

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II



Úloha č. 21

Název úlohy: Studium hysterezních smyček feritů

Jméno: Vojtěch Votruba

Datum měření: 2023-10-02

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Použitá literatura	0–1	
Celkem	max. 17	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

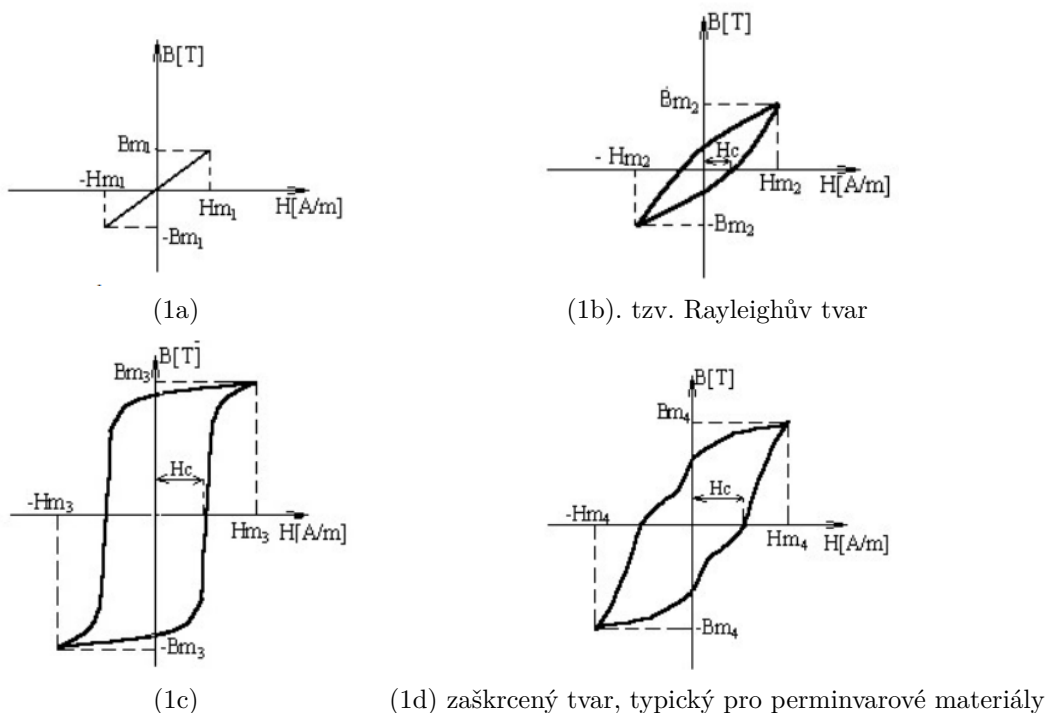
1. U dvou ze tří feritových kroužků
 - (a) Změřte závislost indukce B_m a koercitivní síly H_c na intensitě magnetického pole H_m (viz obr. 1).
 - (b) Sledujte základní typy hysterezních smyček v závislosti na intensitě pole H_m a zjistěte přibližně, při které intensitě pole H_m (nebo v kterém intervalu intensit 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.

1 Teoretická část

1.1 Proměření závislostí

V této úloze se pracovní úkoly točí okolo proměření tzv. hysterezních smyček. Tyto smyčky jsou křivkami závislosti magnetické indukce B na intensitě vnějšího magnetického pole H . Různé materiály mají různou reakci na vystavení vnějšímu magnetickému poli.

My budeme proměřovat konkrétně ferity – podvojně oxidy se vzorcem $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ [1]. Ferity jsou z hlediska magnetismu pozoruhodné tím, že mají poměrně vysoký měrný elektrický odpor (až $10^4 \Omega \cdot m^{-1}$), což způsobuje, že ztráty v důsledku vířivých proudů jsou nízké [1]. Díky těmto (ale i dalším) fyzikálním a chemickým vlastnostem se u námi proměřovaných feritů (u zinečnatého a nikelnatého s příměsí kobaltu) objevují až čtyři charakteristické hysterezní smyčky [1], ty jsou k vidění na obrázku 1.



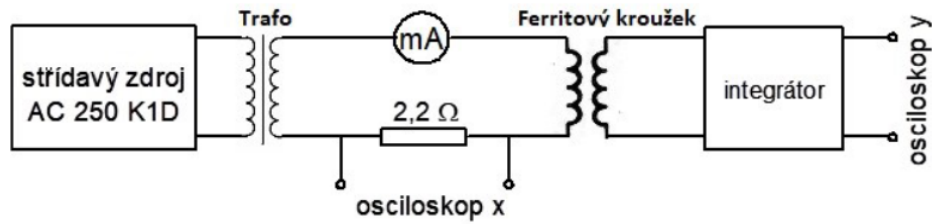
Obrázek 1: Různé typy hysterezních smyček feritů [1]

Samotné měření pak bude probíhat pomocí elektrického obvodu zakresleného na obr. 2. Do obvodu je pouštěn střídavý proud, který je na začátku transformátorem snižen na maximální hodnotu okolo 6,5 V, v tomto obvodu je pak zároveň ampérmetr, který nám umožňuje odečíst proud. Díky znalosti proudu jsme schopni spočítat intenzitu magnetického pole H na feritovém kroužku jako

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

kde n_1 je počet závitů na primárním vinutí ferit. kroužku, i je magnetizační proud procházející v obvodu a d aritmetický průměr d_1 a d_2 , vnitřního a vnějšího průměru kroužku [1]. Přes sekundární vinutí je feritový

kroužek pak připojen k tzv. integrátoru, který provádí matematickou operaci integrace na připojené napětí. Vzhledem k tomu, že podle Faradayova zákona je derivace $\frac{dB}{dt}$ přímo úměrná napětí, integrací napětí získáváme veličinu úměrnou magnetické indukci B [1]. Tento signál je pak přiveden na osu y osciloskopu, zatímco na osu x je přivedeno napětí z části obvodu s ampérmetrem. Tak získáváme na osciloskopu obraz kýžené hysterezní křivky – z toho obrazu již můžeme změřit koercitivní sílu H_c i hodnoty B_m a H_m (viz 1).



Obrázek 2: Schéma obvodu pro měření prac. úkolu 1. [1]

1.2 Kalibrace aparatury

Po odečtení hodnot napětí U z osciloskopu je nutné je převést na cílové hodnoty H a B . K tomu budeme potřebovat osciloskop okalibrovat. Kalibraci horizontální osy provedeme jednoduše, neboť magnetickou sílu H_m můžeme jednoduše vypočítat podle vztahu (1) (pouze musíme dát pozor na to, že ampérmetr ukazuje efektivní hodnotu.) [1]

Ke kalibraci vertikální osy použijeme obvod podle obr. 3, ten je v podstatě děličem napětí, kdy dělicí poměr označíme D . Napětí U_y na vertikální ose osciloskopu bude úměrné maximálnímu napětí na integrátoru, proto můžeme použít vztah

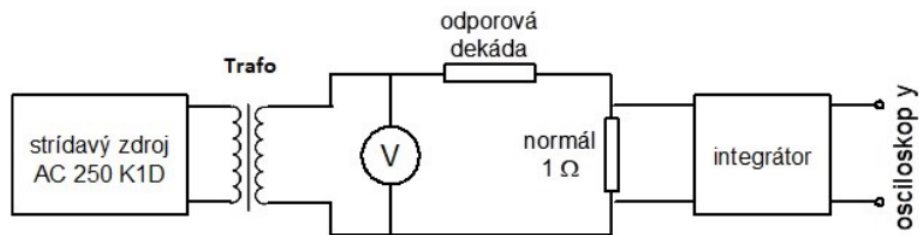
$$U_y = k \frac{U_v \sqrt{2}}{\omega}, \quad (2)$$

kde k je konstanta úměrnosti, U_v efektivní napětí na voltmetru (viz 3) a ω kruhová frekvence magnetizačního proudu [1].

Pomocí již zmíněného Faradayova zákona aplikovaného na sekundární vinutí dále můžeme nalézt vztah mezi magnetickou indukcí B_m a napětím U_y jako

$$U_y = k S n_2 B_m = k \frac{d_1 - d_2}{2} v n_2 B_m, \quad (3)$$

kde v je výška ferit. kroužku a n_2 počet závitů na jeho sekundárním vinutí [1].



Obrázek 3: Schéma obvodu pro kalibraci vertikální osy. [1]

2 Výsledky a zpracování měření

2.1 Podmínky pokusu

Měření bylo provedeno v místnosti PII v budově MFF UK na Karlově. Změřené podmínky termo-hygrobarometrem při pokusu byly následující: Teplota $t = 23,9(4)^\circ\text{C}$, relativní vlhkost $\Phi = 42(3)\%$, tlak $p = 994(2) \text{ hPa}$.

2.2 Kalibrace a přípravná měření

Údaje o rozměrech $d_{1,2}$ a počtu závitů $n_{1,2}$ na feritových kroužcích na nich byly přímo uvedeny. Tyto údaje budeme v rámci zadání považovat za přesné (viz Diskuse výsledků), nejistotu ve výpočtech S a d vyjádříme pomocí platných cifer. Všechna tato data byla zanesena do tabulky 1.

Tabulka 1: Rozměry jednotlivých feritových kroužků

Kroužek	n_1	n_2	d_1/mm	d_2/mm	d/mm	v/mm	S/mm^2
I	50	6	29,2	20,75	25,0	4,4	19
III	300	6	31,0	21,8	26,4	4,15	19,1

Při měření B_m jsme použili dva rozsahy: 0,2 V a 0,5 V, pro každý z těchto rozsahů bylo nutné provést kalibraci. Pro kalibraci vertikální osy a stanovení konstanty úměrnosti k využijeme lineární regresi a budeme proti sobě vynášet U_v a U_y . Z lineární regrese získáme konstantu α – tu pak přepočteme podle vztahu (2), přičemž nejistotu α nám vrátí s přihlédnutím na chybu naměřených dat software *Origin*. Nejistotu kruhové frekvence $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz}$ zanedbáme a nejistotu dělicího poměru $D = 1000 : 1$ také.

Hodnoty U_v byly změřeny digitálním multimetrem FLUKE 175, jehož chyba je v daném rozsahu uvedena jako 1,0% a 3 digity.

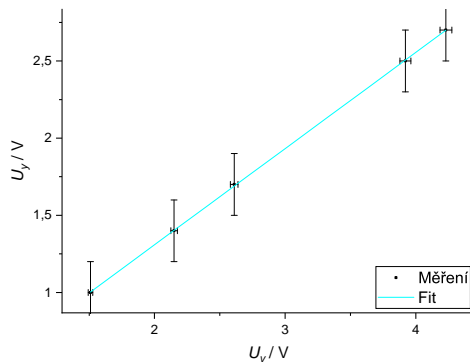
Nejistotu hodnot U_y odečtených z osciloskopu odhadneme jako nejmenší dílek osciloskopu při daném rozsahu, tj. jako $\sigma_{U_y} = 0,2 \text{ V}$, případně $\sigma_{U_y} = 0,5 \text{ V}$.

Naměřené hodnoty U_v a U_y i s chybami byly zaneseny do tabulky 2.

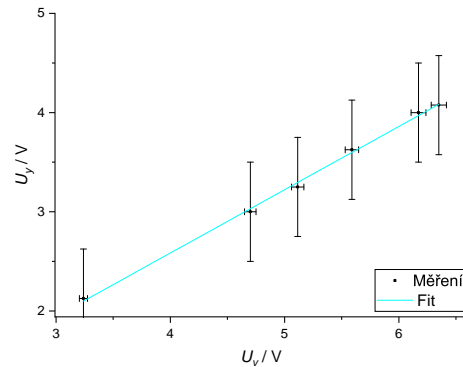
Tabulka 2: Hodnoty napětí U_v a U_y naměřené pro kalibraci vertikální osy

U_v/V	U_y/V	U_v/V	U_y/V
3,24(4)	2,1(5)	1,51(2)	1,0(2)
4,70(5)	3,0(5)	2,15(3)	1,4(2)
5,12(5)	3,3(5)	2,61(3)	1,7(2)
5,59(6)	3,6(5)	3,92(4)	2,5(2)
6,17(7)	4,0(5)	4,23(4)	2,7(2)
6,35(2)	4,1(5)		

Tato data byla pak vynesena do grafů (a) a (b) na obrázku 4 a proložena funkcí *Fit linear x with error* programem *Origin*. Z lineární regrese tak dostáváme koeficienty $\alpha_a = 0,62(9)$, resp. $\alpha_b = 0,6(2)$, které odpovídají



(a) Rozsah 0,2 V



(b) Rozsah 0,5 V

Obrázek 4: Závislost U_y na U_v proložená lineárním fitem

rozsahu 0,2 V, resp. 0,5 V. Přepočtem podle vztahu (2) nám dále vyjdou hodnoty $k_a = 14(2) \times 10^4 \text{ Hz}$, resp. $k_b = 14(4) \times 10^4 \text{ Hz}$, kde jsme nejistotu převedli podle metody přenosu chyb jako

$$\frac{\sigma_\alpha}{\alpha} = \frac{\sigma_k}{k}. \quad (4)$$

2.3 Proměření závislostí

Do tabulek 3 a 4, shrnujících všechna měření a přepočty v této podsekcí, byly nejprve vyneseny údaje o efektivním proudu vyčtené z ampérmetru (viz obr. 2) a příslušná napětí odečtena z osciloskopu. Při odečítání napětí byly vždy sklopeny popořadě osy x a y , aby byl odečet jednodušší. Při měření byl také experimentátorem sledován a zapisován tvar hysterezních smyček podle obr. 1.

Nejistota odečteného proudu I byla stanovena podle manuálu použitého multimetru FLUKE 175 jako 1,5% a 3 digity. Z tohoto proudu byla rovnicí (1) vypočtena intenzita H_m , jejíž nejistota byla podle metody přenosu chyb jednoduše

$$\frac{\sigma_{H_m}}{H_m} = \frac{\sigma_I}{I}. \quad (5)$$

Naměřená napětí dále byla přepočtena příslušnými vzorci na veličiny B_m a H_c . B_m lze stanovit podle vztahu (3) a její nejistotu určíme metodou přenosu chyb:

$$\frac{\sigma_{B_m}}{B_m} = \sqrt{\frac{\sigma_{U_y}^2}{U_y^2} + \frac{\sigma_k^2}{k^2}}, \quad (6)$$

kde nejistotu U_y (a stejně tak i nejistotu U_c a U_x) odhadneme znovu jako velikost nejmenšího dílku v nastaveném rozsahu. Pro určení koerzivní síly H_c využijeme kalibraci horizontální osy a efektivně tak vzorec

$$H_c = \frac{U_c}{U_x} H_m. \quad (7)$$

Z toho nám plyne nejistota H_c podle metody přenosu chyb a vztahu (5) jako

$$\frac{\sigma_{H_c}}{H_c} = \sqrt{\frac{\sigma_{U_c}^2}{U_c^2} + \frac{\sigma_{U_x}^2}{U_x^2} + \frac{\sigma_I^2}{I^2}}. \quad (8)$$

Takto vypočtené veličiny H_c , H_m a B_m byly také i s chybami zaneseny do tabulek 3 a 4.

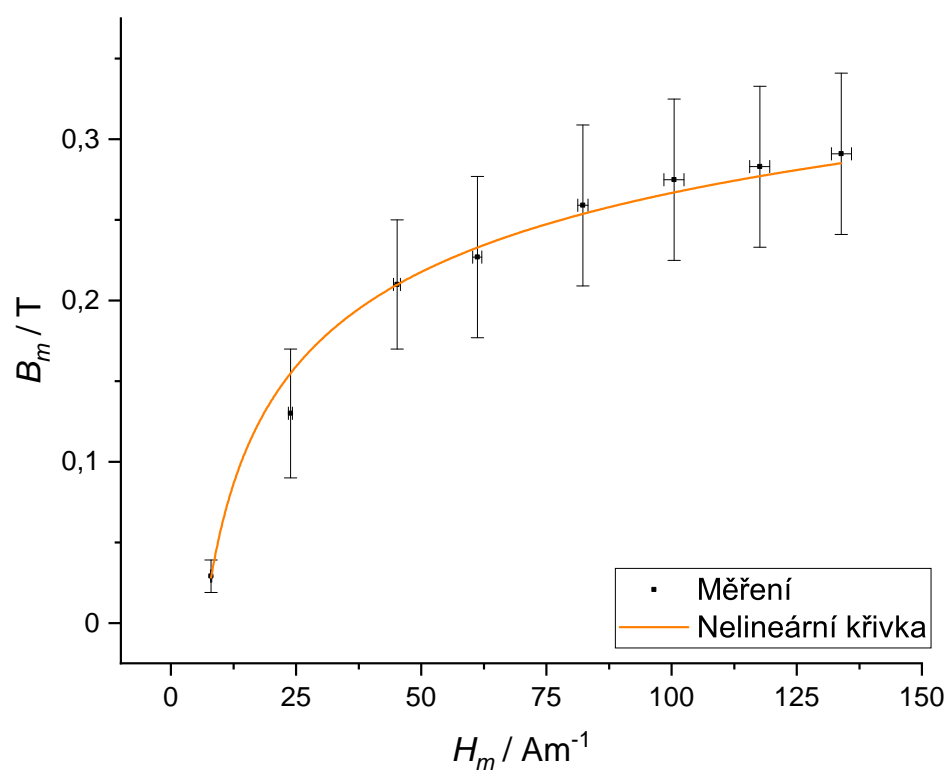
Tabulka 3: Výsledky měření ferit. kroužku I

I/mA	U_c/V	U_x/V	U_y/V	$H_c/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$H_m/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B_m/T	Typ
8,9(1)	0,00(2)	0,13(2)	0,4(2)	0	8,0(1)	0,03(1)	A
26,5(4)	0,09(2)	0,44(5)	2,0(5)	5(1)	23,9(4)	0,13(4)	B
50,1(8)	0,14(2)	0,80(5)	3,2(5)	8(1)	45,1(7)	0,21(4)	B-C
68(1)	0,2(1)	1,1(1)	3,5(5)	11(6)	61,2(9)	0,23(5)	C
91(1)	0,2(1)	1,4(1)	4,0(5)	13(6)	82(1)	0,26(5)	C
112(2)	0,2(1)	1,7(1)	4,2(5)	14(6)	100(2)	0,27(5)	C
131(2)	0,2(1)	2,0(1)	4,4(5)	15(6)	118(2)	0,28(5)	C
149(2)	0,25(5)	2,3(2)	4,5(5)	15(3)	134(2)	0,29(5)	C

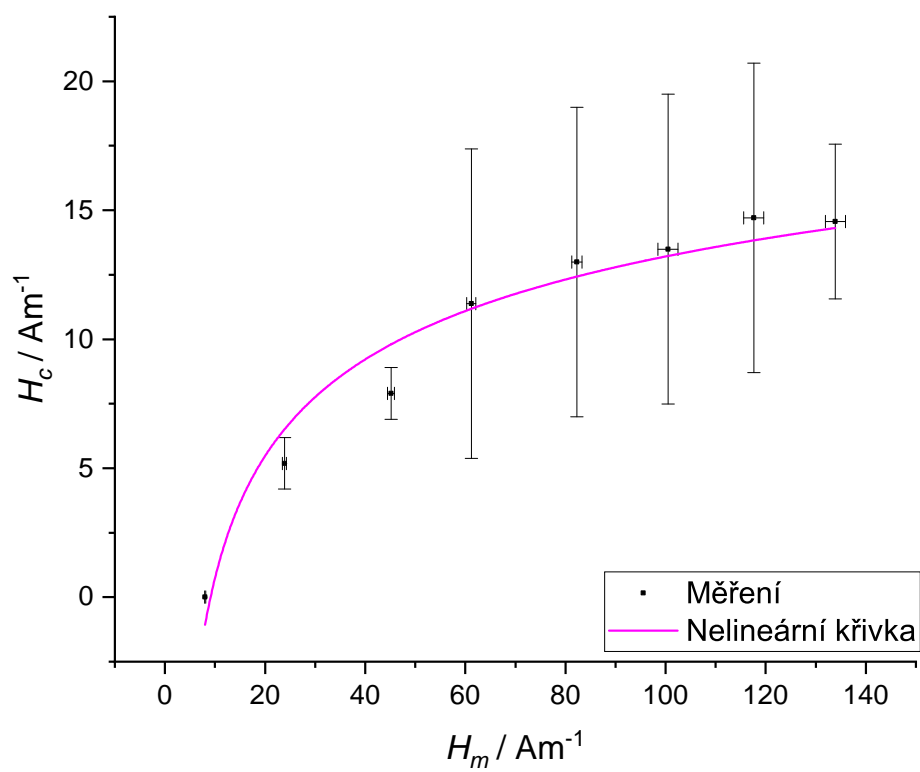
Tabulka 4: Výsledky měření ferit. kroužku III

I/mA	U_c/V	U_x/V	U_y/V	$H_c/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	$H_m/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	B_m/T	Typ
349(5)	0(2)	5(2)	0,6(2)	0	$18(3) \times 10^2$	0,03(2)	A
460(7)	0(2)	7(2)	0,9(2)	0	$24(4) \times 10^2$	0,05(2)	A-B
534(8)	2(2)	8(2)	1,3(2)	$6(7) \times 10^2$	$27(4) \times 10^2$	0,08(3)	B
$65(1) \times 10^1$	4(2)	11(2)	2,9(2)	$12(7) \times 10^2$	$33(5) \times 10^2$	0,18(6)	D
$75(1) \times 10^1$	4(2)	12(2)	3,5(5)	$13(7) \times 10^2$	$38(6) \times 10^2$	0,22(7)	D
$89(1) \times 10^1$	5(2)	14(2)	4,0(5)	$16(7) \times 10^2$	$45(7) \times 10^2$	0,25(8)	D
$99(1) \times 10^1$	5(2)	16(2)	4,2(5)	$16(7) \times 10^2$	$51(8) \times 10^2$	0,26(9)	D
$103(2) \times 10^1$	6(2)	16(2)	4,3(5)	$18(7) \times 10^2$	$52(8) \times 10^2$	0,26(9)	D
$111(2) \times 10^1$	6(2)	17(2)	4,3(5)	$18(7) \times 10^2$	$57(9) \times 10^2$	0,26(9)	D
$119(2) \times 10^1$	6(2)	18(2)	4,4(5)	$20(7) \times 10^2$	$61(9) \times 10^2$	0,27(9)	C

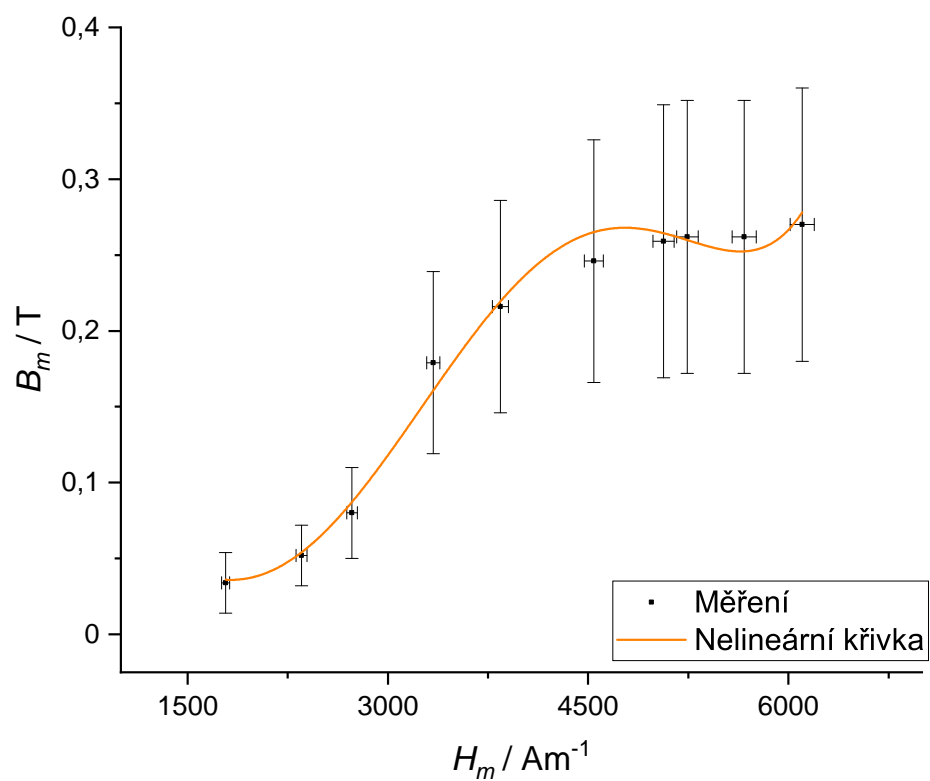
Závislosti $B_m(H_m)$ a $H_c(H_m)$ byly pro každý z kroužků finálně vyneseny do následujících grafů 5 až 8 programem *Origin*.



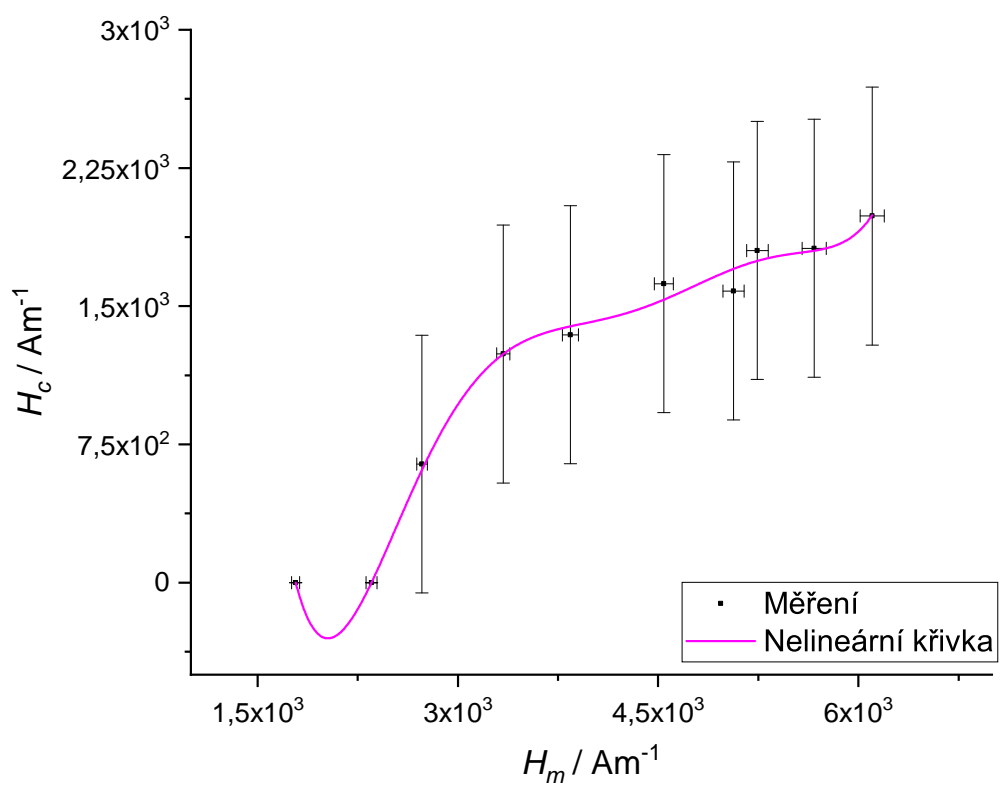
Obrázek 5: Graf závislost indukce B_m na intenzitě H_m , kroužek I.



Obrázek 6: Graf závislost koercitivní síly H_c na intenzitě H_m , kroužek I.



Obrázek 7: Graf závislost indukce B_m na intenzitě H_m , kroužek III.



Obrázek 8: Graf závislost koercitivní síly H_c na intenzitě H_m , kroužek III.

3 Diskuse výsledků

V rámci měření byly pozorovány všechny typy hysterezních smyček. U kroužku I můžeme společně s přechodem ze smyček typu A,B do smyčky typu C sledovat postupnou stabilizaci koercitivní síly a magnetické indukce. Na měření kroužku III se zase dala velmi dobře pozorovat jeho perminvarová povaha, kdy jsme dlouho pozorovali zaškracený typ smyčky D, až jsme na konci při nejvyšším proudu pozorovali i smyčku typu C.

Celkově bylo ovšem měření zatíženo poměrně velkou chybou, která byla způsobena nepřesností odečtu dílků na osciloskopu. Tato chyba je tak velká, že jsme pohodlně mohli zanedbat některé menší zdroje chyb jako například nepřesnost poměru na děliči napětí apod. Při kalibrace se také projevila chyba statistická, tyto nejistoty dohromady způsobily – v případě kalibrace rozsahu 0,5 V – chybu vyšší než 20 %.

Statistická chyba by se nejspíše dala snížit naměřením většího počtu dat, zatímco u chyby systematické by mohlo pomoci použít přesnější měřicí techniku – např. větší osciloskop či počítač.

4 Závěr

Podařilo se proměřit závislosti $B_m = B_m(H_m)$ a $H_c = H_c(H_m)$ pro feritový kroužek I a III. Tyto závislosti byly dle zadání zpracovány do grafů i do tabulek. Byla také provedena kalibrace os laboratorního osciloskopu a byly naměřeny konstanty napěťové citlivosti aparatury $k_a = 14(2) \times 10^4$ Hz pro 0,2 V a $k_b = 14(4) \times 10^4$ Hz pro 0,5 V.

Reference

- [1] *Studium hysterezních smyček feritů* [online]. [cit. 2023-10-5]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/zadani/221>