

Experimentální úloha celostátního kola 60. ročníku FO

HRADEC KRÁLOVÉ 2019

Magnetická levitace těles

Teorie

Magnetická levitace je stav, kdy je těleso udržováno ve vzduchu vlivem magnetické síly, která působí proti síle tíhové. Využívá se např. u rychlovlaků, k bezkontaktnímu indukčnímu ohřevu a v magnetických ložiscích. Popis magnetické levitace má vždy dvě části: Výpočet magnetické síly působící na levitující těleso a výpočet podmínek stability levitace. Podmínky levitace závisí zejména na relativní permeabilitě použitého materiálu.

Permeabilita je fyzikální veličina, která vyjadřuje vliv materiálu na výsledné účinky magnetického pole. V izotropních tzv. *magneticky měkkých materiálech* platí

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H},$$

tedy magnetická indukce \mathbf{B} je přímo úměrná magnetické intenzitě \mathbf{H} . Konstanty úměrnosti jsou permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ a relativní permeabilita materiálu μ_r . Pro relativní permeabilitu platí

$$\mu_r = 1 + \chi_m,$$

kde χ_m je magnetická susceptibilita. Podle hodnot μ_r a χ_m rozlišujeme materiály:

- diamagnetické: $\mu_r < 1, \chi_m < 0,$
- paramagnetické: $\mu_r > 1, \chi_m > 0,$
- feromagnetické: $\mu_r \gg 1, \chi_m \gg 0.$

Magnetická síla, kterou působí v těžišti magnet na vzorek materiálu o objemu V s magnetickou susceptibilitou χ_m , může být vypočtena jako

$$\mathbf{F}_m = \frac{V \chi_m \mathbf{B} \frac{dB}{dx}}{\mu_0}. \quad (1)$$

Úkoly

- a) Určete hmotnost m vzorku a jeho objem V , jestliže víte, že hustota vzorku je $\rho = 9,78 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Užijte hodnotu $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- b) Pomocí vah (viz část *Provedení úlohy*) určete, zapište do tabulky a vynesete do grafu závislost síly, kterou působí permanentní magnet na vzorek na vzdálenosti magnetu od vzorku pro interval $\langle 0; 4 \rangle \text{ mm}$ s krokem $0,5 \text{ mm}$. Graf viditelně označte číslem soutěžícího.

- c) Pomocí vzorce (1) určete pro každou polohu magnetickou susceptibilitu materiálu χ_m . Závislost magnetické indukce magnetu na vzdálenosti je popsána vzorcem

$$B(x) = \frac{B_0}{2} \left[\frac{L+x}{\sqrt{R^2 + (L+x)^2}} - \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}} \right],$$

kde $B_0 = 0,500$ T je magnetická indukce na povrchu magnetu, $L = 2,00$ cm výška magnetu a $R = 0,60$ cm jeho poloměr. Tloušťku vzorku zanedbejte.

Derivaci magnetické indukce budete určovat numericky. Budeme předpokládat, že indukce magnetického pole je závislá pouze na souřadnici x (tzn. zanedbáme okrajové jevy). Platí

$$\frac{dB}{dx} \cong \frac{B(x_2) - B(x_1)}{x_2 - x_1},$$

kde $B(x_1)$ a $B(x_2)$ jsou dvě po sobě jdoucí hodnoty magnetické indukce, měřené ve vzdálenostech x_1 a x_2 .

- d) Z vypočtené hodnoty χ_m určete relativní permeabilitu μ_r vzorku včetně chyby měření. Určete, zda se jedná o para-, fero- nebo diamagnetikum. Hodnoty statisticky zpracujte, výpočet podle zákona hromadění chyb se nepožaduje.
- e) Vysvětlete stručně, proč musí být vzorek umístěn na plastovém držáku vysokém 3 cm.
- f) Užitím rovnice (1) určete obecně podmínku magnetické levitace tělesa o hustotě ρ v jednorozměrném případě.
Poznámka: Asi bude nutné vyřešit diferenciální rovnici v proměnné B .
- g) Z podmínky podle bodu f) vyjádřete výšku levitujícího předmětu nad magnetem s povrchovou indukcí B_0 a určete obecně, v jaké maximální výšce může levitovat supravodič, pro který platí $\chi_m = -1$.

Provedení úlohy

K měření malé síly, kterou působí permanentní magnet na vzorek, využijete setinové váhy. Na nich nejprve zvažte vzorek, následně umístěte na váhy držák se vzorkem a vynulujte váhy stiskem tlačítka TARE. Tlačítko ON/OFF slouží k zapnutí a vypnutí vah. Pokud se 30 sekund nezmění hodnota hmotnosti, váhy se automaticky vypnou!

Měření začněte zašroubováním magnetu těsně až na vzorek ($x = 0$). Nešroubujte však dále, aby nedošlo k poškození vah! Při šroubování v opačném směru se v okamžiku oddělení magnetu od vzorku skokově změní hmotnost, kterou ukazují váhy. Následně platí, že každá otáčka závitů odsune magnet o jeden milimetr.

Na samotné měření máte 90 minut, po kterých se na zpracování měření přesunete do jiné učebny. Proto se ujistěte, že máte naměřena všechna potřebná data! Řešení úlohy si časově dobře rozvrhněte.

Před obědem si po práci se vzorkem dobře umyjte ruce!