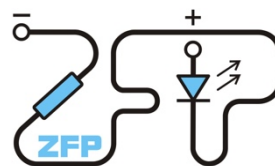


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

## Fyzikální praktikum II.



Úloha č. 21.

Název úlohy: Studium hysterezních smyček feritů

Jméno: Jan Hrabovský

Obor: FOF

Datum měření: 22.10.2018

Datum odevzdání:

Připomínky 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>Celkem</b>	max. 20	

Posuzoval: .....

dne: .....

## 21 – Studium hysterezních smyček feritů

-

### Základní fyzikální praktikum (Fyzikální praktikum II. OF)

---

Vypracoval: Jan Hrabovský

UKČO: 61088176

Datum měření: 22.10.2018

---

#### Pracovní úkoly:

1. U feritových kroužků I, II a III
  - a. Změřte závislost indukce  $B_m$  a koercivní síly  $H_C$  na intenzitě magnetického pole  $H_m$  (viz. Obr. 1 [1])
  - 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 1a, zpracujte tabelárně a graficky

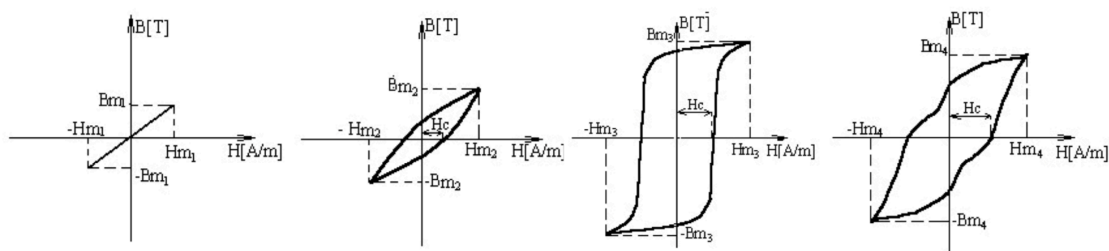
#### Teoretická část:

Feritové materiály jsou chemické oxidické sloučeniny chemického vzorce  $M^{2+}Fe^{3+}O_4$ , kde  $M^{2+}$  reprezentuje kov s oxidačním číslem 2, povětšinou Mn, Ni, Cu, Zn, atd., nebo některé kombinace těchto oxidů v určitých poměrech. Vyznačují se plošně centrovanou kubickou mřížkou kyslíkových aniontů, jejíž dutiny jsou dle druhu feritu obsazovány právě kationty  $M^{2+}$  a  $Fe^{3+}$ .

Ferity narozdíl od kovových ferroelektrik vykazují antiparalelní uspořádání magnetických momentů na kovových kationtech. Z tohoto důvodu mohou být ferrity jak ferrimagnetické tak antiferrimagnetické. Vlivem vnějšího pole však také dochází ke změně v rozložení domén, což lze pozorovat na magnetizační a hysterezní smyčce<sup>[1,2]</sup>.

Vzhledem k vyšším hodnotám u feritů oproti běžným kovům dochází k menším ztrátám vlivem vířivých proudů v látce, což umožňuje jejich aplikaci ve vysokofrekvenční technice. V rámci měření se používají kroužky č. I. a II., které spadají do skupiny ferrite magnetozečnatých, kroužek č. III. Spadá do permivarové skupiny (ve velkém rozsahu mag. pole vykazuje konstantní permeabilitu)<sup>[1,2]</sup>.

Hysterezní smyčka je závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě magnetického pole  $H$ . Plocha jí ohraničená udává práci, kterou je zapotřebí vynaložit k přemagnetování látky mezi poli  $+H_m$  a  $-H_m$  a těmto polím odpovídá dosažená hodnota  $B_m$  a  $(-B_m)$ . Na Obr. 1 jsou znázorněny tři základní typy a jeden typ přechodných hysterezních smyček<sup>[1,2]</sup>.



**Obr.1.** Základní typy hysterezních smyček. Zleva redukovaná smyčka na přímku - lineární, smyčka s dvěma větvemi a parabolickou aproximací - Rayleigho, smyčka normálního tvaru a zaškrbený tvar hysterezní smyčky zcela vpravo.

Hlavním principem měření je přivedení střídavého magnetizačního proudu  $i$  na primární vinutí kroužku ( $n_1$ ) a magnetické pole v kroužku následně počítáme jako (1), kde  $d = (d_1 + d_2)/2$  kde  $d_1$  je vnitřní a  $d_2$  vnější průměr kroužku (Obr.2). Signál následně přivádíme na horizontální destičky osciloskopu. V sekundárním vinutí ( $n_2$  závitů) dojde následně k indukci napětí úměrné časové změně magnetické indukce. Magnetické pole  $H$  v kroužku

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

Jelikož však dochází na miliampérmetru ke čtení efektivních hodnot proudu  $I_{ef}$ , transformujeme vztah (1) na (2)

$$H = \frac{2\sqrt{2}n_1 I_{ef}}{\pi d} \quad (2)$$

Ze známých hodnot magnetických intenzit lze následně porovnáváním délek odečtu na horizontální ose určit i hodnoty koercivní síly dle vztahu (3), kde  $H_m$  je hodnota odečtu v při hodnotě magnetizačního proudu  $I_m$  odpovídající horizontálnímu odečtu  $x_m$  [1,2].

$$H = \frac{x}{x_m} H_m \quad (3)$$

Koercitivní sílu definujeme jako zápornou intenzitu magnetického pole, která je nutná a postačující k odstranění zbytkového magnetizmu dané látky. Z této definice je zřejmé, že její hodnoty  $H_C$  budeme určovat dle vztahu (3).

Pro kalibraci vertikální osy používáme obvod viz obr. 2b. Označme efektivní napětí na odporovém normálu  $U_{ef}$ , úhlovou frekvenci střídavého proudu  $\omega$ , počet závitů na sekundárním vinutí  $n_2$  a výšku kroužku  $v$ . Potom svislé úsečky délky  $y_0$  odpovídá hodnota indukce  $B_0$  daná výrazem

$$B_0 = \frac{2\sqrt{2}U_{ef}}{v\omega n_2 (d_1 - d_2)} \quad (4)$$

Ostatní hodnoty indukce  $B$  jsou přímo úměrné podle měřených délek  $y$ , platí tedy

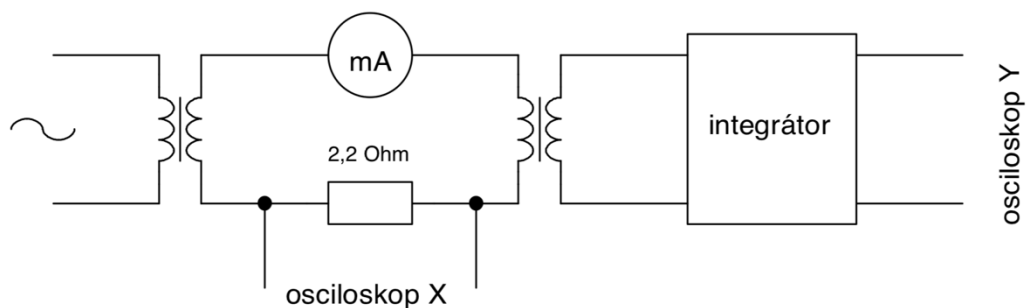
$$B = \frac{y}{y_0} B_0 \quad (5)$$

V rámci praktika je však nutné provést kalibraci vertikální osy osciloskopu. Ke kalibraci použijeme zapojení zobrazené na Obr.3. Délka úseku na vertikální ose (y) je následně úměrná maximálnímu napětí změřenému na odporovém normálu dle (6), kde k je konstanta úměrnosti závislá na konkrétním nastavení osciloskopu a integrátoru<sup>[1,2]</sup>.

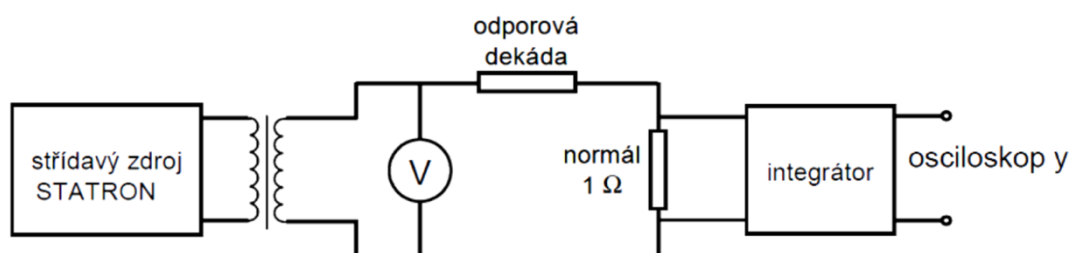
$$y = \frac{k\sqrt{2}U_{ef}}{\omega} \quad (6)$$

S využitím Ohmova zákona následně zjistíme vztah mezi naměřeným napětím a napětím na odporovém normálu jako (7). Toto zjištěné napětí následně dosazením do vztahu (4) poskytuje informaci o kalibraci vertikální osy.

$$U_{ef} = \frac{U}{R + 1} \quad (7)$$



**Obr.2.** Schema experimentálního zapojení



**Obr.3.** Schema zapojení pro kalibraci vertikální stupnice osciloskopu

## Experimentální část:

V rámci laboratorního praktika byly zjištěny okolní podmínky měření, jako teplota 24,2 °C, vlhkost vzduchu 35,1 % a okolní tlak 998,3 hPa. Je však nutné uvést, že žádná z těchto odečtených hodnot nemá podstatnější vliv na výsledky měření a proto nebude uvažována.

Jako pomůcky a součásti aparatury byly během měření použity následující přístroje: Osciloskop značky KIKUSUI – Digital Oscilloscope (100 MHz), COR 5502U u kterého byla uvažována chyba odečtu jako jedna polovina z nejmenšího odečteného dílku na osa při zvoleném nastaveném rozsahu, který byl v případě rozsahu na y-ové ose konstantní a to 2 V na díl a v případě nastavení x-ové osy proměnlivý v závislosti na části měření hysterezní smyčky, dále byl použit zdroj STATRON (typ 5315), multimetr FLUKE 175 TRUE RMS Multimeter s chybovostí v závislosti na použití jako ampérmetr (AC rozsah 60 mA: rozlišení 0,01 mA, AC 400 mA: rozlišení 0,1 mA, AC 6,0 A: rozlišení 0,001 A, uvedené hodnoty jsou platné pro rozsah frekvencí 45 Hz až 1 kHz, pro všechny hodnoty je dále platné 1,5% + 3) či voltmetr (AC rozsah 6 V: rozlišení 0,001 V (1,0% + 3) dle [3], odporová dekáda od firmy METRA typ XL6, která vykazuje v rámci použitých rozsahů odporů chybovost  $\pm 0,1$  %, odporový normál s hodnotou 1  $\Omega$  a integrator typu VR 8101. Hodnoty u předložených vzorků feritů nebyly uvedeny s příslušnými chybami a proto budou brány jako absolutní<sup>[2,3]</sup>.

V rámci měření byla uvažována hodnota síťové frekvence jako  $f = 50$  Hz ( $\omega = 2\pi f = 100\pi$  s<sup>-1</sup>). Zjištěné parametry feritových kroužků jsou uvedeny v tabulce (Tab.1)

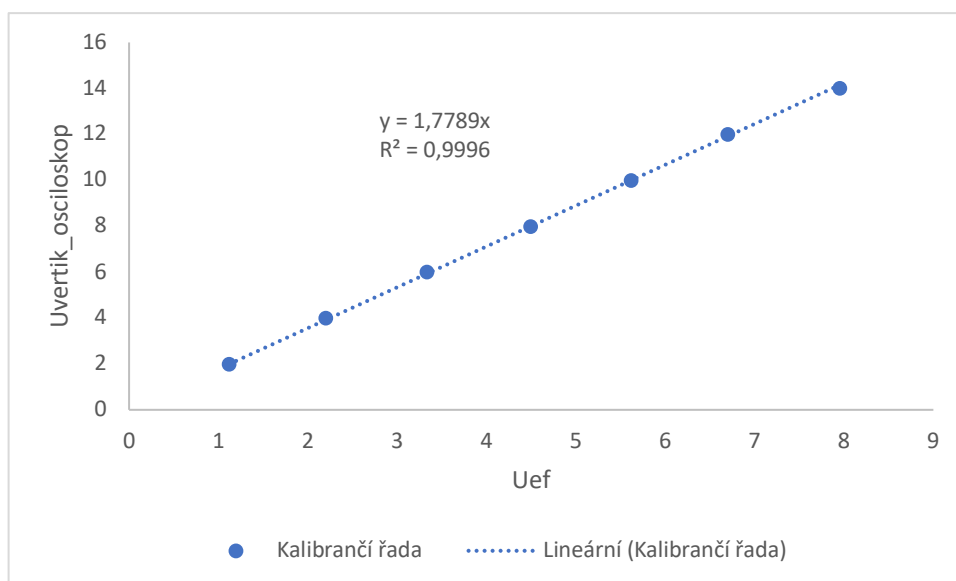
**Tab.1.** Parametry proměřovaných vzorků feritů

	$d_1$ [mm]	$d_2$ [mm]	$v$ [mm]	$n_1$ [závitů]	$n_2$ [závitů]
<b>Kroužek I.</b>	29,2	20,75	4,4	50	6
<b>Kroužek II.</b>	30,65	21,8	4,35	50	6
<b>Kroužek III.</b>	31,0	21,8	4,15	300	6

V první části je nutné zajistit kalibraci vertikální osy. Během měření bylo pro všechny vzorky použito pouze jedno nastavení rozsahu vertikální osy. Byl proto sestaven obvod dle nákresu na Obr.2., kde byl na odporové dekádě nastaven odpor  $R = 999 \Omega$  a ze znalosti odporu odporového normálu a vztahu (6) a (7) byla známa hodnota napětí  $U_{ef}$  na tomto normálu, která byla ztotožněna s hodnotou odečtenou na stínítku osciloskopu. Záznam kalibrace je uveden v tabulce (Tab.2). Vynesením těchto dat (Graf.1.) a jejich proložením lineární regresí bylo zjištěno, že převodní poměr mezi  $U_{ef}$  na odporovém normálu a stupnicí na stínítku oscilátoru je  $U_{vertik} = 1,779 U_{ef}$

**Tab.2.** Záznam měření kalibrace hodnoty naměřeného efektivního napětí na odporovém normálu a odečtené hodnoty na vertikální ose osciloskopu

$U_{ef}$	1,116	2,199	3,327	4,494	5,613	6,7	7,95
$U_{osciloskop}$	2	4	6	8	10	12	14



**Graf.1.** Kalibrační řada vertikální osy osciloskopu

Ze znalosti této kalibrační závislosti byly stanoveny koeficienty pro zjištění hodnoty magnetické indukce během měření. Koeficienty pro každý ze vzorků byly vypočteny na základě (4) a hodnot uvedených v Tab.1. a jsou následující  $B_{0I} = (2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  T,  $B_{0II} = (2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  T a  $B_{0III} = (2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}$  T pro jednotkovou vzdálenost (1 V) na stínítku oscilátoru. V následujícím měření tak bude používán pro výpočet hodnoty aktuální magnetické indukce vzorec  $B = yB_0$  odvozený od (5) kde  $y = 1$ .

Záznamy měření hysterezních smyček jsou uvedeny v tabulkách pro Kroužek I. (Tab.3), Kroužek II. (Tab.4.) a pro Kroužek III. (Tab.5). Dále byly vyneseny závislosti intenzity koercivní síly na intenzitě vnějšího pole pro jednotlivé kroužky (Graf.2., Graf.3 a Graf 4.) a byla vynesena závislost magnetické indukce na vnější intenzitě magnetického pole pro všechny tři kroužky (Graf 5.). Vynesené body byly pouze proloženy jednoduchou spojnici, která nereprezentuje žádnou fyzikální závislost a slouží k vedení oka.

Studium tvaru samotných smyček probíhalo až po samotném měření jednotlivých bodů, které jsou uvedeny v tabulkách a vyneseny v grafech. Aparatura byla uvedena do původního stavu, a následně bylo plynule zvyšováno napětí od minimální po maximální dovolenou hodnotu specifickou pro každý kroužek, přičemž bylo současně na stínítku osciloskopu pozorována kvalitativní změna tvaru smyček. Tento postup byl zvolen pro docílení větší přesnosti měření.

V případě měření Kroužku I. Byla v každém bodě měření možnost odečtení hodnoty na ose  $x$  pro následný výpočet koercivní síly, z čehož plyne, že smyčka se neredukovala na lineární tvar a v tomto případě byl pozorován Rayleighův tvar smyčky, který při překročení hodnoty vstupního proudu nad 30 mA přecházel do normálního stavu.

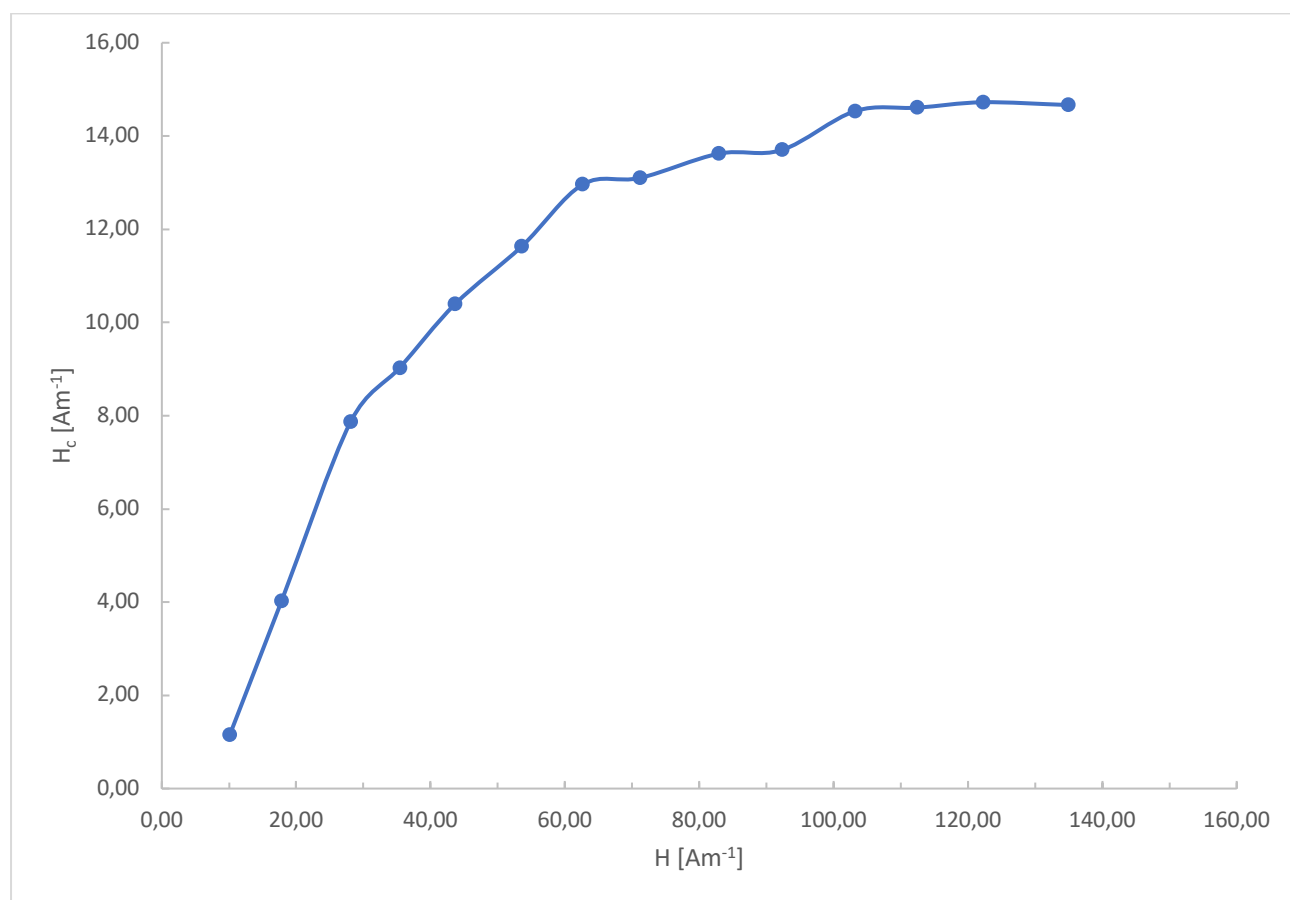
U Kroužku II. byl do hodnoty vstupního proudu 63 mA pozorován lineární charakter, který následně do hodnoty 190 mA přecházel do tvaru Rayleigha a následně do své finální podoby, která odpovídala normálnímu průběhu (Obr.4)

V případě Kroužku III. Byl do hodnot přibližně 410 mA pozorován Rayleighův tvar smyčky, následně přecházející do stavu zaškrčené smyčky, který setrval až k hodnotě okolo 1 A a následně se transformoval do normálního stavu.

Vzhledem k tomu, že šlo o kvalitativní pozorování a hodnoty odečtů jsou pouze přibližné, není v tomto případě uvažována chybovost těchto odečtů

**Tab.3.** Záznam měření hysterezních smyček pro Kroužek I. Hodnoty  $x$  a  $x_c$  stejně jako hodnota  $y$  reprezentují naměřené hodnoty tzv. peak to peak (od maxima k maximu) a tedy pro výpočet je nutné používat jejich poloviční hodnoty. Hodnoty pro  $B$ ,  $H$  a  $H_c$  jsou již výsledné a správné dle teorie.

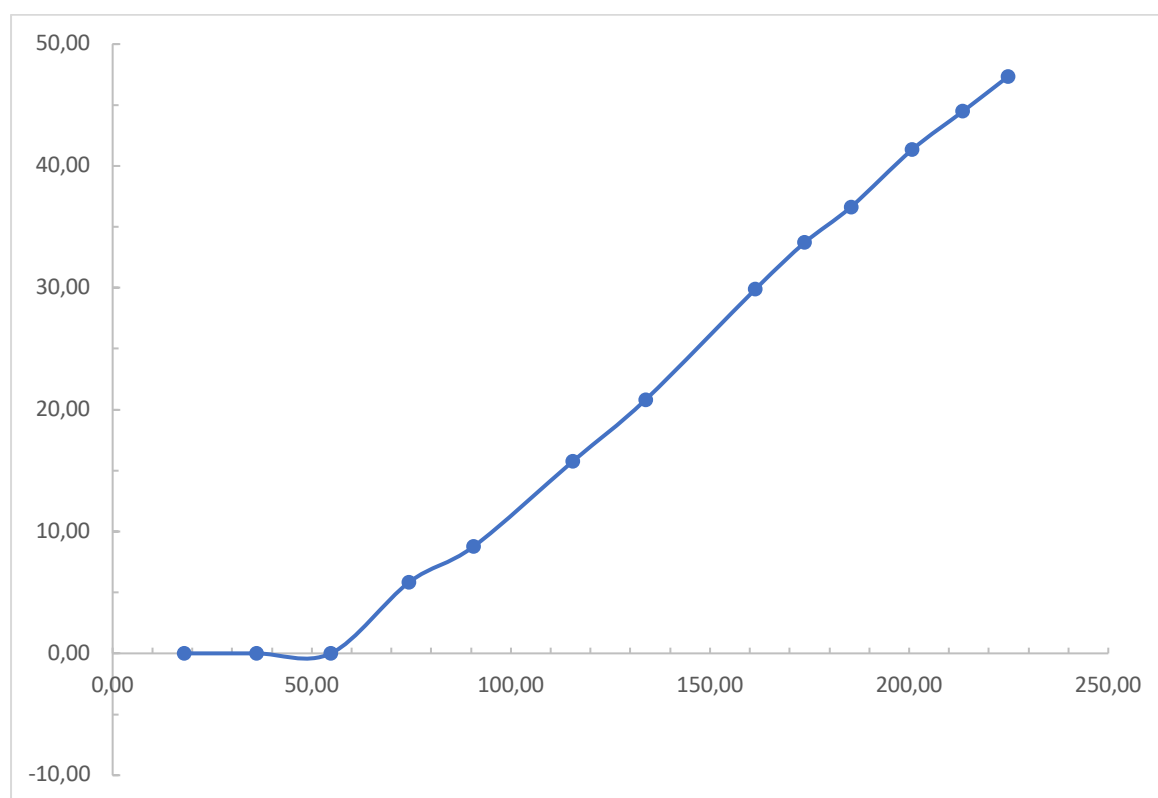
$I$ [mA]	$x$ [mV]	$x_c$ [mV]	$y$ [V]	$B_m$ [T]	$H$ [Am <sup>-1</sup> ]	$H_c$ [Am <sup>-1</sup> ]
11,24	70	8	1,6	0,02	10,1	1,16
19,78	124	28	3,6	0,04	17,8	4,03
31,18	200	56	6	0,07	28,1	7,87
39,3	255	65	7,4	0,08	35,4	9,03
48,44	315	75	8,6	0,10	43,7	10,4
59,45	380	82,5	9,4	0,11	53,6	11,6
69,5	435	90	10	0,11	62,6	13,0
79	500	92	10,6	0,12	71,2	13,1
92	560	92	11	0,12	82,9	13,6
102,4	640	95	11,4	0,13	92,3	13,7
114,5	710	100	11,6	0,13	103	14,5
124,8	770	100	12	0,14	112	14,6
135,6	830	100	12	0,14	122	14,7
149,7	920	100	12,4	0,14	135	14,7



**Graf.2.** Závislost koercivní síly  $H_c$  na intenzitě magnetického pole pro Kroužek I.

**Tab.4.** Záznam měření hysterezních smyček pro Kroužek II. Hodnoty  $x$  a  $x_c$  stejně jako hodnota  $y$  reprezentují naměřené hodnoty tzv. peak to peak (od maxima k maximu) a tedy pro výpočet je nutné používat jejich poloviční hodnoty. Hodnoty pro  $B$ ,  $H$  a  $H_c$  jsou již výsledné a správné dle teorie.

$I$ [mA]	$x$ [mV]	$x_c$ [mV]	$y$ [V]	$B_m$ [T]	$H$ [Am <sup>-1</sup> ]	$H_c$ [Am <sup>-1</sup> ]
19,85	120	0	0,8	0,01	17,9	0,00
40,05	245	0	1,4	0,02	36,1	0,00
60,8	375	0	2,2	0,02	55	0,00
82,6	510	40	3	0,03	74	5,84
100,6	620	60	3,9	0,04	91	8,77
128,2	770	105	5,2	0,06	116	15,75
148,5	900	140	6,2	0,07	134	20,82
179,1	1080	200	7,4	0,08	161	29,89
192,8	1160	225	8	0,09	173	33,70
205,7	1240	245	8,6	0,09	185	36,63
222,7	1360	280	9,2	0,10	201	41,32
236,9	1440	300	9,6	0,11	214	44,48
249,5	1520	320	10	0,11	225	47,34

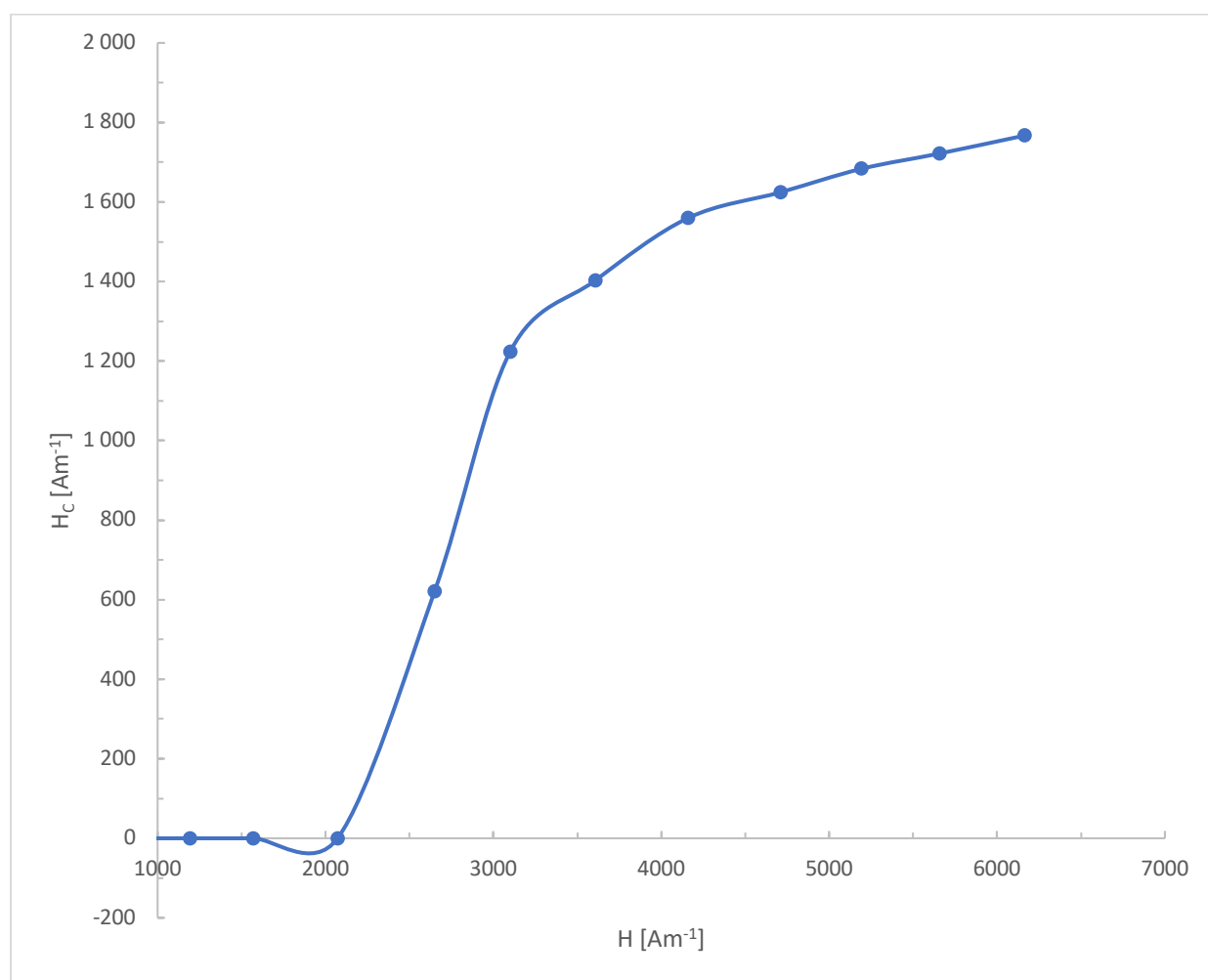


**Graf.3.** Závislost koercivní síly  $H_c$  na intenzitě magnetického pole pro Kroužek II.

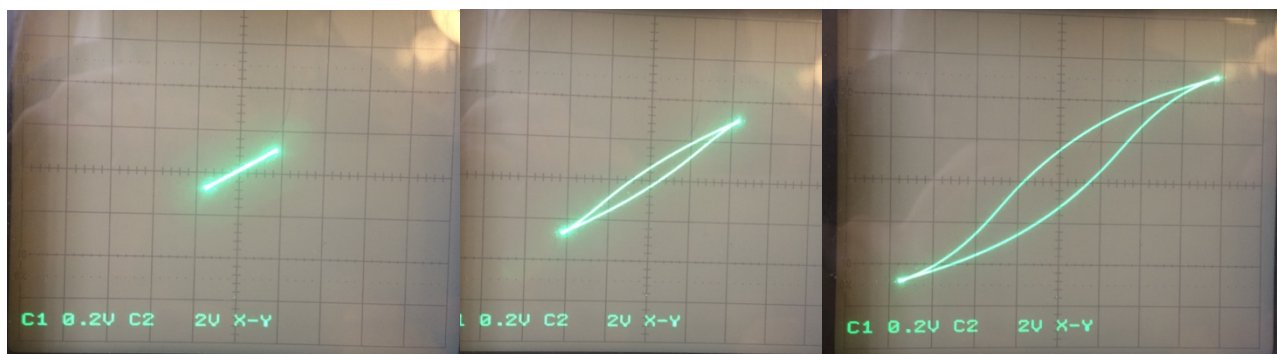


**Tab.5.** Záznam měření hysterezních smyček pro Kroužek III. Hodnoty  $x$  a  $x_c$  stejně jako hodnota  $y$  reprezentují naměřené hodnoty tzv. peak to peak (od maxima k maximu) a tedy pro výpočet je nutné používat jejich poloviční hodnoty. Hodnoty pro  $B$ ,  $H$  a  $H_c$  jsou již výsledné a správné dle teorie.

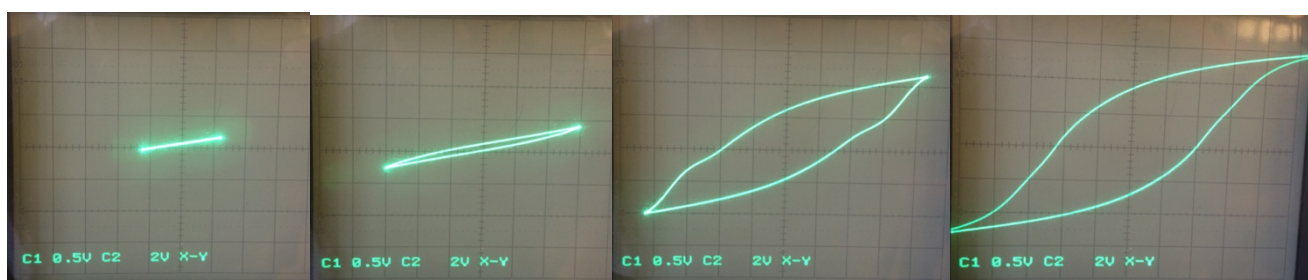
$I$ [mA]	$x$ [mV]	$x_c$ [mV]	$y$ [V]	$B_m$ [T]	$H$ [Am <sup>-1</sup> ]	$H_c$ [Am <sup>-1</sup> ]
130	780	0	0,6	0,01	665,01	0,00
233	1400	0	1	0,01	1191,90	0,00
307	1850	0	1,4	0,02	1570,44	0,00
405	2500	0	2	0,02	2071,75	0,00
518	3200	750	3,2	0,04	2649,79	621,05
606	3800	1500	6,4	0,07	3099,95	1223,67
705	4500	1750	9,2	0,10	3606,38	1402,48
813	5200	1950	10,4	0,11	4158,85	1559,57
921	5800	2000	11	0,12	4711,31	1624,59
1015	6400	2075	11,6	0,13	5192,17	1683,40
1106	6900	2100	12	0,13	5657,67	1721,90
1205	7500	2150	12,2	0,13	6164,10	1767,04



**Graf.4.** Závislost koercivní síly  $H_c$  na intenzitě magnetického pole pro Kroužek III.



**Obr.4.** Kvalitativní pozorování hysterezních smyček charakteristické pro měření Kroužku I. A Kroužku II. Pozorovaný vývoj od lineárního, přes Rayleiho a následně do normálního tvaru.



**Obr.5.** Kvalitativní pozorování hysterezních smyček charakteristické pro měření Kroužku III. Pozorovaný vývoj od lineárního, přes Rayleigha a taškrčený tvar až následně do tvaru normálního průběhu.

## Diskuse:

Celkem s jistotou lze konstatovat, že největší chybu do měření vnáší odečet hodnot ze stínítka osciloskopu. V případě horizontální osy, na které vynášíme hodnotu intenzity magnetického pole lze tuto chybu poměrně dobře redukovat alespoň změnou zobrazovaných rozsahů měření. V případě vertikální osy tento způsob není příliš vhodný vzhledem k tomu, že by se musela pro každý rozsah zvláště provádět kalibrace, která by mohla dále výsledky zkreslovat.

Dále je nutné uvést, že při zkratování signálu na osciloskopu a vystředování bodu do nulových souřadnic a následném opětovném zobrazení signálu se smyčka nenacházela v zobrazovaném středu displeje, ale byly vychýlena v ose IV. kvadrantu, což vedlo k tomu, že každý odečet síly koercivního pole a dalších veličin byl manuálně středován a tedy mohl opět do měření vnášet další chyby.

Vzhledem k výše diskutovanému tak v rámci měření není zohledňován vliv chyby na odporové dekadě.

V rámci lepšího pozorování přechodu mezi jednotlivými tvary pozorovaných hysterezních smyček nebyly přechody pozorovány během měření hodnot, ale teprve po ukončení každého dílčího měření. Po zaznamenání hodnot bylo opět vnější buzené pole sníženo na nulu a plynule zvyšováno za současného pozorování změny tvaru, čímž bylo docíleno přesnějšího určení mezního pole přechodu mezi jednotlivými typy. Tímto bylo jejich učení značně zpřesněno.

### **Závěr:**

V rámci laboratorního měření byla pozorována závislost magnetické indukce a koercivní síly na intenzitě vloženého magnetického pole pro tři různé typy feritových kroužků. Záznamy měření jsou uvedeny v příložených tabulkách a závislosti zpracovány a vyneseny do grafů. Kvalitativně byly pozorovány všechny druhy hysterezních smyček, od lineární, Rayleigho, normální tak zaškrčené, což ilustrují obrázky v příloze.

### **Literatura:**

[1] Studijní text, Fyzikální praktikum II., úloha 21 – Studium hysterezních smyček feritů, online zdroj, [cit. 24.10.2018], dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>

[2] Sedlák B., Štol I., Elektřina a magnetismus, Praha, Karolinum, vyd. 3., 2012, ISBN 80-246-2198-2

[3] Produktové listy k měřicím přístrojům, Soubor dokumentů z Fyzikálního praktika II, online zdroj, [cit. 24.10.2018], dostupné z: [work.jhrabovsky.cz/mff/praktikum2](http://work.jhrabovsky.cz/mff/praktikum2)

