

12. Mapování magnetického pole Helmholtzových cívek

1. Klíčová slova

Magnetický indukční tok, magnetické indukční čáry, magnetická indukce, Faradayův zákon elektromagnetické indukce, náboj, proud, elektromotorické napětí,

2. Princip

Přepnutí polarity proudu Helmholtzovými cívkami způsobí změnu polarity jejich magnetického pole a indukované napětí v malých měřicích cívkách uvnitř tohoto pole. Měřicí cívky jsou orientovány vzhledem k Helmholtzovým cívkám rovnoběžně s osou, resp. kolmo na osu a indukují se v nich napětí úměrná rovnoběžné, resp. kolmé složce vektoru magnetické indukce. Z velikosti těchto napětí se vypočte vektor magnetické indukce v místě měřicích cívek.

3. Přístroje a pomůcky

Sada měrných cívek, Helmholtzovy cívky, souřadnicový zapisovač, souprava ISES s dvěma voltmetry a proudovým zesilovačem, zdroj pro proudový zesilovač

4. Úkol

A. Zjistěte průběh vektoru magnetické indukce Helmholtzových cívek

B. Vypočtěte velikost magnetického pole ve středu jedné z cívek.

5. Teorie

V daném místě je magnetické pole o **indukci magnetického pole \mathbf{B}** , působí-li na bodový náboj Q pohybující se rychlostí \mathbf{v} síla \mathbf{F}

$$\mathbf{F} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [B] = \text{T (tesla)}. \quad (12.1)$$

Magnetické indukční čáry jsou křivky, jejichž tečna v každém bodě má směr vektoru magnetické indukce.

Magnetický indukční tok Φ je definován plošným integrálem

$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad [B] = \text{Wb (weber)}, \quad (12.2)$$

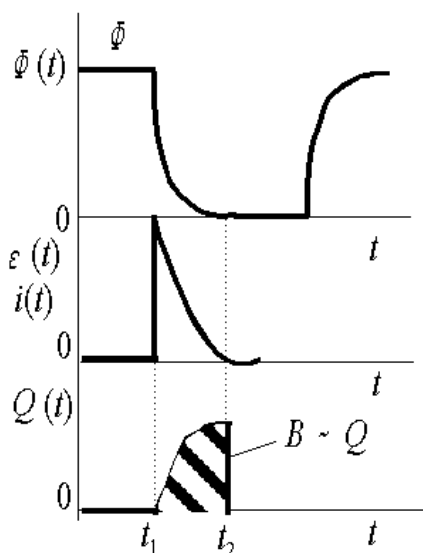
kde $d\mathbf{S}$ je elementárním vektorem plochy,

Faradayův zákon elektromagnetické indukce: indukované elektromotorické napětí ε v uzavřeném vodiči je rovno časové derivaci indukčního toku plochou ohraničenou vodičem.

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [\varepsilon] = \text{V}. \quad (12.3)$$

Metoda měření vektoru magnetické indukce

Předpokládejme, že do místa, ve kterém chceme změřit magnetickou indukci, vložíme měrnou cívku o N závitů a ploše S . Předpokládejme dále, že magnetický tok cívkou se mění s časem $\Phi(t)$, to znamená že platí $d\Phi/dt \neq 0$. Pro náboj prošlý měrnou cívkou o N závitů za čas dt platí podle Faradayova zákona

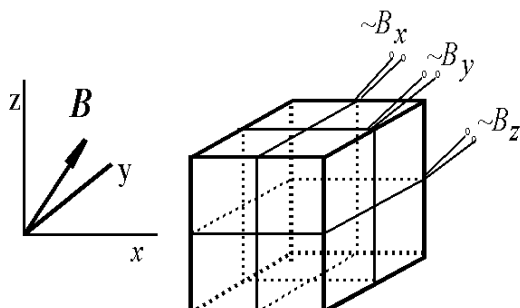


Obr. 12.1 Časový průběh indukčního toku, indukovaného elektromotorického napětí, proudu a náboje, který protekl obvodem

$$dt = i(t) dt = \frac{\varepsilon(t)}{R} dt = -N \frac{d\Phi}{R}, \quad (12.4)$$

kde R je odpor celého obvodu včetně cívky.

Nechť je změna magnetického toku měrnou cívkou $\Phi(t)$ taková, že v určitém časovém intervalu (t_1, t_2) dojde ke změně magnetického toku z určité ustálené hodnoty Φ na hodnotu nulovou, tj. $\Delta\Phi = -\Phi$. Pak celkový prošlý náboj měrnou cívkou bude



$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = N \frac{\Phi}{R}, \quad [Q] = C. \quad (12.5)$$

Když si nyní uvědomíme definici magnetického indukčního toku (12.2) a uvážíme malé rozměry a orientaci měrné cívky ($\mathbf{B} \perp \mathbf{S}$), integrál ve vztahu (12.2) můžeme vyjádřit prostým součinem magnetické indukce a plochy cívky. Pak bude platit výsledný vztah pro magnetickou indukci

Obr. 12.2 Měřicí cívky pro snímání magnetické indukce

$$B = \frac{\Phi}{S} = Q \frac{R}{NS} = \frac{R}{NS} \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt = \frac{1}{NS} \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(t) dt. \quad (12.6)$$

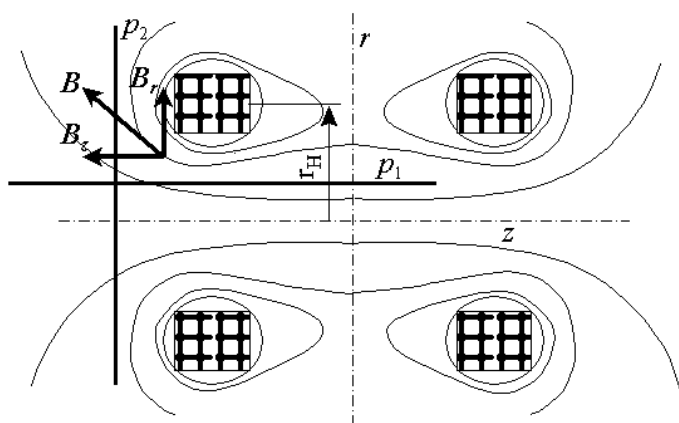
Protože chceme zjišťovat vektorovou veličinu \mathbf{B} , musíme měřit její tři složky (B_x, B_y a B_z) třemi nezávislými měřeními, nejlépe ve třech navzájem kolmých směrech. Vzhledem k osové symetrii Helmholtzových cívek a měření v osové rovině však stačí cívky dvě, pro axiální směr B_z a pro radiální směr B_r / B_x , ($B_y = 0$). To je v naší aparatuře realizováno pomocí dvou navzájem kolmých měrných cívek, u nichž je udána plocha S a počet závitů N (obr. 12.2).

Na Helmholtzovy cívky vytvářející magnetické pole je přiváděno periodické pulzní napětí, které vytváří pulsující magnetické pole. Vložíme-li do takového magnetického pole měrnou cívku, indukuje se v ní podle rovnice (12.3) časově proměnné elektromotorické napětí, které zaznamenáváme. Integrál z tohoto pulzního napětí, neboli součin náboje a odporu obvodu QR , je pak již podle vztahu (12.6) úměrný zjišťované magnetické indukci. Takto uspořádané dvě cívky tedy poskytují nezávislou informaci o složkách magnetické indukce (B_r a B_z).

6. Pokyny pro měření

A. Ke stanovení polohy měřících cívek využijte mechanického posuvu zapisovače a měřítka na lištách zapisovače. Volba počátku soustavy souřadnic je libovolná, nejvýhodnější je taková, v níž se souřadnice odečítají na lištách proti jazýčkům posuvných částí. Měření provádějte asi po 2-3 cm pro zhruba 10 bodů ležících na ose a na přímkách podle obr. 12.3. Měřicí cívka má $N = 100$ závitů a plochu $S = 2,25 \text{ cm}^2$.

Ke zjištění velikosti axiální složky magnetické indukce v jednom vybraném bodě použijte metodu popsanou rovnicemi (12.4) - (12.6). Nejprve pomocí počítačového osciloskopu (ISES - konfigurace podle konfiguračního souboru **mgpole.imc**) změřte časovou odezvu napětí na pulzní změnu magnetického pole vytvářeného Helmholtzovými cívkami. Toto napětí se pomocí programového vybavení (DATA ZOOM a INTEGRACE) převede na integrál, ze kterého pak pomocí vztahu (12.6) určíme absolutní hodnotu příslušné složky magnetické indukce. Pak odečteme hodnotu maxima časové odezvy napětí. Poměr integrálu a maximálního napětí je konstantní.



Obr. 12.3 Řez osovou rovinou Helmholtzových cívek se znázorněnými indukčními čarami

Změníme konfiguraci zobrazení tak, aby na vodorovné ose bylo napětí úměrné radiální složce B_r , a na svislé ose axiální složce B_z (konfigurační soubor **mgvektor.ime**). Zobrazí se tak úsečka, jejíž koncový bod má souřadnice rovny maximum těchto napětí a jejíž směr udává směr vektoru magnetické indukce. Změřte pouze maximální velikosti napětí pro axiální a radiální složku indukce a pomocí předchozího kalibračního měření stanovte velikost složek magnetické indukce v každém bodě podle zadání.

Nejdříve měříme v bodech na ose z , poté na přímce p_1 vzdálené 6 cm od osy a nakonec po přímce p_2 vzdálené 2 cm od čela cívky podle obr. 12.3. Nakonec pomocí posuvu měřicí cívky odečtete ve stejném souřadném systému polohu, případně rozměry Helmholtzových cívek.

B. Pro výpočet mg. indukce uprostřed kruhové cívky potřebujeme znát její rozměry, počet závitů a procházející proud. Vycházíme z následujících parametrů cívky: délka vinutí je 40 mm, výška vinutí je 30 mm, vnitřní průměr cívky $2r_H$ je 210 mm, cívka obsahuje $N_H = 240$ závitů Cu vodiče průměru 2,2 mm o celkovém odporu 0,9 Ω . Proud cívkami I je nastaven pomocí zdroje napětí U a sériového odporu 30,8 Ω (včetně odporu vinutí), zaznamenáme tedy napětí zdroje.

7. Pokyny pro zpracování

A. Vypočteme a vyneseme do grafů závislosti magnetické indukce Helmholtzových cívek $B_z(z)$ a $B_r(z)$ na poloze z pro vzdálenosti od osy cívek ($r = 0$ a 6 cm) a $B_z(r)$, $B_r(r)$ na poloze r pro kolmici na osu vně cívek.

Jestliže změna magnetického pole nastává změnou polarity napájení Helmholtzových cívek, nikoli spínáním a vypínáním, je ve skutečnosti dvojnásobná, ustálená magnetická indukce daná vztahem 12.6 je pak poloviční.

B. Na základě přibližného vztahu pro výpočet magnetické indukce uprostřed kruhové cívky

$$B = \mu_0 \frac{N_H I}{2r_H}, \quad (12.7)$$

kde $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ je permeabilita vakua a r_H je střední poloměr Helmholtzovy cívky, provedeme srovnání vypočtené a naměřené magnetické indukce. Proud vypočteme podle Ohmova zákona z napětí zdroje a odporu vinutí cívky. Příspěvek indukce od vzdálenější cívky pro výpočet zanedbáme.

8. Kontrolní otázky

- Vysvětlete pojmy „indukce magnetického pole“, „magnetický indukční tok“, „indukční čára“.
- Co vyjadřuje Faradayův zákon elektromagnetické indukce ?
- Vysvětlete princip měření magnetické indukce.