

Laboratorní úloha

Měření síly působící na proudovodič

1.1 Úkol měření

Prozkoumejte závislost mezi proudem protékajícím vodičem v magnetickém poli a silou, jež na vodič působí.

1.2 Silové účinky magnetického pole

Elektromagnetické pole jako takové (a magnetické pole je jeho součástí) popisují Maxwellovy rovnice. Čtyři tzv. hlavní Maxwellovy rovnice shrnují vzájemné vztahy mezi veličinami popisujícími pole a po doplnění materiálovými vztahy je možné z nich pole vypočítat. Pokud by však elektromagnetické pole nepůsobilo na elektrické náboje silou, jednalo by se spíš jen o intelektuální cvičení, protože by nebylo možné přesvědčit se o existenci pole měřením. Elektromagnetické pole však silové účinky má: příslušné vztahy pro sílu se nazývají po H. A. Lorentzovi (1853-1928).

1.2.1 Lorentzova síla

Lorentzova síla je dána vztahem

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

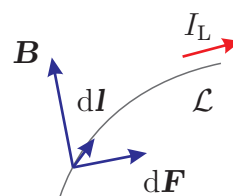
kde q je náboj, \mathbf{E} vektor intenzity elektrického pole, \mathbf{v} vektor rychlosti náboje a \mathbf{B} vektor magnetické indukce.

Jedná se o sílu působící na elektrický náboj; předpokládá se přitom že náboj je „bodový“, tzn. nachází se v jediném bodě. Ve většině případů však uvažujeme nikoli o jednotlivých nábojích, ale o elektrickém proudu jako o spojitě veličině. (Již z toho je vidět, že Maxwellovy rovnice se nehodí pro mikrofyzikální popis pole.)

1.2.2 Síla působící na proudovodič

Speciálně pro silové působení časově neproměnných magnetických polí na vodič protékaný elektrickým proudem I_L a) není třeba počítat se vzájemným působením elektrických polí nábojů (celek je tzv. nábojově neutrální; stačí druhý člen ve vztahu pro Lorentzovu sílu), b) snadno se odvodí vztah

$$d\mathbf{F} = I_L d\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \quad (1.1)$$



kde $d\mathbf{F}$ je síla působící na element proudovodiče $d\mathbf{l}$ orientovaný ve směru protékajícího proudu, který považujeme za nekonečně tenký, respektive jeho tloušťku oproti ostatním rozměrům zanedbáváme.

Vztah (1.1) se někdy nazývá Ampèrova síla. Indukce \mathbf{B} se místo od místa mění, stejně jako její vzájemný směr s vektorem $d\mathbf{l}$, proto je vztah (1.1) „pouze“ v diferenciálním tvaru. K určení celkové síly působící na vodič protékaný proudem je třeba jednotlivé příspěvky sečíst – zintegrovat:

$$\mathbf{F} = I_L \int_{\mathcal{L}} d\mathbf{l} \times \mathbf{B}. \quad (1.2)$$

Uvažujme přímý úsek proudovodiče délky l orientovaný jednotkovým vektorem \mathbf{i}_0 protékaný proudem I_L (ve směru vektoru \mathbf{i}_0) umístěný v homogenním magnetickém poli $\mathbf{B} = B\mathbf{j}_0$, kde \mathbf{j}_0 je jednotkový vektor. Pro sílu působící na tento úsek vodiče bude dosazením do vztahu (1.2) platit

$$\mathbf{F} = BI_L l (\mathbf{i}_0 \times \mathbf{j}_0)$$

a pokud bude navíc platit $\mathbf{i}_0 \perp \mathbf{j}_0$, dostaneme pro velikost této síly známý vztah

$$F = BI_L l. \quad (1.3)$$

1.3 Proudové váhy

K demonstraci a proměření vlivu magnetického pole na vodič protékaný proudem je vhodné sestavit experimentální zařízení s co nejjednodušší geometrií: tak, aby vektor magnetické indukce byl **a)** konstantní a homogenní, tzn. všude stejně velký a ve stejném směru, **b)** kolmý na proudovodič, pak se vektorový součin nahradí součinem velikostí vektorů, viz vztah (1.3) a **c)** je třeba eliminovat vliv úseků, jimiž se proud přivádí do magnetického pole. Působící sílu je možné měřit zařízením velmi podobným obyčejným vahám; odtud je název.

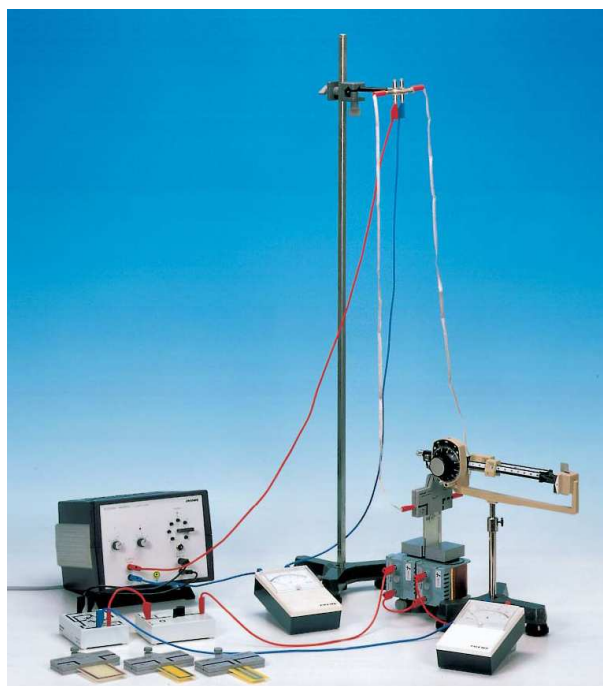
1.3.1 Elektromagnet a jeho pole

Zdrojem konstantního homogenního pole je elektromagnet napájený stejnosměrným proudem. Elektromagnet je již sestaven (po měření jej nerozkládejte!): skládá se ze dvou cívek, železného jádra ve tvaru U a pólových nástavců. Šířka mezery je 1 cm (přetočením pólových nástavců se dá zvětšit na cca 4 cm, ale to nedělejte – pole pak není dostatečně homogenní). Pole v prostoru mezi nástavci je možné pokládat v rozmezí 2 – 3 mm za homogenní. Namísto velikosti magnetické indukce v místě měření měříte a měníte velikost proudu I_m protékajícího vlnutím(i) elektromagnetu, jíž je velikost magnetické indukce úměrná.

Při přepočtu proudu na magnetickou indukci počítejte s tím, že její velikost je úměrná protékajícímu proudu I_m a že proudu $I_m = 870 \text{ mA}$ odpovídá magnetická indukce o velikosti $B = 168 \text{ mT}$.

1.3.2 Vlastní váhy

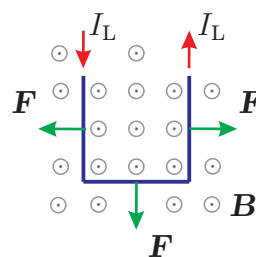
Jedná se o běžné vahadlové váhy. Na levém vahadle je zavěšen přípravek s proudovodičem ve tvaru pravoúhlé smyčky, který se vyvažuje na pravé straně přivažky po 10 g a 100 g a jemným



vyvažováním. Vyvažuje se tak, aby ryska na pravém vahadle koincidovala s ryskou „0“ na rámečku vah. Jemné vyvažování, které právě budete používat, se provádí pomocí otočného pružinového zařízení s ukazatelem kalibrovaným v rozsahu 0 – 10 g (dílků číslovaných 1 – 10), mezi číslovanými dílky se odečítají desetiny g, setiny g se odečítají na noniu. Rozhodující ryska na noniu je vpravo, označena je nulou. **Pozor, s vahami je třeba zacházet šetrně a nenásilně!**

1.3.3 Geometrie měřeného úseku, eliminace vlivu přívodů

Měří se síly, jež magnetické pole vyvolává ve střední (vodorovné) části smyčky zavěšené do prostoru mezi pólovými nastavci elektromagnetu. Síly pochopitelně působí i na svislé části smyčky, ty se však navzájem ruší. Přívody k měřené smyčce jsou tvořeny tenkou textilní stuhou protkanou jemnými měděnými vlákny, kterou je možné pokládat za dokonale ohebnou – na závěs proto nijak silově nepůsobí.



1.4 Postup měření

1.4.1 Seznámení se s aparaturou

Začněte tím, že si celé zařízení podrobně prohlédnete. Podívejte se, kudy protéká magnetizační proud a kde je vlastní proudový okruh pro určení působení Lorentzovy (Ampèrovy) síly. Na levém vahadle je možná již od předcházejícího měření zavěšen přípravek s proudovodičem; na něm je zapsána délka měřeného úseku smyčky (německy Leiterschleife, $l = 12,5, 25$ nebo 50 mm) a počet závitů ($n = 1$ nebo 2). Vyzkoušejte si, jak se váhy vyvažují.

1.4.2 Nastavení magnetického pole a proudu I_L ve smyčce

Elektromagnet je napájen z pravé části napájecího zdroje ($2 - 15$ V střídavých). Střídavé napětí se pomocí můstku převádí na stejnosměrné. Obě cívky elektromagnetu jsou zapojeny v sérii. Magnetizační proud se nastavuje stupňovitě karuselovým přepínačem na pravé části napájecího zdroje (ještě před usměrněním), měří se ampérmetrem; proud nesmí přesáhnout $1,3$ A. Proud I_L procházející měřenou smyčkou se odebírá z levé části napájecího zdroje a měří se ampérmetrem; proud nesmí přesáhnout 5 A.

1.4.3 Situace

V úloze jsou čtyři proměnné veličiny: proud I_m procházející cívkami elektromagnetu, proud I_L procházející vodičem v magnetickém poli, jeho délka l (v případě dvouzávitového vodiče její dvojnásobek?) a konečně síla \mathbf{F} působící na proudovodič. Které z těchto proměnných jsou nezávislé a která závisí na ostatních?

Výsledky měření budou jednak ve formě tabulek (nenázorné), jednak – a to bude vaším hlavním úkolem – ve formě grafů; na nich nejlépe můžete vidět, nakolik jsou hledané závislosti lineární, tedy nakolik jsou si měřené veličiny přímo úměrné.

V (dvourozměrném) grafu se vynáší závislost jedné veličiny na druhé; vliv třetí proměnné je možné zobrazit formou parametru: v grafu bude několik křivek naměřených hodnot, každá křivka pro jinou hodnotu třetí proměnné. Jak však zobrazit vztahy mezi čtyřmi proměnnými? V daném případě je výhodné, že délka vodiče je dána měřicím přípravkem ($12,5, 25$ a 50 resp. 100 mm),

délku vodiče proto je možné brát také jen jako parametr; výsledky měření pak budou na několika grafech.

1.4.4 Vlastní měření

Magnetizační proud I_m procházející vinutými elektromagnetu měňte v rozmezí od 0 do 1 A. Proud I_L tekoucí proudovodičem měňte od 0 do 5 A.

Váhy vždy vyvažte ve stavu, kdy vinutím elektromagnetu ani proudovodičem v přípravku proud neprochází ($I_m = I_L = 0$) – za tímto účelem jsou příslušné vodiče opatřeny vypínači. Váhy je třeba vyvážit po každé výměně přípravku s proudovodičem.

Velikost síly působící na proudovodič v tomto experimentu závisí na velikosti magnetické indukce (ta je úměrná proudu I_m), proudu I_L a délce proudovodiče l . Proměrní této závislosti můžete s minimem úsilí provést například níže uvedeným způsobem.

Pro jeden přípravek ($l = konst.$) a pět různých proudů I_m změřte závislosti $F = F(I_L)$, alespoň tři z těchto závislostí vynesete do společného grafu, kde proud I_m bude parametrem jednotlivých závislostí. Pomocí *týchž* naměřených hodnot¹ do druhého grafu vynesete alespoň tři závislosti $F = F(I_m)$, kde parametrem jednotlivých závislostí bude proud I_L .

V dalším kroku pro pevně nastavený proud I_L a I_m změřte závislost síly na délce proudovodiče, měření budete provádět pro každý z přípravků, tedy pro $l = 12,5, 25, 50$ a 100 mm. Do třetího grafu vynesete závislost $F = F(l)$.

Grafy můžete zpracovat například pomocí Univerzálního nástroje pro kreslení grafů, dostupného na adrese

<http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/grafy/grafy.php>

(nebo jakýmkoli jiným způsobem – ruční zakreslení na milimetrový papír nevyjímáje). V případě použití metody nejmenších čtverců data aproximujte přímkami (polynomy 1. řádu).

Poznámka: Všimněte si, jak snadno můžete zapříčinit nepřesné měření; stačí, aby se přírodní vodiče někde dotkly vahadla.

1.4.5 Výsledky měření, závěr

Fyzikální teorie, viz vztah (1.3) tvrdí, že velikost síly působící na proudovodič je přímo úměrná délce vodiče l , procházejícímu proudu I_L a velikosti (homogenní) magnetické indukce B v místě vodiče. Prozkoumejte získané grafy a uveďte, nakolik to odpovídá výsledkům vašich měření. Naměřené hodnoty nikdy nebudou odpovídat přesně přímým úměrnostem. Pokuste se proto objasnit (a v tom spočívá těžiště vaší práce) příčiny zjištěných odchylek.

1.5 Použitá literatura

Libovolný studijní text pro VŠ věnovaný elektromagnetickému poli.

29. ledna 2013, Karel Malinský, Milan Červenka, milan.cervenka@fel.cvut.cz

¹Proud I_L nastavujte např. v krocích 1 A, 2 A, 3 A, 4 A, 5 A pomocí omezovače proudu na zdroji, proud I_m pomocí pěti vybraných poloh karuselového přepínače. Tímto způsobem získáte celkem 25 hodnot síly F .