

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 2

Zpracoval: Tomáš Plšek

Naměřeno: 12. prosince 2017

Obor: Astrofyzika **Ročník:** II **Semestr:** III

Testováno:

Úloha č. 5: Magnetické pole

Povinná část:

1. Změřte výchylku střelky v obou Gaussových polohách magnetu pro tři různé vzdálenosti r od středu magnetu. Měření provádějte na obě strany od magnetu a také pro magnet otočený o 180° .
2. Změřte periodu kmitů magnetu v magnetickém poli Země, rozměry a hmotnost magnetu.
3. Určete velikost horizontální složky magnetického pole Země pomocí vztahu (10).

Povinně volitelná část:

1. Zapojte obvod podle schématu.
2. Z osciloskopu odečtěte napětí odpovídající koercitivnímu poli, remanentní a saturační magnetizaci.
3. Změřte rozměry jádra transformátoru.
4. Určete velikost koercitivního pole, saturační a remanentní magnetizace pro zadaný materiál podle vztahů (11), (12) a (13).

1. Teoretický úvod

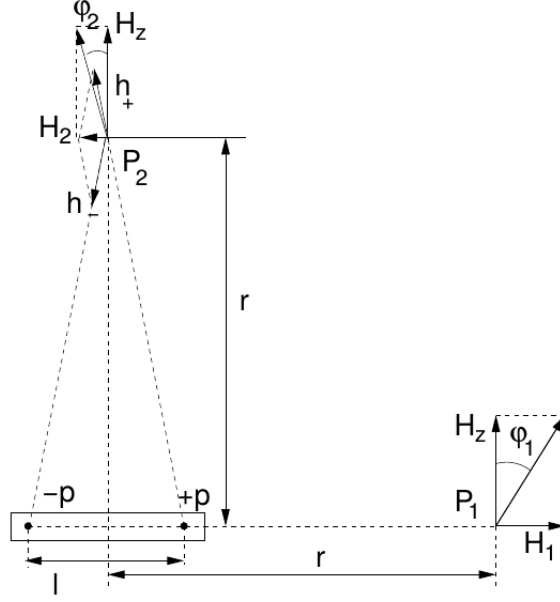
V této úloze se budeme zabývat magnetickým polem Země, jehož vlastnosti popisuje intenzita magnetického pole \vec{H} . Vektor intenzity můžeme v každém bodě rozložit na horizontální a vertikální složku, my se budeme zabývat pouze měřením horizontální složky H_z . Princip měření spočívá v porovnání zemského magnetického pole se intenzitou magnetického pole permanentního magnetu s dipólovým momentem:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi r^3} \left[\frac{3(\vec{r} \cdot \vec{m})\vec{r}}{r^2} - \vec{m} \right], \quad (1)$$

kde \vec{r} je polohový vektor vůči poloze magnetického dipólu. V našem případě však nemůžeme rozměry magnetu vůči jeho vzdálenosti zanedbat, tyčový magnet budeme tedy brát jako dva fiktivní magnetické monopóly o magnetickém množství $-p$ a $+p$ ve vzdálenosti l od sebe (obrázek 1). V první Gaussově poloze měříme pole v ose permanentního magnetu a magnetická intenzita v bodě P_1 je dána vztahem:

$$H_1(r) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left[\frac{p}{(r - l/2)^2} - \frac{p}{(r + l/2)^2} \right], \quad (2)$$

kde r je vzdálenost od středu magnetu a l je jeho redukovaná délka.



Obrázek 1: Schéma 1. a 2. Gaussovy polohy.

Po upravě získáváme vztah:

$$H_1(r) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{2M}{r^3(1-\lambda^2)^2}, \quad (3)$$

kde $\lambda = \frac{l}{2r}$ a $M = pl$ je magnetický moment magnetu. Magnetická intenzita pro druhou Gaussovu polohu bude mít tvar:

$$H_2(r) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{M}{r^3(1+\lambda^2)^{3/2}}. \quad (4)$$

Výchylku střelky magnetu od původního směru označíme jako φ_1 , přičemž platí:

$$\tan \varphi_1 = \frac{H_1}{H_z} = \frac{1}{4\pi\mu_0 H_z} \frac{2M}{r^3(1-\lambda^2)^2}. \quad (5)$$

Obdobně se vychýlí střelka v druhé Gaussově poloze o úhel φ_2 , pro nějž platí:

$$\tan \varphi_2 = \frac{H_2}{H_z} = \frac{1}{4\pi\mu_0 H_z} \frac{M}{r^3(1+\lambda^2)^{3/2}}. \quad (6)$$

Po vynásobení, úpravě vztahů (5) a (6) a aproximaci geometrického průměru na aritmetický získáváme vztah:

$$\frac{M}{H_z} = \frac{4\pi\mu_0 r^3}{7} \left(\frac{3 \tan \varphi_1}{2} + 4 \tan \varphi_2 \right) \quad (7)$$

Magnetický moment magnetu můžeme určit například z doby kyvu magnetu $\tau = T/2$, kde T je perioda kmitů:

$$MH_z = \frac{\pi^2 J}{\tau^2}. \quad (8)$$

Moment setrvačnosti magnetu určíme ze vztahu:

$$J = \frac{m}{4} \left(R^2 + \frac{l^2}{3} \right) \quad (9)$$

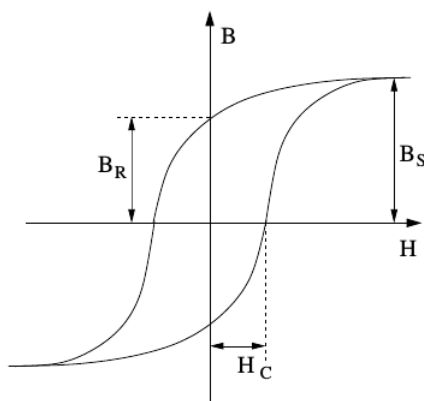
kde R je poloměr, l délka a m je hmotnost magnetu.

Úpravou rovnic (7) a (8) jsme nyní schopni vyjádřit velikost horizontální složky magnetického pole:

$$H_z = \sqrt{\frac{7\pi J}{4\mu_0\tau^2r^3} \left(\frac{3 \tan \varphi_1}{2} + 4 \tan \varphi_2 \right)^{-1}}. \quad (10)$$

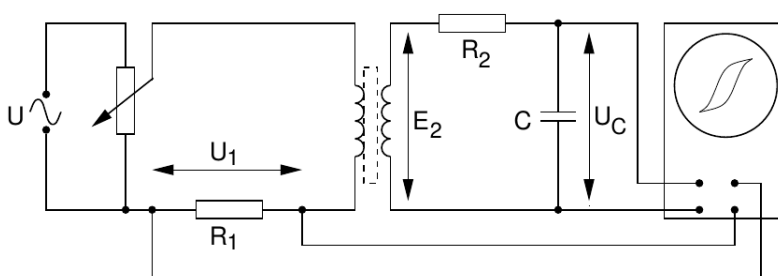
1.1. Magnetická odezva feromagnetického materiálu

Závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro feromagnetické materiály není lineární, ale má hysterézní závislost (obrázek 2). Feromagnetické materiály navíc mohou vykazovat magnetizaci bez vnějšího magnetického pole, ta však může dosahovat pouze do jisté maximální hodnoty M_S (saturační magnetizace). Po odstranění magnetického pole v materiálu zůstává remanentní (zbytková) magnetizace M_R . Další veličinou popisující hysterézní křivku je koerzivní pole H_C , které udává velikost vnějšího pole, při kterém je celková magnetická indukce v materiálu nulová.



Obrázek 2: Hysterézní křivka.

Měření budeme provádět podle schématu na obrázku 3. Využijeme feromagnetické jádro se dvěma vinutími. Primární vinutí slouží k buzení magnetického pole a na sekundárním snímáme indukované napětí.



Obrázek 3: Schéma obvodu pro měření magnetického pole feromagnetu.

Na osciloskopu tedy odečteme napětí odpovídající koercitivnímu poli a remanentní a saturační magnetizaci a následně určíme i jejich hodnoty:

$$H = \frac{N_1}{2\pi r R_1} U_1 \quad (11)$$

$$B = \frac{RC}{N_2 S} U_C \quad (12)$$

$$M = \frac{B}{\mu_0} - H. \quad (13)$$

2. Měření

2.1. Měření výchylek střelky v obou Gaussových polohách

Měření jsme prováděli vždy v třech různých vzdálenostech z jedné a druhé strany od kompasu ('/'') a také pro obě otočení magnetu ($1/2$).

Tabulka 1a: Měření výchylek střelky - 1. Gaussova poloha.

d [cm]	φ'_1 [°]	φ'_2 [°]	φ''_1 [°]	φ''_2 [°]
50	34	35	35	33
45	41	42	43	41
40	48	49	50	50

Tabulka 1b: Měření výchylek střelky - 2. Gaussova poloha.

d [cm]	φ'_1 [°]	φ'_2 [°]	φ''_1 [°]	φ''_2 [°]
50	22	22	21	23
45	28	29	27	29
40	35	37	34	38

Tabulka 2: Střední hodnoty výchylek pro jednotlivé vzdálenosti.

d [cm]	$\bar{\varphi}_1$ [°]	$\bar{\varphi}_2$ [°]
50	$34,3 \pm 0,7$	$22,0 \pm 0,6$
45	$41,8 \pm 0,7$	$28,3 \pm 0,7$
40	$49,3 \pm 0,7$	36 ± 1

2.2. Měření periody kmitů, rozměrů a hmotnosti magnetu

Magnet použitý v předchozí úloze jsme zavěsily na strunu s nízkým modulem pružnosti v torzi (aby magnet vykonával kmity zejména způsobené interakcí s magnetickým polem Země) a měříme jeho periodu kmitů. Pro větší přesnost měříme více period např. 10. Změříme také rozměry a hmotnost magnetu.

Tabulka 2: Perioda kmitů magnetu.

10 period	T [s]
$1^m 36,8^s$	9,68
$1^m 38,7^s$	9,87
$1^m 39,3^s$	9,93
$1^m 38,6^s$	9,86
$1^m 36,8^s$	9,68

Délka kyvu $\bar{\tau} = (4,90 \pm 0,03)$ s.

Tabulka 3: Rozměry magnetu.

l [cm]	d [cm]
12,35	2,08
12,34	2,06
12,36	2,07
12,34	2,05
12,34	2,07

Délka magnetu $\bar{l} = (12,35 \pm 0,05)$ cm.

Poloměr magnetu $\bar{r} = (1,03 \pm 0,03)$ cm.

Hmotnost magnetu $m = (305,0 \pm 0,2)$ g.

2.3. Určení horizontální složky magnetického pole Země

Ze vzorce (9) určíme moment setrvačnosti magnetu a jednotlivé vzdálenosti spočteme (vztah (10)) horizontální složku intenzity magnetického pole.

Tabulka 4: Horizontální složka magnetického pole pro jednotlivé vzdálenosti.

d [cm]	H_z [$A \cdot m^{-1}$]
50	$14,9 \pm 0,6$
45	$15,1 \pm 0,5$
40	$15,6 \pm 0,5$

Horizontální složka magnetického pole $\bar{H}_z = (15,1 \pm 0,7) A \cdot m^{-1}$.

2.4. Určení napětí odpovídající koerc. poli a remanentní a saturační magnetizaci

Na osciloskopu zobrazíme na x-ové ose napětí U_1 a na y-ové ose napětí U_C (obrázek 3). Ze vzniklé hysterézní křivky odečteme potřebné údaje.

Tabulka 5: Napětí odpovídají koerc. poli a remanentní a saturační magnetizaci.

U_C^r [mV]	U_C^s [mV]	U_1^C [mV]
54,9	105,1	947,2

2.5. Měření rozměrů jádra transformátoru

Tabulka 6: Rozměry jádra transformátoru.

d_{max} [cm]	d_{min} [cm]	h [cm]
3,04	1,93	0,82
2,97	1,94	0,83
3,03	1,98	0,83
3,02	1,96	0,81
3,01	1,95	0,82

Pro výpočet budeme používat střední poloměr jádra, tedy:

$$r = \frac{r_{max} + r_{min}}{2}. \quad (14)$$

Střední poloměr jádra $\bar{r} = (1,24 \pm 0,01)$ cm.

2.6. Určení velikosti koerc. pole a remanentní a saturační magnetizace

Pro výpočet koercitivního pole a remanentní a saturační magnetické indukce použijeme vzorce (11) a (12) a z nich následně vypočteme remanentní a saturační magnetizaci (vztah (13)). Vlastnosti jednotlivých prvků obvodu známe:

odpor $R_1 = 83 \Omega$,
odpor $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$,
kapacita $C = 10^{-6} \text{ F}$,
počet závitů $N_1 = 260$,
počet závitů $N_2 = 900$.

Výsledné velikosti H_C , B_r , B_s , M_r a M_s :

koercitivní pole $\bar{H}_C = (38,0 \pm 0,3) \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,
remanentní mag. indukce $\bar{B}_r = (15,1 \pm 0,2) \text{ mT}$,
saturační mag. indukce $\bar{B}_s = (28,9 \pm 0,4) \text{ mT}$,
remanentní magnetizace $\bar{M}_r = (12,0 \pm 0,1) \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$,
saturační magnetizace $\bar{M}_s = (23,0 \pm 0,3) \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.

3. Závěr

Horizontální složku intenzity magnetického pole jsem stanovil na hodnotu $\bar{H}_z = (15,1 \pm 0,7) \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. Hodnoty horizontální složky intenzity magnetického pole vykazují jistou systematickou chybu závislou na vzdálenosti magnetu od střelky.

Velikosti koercitivního pole a remanentní a saturační magnetizace feromagnetického materiálu jsem určil na $\bar{H}_C = (38,0 \pm 0,3) \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, $\bar{M}_r = (12,0 \pm 0,1) \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$ a $\bar{M}_s = (23,0 \pm 0,3) \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$.