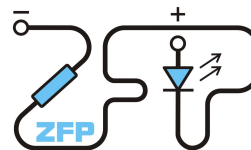


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum ...



Úloha č.

Název úlohy:.....

Jméno:Datum měření:

Datum odevzdání:

Připomínky opravujícího:

| | Možný počet bodů | Udělený počet bodů |
|---------------------------|------------------|--------------------|
| Práce při měření | 0 - 5 | |
| Teoretická část | 0 - 1 | |
| Výsledky měření | 0 - 8 | |
| Diskuse výsledků | 0 - 4 | |
| Závěr | 0 - 1 | |
| Seznam použité literatury | 0 - 1 | |
| Celkem | max. 20 | |

Posuzoval:.....

dne:

1 Pracovní úkol

1. Změřte průběh intenzity magnetického pole na ose souosých kruhových magnetizačních cívek
 - (a) v zapojení s nesouhlasným směrem proudu při vzdálenostech 12, 16, 20 cm
 - (b) v zapojení se souhlasným směrem proudu při týchž vzdálenostech cívek
2. Změřte intenzitu magnetického pole uprostřed mezi souosými kruhovými magnetizačními cívkami v zapojení se souhlasným směrem magnetizačního proudu při
3. Přesvědčte se, že při Helmholtzově poloze cívek v zapojení se souhlasným směrem proudu je pole na ose cívek v rámci možností homogenní. Pro tento případ stanovte experimentálně konstantu úměrnosti mezi intenzitou magnetického pole cívek a napětím indukovaným na detekční cívce a porovnejte ji s teoretickou hodnotou.
4. Proměřte průběh intenzity magnetického pole na ose solenoidu.
5. Veškeré výsledky zpracujte tabelárně a graficky.

2 Teorie

Pro intenzitu H magnetického pole na ose cívky ve vzdálenosti x od středu je dána [1]

$$H = \frac{NIR^2}{2(R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

kde R je poloměr cívky, N počet jejích závitů a I proud protékající cívkou. Pro dvě cívky na společné ose dále platí superpozice jejich polí, tedy (viz [1])

$$H = \frac{NIR^2}{2} \left\{ \frac{1}{[R^2 + (a+x)^2]^{\frac{3}{2}}} \pm \frac{1}{[R^2 + (a-x)^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (2)$$

pro vzdálenost x od jejich středu na ose, $2a$ je vzájemná vzdálenost středů cívek. Znaménko $+$ platí pro proud procházející v souhlasném směru, $-$ pro proud v nesouhlasném směru.

Lze ukázat, že při tzv. Helmholtzově uspořádání cívek ($2a = R$, souhlasný směr proudu) je homogenita pole mezi cívkami téměř ideální. Pak dle (2) pro bod uprostřed mezi cívkami platí [1]

$$H = \frac{8}{5\sqrt{5}} \frac{NI}{R} \quad (3)$$

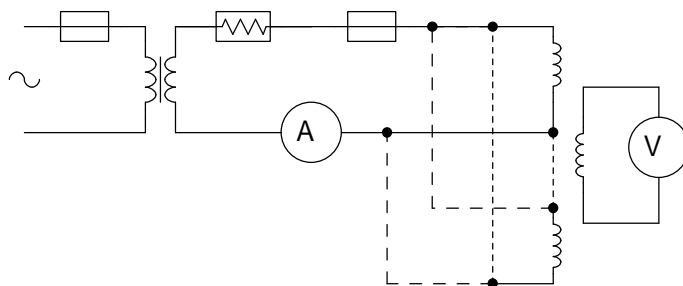
Magnetické pole v solenoidu i mezi cívkami měříme detekční cívkou, na které se indukuje střídavé napětí. Toto napětí je dle [1] úměrné intenzitě magnetického pole v daném místě a platí s uvážením $\omega = 2\pi f$ vztah:

$$H = \frac{1}{2\mu_0 f n \pi^2 r^2} U = kU \quad (4)$$

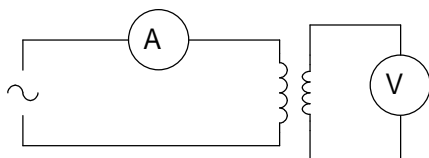
μ_0 je permeabilita vakua, f frekvence střídavého napětí, n počet závitů detekční cívky a r její poloměr.

[1] udává pro hodnotu intenzity magnetického pole v ose solenoidu konečné délky a nezanedbatelného rozdílu vnitřního a vnějšího poloměru vztah

$$H = \frac{NI}{2l(r_2 - r_1)} \left\{ \left(\frac{l}{2} + a \right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} + a \right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} + a \right)^2}} + \left(\frac{l}{2} - a \right) \ln \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{l}{2} - a \right)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(\frac{l}{2} - a \right)^2}} \right\} \quad (5)$$



Obrázek 1: Schéma pro měření pole mezi cívkami



Obrázek 2: Schéma pro měření pole v ose solenoidu

kde r_2 a r_1 jsou vnitřní a vnější poloměry, l je délka solenoidu, N počet jeho závitů a a poloha měřeného bodu.

3 Pomůcky

souosé cívky, detekční cívka, digitální multimetr MDX 4660A, ampérmetr, solenoid, variátor, zdroje střídavého napětí

4 Výsledky měření

Podmínky měření

Chyby zadaných parametrů byly odhadnuty.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$f = 50 \text{ Hz}$; síťovou frekvenci uvažujeme přesnou

Tabulka 1: Přesnost přístrojů

| Voltmetr | |
|----------------|----------------------------------|
| 0,2 V – 2 V AC | $\pm(0,8\% + 10 \text{ digits})$ |
| Ampérmetr | |
| 10 A AC | tř. přesnosti 0,2 % |
| 500 mA AC | tř. přesnosti 1,5 % |

Parametry sousých cívek

$$R = (10,4 \pm 0,2) \text{ cm}$$

$$N = 100$$

$$r = (1,28 \pm 0,2) \text{ cm}$$

$$n = 1000$$

$$2I = (3 \pm 0,02) \text{ A}$$

Parametry solenoidu

Solenoid:

$$N = 4464$$

$$l = (400 \pm 2) \text{ mm}$$

$$d_1 = 2r_1 = (114 \pm 1) \text{ mm}$$

$$d_2 = 2r_2 = (70 \pm 1) \text{ mm}$$

$$I = (400 \pm 7,5) \text{ mA Detekční cívka:}$$

$$r = (7 \pm 0,2) \text{ mm}$$

$$N = 200$$

4.1 Souosé cívky

Obvod byl sestaven podle 1, naměřené hodnoty jsou v tabulkách 2 – 6. Chyba určení polohy detekční cívky byla odhadnuta na 2 mm („hrot“ posunující se po pravítku je poměrně tupý a poloha středu detekční cívky je také poněkud diskutabilní). H bylo vypočteno podle vzorce (3), jeho chyba spočtena z dílčích chyb za užití vzorce pro výpočet chyb nepřímých měření [2]. Chyba U byla stanovena podle tab. 1.

Jsem si vědom toho, že ve studijním textu je doporučeno středovat hodnoty měřené symetricky vzhledem ke středu. Žel, vzpomněl jsem si na to až při odchodu z měření. . .

V grafech (obr. 3 a 4) jsou měřené hodnoty proloženy teoretickou závislostí (2).

Tabulka 2: Magnetické pole na ose pro $2a = 12 \text{ cm}$

| | nesouhlasně | | | | souhlasně | | | |
|---|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
| 1 | -33 | 74,5 | 367 | 12 | -33 | 195,1 | 960 | 31 |
| 2 | -25 | 60,0 | 295 | 10 | -25 | 194,7 | 958 | 31 |
| 3 | -17 | 43,0 | 212 | 7 | -16 | 192,8 | 949 | 31 |
| 4 | -10 | 27,2 | 134 | 4 | -10 | 192,0 | 945 | 31 |
| 5 | 0 | 5,8 | 28 | 1 | 0 | 191,4 | 942 | 31 |
| 6 | 9 | 20,8 | 102 | 3 | 10 | 191,6 | 943 | 31 |
| 7 | 16 | 34,8 | 171 | 6 | 21 | 192,5 | 948 | 31 |
| 8 | 23 | 49,8 | 245 | 8 | 29 | 192,8 | 949 | 31 |
| 9 | 29 | 60,5 | 297 | 10 | | | | |

V obr. 5 jsou naměřené hodnoty proloženy závislostí (2) s dosazeným paramterem $a = \frac{R}{2}$, na obr. 6 závislostí (2) s dosazeným paramterem $x = 0$.

Teoretická hodnota konstanty úměrnosti vypočtená podle (4) je rovna

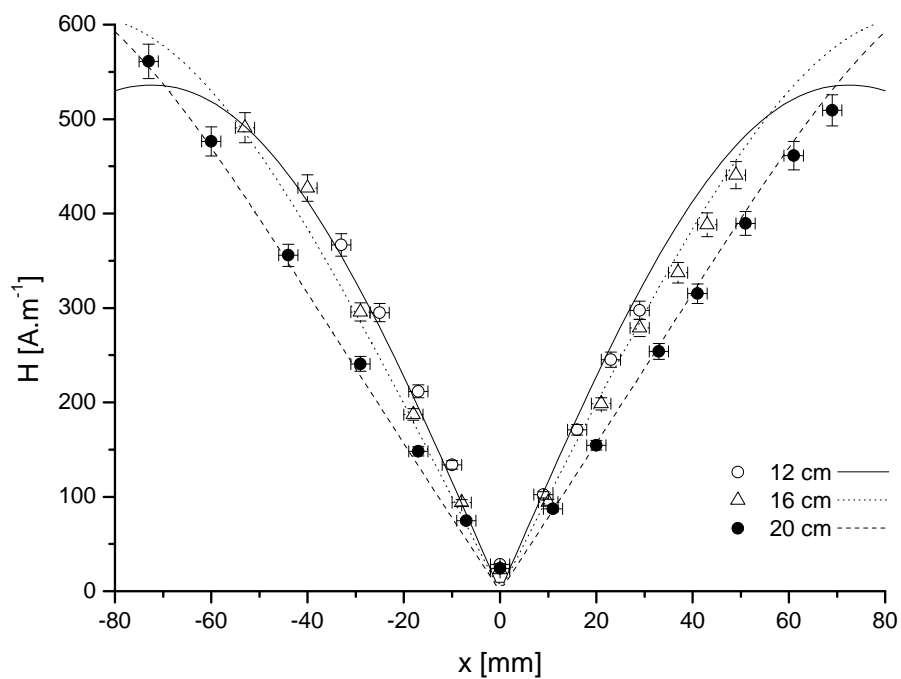
$$k_t = (4920 \pm 80) \text{ A. V}^{-1}. \text{ m}^{-1}$$

Tabulka 3: Magnetické pole na ose pro $2a = 16$ cm

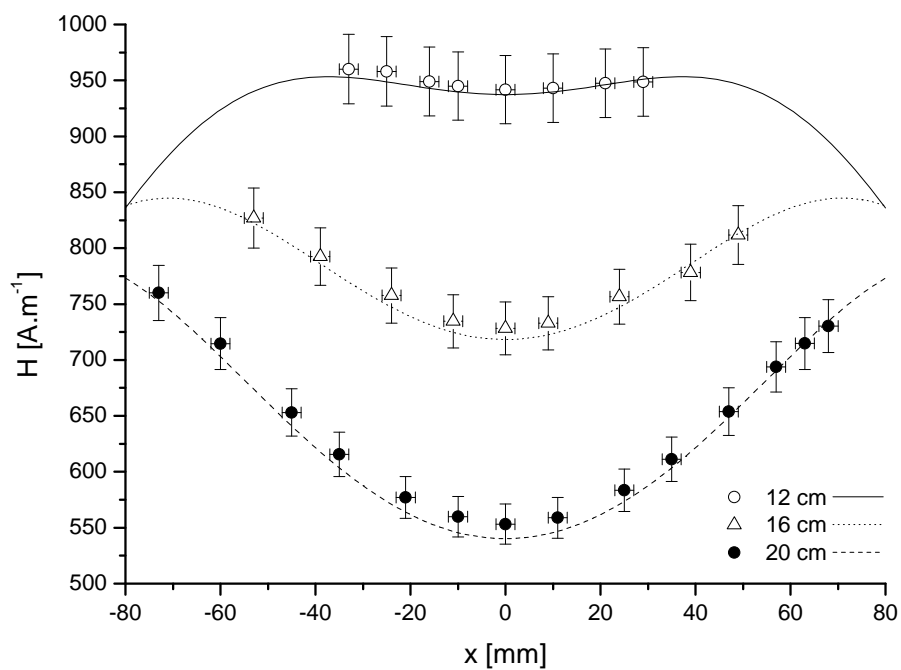
| | nesouhlasně | | | | souhlasně | | | |
|----|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
| 1 | -53 | 100 | 491 | 16 | -53 | 168,1 | 827 | 27 |
| 2 | -40 | 87 | 427 | 14 | -39 | 161,0 | 792 | 26 |
| 3 | -29 | 60 | 296 | 10 | -24 | 153,9 | 758 | 25 |
| 4 | -18 | 38 | 187 | 6 | -11 | 149,3 | 735 | 24 |
| 5 | -8 | 19 | 94 | 3 | 0 | 148,0 | 728 | 24 |
| 6 | 0 | 5 | 23 | 1 | 9 | 148,9 | 733 | 24 |
| 7 | 10 | 19 | 94 | 3 | 24 | 153,7 | 756 | 25 |
| 8 | 21 | 40 | 199 | 7 | 39 | 158,1 | 778 | 25 |
| 9 | 29 | 57 | 279 | 9 | 49 | 164,9 | 812 | 26 |
| 10 | 37 | 69 | 337 | 11 | | | | |
| 11 | 43 | 79 | 388 | 13 | | | | |
| 12 | 49 | 90 | 441 | 14 | | | | |

Tabulka 4: Magnetické pole na ose pro $2a = 20$ cm

| | nesouhlasně | | | | souhlasně | | | |
|----|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
| 1 | -73 | 114,0 | 561 | 18 | -73 | 154,4 | 760 | 25 |
| 2 | -60 | 96,8 | 476 | 15 | -60 | 145,2 | 715 | 23 |
| 3 | -44 | 72,3 | 356 | 12 | -45 | 132,7 | 653 | 21 |
| 4 | -29 | 48,9 | 241 | 8 | -35 | 125,1 | 616 | 20 |
| 5 | -17 | 30,1 | 148 | 5 | -21 | 117,3 | 577 | 19 |
| 6 | -7 | 15,2 | 75 | 3 | -10 | 113,8 | 560 | 18 |
| 7 | 0 | 4,9 | 24 | 1 | 0 | 112,4 | 553 | 18 |
| 8 | 11 | 17,7 | 87 | 3 | 11 | 113,6 | 559 | 18 |
| 9 | 20 | 31,4 | 155 | 5 | 25 | 118,6 | 584 | 19 |
| 10 | 33 | 51,6 | 254 | 8 | 35 | 124,2 | 611 | 20 |
| 11 | 41 | 64,0 | 315 | 10 | 47 | 132,8 | 654 | 21 |
| 12 | 51 | 79,1 | 389 | 13 | 57 | 141,0 | 694 | 23 |
| 13 | 61 | 93,8 | 461 | 15 | 63 | 145,2 | 715 | 23 |
| 14 | 69 | 103,5 | 509 | 17 | 68 | 148,4 | 730 | 24 |



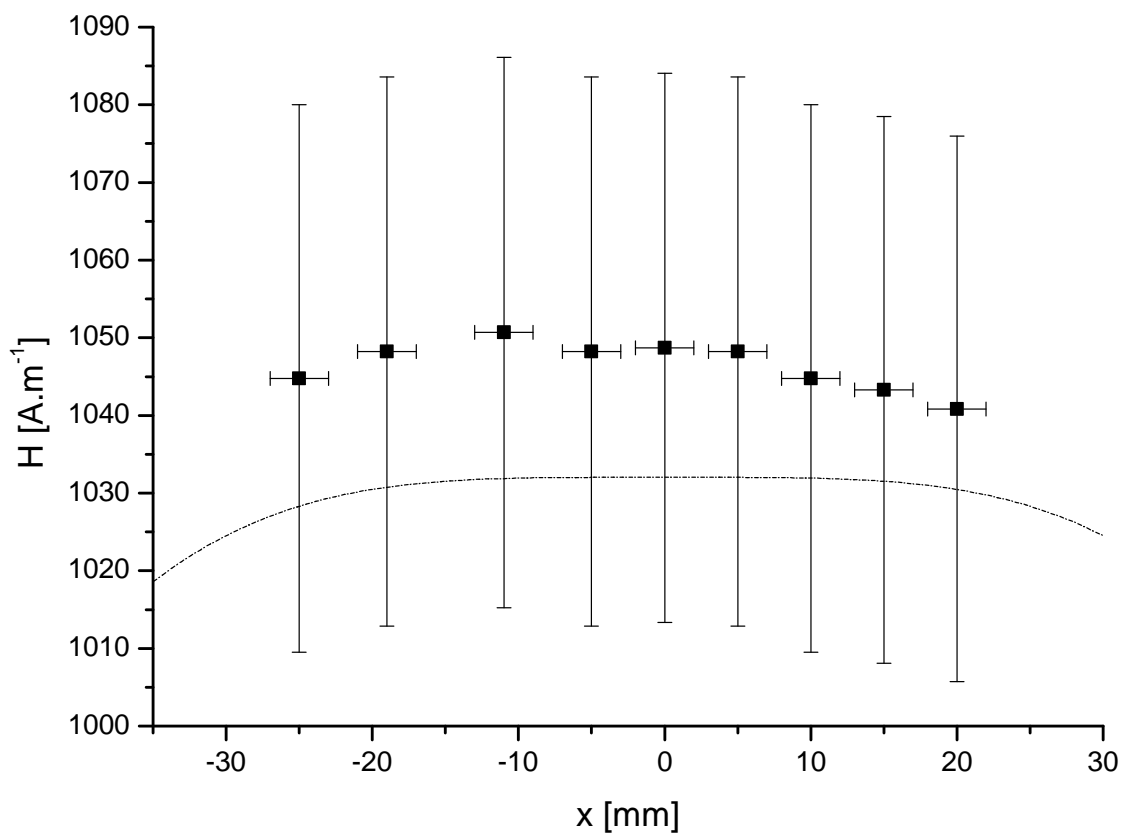
Obrázek 3: Průběh magnetického pole mezi cívkami při nesouhlasném směru proudu



Obrázek 4: Průběh magnetického pole mezi cívkami při souhlasném směru proudu

Tabulka 5: Magnetické pole na ose pro $2a = R$ (Helmholtzovo uspořádání)

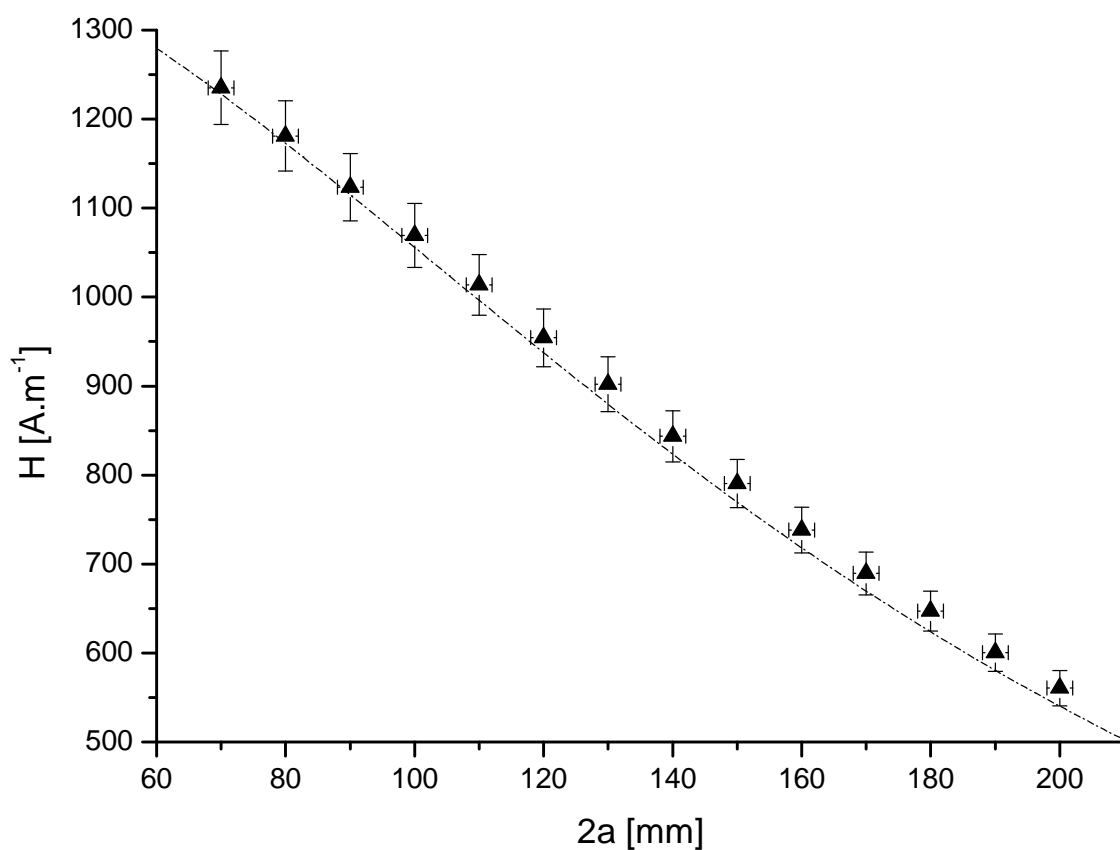
| | x [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
|---|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | -25 | 212,3 | 1045 | 35 |
| 2 | -19 | 213 | 1048 | 35 |
| 3 | -11 | 213,5 | 1051 | 35 |
| 4 | -5 | 213 | 1048 | 35 |
| 5 | 0 | 213,1 | 1049 | 35 |
| 6 | 5 | 213 | 1048 | 35 |
| 7 | 10 | 212,3 | 1045 | 35 |
| 8 | 15 | 212 | 1043 | 35 |
| 9 | 20 | 211,5 | 1041 | 35 |



Obrázek 5: Průběh magnetického pole při Helmholtzově konfiguraci

Tabulka 6: Magnetické pole na ose v závislosti na vzdálenosti cívek

| | $2a$ [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
|----|--------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 70 | 251 | 1235 | 41 |
| 2 | 80 | 240 | 1181 | 40 |
| 3 | 90 | 228,3 | 1124 | 38 |
| 4 | 100 | 217,3 | 1069 | 36 |
| 5 | 110 | 206 | 1014 | 34 |
| 6 | 120 | 193,9 | 954 | 32 |
| 7 | 130 | 183,3 | 902 | 31 |
| 8 | 140 | 171,4 | 843 | 29 |
| 9 | 150 | 160,6 | 790 | 27 |
| 10 | 160 | 150 | 738 | 25 |
| 11 | 170 | 140,1 | 689 | 24 |
| 12 | 180 | 131,5 | 647 | 23 |
| 13 | 190 | 122 | 600 | 21 |
| 14 | 200 | 113,9 | 561 | 20 |



Obrázek 6: Magnetické pole v závislosti na vzájemné vzdálenosti cívek

Experimentální hodnotu získáme statistickým zpracováním U z tab. 5 (pp. konstantnost při Helmholtzově zapojení), H pomocí vztahu (3).

$$U_{exp} = (212 \pm 1) \text{ mV}$$

$$H_{exp} = (1032 \pm 20) \text{ A. m}^{-1}$$

Výslednou hodnotu vypočítáme pomocí vztahu (4).

$$k_{exp} = (4900 \pm 100) \text{ A. V}^{-1}. \text{ m}^{-1}$$

Všechny chyby byly vypočítány pomocí vzorce pro výpočet chyby nepřímých měření [2].

4.2 Solenoid

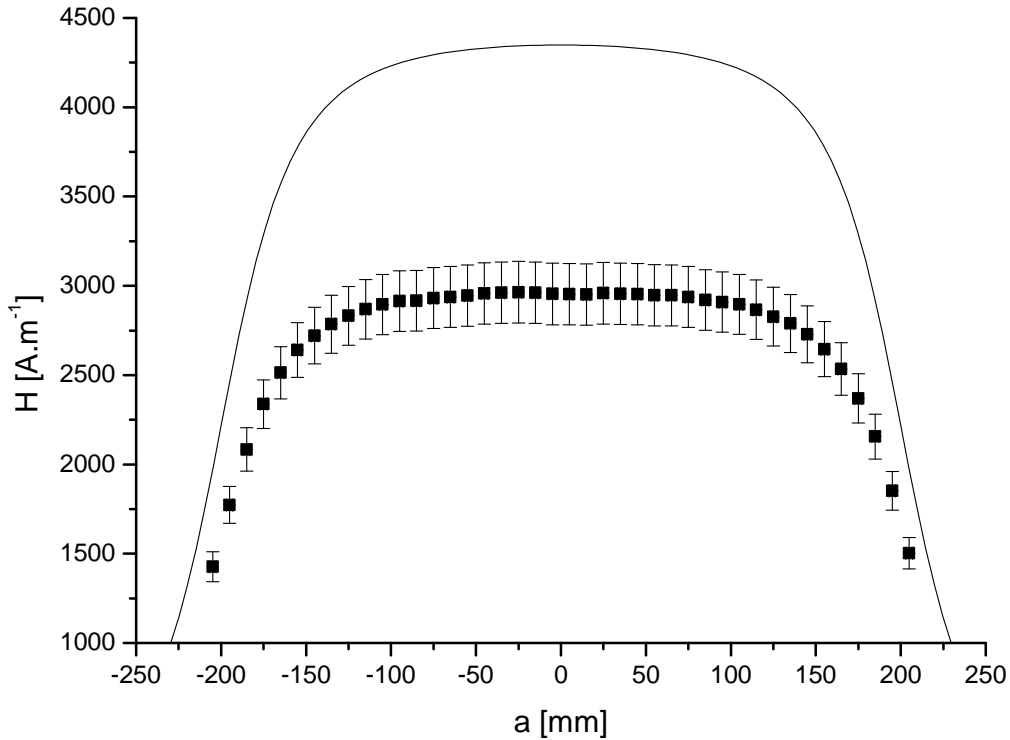
Ačkoli je délka solenoidu 400 mm, detekční cívkou se dalo pohybovat v rozsahu 410 mm (rozsah -205 mm – 205 mm). Na obr. 7 jsou naměřené hodnoty proloženy teoretickou závislostí (5).

Tabulka 7: Magnetické pole na ose solenoidu

| | a [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] | | a [mm] | U [mV] | H [A. m ⁻¹] | σ_H [A. m ⁻¹] |
|----|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|----|-------------|-------------|------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | -205 | 17,4 | 1427 | 84 | 22 | 5 | 35,9 | 2954 | 172 |
| 2 | -195 | 21,6 | 1773 | 104 | 23 | 15 | 35,9 | 2952 | 172 |
| 3 | -185 | 25,3 | 2083 | 122 | 24 | 25 | 36,0 | 2959 | 172 |
| 4 | -175 | 28,4 | 2337 | 136 | 25 | 35 | 35,9 | 2955 | 172 |
| 5 | -165 | 30,6 | 2513 | 146 | 26 | 45 | 35,9 | 2954 | 172 |
| 6 | -155 | 32,1 | 2641 | 154 | 27 | 55 | 35,8 | 2947 | 171 |
| 7 | -145 | 33,1 | 2721 | 158 | 28 | 65 | 35,8 | 2946 | 171 |
| 8 | -135 | 33,9 | 2785 | 162 | 29 | 75 | 35,7 | 2937 | 171 |
| 9 | -125 | 34,4 | 2832 | 165 | 30 | 85 | 35,5 | 2921 | 170 |
| 10 | -115 | 34,9 | 2869 | 167 | 31 | 95 | 35,4 | 2909 | 169 |
| 11 | -105 | 35,2 | 2895 | 168 | 32 | 105 | 35,2 | 2896 | 168 |
| 12 | -95 | 35,4 | 2915 | 170 | 33 | 115 | 34,8 | 2866 | 167 |
| 13 | -85 | 35,4 | 2916 | 170 | 34 | 125 | 34,4 | 2827 | 164 |
| 14 | -75 | 35,6 | 2931 | 170 | 35 | 135 | 33,9 | 2789 | 162 |
| 15 | -65 | 35,7 | 2937 | 171 | 36 | 145 | 33,2 | 2728 | 159 |
| 16 | -55 | 35,8 | 2945 | 171 | 37 | 155 | 32,1 | 2645 | 154 |
| 17 | -45 | 35,9 | 2957 | 172 | 38 | 165 | 30,8 | 2534 | 148 |
| 18 | -35 | 36,0 | 2962 | 172 | 39 | 175 | 28,8 | 2369 | 138 |
| 19 | -25 | 36,0 | 2964 | 172 | 40 | 185 | 26,2 | 2156 | 126 |
| 20 | -15 | 36,0 | 2962 | 172 | 41 | 195 | 22,5 | 1851 | 108 |
| 21 | -5 | 35,9 | 2954 | 172 | 42 | 205 | 18,3 | 1502 | 88 |

5 Diskuze výsledků

Z grafů 3 – 6 bylo dosaženo dobré shody s teoretickými předpoklady v rámci chyb. Při měření pole Helmholtzovy cívky je teoretická hodnota mírně odlišná (3%), což ukazuje na systematickou chybu (např. způsobenou geometrií detekční cívky). Z uvedených grafů je také patrná asymetričnost pole, která je dle teorie [1] způsobena tím, že detekční ani magnetizační cívky nejsou ideální a nevytvářejí tak ani ideální pole.



Obrázek 7: Magnetické pole v ose solenoidu

Vypočtená konstanta úměrnosti k_t se v rámci chyb dobře shoduje s konstantou k_{exp} určenou experimentálně.

U solenoidu je z grafu 7 patrné, že charakter závislosti je správný, ne tak ovšem velikost pole, která se od hodnoty teoretické značně liší. To může být způsobeno lehce jinými parametry detekční cívky (spec. r), o kterém nemáme informace co do přesnosti jeho určení a vyskytuje se navíc ve vztahu (4) v kvadrátu. Kdyby např. bylo $r = 6\text{mm}$, shoda s teoretickou závislostí by již byla relativně dobrá.

6 Závěr

Charaktery průběhu polí mezi sousými cívkami a na ose solenoidu odpovídají předpokladům, ovšem velikost pole v solenoidu se značně liší od teorie. Konstanty úměrnosti $H(U)$ se v rámci chyb dobře shodují a byly stanoveny jako

$$k_t = (4920 \pm 80) \text{ A} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$k_{exp} = (4900 \pm 100) \text{ A} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

Reference

- [1] Studijní text k Praktiku II. [online], [cit. 2013-11-18].
URL <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_223.pdf>
- [2] English, J.: *Úvod do praktické fyziky*. Praha: Matfyzpress, první vydání, 2006, ISBN 80-867-3293-2, 145 s.