

63. ročník Fyzikálnej olympiády
v školskom roku 2021/2022
kategória A – celoštátne kolo
Text experimentálnej úlohy

Magnetické pole valcovej cievky (solenoidu)

Ak cievkou prechádza elektrický prúd, vytvára sa v nej a jej okolí magnetické pole. V prípade, že cievka je veľmi dlhá a úzka, magnetické pole vnútri cievky (mimo malých oblastí v blízkosti koncov) je prakticky homogénne a orientované pozdĺž osi cievky. Takéto cievky sa používajú ako zdroje homogénneho magnetického poľa. So skracovaním cievky, t. j. keď polomer vinutia nie je už omnoho menší ako jej dĺžka, je veľkosť a smer magnetického poľa funkciou polohy v cievke.

Magnetické pole B na pozdĺžnej osi cievky je orientované rovnobežne s osou cievky a jeho veľkosť možno vyjadriť pre vinutie v tvare skrutkovice ($x = 0$ je stred cievky) vzťahom

$$B = \frac{\mu_0 IN}{2l} \left(\frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} - x\right)^2 + R^2}} + \frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} + x\right)^2 + R^2}} \right), \quad (1)$$

kde magnetická konštanta $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$, I je elektrický prúd prechádzajúci cievkou, N počet závitov cievky, l dĺžka cievky a R polomer cievky. Veľkosť magnetickej indukcie je priamoúmerná prúdu I , ktorý cievkou prechádza.

Cieľom úlohy je zmapovať magnetické pole cievky pozdĺž jej osi. Budete určovať závislosť pomeru $b = B/I$ indukcie magnetického poľa v cievke a prechádzajúceho prúdu na polohe pozdĺž osi cievky. Pomer b závisí v danom bode len od súradnice bodu, geometrie cievky, dĺžkovej hustoty $z = N/l$ závitov a materiálu prostredia (v našom prípade vzduchu)

$$b = \frac{B}{I} = \frac{\mu_0 z}{2} \left(\frac{\frac{l}{2} - x}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} - x\right)^2 + R^2}} + \frac{\frac{l}{2} + x}{\sqrt{\left(\frac{l}{2} + x\right)^2 + R^2}} \right). \quad (2)$$

Experimentálne zariadenie

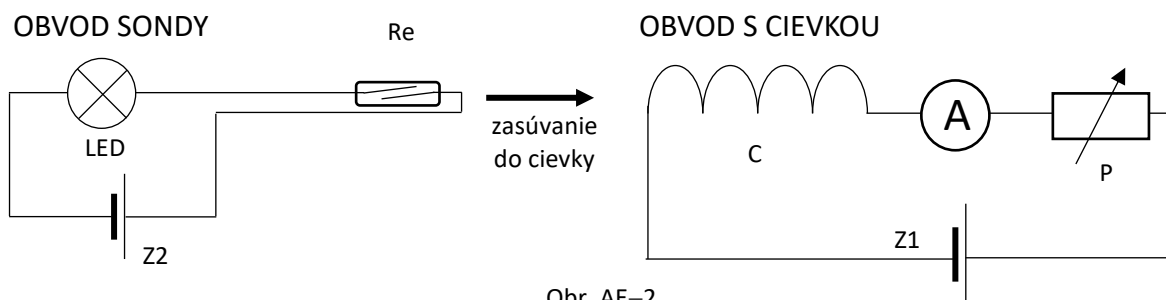
Na mapovanie použijeme ako sondu jazýčkové magnetické relé, obr. AE-1.



Obr. AE-1

Relé obsahuje dva tenké pružné feromagnetické jazýčky. Ak je vonkajšie magnetické pole nulové, resp. veľmi malé, jazýčky sa nedotýkajú. Ak sa relé vloží do magnetického poľa rovnobežného s pozdĺžnou osou relé, jazýčky sa magnetujú. Pri dostatočne veľkej hodnote indukcie sa konce jazýčkov vzájomne pritiahnu a vytvoria elektrický spoj. Ak je relé zapojené sériovo v uzavretom elektrickom obvode, začne obvodom prechádzať elektrický prúd.

Ak sa postupne zväčšuje indukcia vonkajšieho magnetického poľa, pri určitej minimálnej hodnote B_s sa relé zopne. Ak sa potom indukcia znižuje, pri určitej hodnote B_r sa relé rozopne.



Obr. AE-2

Na meranie použijete sústavu podľa schémy na obr. AE-2. Sústava má dve časti. Prvú tvorí meraná cievka C, ktorá je napájaná zo zdroja konštantného napätia Z1. Prúd cievky sa mení potenciometrom P a meria sa ampérmetrom A. Druhá časť je obvod sondy s detekčným relé Re. So zdrojom konštantného napätia Z2 je do série zapojená LED (svietivá dióda), ktorá indikuje zopnutie alebo rozopnutie relé Re. **Pred zapojením obvodu nastavte rozsah ampérmetra na 200 mA.**

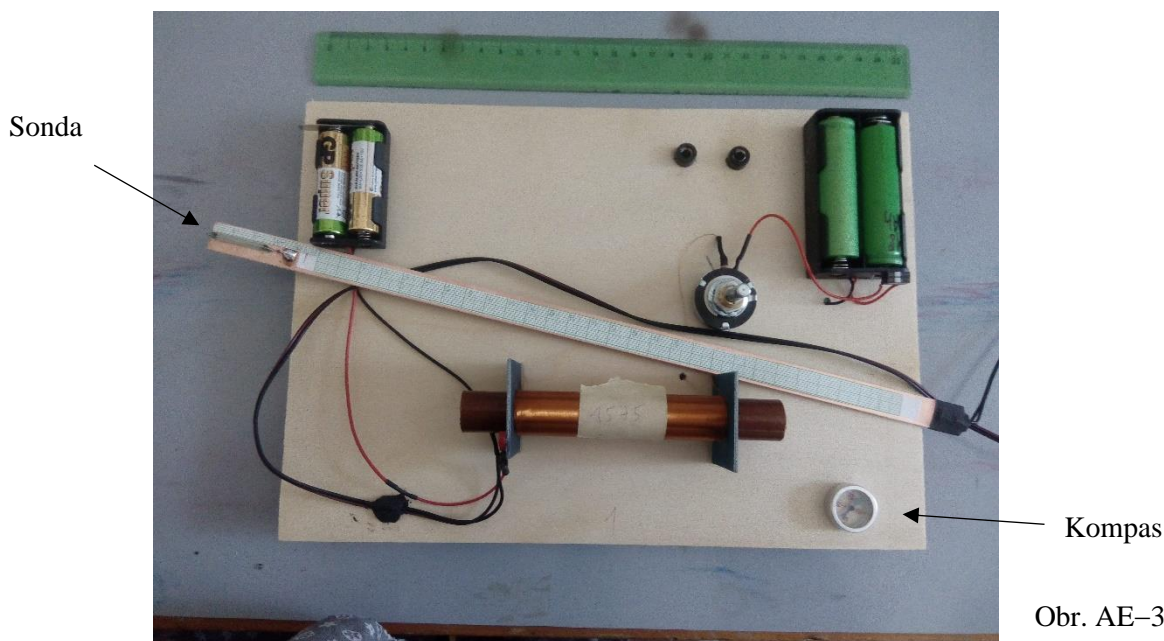
Predpokladajte, že pre dané relé sú spínacia hodnota indukcie magnetického poľa (spínacie pole) a rozopínacia hodnota indukcie magnetického poľa (rozopínacie pole) konštanty. Cievku považujte za valcovú cievku s rovnomerne navinutou jednou vrstvou závitov.

Metóda merania

Sondu s jazýčkovým relé postupne posúvate pozdĺž osi cievky. Pre každú polohu relé postupným zväčšovaním prúdu cievky pomocou potenciometra určíte prúd, pri ktorom sa relé zopne (LED sa rozsvieti). Potom pre každú polohu zopnutého relé postupným znižovaním prúdu cievky pomocou potenciometra určíte prúd, pri ktorom sa relé rozopne (LED zhasne). Relé nastavujete do polôh vo vnútri cievky i mimo cievku do vzdialenosti, ktorú umožňuje meracie zariadenie.

Pomôcky

Experimentálna zostava, milimetrový papier, kompas, pravítko, ceruzka, posuvné meradlo, multimeter.



Obr. AE-3

Úlohy

U1 Meranie parametrov cievky

- Zmerajte vnútorný a vonkajší priemer vinutia a určte stredný polomer R vinutia cievky.
- Zmerajte dĺžku l cievky a určte hustotu z závitov cievky. Počet N závitov cievky je uvedený na zariadení.

U2 Určenie spínacieho a rozopínacieho prúdu v strede cievky

- Nastavte orientáciu zariadenia pomocou kompasu tak, aby magnetické pole Zeme neovplyvnilo meranie, teda aby os cievky bola kolmá na smer horizontálnej zložky magnetického poľa Zeme.
- Vhodným spôsobom určte uhol α odklonu osi cievky od prednej hrany stola. Naznačte obrázok a merané veličiny.
- Sondu zasuňte približne do stredu cievky. Potom pomaly zvyšujte prúd cievky kým nedosiahne hodnotu potrebnú na zopnutie relé (spínací prúd). Meranie viackrát opakujte a určte najpravdepodobnejšiu hodnotu I_{s0} spínacieho prúdu.
- Po dosiahnutí zopnutia a určení spínacieho prúdu pomaly znižujte prúd cievky až do rozopnutia obvodu sondy. Určte hodnotu rozopínacieho prúdu. Meranie viackrát opakujte a určte najpravdepodobnejšiu hodnotu I_{r0} rozopínacieho prúdu.
- Určte pomer I_{r0}/I_{s0} a vyjadrite v percentách.

U3 Určenie pomeru b v strede cievky (spínacie a rozopínacie magnetické pole)

- S použitím vzťahu (2) a určeného prúdu I_{s0} určte hodnotu pomeru b_0 , pri ktorej dôjde k zopnutiu relé.
- Vzťah (2) upravte na zjednodušený tvar pre $R \ll l$ a $|x| \ll l$ a s jeho použitím určte hodnotu $(b_0)'$. Určte relatívnu odchýlku takto získanej hodnoty od hodnoty b_0 získanej zo vzťahu (1).

U4 Meranie závislosti spínacieho a rozopínacieho prúdu od posunutia sondy

- Sondu nastavte do jednej krajnej polohy a zmerajte hodnoty spínacieho a rozopínacieho prúdu. Potom postupne posúvajte sondu pozdĺž osi cievky a meranie opakujte až po dosiahnutie druhej krajnej polohy. Namerané posunutie sondy ξ a príslušné hodnoty I_s a I_r zapíšte do tabuľky tab. AE-1.

(Poznámka: Rozsah polôh, pri ktorých je možné uskutočniť meranie prúdu je rôzny pre spínanie a rozopínanie. Postup merania prispôbte, aby ste odmerali hodnoty v čo najširšom rozsahu.)

- Zostrojte spoločný graf I_s a I_r ako funkcie posunutia ξ sondy zo začiatkovej polohy.
- Určte polohu stredu cievky ξ_0 z osi symetrie grafov a do tab. AE-1 doplňte hodnoty súradnice $x = \xi - \xi_0$ vzhľadom na stred cievky.

U5 Zobrazenie priebehu magnetickej indukcie pozdĺž osi cievky

- Predpokladajte, že cievkou prechádza konštantný prúd $I_0 = 100$ mA. Do tabuľky tab. AE-1 doplňte pre tento prúd cievky a pre každú súradnicu x hodnoty indukcie $(B_{\text{exp}})_s$ a $(B_{\text{exp}})_r$ určených pomocou nameraných spínacích a rozopínacích prúdov a hodnoty b_0 .

- b) Do ďalšieho stĺpca doplňte strednú hodnotu B_{exp} hodnôt $(B_{\text{exp}})_s$ a $(B_{\text{exp}})_r$.
- c) Do ďalšieho stĺpca doplňte vhodný počet hodnôt B_{teor} získaných výpočtom podľa vzťahu (1) pre prúd cievky $I_0 = 100$ mA.
- d) Zostrojte spoločný graf B_{exp} a B_{teor} ako funkcie súradnice x . Získané krivky porovnajte a prípadné rozdiely zdôvodnite.
- e) Porovnajte na osi cievky hodnoty magnetickej indukcie B_k na konci a B_0 v strede cievky.
- f) Určte rozsah Δx súradníc na osi cievky, v ktorom možno považovať magnetické pole rovné hodnote $B_{\text{exp}0}$ v strede cievky s presnosťou do 5 %, a jeho relatívnu časť dĺžky cievky.

*Pozn.: Výsledky meraní a výpočtov zapíšte do príslušných tabuliek a grafy zostrojte vo formulári **Prehľad výsledkov**. V tabuľkách a grafoch uveďte označenia a jednotky veličín, v grafoch zvolte správnu mierku.*

63. ročník Fyzikálnej olympiády – Experimentálna úloha celoštátneho kola kategórie A

Autor návrhu:	Mária Kládiová
Recenzia:	Aba Teleki, Ľubomír Mucha
Preklad textu úloh do maďarského jazyka:	Aba Teleki
Redakcia:	Ivo Čáp
Vydal:	Slovenská komisia fyzikálnej olympiády IUVENTA – Slovenský inštitút mládeže, Bratislava 2022