

Magnetické pole

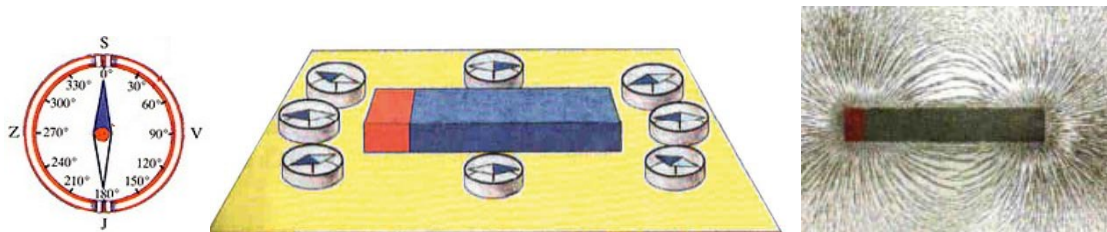
1. Magnetické dipóly

Zdroje magnetického poľa na makroskopickej úrovni sú dvoch druhov:

- i) tzv. permanentné magnety, napr. strelka kompasu alebo tyčový magnet
- ii) elektrický prúd

Na určenie veľkosti a smeru magnetického poľa sa používa vektor magnetickej indukcie – \mathbf{B} .

Jednotka magnetickej indukcie je Tesla – T. Priestorové rozloženie magnetického poľa



Obr. 1 Mapovanie indukčných čiar magnetického poľa buzolami a ocel'ovými pilinami. Severný pól strelky (označený modrou farbou) je priťahovaný k južnému pólu magnetu.

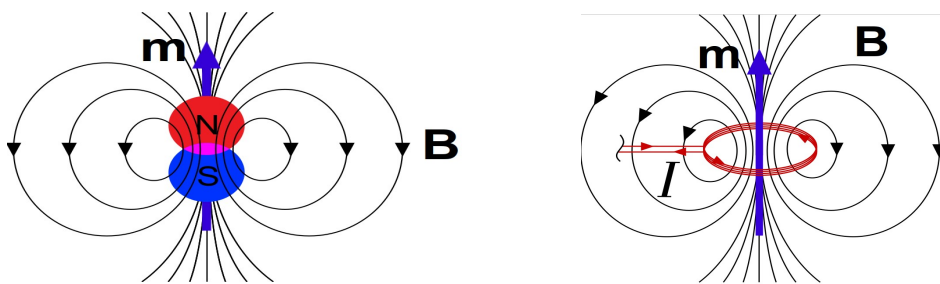
zobrazujeme sústavou priestorovo orientovaných kriviek, ktoré sa nazývajú magnetické indukčné čiary. Magnetická indukčná čiara je krivka, ktorej dotyčnica v danom bode má smer veľmi malej strelky buzoly (toto je aj smer vektora \mathbf{B}) umiestnenej v tomto bode (obr. 1). V miestach, kde je magnetické pole silnejšie, je vyššia hustota indukčných čiar. V prípade tyčového magnetu je pole najsilnejšie na oboch koncoch magnetu, ktoré nazývame severný a južný pól magnetu. K južnému pólu magnetu je priťahovaný severný pól strelky buzoly. Mimo magnetu je indukčná čiara orientovaná od severného k južnému pólu magnetu. Magnetické pole vieme zmapovať pomocou buzoly alebo železných pilín (obr. 1). Výsledok mapovania je pre prípad tyčového magnetu znázornený na obr. 2 vľavo. Takéto pole sa v limitnom prípade malého tyčového magnetu nazýva dipólové magnetické pole, ktoré je charakterizované magnetickým momentom m .

V prípade tyčového magnetu s dĺžkou l a magnetickým momentom m je magnetické pole magnetu B_M na jeho osi dané vzťahom (budeme ho potrebovať pri meraní)

$$B_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{l} \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] \quad (1)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ je permeabilita vákua, r_1 je vzdialenosť bližšieho konca magnetu od bodu na osi magnetu (dipólu), v ktorom určujeme magnetické pole a r_2 je vzdialenosť vzdialenejšieho konca magnetu.

Druhý spôsob generovania magnetizmu je vytvoriť elektrický prúd. Pomocou strelky buzoly sa môžeme presvedčiť, že v okolí vodiča s prúdom sa nachádza magnetické pole, ktoré vytvorili pohybujúce sa elektrické náboje vo vodiči. Ukazuje sa, že malá slučka, ktorou prechádza elektrický prúd (obr. 2 vpravo) vytvára vo svojom okolí dipólové magnetické pole rovnako ako malý tyčový magnet.



Obr. 2 Dipólové magnetické pole malého tyčového magnetu (vľavo) má rovnaký profil ako dipólové magnetické pole malej prúdovej slučky (vpravo). Zdroj: Wikipédia

V prípade slučky s plochou S , ktorou tečie prúd I , je veľkosť magnetického dipólového momentu m definovaná vzťahom

$$m = IS \quad (2)$$

Vieme, že oddeliť dva póly elektrického dipólu, ktorý je tvorený kladným a záporným elektrickým nábojom, nie je problém. Stačí od seba vzdialiť oba náboje. U magnetického dipólu sa to nedá. Ak by sme rozrezali tyčový magnet v snahe izolovať severný pól od južného, zistíme, že každá polovica rozrezaním opäť nadobudla dva póly a preto sme namiesto dvoch (mono)pólov dostali dva dipóly. Ak by sme dostatočne trpezlivo „krájali“ magnet ďalej, dostali by sme sa napokon až k jednotlivým atómom, ich jadrám a elektrónom. Zistili by sme, že hlavným zdrojom magnetizmu látok sú elektróny, elementárne častice, ktoré nesú záporný elektrický náboj.

Elektrón sa prekvapujúco stále správa ako magnetický dipól, hoci je to elementárna častica, ktorú už ďalej nevieme „prekrojiť“. Izolovaný magnetický pól pokiaľ vieme neexistuje. Najmenšia „jednotka“ magnetizmu je teda elektrón ako magnetický dipól. Veľkosť jeho vnútorného magnetického dipólového momentu je daná vzťahom

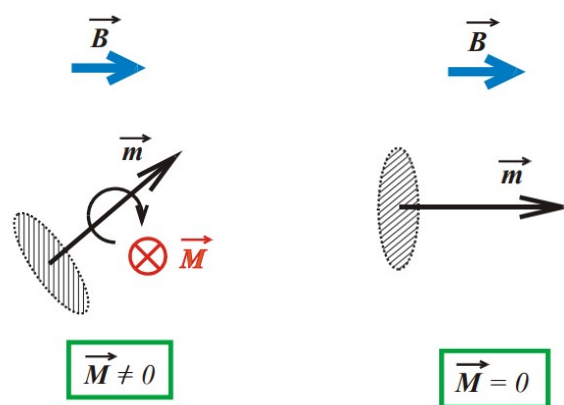
$$m = 9,28 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2 \quad (3)$$

2. Harmonické kmity magnetu v externom magnetickom poli

Na magnetický dipól s momentom m v externom magnetickom poli B (napr. v poli Zeme alebo iného magnetu) pôsobí moment sily M , ktorý možno vyjadriť ako

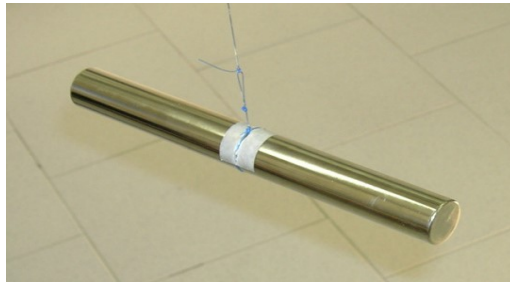
$$M = m \times B \quad (4)$$

Moment sily spôsobuje natáčanie dipólu (magnetky buzoly, tyčového magnetu či iných telies z feromagnetických látok) do smeru B (Obr. 3). V prípade, keď máme tyčový magnet s magnetickým momentom m zavesený na niti tak, že sa môže otáčať vo vodorovnej rovine okolo osi prechádzajúcej jeho ťažiskom (t.j. okolo nite, Obr. 4), tak sa otáčavý pohyb nekončí prvým natočením do smeru poľa B , ale pokračuje vplyvom zotrvačnosti ďalej, kým ho magnetický moment nedonúti vrátiť sa späť, čím v konečnom dôsledku vzniká kmitavý pohyb okolo smeru externého magnetického poľa, ktorý je postupne tlmený.



Obr. 3 Pôsobenie momentu sily M na magnetický dipól m v magnetickom poli B . Magnetický dipól sa otočí do smeru B , kde je moment sily nulový.

Podobný kmitavý pohyb pozorujeme pri kmitoch torzného kyvadla, ktoré vykonáva rovnaké kmity, avšak nie pôsobením magnetických síl, ale pružných deformačných síl v drôte, ktorý sa používa namiesto nite. Preto pri výbere nite musíme voliť nite s minimálnym torzným momentom.



Obr. 4 Tyčový magnet zavesený na niti v jeho ťažisku .

Ak magnet kmitá len pod vplyvom horizontálnej zložky magnetického poľa Zeme B_0 , pre malé kmity, t.j. malé uhlové výchylky magnetu φ (uhol medzi vektormi m a B_0) platí:

$$\varphi = \varphi_M \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

kde φ_M je amplitúda uhlovej výchylky, φ_0 je fázová konštanta a ω je kruhová frekvencia kmitov, ktorej zodpovedá perióda kmitov magnetu T

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{m B_0}} \quad (6)$$

kde J je moment zotrvačnosti magnetu vzhľadom k osi otáčania. V prípade tyčového magnetu s hmotnosťou m_m a dĺžkou l otáčajúceho sa okolo osi prechádzajúcej ťažiskom a kolmej na magnet je

$$J = \frac{1}{12} m_m l^2 \quad (7)$$

3. Magnetické pole Zeme

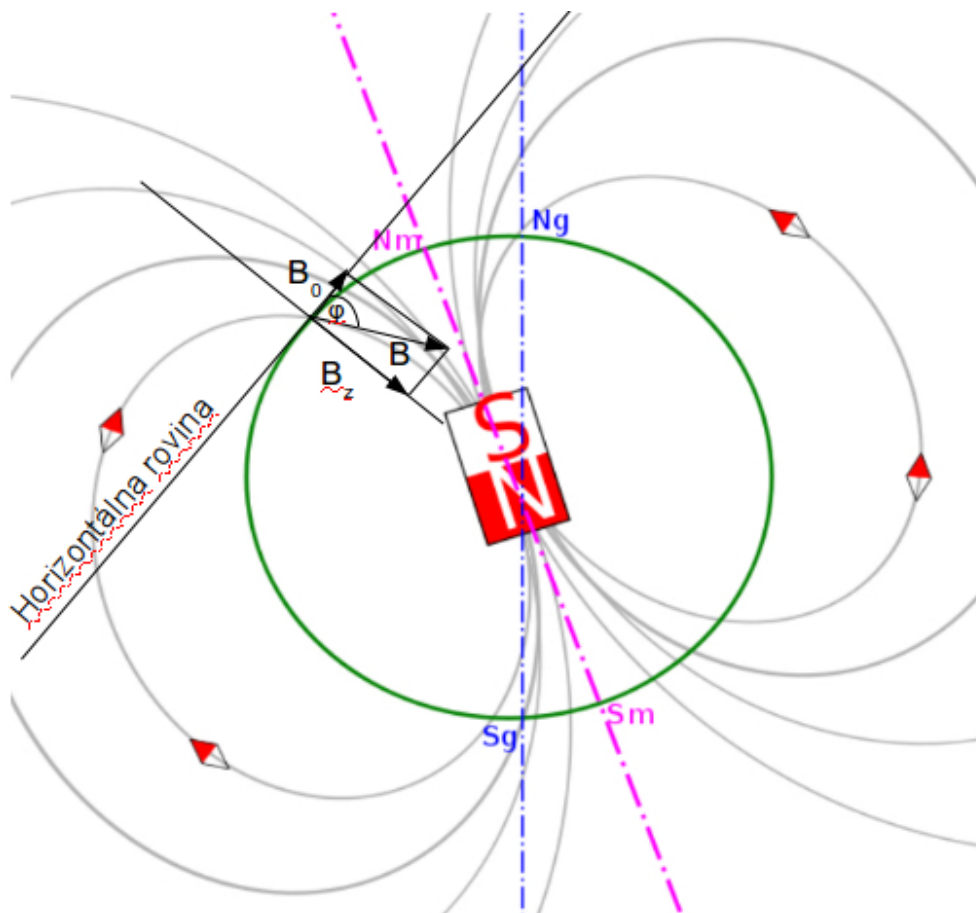
Vo vnútri, na povrchu a v priestore okolo Zeme existuje magnetické pole. Jeho zdroj sa nachádza v zemskom jadre. Železné jadro Zeme má dve časti. Pevná časť je obklopená horúcou tekutou vrstvou. Tečenie kvapalného železa (ktoré obsahuje elektricky nabitú ióny) v zemskom jadre

vytvára elektrické prúdy, ktoré generujú magnetické pole s charakteristickým dipólovým tvarom (Obr. 5).

Južný pól poľa (na obrázku ilustrovaný ako pól **S** myslenej magnetky) sa nachádza vo vnútri Zeme pod tzv. severným geomagnetickým pólom *Nm*, ktorý je odchýlený od severného zemepisného pólu *Ng* o približne 11 stupňov. Strelka kompasu teda neukazuje skutočný zemepisný sever, ale „magnetický“ sever definovaný pólom *Nm*.

V danom mieste povrchu má magnetické pole Zeme *B* zložky B_x (severná zložka), B_y (východná zložka) a B_z (zvislá zložka). Horizontálna zložka poľa Zeme je daná vzťahom

$$B_0 = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$



Obr. 5 Magnetické pole Zeme B v danom mieste povrchu má horizontálnu zložku B_0 a vertikálnu zložku B_z . Zdroj obr.: Wikipédia.

Uhol φ , ktorý zvierá pole Zeme B s horizontálnou rovinou sa nazýva magnetická inklinácia. Magnetické pole Zeme na Slovensku má (v r. 2015) nasledovné hodnoty

$$B_x = (20 \pm 1) \mu\text{T} \quad (\text{severná zložka}) \quad (8)$$

$$B_y = (2 \pm 1) \mu\text{T} \quad (\text{východná zložka})$$

$$B_z = (44 \pm 2) \mu\text{T} \quad (\text{vertikálna zložka})$$

$$B_0 = (20 \pm 1) \mu\text{T}$$

$$\varphi = 65 \pm 1 \text{ stupňa.}$$

Výsledné magnetické pole Zeme B (horizontálna plus vertikálna zložka) teda smeruje na Slovensku prudko do Zeme.

4. Určenie magnetického poľa Zeme pomocou kmitov tyčového magnetu a určenie magnetického momentu tyčového magnetu

Časť a) kmity magnetu

Popis zariadenia a metóda merania:

V tejto časti úlohy využijeme kmity tyčového magnetu v magnetickom poli Zeme opísané v sekcii 2. Magnet zavesíme na mäkkú niť s nízkym torzným momentom (obr. 4). Magnet vyvážíme tak, aby zaujal vodorovnú polohu. Magnet sa spontánne otočí do severojužného smeru.

Postup merania:

Pomocou rovnice (6) definujeme veličinu s_1 , ktorá bude dôležitá pre naše merania

$$s_1 = mB_0 = 4 \pi^2 \frac{J}{T^2} \quad (9)$$

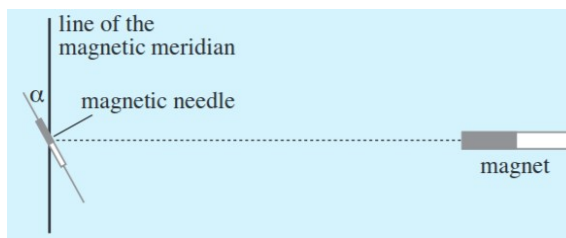
Na určenie veličiny s_1 potrebujeme poznať moment zotrvačnosti magnetu J a periódu kmitov T . Odváženíím magnetu nájdeme jeho hmotnosť m_m a zmeriame aj jeho dĺžku l . Moment zotrvačnosti J vypočítame zo vzťahu (7). Periódu T nájdeme tak, že necháme magnet kmitať s malou amplitúdou Φ_M a stopkami odmeriame čas potrebný na vykonanie 10 kmitov. Dbáme na to, aby podľa možnosti magnet kmital len v horizontálnej rovine (podľa potreby treba magnet vyvážiť) a aby nekmitala niť, na ktorej je magnet zavesený. Meranie 10 kmitov zopakujeme

aspoň desaťkrát a nájdeme priemernú dobu pre 10 kmitov T_{10} . Períodu T nájdeme ako $T_{10}/10$. Veličinu s_1 nájdeme zo vzťahu (9). Určíme chyby veličín J , T a s_1 .

Časť b) tyčový magnet vychýľuje strelku buzoly

Popis zariadenia a metóda merania:

V druhej časti merania použijeme kompas a tyčový magnet, ktoré umiestnime do horizontálnej roviny tak, že magnet bude smerovať kolmo na horizontálnu zložku magnetického poľa Zeme a os magnetu bude prechádzať stredom kompasu/strelky (Obr. 8).



Obr. 8 Schéma druhej časti merania

Po priblížení magnetu sa strelka buzoly otočí od severu o uhol α , v smere výsledného poľa, ktoré je v tomto prípade vektorovým súčtom horizontálnej zložky magnetického poľa Zeme B_0 a horizontálnej zložky poľa magnetu B_M , ktorej veľkosť je daná vzťahom (1). Keďže B_M je kolmé na B_0 , pre tangens uhla α platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_M}{B_0} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{m}{lB_0} \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] \quad (10)$$

Odtiaľto vieme vyjadriť pomer $s_2 = m/B_0$ ako

$$s_2 = \frac{m}{B_0} = \frac{l \operatorname{tg} \alpha}{\frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right]} \quad (11)$$

Postup merania a vyhodnotenie:

Tyčový magnet umiestnime 50-60 cm od buzoly. Zmeriame vzdialenosti jeho bližšieho konca r_1 a vzdialenejšieho konca r_2 od stredu buzoly/strelky a uhlovú odchýlku α . Chyby týchto veličín odhadneme pomocou najmenšieho dielika príslušného meradla. Magnet priblížime o cca 5-10 cm k buzole a meranie zopakujeme. Merania urobíme pri 5-10 rôznych vzdialenostiach magnetu od kompasu. Príslušné hodnoty s_2 pre každú polohu magnetu nájdeme z rovnice (11). Výslednú hodnotu s_2 nájdeme ako váhovaný priemer 5-10 meraní a určíme aj chybu váhovaného priemeru σ_{s_2} .

Vyhodnotenie častí a) a b):

Po nájdení veličín s_1 a s_2 (rovnice (9) a (11)) vypočítame horizontálnu zložku poľa Zeme B_0 a magnetický moment magnetu m nasledovne

$$B_0 = \sqrt{\frac{s_1}{s_2}}, \quad m = \sqrt{s_1 s_2} \quad (12)$$

Vypočítame aj chyby týchto veličín. Naše výsledky porovnáme s tabuľkovou hodnotou magnetického poľa Zeme (rovnica (8)).

Magnetický moment magnetu porovnáme s magnetickým dipólovým momentom elektrónu (vzťah (3)). Odhadneme tiež plochu S prierezu magnetu a využijeme vzťah (2) na výpočet prúdu $I = m/S$, ktorý by musel tiecť prúdovou slučkou s plochou S , aby mala rovnaký magnetický moment m ako náš magnet.

5. Určenie horizontálnej zložky magnetického poľa Zeme pomocou tangentovej buzoly a kruhového závitú s prúdom

Horizontálnu zložku poľa Zeme vieme určiť nezávislým spôsobom, keď namiesto tyčového magnetu použijeme prúdovú slučku vo forme kruhového závitú s polomerom R , ktorým prechádza prúd I . Ako už vieme, prúdová slučka generuje vo svojom okolí magnetické pole. V strede závitú pole smeruje kolmo na rovinu závitú a jeho veľkosť je

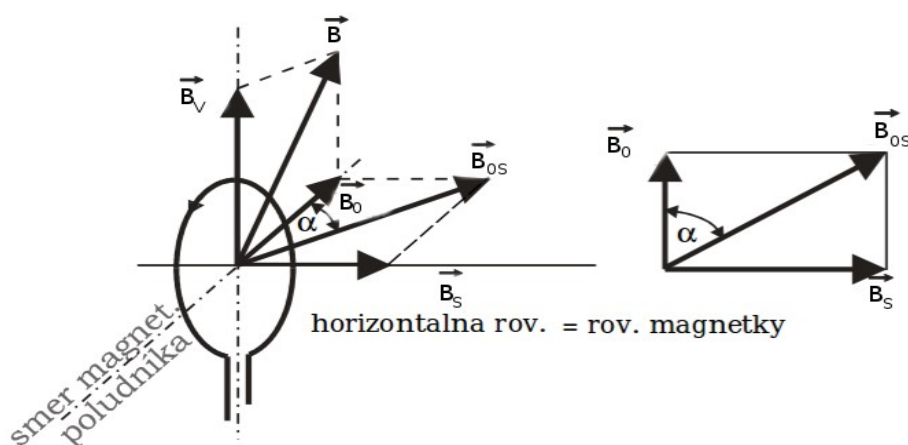
$$B_s = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (13)$$

Do stredu kruhového závitú umiestnime natrvalo buzolu a natočíme ju tak, aby na uhľomernom kruhu ukazovala na sever (resp. na nulu uhľomerného kruhu). Kruhový závit natočíme tak, aby jeho rovina bola totožná s rovinou miestneho magnetického poludníka.

Ak bude kruhovým vodičom pretekať elektrický prúd I , vychýli sa magnetka buzoly o uhol α .

Vektor B_{0s} na obr. 9 znázorňuje horizontálnu zložku vektora indukcie výsledného magnetického poľa. Z obr. 9 je zrejmé, že ak poznáme uhol α a pole B_s , môžeme určiť horizontálnu zložku poľa Zeme zo vzťahu

$$B_0 = \frac{B_s}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (14)$$



Obr. 9 Magnetické pole Zeme $B = B_V + B_0$ a kruhového závitú B_s . V horizontálnej rovine sa skladá B_0 s B_s ako $B_{0s} = B_0 + B_s$

Úlohy:

1. Určiť veľkosť horizontálnej zložky intenzity magnetického poľa Zeme.
2. Určiť chybu tejto veličiny.
3. Určiť relatívnu odchylku od tabuľkovej hodnoty.

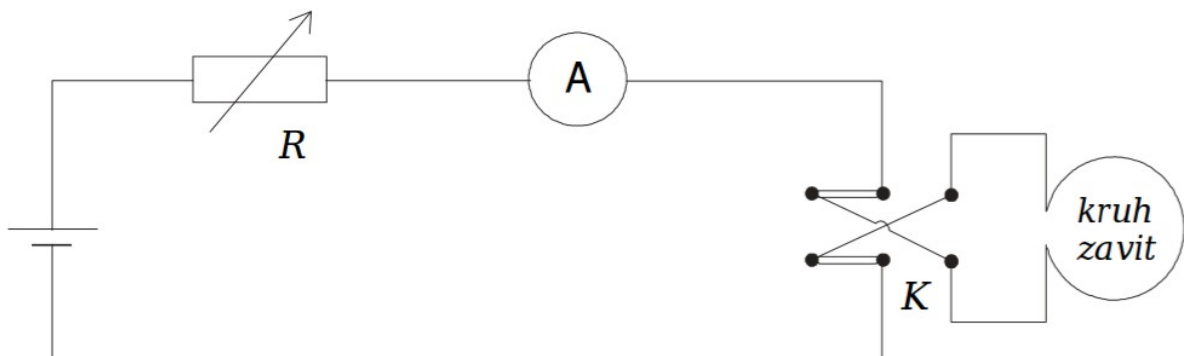
Postup merania a vyhodnotenie výsledkov:

1. Buzolu s magnetkou a uhľomerným kruhom v horizontálnej rovine umiestnime do stredu kruhového vodiča. Rovina kruhového vodiča nech je totožná s rovinou miestneho magnetického poludníka (magnetka leží v rovine závitú), uhľomerný kruh natočíme tak, aby magnetka ukazovala na nulu.
2. Kruhový vodič zapojíme do obvodu s jednosmerným elektrickým prúdom cez komutátor podľa obr. 10.

3. Kruhovým vodičom necháme prechádzať elektrický prúd I jedným smerom a určíme odchylku magnetky od pôvodného (severo-južného) smeru na jednom jej konci α_1 a na druhom konci α_2 .
4. Zachováme veľkosť elektrického prúdu, ale zmeníme jeho smer (zmenu urobíme komutátorom), odmeriame odchylky magnetky na opačnú stranu od roviny miestneho magnetického poludníka t. j. α_1' a α_2' .
5. Merané hodnoty zapisujeme do tabuľky:

| Číslo merania | I [A] | α_1 | α_2 | α_1' | α_2' | α | B_0 [T] |
|---------------|---------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------|
| | | | | | | | |

6. Pre dosadenie do (2) určíme z výchyliek $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_1'$ a α_2' aritmetický priemer α . Týmto spôsobom eliminujeme chyby vzniknuté nepresným určením nulovej polohy a vplyv rušivých magnetických polí.
7. Meranie opakujeme aspoň 10-krát pre rôzne hodnoty prúdu I a vypočítame pre každú hodnotu prúdu magnetickú indukciu B_0 a jej aritmetický priemer a chybu aritmetického priemeru.
8. Nakoniec porovnajme nameranú hodnotu s tabuľkovou hodnotou.



Obr. 10 Jednoduchý obvod na vytvorenie prúdu v kruhovom závite a jeho meranie