

Meno a priezvisko:

Škola:

Predmet:

Školský rok/blok:

Skupina:

Trieda:

Dátum:

Bilingválne gymnázium C. S. Lewisa, Beňadická 38, Bratislava

Fyzika

/

Teória

Magnetické pole

Stacionárne magnetické pole

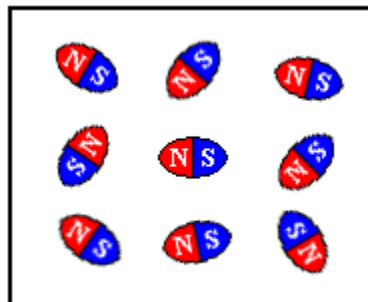
1.1.7 Látky v magnetickom poli

Veľkosť magnetickej indukcie cievky je závislá od permeability prostredia v ktorom sa cievka nachádza, resp. ktorým je tvorené jej jadro. Preto je magnetická indukcia cievky navinutej na uzatvorenom oceľovom jadre väčšia ako magnetická indukcia rovnakej cievky bez jadra.

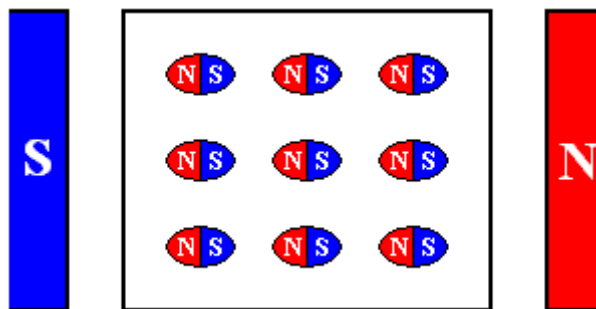
Hodnota relatívnej permeability je určená vlastnosťami atómov, z ktorých je látka zložená. Tento poznatok bol známy už Ampérovi, ktorý tvrdil, že magnetické vlastnosti látok určujú elektrické prúdy vo vnútri týchto látok.

Zjednodušený model si môžeme predstaviť nasledovne: elektróny v atómoch vytvárajú elementárne magnetické polia, ktoré sa skladajú a vytvárajú výsledné magnetické pole atómu. Podľa usporiadania elektrónov v atóme delíme magnetické látky do troch skupín:

1. **Diamagnetické látky** sa skladajú z diamagnetických atómov a majú relatívnu permeabilitu o málo nižšiu ako 1 ($\mu_r < 1$). To znamená, že tieto látky mierne zoslabujú magnetické pole. Patria sem inertné plyny, zlato, meď, ortuť, **Diamagnetické látky sa od magnetu odpudzujú.**
2. **Paramagnetické látky** sú zložené z paramagnetických atómov a ich permeabilita je o niečo väčšia ako 1, tj. $\mu_r > 1$. Tieto látky mierne zosilňujú magnetické pole (draslík, sodík, hliník, ...). Atómy týchto látok majú vlastné magnetické pole. Vonkajším magnetickým poľom je možné usporiadať ich tak, aby došlo k súhlasnej orientácii magnetických polí jednotlivých atómov, a tým aj k značnému zosilneniu magnetického poľa v materiáli. V skutočnosti ale tento stav nenastáva – bráni mu v tom **tepelný pohyb**. Magnetické pole v paramagnetickej látke nie je možné zosilniť ani vonkajším poľom s veľmi veľkou magnetickou indukciou. **Paramagnetická látka sa k magnetu priťahuje a bude sama priťahovať drobné kovové predmety (kancelárske spinky, ...) len v prípade, že bude v blízkosti magnetu. Paramagnetickú látku nie je možné zmagnetizovať trvale.**
3. **Feromagnetické látky** sú zložené tiež z paramagnetických atómov, ale v takom usporiadaní, že výrazne zosilňujú magnetické pole. Ich relatívna permeabilita je oveľa väčšia ako 1 ($\mu_r \gg 1$). Už slabým magnetickým poľom je možné u nich vyvolať také usporiadanie atómov, že sa magnetické pole zosilní a dôjde k zmagnetovaniu látky. Magnetické pole vo feromagnetickkej látke zostáva aj po zaniknutí vonkajšieho poľa. Príčinou magnetizácie látky je pôsobenie tzv. **výmenných síl** susednými atómami. Ich vplyvom nastáva aj bez vonkajšieho magnetického poľa súhlasné usporiadanie magnetických polí v malej oblasti látky. Pri tejto **spontánnej (samovolnej) magnetizácii** vznikajú v látke zmagnetované mikroskopické oblasti (ich objem je približne $10^{-3} - 10 \text{ mm}^3$), ktoré nazývame **magnetické domény**. Ich orientácia je náhodná. Pôsobením vonkajšieho magnetického poľa sa tieto domény orientujú súhlasne a látka získava vlastnosti



magnetu. Pri tomto jave sa objem domén postupne zväčšuje, až sa pri ich súhlasnom usporiadaní doménová štruktúra stráca – látka je magneticky nasýtená. **Feromagnetickú látku je možné zmagnetovať trvale: napríklad ak priložíme permanentný magnet k skrutkovaču alebo nožíku, začne priťahovať drobné kovové predmety (kancelárske spinky, šróbiky, ...). Feromagnetická látka je tvorená rovnakým druhom atómov ako látka paramagnetická, líšia sa ale v inom usporiadaní atómov a teda aj v inom vzájomnom silovom pôsobení.**



Štruktúru paramagnetickej látky sme zobrazili na prvom obrázku. Zmagnetované oblasti sú ale v paramagnetickej oblasti výrazne menšie ako v látke feromagnetickej – v látke paramagnetickej sa jedná len o jednotlivé atómy, zatiaľ čo v látke feromagnetickej ide o „zhluky“ atómov. Navyše tieto oblasti nie je možné v paramagnetickej látke usporiadať v smere vonkajšieho magnetického poľa (ako u feromagnetickej látky – druhý obrázok); tomuto preusporiadaniu bráni tepelný chaotický pohyb častíc látky.

Počet feromagnetických látok nie je veľký, napriek tomu majú značný praktický význam: vyrábajú sa z nich jadrá cievok v elektromagnetoch, transformátoroch, elektrických strojoch,

Základné vlastnosti feromagnetických látok

1. Feromagnetizmus sa prejavuje len vtedy, ak je látka **v kryštalickom stave** – v kvapalnom alebo plynnom stave sa správajú látky ako paramagnetické. **Feromagnetizmus je teda vlastnosťou štruktúry, nie jednotlivých atómov.**
2. Pre každú feromagnetickú látku existuje určitá teplota – tzv. **Curieho teplota**. Po jej prekročení látka stráca feromagnetické vlastnosti a stáva sa látkou paramagneticou.

Pri prekročení Curieho teploty (je to spravidla rádovo niekoľko stovák °C) je tepelný pohyb tak intenzívny, že sa vzniknuté magnetické domény rozpadajú na jednotlivé atómy.

Ak chcete zničiť magnet, vhodte ho do ohňa. Ak ho necháte chladnúť bez prítomnosti magnetického poľa, získate kus nemagnetického materiálu. Ak ho opäť zahrejete na Curieho teplotu a necháte ho opäť vychladnúť – ale v magnetickom poli, získate opäť magnet.

Vzniku domén totiž bráni vnútorný tepelný pohyb častíc. Preto sa tieto domény jednoduchšie vytvoria v prítomnosti vonkajšieho magnetického poľa. Pred opätovným vytvorením magnetických domén je nutný ohrev na Curieho teplotu preto, aby sa intenzívnym tepelným pohybom rozpadli zvyšky magnetických domén, ktoré mohli v štruktúre látky zostať z predošlého magnetovania. Bez ohrevu na Curieho teplotu by bolo nutné použiť veľmi silné magnetické pole.

K natočeniu domén je nutné dodať určitú energiu, je nutné vykonať určitú prácu. A túto energiu je možné získať ohriatím materiálu (častice a domény začnú intenzívnejšie vibrovať a je teda jednoduchšie preklopiť ich do požadovanej polohy) alebo silným magnetickým poľom (magnetická sila sa bude snažiť domény natočiť tak, aby boli v energeticky výhodnom stave).

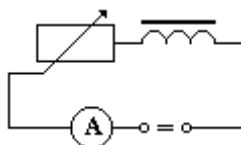
Medzi feromagnetické látky patria tiež **ferimagnetické látky (ferity)** – zlúčeniny Fe_2O_3 s oxidmi iných kovov (Mn, Ba, ...). Majú omnoho väčší elektrický odpor ako kovové feromagnetické látky, a preto našli široké uplatnenie v praxi (slaboprúdová elektrotechnika, permanentné magnety, ...).

1.1.8 Magnetická hysterézia

Pre veľkosť magnetickej indukcie veľmi dlhej cievky platí vzťah:

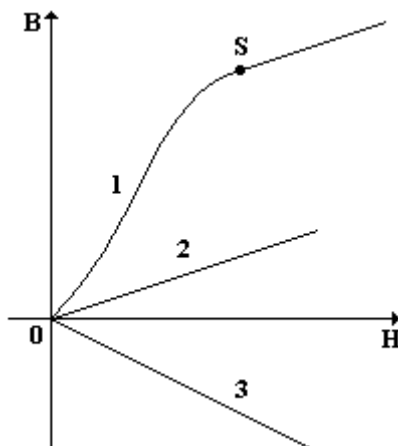
$$B = \mu_0 \mu_r \frac{N.I}{l} = \mu \frac{N.I}{l} = \mu.H$$

kde $H = \frac{N.I}{l}$ je **intenzita magnetického poľa**; $[H] = A.m^{-1}$. Je to vektorová fyzikálna veličina, ktorej vektor má (v izotropnom prostredí – v prostredí, ktoré má vo všetkých smeroch rovnaké vlastnosti) rovnaký smer ako vektor magnetickej indukcie. Relatívna permeabilita feromagnetických látok nie je konštantná, ale závisí na veľkosti intenzity magnetického poľa. Závislosť $B = \mu_0 \mu_r H$ nie je lineárna.

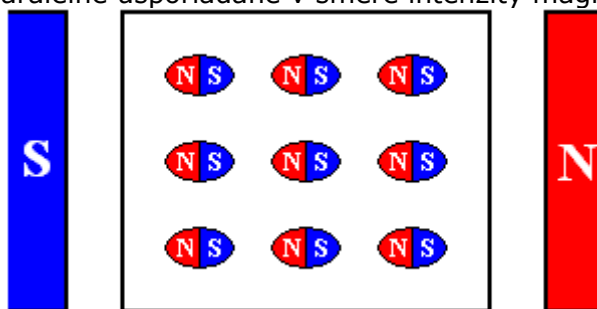


Ak budeme v uvažovanej cievke s magnetickým jadrom z feromagnetической látky (podľa schémy zapojenia) postupne zväčšovať prúd z nulovej hodnoty, bude sa magnetická indukcia v jadre zväčšovať v závislosti na zväčšujúcej sa intenzite magnetického poľa.

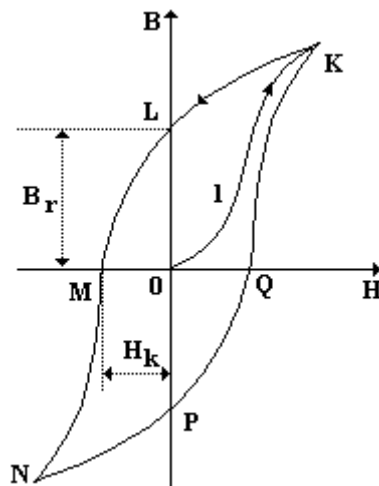
Veľkosť magnetickej intenzity je daná vzťahom $H = \frac{N.I}{l}$, to znamená, že magnetická intenzita sa mení v závislosti na zmene prúdu. Počet závitov cievky N a jej dĺžka l zostávajú konštantné. Opisujeme závislosť magnetickej indukcie od prúdu, ktorý preteká cievkou.



Grafom tejto závislosti je krivka prvotnej magnetizácie, ktorá je zobrazená na obrázku (krivka č.1). Bod S na tejto krivke zodpovedá magnetickému nasýteniu látky. To je stav, pri ktorom sú magnetické domény paralelne usporiadané v smere intenzity magnetického poľa $\vec{H}$.



Ďalšie zväčšovanie magnetickej indukcie za bod S je spôsobené zväčšovaním magnetickej indukcie poľa samotnej cievky (tj. už ďalej sa neuplatní vplyv feromagnetického jadra) – krivka č.2. Krivka č.3 znázorňuje diamagnetickú látku.



Pri znižovaní veľkosti intenzity magnetického poľa (teda pri znižovaní prúdu, ktorý tečie cievkou) sa znižuje i veľkosť magnetickej indukcie. Grafom závislosti je krivka KL , ktorá hovorí o **nevratnosti magnetizačných procesov vo feromagnetických látkach**. Na obrázku je zakreslený celý graf.

Po dosiahnutí nulovej hodnoty intenzity magnetického poľa neklesne veľkosť magnetickej indukcie na nulovú hodnotu, ale na hodnotu B_r . Látka je teda zmagnetizovaná i bez pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa. Magnetická indukcia $\vec{B}_r$ sa nazýva **remanentná (zbytková) magnetická indukcia**. Ak zmeníme smer vektora intenzity magnetického poľa na opačný (tj. obrátíme smer prúdu v cievke), bude sa s ďalším zväčšovaním prúdu tečúcim cievkou (teda aj so zväčšovaním veľkosti magnetickej intenzity) znižovať veľkosť magnetickej indukcie (časť krivky LM).

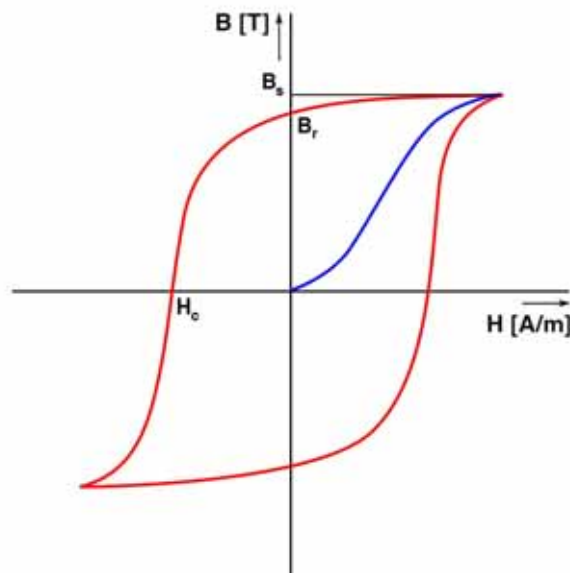
Ak dosiahneme veľkosť intenzity magnetického poľa hodnoty H_k (tzv. **koercitívna intenzita magnetického poľa**), klesne veľkosť magnetickej indukcie v látke na nulu (bod M). Pri ďalšom zväčšovaní intenzity magnetického poľa (a teda aj prúdu prechádzajúceho cievkou) sa vzorka magnetizuje opačne až do nasýtenia (bod N). Po dosiahnutí bodu N začneme intenzitu magnetického poľa opäť znižovať (ako v predošlom prípade) a po dosiahnutí jej nulovej veľkosti zmeníme opäť smer prúdu v cievke a dostaneme sa do bodu K (časť krivky $NPQK$). Tým je jeden magnetizačný cyklus uzatvorený.

Opísaný jav sa nazýva **magnetická hysterézia** a krivka $KLMNPQK$ **hysterézna slučka**.

Hysterézna slučka je dôležitou charakteristikou feromagnetických látok – dajú sa z nej určiť hodnoty B_r a H_k , je možné odhadnúť tzv. **hysterézne straty**, ktoré sú príčinou **nežiadúceho zahrievania feromagnetických látok pri ich striedavej magnetizácii** (zahrievanie ocelových jadier transformátorov, ...). Hysterézne straty sú priamo úmerné obsahu plochy ohraničenej hysteréznu slučkou.

Podľa tvaru krivky delíme látky na:

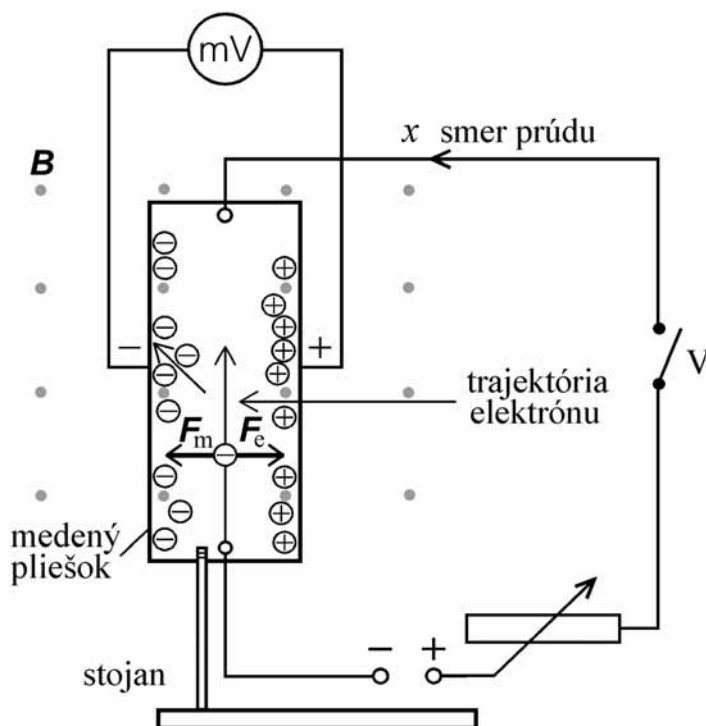
1. **Magneticky tvrdé** – majú širokú hysteréznou slučku, veľkú hodnotu B_r a sú preto viac odolné voči zmagnetovaniu (ocel s vysokým obsahom uhlíka, ...). Po zrušení vonkajšieho magnetického poľa zostávajú naďalej zmagnetizované a správajú sa ako permanentný magnet. Ich magnetické pole je možné zrušiť pomocou vonkajšieho magnetického poľa opačnej polarizácie (napríklad do cievky s jadrom zavedieme prúd opačného smeru).
2. **Magneticky mäkké** – materiály s úzkou hysteréznu slučkou, ktoré sa dajú ľahko zmagnetizovať (magnetofónové pásky, diskety, ...). Majú malú B_r , čo znamená, že po zrušení vonkajšieho magnetického poľa ich vlastné magnetické pole prakticky zaniká.



1.1.10 Hallov jav

V článku 1.2 sme sa zaoberali magnetickou silou, ktorá v magnetickom poli pôsobí na vodič s prúdom. Teraz nás bude zaujímať odpoveď na otázku, ktorá s pôsobením magnetickej sily súvisí:

Pôsobí magnetické pole magnetickou silou priamo na vodič alebo na elektrické náboje, ktoré konajú usmernený pohyb, a tak vytvárajú elektrický prúd?



Obr. 1-12

Experiment znázorňujúci Hallov jav. V stojane je upevnený kovový pliešok, ktorým prechádza prúd zo zdroja napätia. Ak sa pliešok nachádza v magnetickom poli, milivoltmeter pripojený na jeho zvislé okraje meria Hallovo napätie. (Indukčné čiary magnetického poľa vstupujú z nákresne.)

Odpoveď na túto otázku by mohol dať experiment znázornený na obr. 1-12: Tenký kovový pliešok je upevnený v stojane a vložený do magnetického poľa (na obrázku jeho indukčné čiary vstupujú z nákresne). Pliešok je súčasťou elektrického obvodu, ktorým prechádza prúd.

Ak sa pliešok nachádza v magnetickom poli a prechádza ním vo zvislom smere prúd, citlivý voltmeter pripojený na zvislé protilahlé okraje pliešku odmeria napätie, ktoré označíme U_H . Ak magnetické pole odstránime, napätie nepozorujeme, $U_H = 0$. Jav prvý raz opísal E. H. HALL v roku 1879 a po ňom je aj pomenovaný –**Hallov jav**.

Poznámka

Pre Hallovo napätie U_H odvodil jeho objaviteľ vzťah

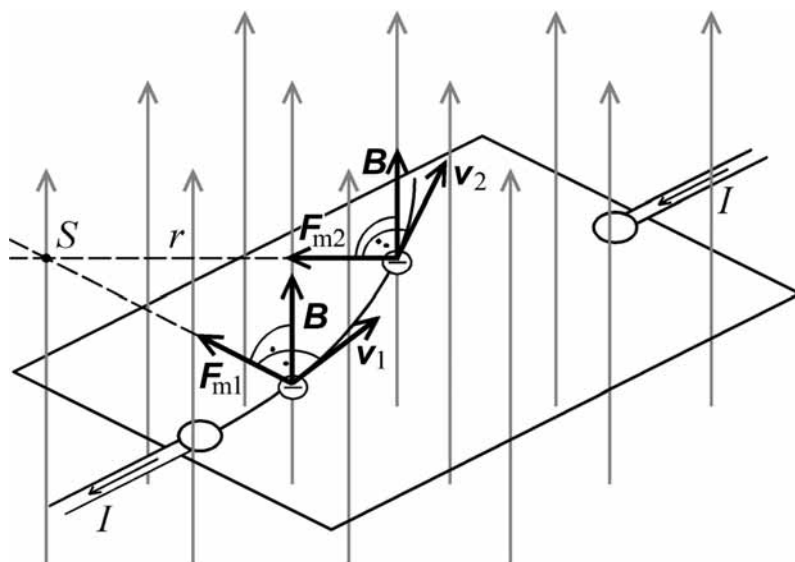
$$U_H = \frac{1}{nQ} \frac{BI}{d} \quad (1)$$

v ktorom n je počet voľných nábojov v jednotke objemu vodiča, Q je elektrický náboj jednotlivéj častice, ktorá sprostredkuje vedenie prúdu (napr. elektrónu) a d je hrúbka pliešku pri pokuse na obr. 1-12.

Pokúsme sa o vysvetlenie javu:

Ihneď po zapnutí vypínača V sa v pliešku rozložia elektrické náboje tak, ako je to naznačené na obr. 1-12. Príčinou nahromadenia záporného náboja na ľavom okraji pliešku je zrejme magnetická sila, ktorá pôsobí v smere sprava doľava na pohybujúce sa elektróny. Na pravom okraji pliešku je nedostatok voľných elektrónov, čo sa prejaví ako kladný náboj.

Medzi pravým a ľavým okrajom pliešku vznikne elektrické pole, v ktorom na ďalšie elektróny pri ich usmernenom pohybe pôsobí elektrická sila zľava doprava. Nakoniec sa rozloženie nábojov na pliešku ustáli tak, že magnetická sila F_m a elektrická sila F_e , ktoré pôsobia na pohybujúci sa elektrón v navzájom opačných smeroch, sú v rovnováhe a plieškom prechádza v pozdĺžnej osi pliešku ustálený prúd.



Obr. 1-13

Idealizovaná trajektória elektrónu pri vzniku Hallovho javu

Experiment, ktorý sme práve opisali, dáva odpoveď aj na otázku, ktorú sme si položili na začiatku. Boli sme zvedaví či *magnetické pole pôsobí len na vodič s prúdom alebo na elektrické náboje, ktoré prúd vytvárajú*. Magnetické sily pôsobia na pohybujúce sa náboje. Ak sa pri tom náboje nachádzajú vo vodiči a svojím usmerneným pohybom vytvárajú elektrický prúd, prenáša sa toto silové pôsobenie aj na vodič.

Vráťme sa teraz k experimentu na [obr. 1-12](#) a uvažujme, aký tvar má trajektória elektrónu, ktorý sa pohybuje v magnetickom poli.

Na [obr. 1-13](#) je znázornený náš pliešok z pokusu s Hallovým javom a v ňom idealizovaná trajektória elektrónu. Zobrazené elektróny vytvárajú elektrický prúd, ktorého dohodnutý smer je práve opačný než smer pohybu elektrónov. Vektor rýchlosti $\mathbf{v}$ leží v každom bode trajektórie v jej dotyčnici a vektor $\mathbf{B}$, magnetickej indukcie je naň kolmý. Ak teraz použijeme Flemingovo pravidlo ľavej ruky a položíme prsty proti smeru pohybu elektrónov, magnetická sila $\mathbf{F}_m$ by teda mala byť v každom bode trajektórie kolmá na vektor $\mathbf{v}$, aj na vektor $\mathbf{B}$.

Na pohybujúci sa elektrón teda pôsobí v každom bode trajektórie *sila, ktorá leží v rovine pohybu a je kolmá na vektor rýchlosti*. S takto pôsobiacou silou sme sa už stretli pri pohybe po kružnici: Na hmotný bod pohybujúci sa po kružnici pôsobí dostredivá sila, kolmá v každom bode trajektórie na vektor rýchlosti.

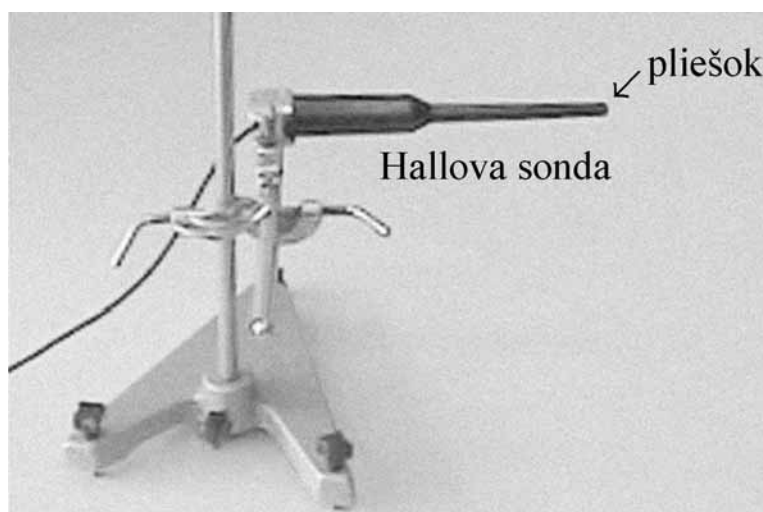
V homogénnom magnetickom poli by sa teda elektróny mali pohybovať po kružnici a magnetická sila F_m by mala byť dostredivou silou tohto pohybu.

Trajektórie elektrónov v kovovom pliešku sa pri ich usmernenom pohybe v magnetickom poli zakrivujú. Zrejme sa však nemôžeme domnievať, že sú to hladké kružnice. Elektrón v kove sa v skutočnosti pohybuje v mriežke, ktorú tvoria atómy kovu a tie ovplyvňujú tvar jeho trajektórie. Preto trajektória elektrónu v magnetickom poli znázornená na [obr. 1-13](#) je len ideálna predstava o pohybe elektrónu v magnetickom poli bez zrážok s prekážkami.

Meranie magnetickej indukcie

Veľkosť magnetickej sily, ktorá pôsobí na vodič s prúdom, závisí od veľkosti magnetickej indukcie. Preto od magnetickej indukcie podľa závisí aj vychýľovanie elektrónov v pliešku a potom aj Hallovo napätie U_H . Táto závislosť sa využíva pri meraní veľkosti magnetickej indukcie. Pliešok s malými rozmermi sa zabuduje do hrotu sondy (pozri [obr. 1-14](#)), ktorá sa potom môže vkladať do tých miest magnetickeho poľa, v ktorých chceme odmerať veľkosť magnetickej indukcie.

Hallovo napätie U_H sa privádza na citlivý milivoltmeter, ktorého stupnica je spravidla vynesená v dielikoch hodnôt magnetickej indukcie – v jednotkách militesla (mT). Voltmeter s takouto stupnicou sa nazýva **teslameter**. (Pozri príklad merania Hallovou sondou na [obr. 1-10](#) v predchádzajúcom článku.)



Obr. 1-14

Hallowa sonda na laboratórnom stojane. Namiesto kovového pliešku sa dnes používajú tenké doštičky z polovodičových materiálov. Doštička je zabudovaná v hrote sondy tak, že jej rovina je kolmá na jej pozdĺžnu os.

Úlohy

1. Na [obr. 1-13](#) je znázornená trajektória zápornej elektrickej častice – elektrónu v magnetickom poli.
 - a) Ako by sa pohybovala v magnetickom poli častica s kladným elektrickým nábojom? Nakreslite obrázok.
 - b) Pokúste sa vysloviť pravidlo (ľavej ruky) pre smer magnetickej sily, ktorá pôsobí na časticu s kladným nábojom.
2. Vyslovte pravidlo o smere sily, ktorá v magnetickom poli pôsobí na pohybujúcu sa časticu so záporným nábojom. Vyhľadajte informácie o tom, ako rýchle sa pohybujú náboje v rôznych vodičoch.
3. Experiment na [obr. 1-12](#) vyzerá jednoducho a zdá sa byť aj jednoducho realizovateľný. Nezodpovedá to skutočnosti. Presvedčte sa o tom a vypočítajte Hallovo napätie U_H (podľa vzťahu (1) na str. 26) v medenom pliešku pri pokuse na [obr. 1-12](#). Koncentrácia voľných elektrónov v medi je $1,2 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$, hrúbka pliešku je 0,1 mm, plieškom prechádza prúd 2 A. Pokus sa koná v magnetickom poli s magneticou indukciou 1,0 T.

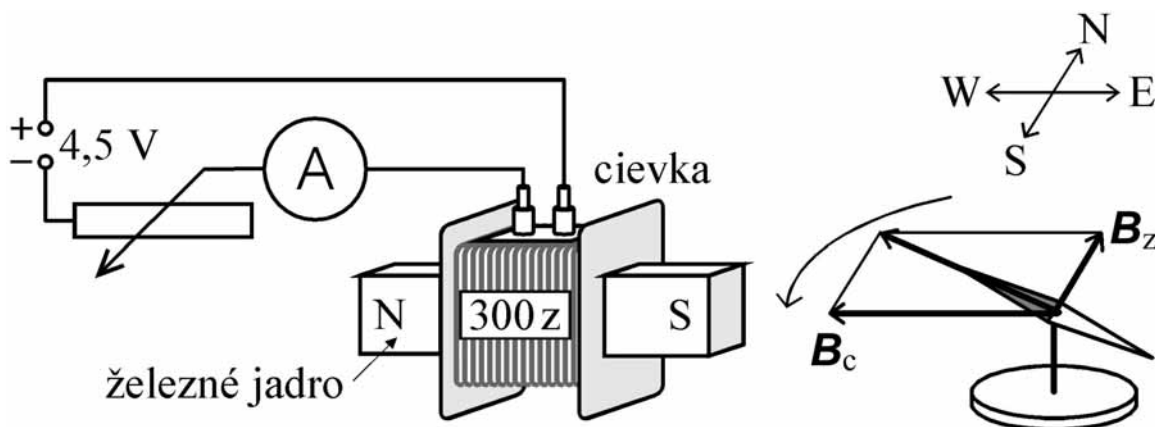
Vysvetlite, či by sa meranie Hallovho napätia v magnetickom poli so známou magneticou indukciou dalo využiť pri meraní koncentrácie voľného náboja vo vodičoch a ako citlivé by potom museli byť meracie prístroje napätia.

1.1.11 Látky v magnetickom poli

Dosiaľ sme uvažovali o magnetických javoch, ktoré sa odohrávali vo vzduchu alebo vo vákuu. Tým sme si väčšinu skúmaných javov do istej miery zjednodušili. Vákuum a do značnej miery aj vzduch sú prostredia, ktoré na tieto javy podstatne neovplyvňujú. Urobme si najprv experiment, ktorý by mal ukázať vplyv látky na vlastnosti magnetickeho poľa. Za látku, ktorou sa budeme usilovať pole ovplyvniť, si zvolíme železo.

Tak ako väčšina našich doterajších experimentov ani tento nebude príliš zložitý. Budeme k nemu potrebovať cievku – najlepšie takú, aké sa používajú v školskom laboratóriu, napr. s 300 alebo so 600 závitmi, železné jadro prispôbené na vsunutie do dutiny cievky, zdroj elektromotorického napätia (môže byť aj plochá, suchá batéria, s napätím 4,5 V), ampérmeter a reostat.

Experiment na obr. 1-25 vykonáme najprv s cievkou bez železného jadra. Pokiaľ obvodom a cievkou neprechádza prúd, magnetka sa nachádza len v magnetickom poli Zeme a smeruje k severnému geomagnetickému pólu. Po uzavretí obvodu sa magnetka sčasti vychýli smerom k cievke. Cievka je zapojená tak, aby indukčné čiary magnetického poľa, ktoré vytvára vstupovali do jej dutiny na strane obrátenej k magnetke.



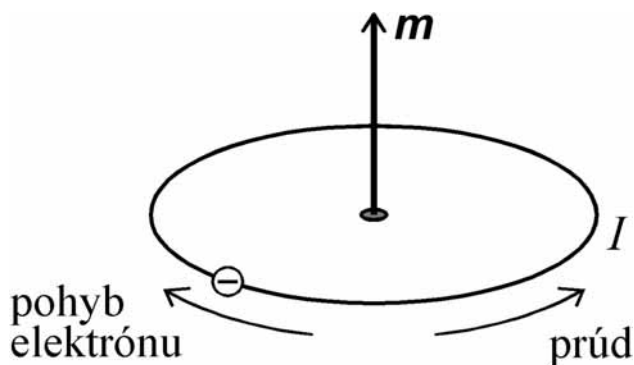
Obr. 1-25

Schéma experimentu s vplyvom železného jadra na magnetické pole cievky

Po ustálení magnetky pokračujeme v experimente. Do dutiny cievky vsunieme železné jadro. Ak železo vplýva na vlastnosti magnetického poľa cievky očakávame, že výchylka magnetky sa teraz zmení. Skutočne je tomu tak – po vsunutí jadra do cievky sa magnetka odkloní ešte viac od severojužného smeru.

Pokúsme sa o vysvetlenie: Môžeme sa domnievať, že železné jadro sa zmagnetizuje – stane sa v magnetickom poli cievky magnetom, ktorý svojím vlastným poľom prispieva k magnetickému poľu cievky. Po vsunutí jadra do cievky sa veľkosť B_C magnetickej indukcie cievky v mieste magnetky zväčší. Mali by sme si teda položiť otázku: Čo sa stane vo vnútri látky, ktorú sme vložili do magnetického poľa?

Odpoveď ponúka fyzikálna teória. Podľa nej je podstata magnetických prejavov látky v samotných atómoch, z ktorých sa látka skladá. Ako vhodný model sa používa predstava o elektróne, ktorý sa v okolí jadra atómu nachádza na trajektórii – orbite, podobnej prúdovej slučke. Tá sa potom správa tak, ako závit s prúdom, ktorými sme sa zaoberali v článku 1.8. Modelová predstava je na obr. 1-26. Predstavujeme si, že elektrón obieha v určitej vzdialenosti okolo jadra, a tak vytvára magnetický moment $\mathbf{m}$. Atóm potom má výsledný magnetický moment, v ktorom sú skombinované magnetické momenty od jednotlivých elektrónov.



Obr. 1-26

Modelová predstava o magnetickom poli vzbudenom elektrónom v atóme

Ak zmagnetizovaná látka zosilňuje magnetické pole, do ktorého sme ju vložili, znamená to, že magnetické momenty jej jednotlivých atómov sa pootočili do smeru vonkajšieho magnetického poľa. Predstavujeme si, že príspevok

zmagnetizovanej látky k vonkajšiemu poľu je tým väčší, čím viac atómov sa pootočí do smeru indukčných čiar tohto poľa.

Poznámka

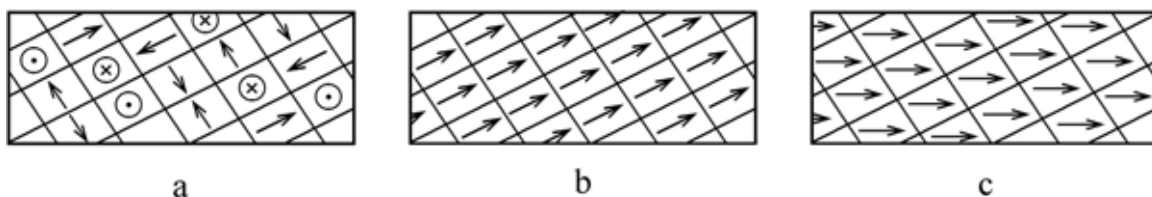
Skutočnosť je zložitejšia a dá sa lepšie opísať prostriedkami, ktoré zaviedla *kvantová fyzika*. Podľa kvantovej fyziky nemožno považovať elektrón za guľôčku, ktorá sa pohybuje okolo jadra atómu po kružnici. Napriek tomu sa však názorná predstava z [obr. 1-26](#) vo fyzike používa a umožňuje magnetické javy v látkach matematicky opísať. V tejto predstave sa elektrónu prisudzujú dva vektorové magnetické momenty. *Orbitálny magnetický moment* súvisí s predstavou obiehania elektrónu po kruhovej trajektórii okolo jadra. Ďalší magnetický moment, nazývaný *spinový magnetický moment*, by mal mať elektrón v dôsledku rotácie okolo vlastnej osi. Ich vektorovým zložením dostaneme výsledný magnetický moment $\mathbf{m}$ atómu.

Modelová predstava o magnetických momentoch atómov umožňuje aj *vysvetlenie správania sa látok vo vonkajšom magnetickom poli*. Pokiaľ látka nie je vo vonkajšom magnetickom poli, magnetické momenty látok sú neusporiadané orientované v priestore. Vtedy látka navonok magnetické vlastnosti neprejavuje.

Vo vonkajšom magnetickom poli sa všetky látky nesprávajú rovnako. Podľa ich magnetických prejavov ich rozdeľujeme do troch skupín:

Paramagnetické látky. Vo vonkajšom magnetickom poli sa magnetické momenty atómov paramagnetickej látky natáčajú do smeru súhlasného so smerom indukčných čiar vonkajšieho poľa. Látka prejavuje slabý magnetizmus s poľom *rovnakého smeru* vzhľadom na indukčné čiary vonkajšieho poľa. Paramagnetizmus pozorujeme napr. u *platiny, hliníka, mangánu, kyslíka*...

Diamagnetické látky. Vo vonkajšom magnetickom poli látka prejavuje slabý magnetizmus s poľom *opačného smeru* vzhľadom na indukčné čiary vonkajšieho poľa. Látka sa správa tak, ako by v nej vznikali indukované (vzbudené) magnetické momenty orientované proti smeru vonkajšieho poľa. Diamagnetiká sú napr. *zlato, meď, ortuť, inertné plyny*...



Obr. 1-27

Zmeny v usporiadaní domén pri magnetizácii feromagnetickkej látky.

a) látka v nemagnetickom stave, b) zmagnetizovaná látka, c) stav magnetického nasýtenia

Feromagnetické látky. V týchto látkach nachádzame mikroskopické, navzájom ohraničené oblasti, nazývané domény, v ktorých prevažná časť magnetických elektrónových momentov má rovnaký smer. (Hrany domén mávajú dĺžku až do jednej tisíciny milimetra.) Celá doména sa teda prejavuje ako magnetický dipól so silnými magnetickými prejavmi. Pokiaľ sme ešte feromagnetickú látku nevložili do vonkajšieho magnetického poľa, smery magnetických polí jednotlivých domén sú spravidla rozložené náhodne. Látka sa navonok magneticky neprejavuje.

Po vložení feromagnetickkej látky do silného vonkajšieho magnetického poľa sa atómy v časti domén orientujú do smeru súhlasného s jeho indukčnými čiarami. Počet súhlasne orientovaných domén sa zväčšuje s magnetickou indukciou vonkajšieho magnetického poľa. Ak sa všetky domény orientujú do smeru vonkajšieho magnetického poľa, feromagnetikum sa dostalo do stavu magnetického nasýtenia. Ak látku potom z magnetického poľa vyberieme, časť domén si zachováva takto nadobudnutú orientáciu a látka sa aj naďalej prejavuje ako stály magnet.

Poznámka

Opísaná postupná orientácia domén do smeru vonkajšieho poľa sa dá v laboratóriu docieľiť napr. tak, že feromagnetickú látku použijeme ako jadro v dutine cievky (pozri [obr. 1-25](#)), v ktorej postupne zväčšujeme prúd.

Feromagnetickými prvkami sú *železo, nikel, kobalt*. Feromagnetizmus vykazujú aj *niektoré zliatiny kovov*. Technicky významné feromagnetiká sú ferity (feromagnetické látky). Sú to zlúčeniny oxidu železitého Fe_2O_3 s oxidmi iných prvkov, napr. mangánu, alebo bária. Používajú sa ako trvalé magnety alebo jadrá cievok v technických elektronických zariadeniach.

Poznámka

Francúzsky fyzik PIERRE CURIE (1859 – 1906) zistil, že feromagnetizmus prejavujú látky do určitej teploty (Curieho teplota). Tak napr. železo zohriate nad teplotu 770 °C, alebo nikel nad teplotou 360 °C prestávajú byť feromagnetickými látkami a nadobudnú vlastnosti paramagnetickej látky.

Látky paramagnetické, diamagnetické a feromagnetické sa navzájom líšia aj svojimi kvantitatívnymi charakteristikami. V článku 1.2 sme zaviedli charakteristiku $\mu = \mu_0 \mu_r$, ktorú sme nazvali **permeabilita**. Je to súčin **magnetickej konštanty** $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}$ (permeability vákuua) a **relatívnej permeability** μ_r . V tabuľke uvádzame pre porovnanie hodnoty relatívnej permeability niektorých látok.

Hodnoty relatívnej permeability niektorých látok

Látka	Druh magnetizmu	μ_r	Látka	Druh magnetizmu	μ_r (maximálne)
meď	diamagnetizmus	0,999 990	nikel	feromagnetizmus	300
bizmut	diamagnetizmus	0,999 848	kremíková oceľ	feromagnetizmus	8 000
hliník	paramagnetizmus	1,000 023	čisté železo	feromagnetizmus	15 000
platina	paramagnetizmus	1,000 264	supermaloy	feromagnetizmus	1 000 000

Z tabuľky môžeme zistiť, že relatívne permeability blízke jednotke majú paramagnetiká $\mu_r > 1$ a diamagnetiká $\mu_r < 1$, zatiaľ čo feromagnetiká vykazujú vysoké hodnoty relatívnej permeability $\mu_r \gg 1$. Okrem toho, v tabuľke v pravom stĺpci uvedené hodnoty relatívnej permeability μ_r sú označené ako maximálne hodnoty. Súvisí to s doménovou štruktúrou feromagnetik: Ak zväčšujeme magnetickú indukciu poľa, do ktorého sme paramagnetickú látku vložili, narastá počet domén, ktoré sa orientujú do smeru indukčných čiar poľa. Tým sa príspevok feromagnetической látky k magnetickej indukcii poľa cievky zväčšuje, čo sa prejaví aj na narastaní hodnoty relatívnej permeability.

Teraz už zrejme sme schopní vysvetliť aj výsledok nášho experimentu na [obr. 1-25](#): Jadro cievky je zo železa (spravidla z niektorého druhu ocele), z feromagnetической látky s veľkou relatívnou permeabilitou. Ak ho vložíme do magnetického poľa s magnetickou indukciou $\mathbf{B}_0$ v dutine cievky, určitý počet domén sa orientuje do smeru indukčných čiar tohto poľa. Vo feromagnetической látke sa tak vzbudí jej vlastné magnetické pole s magnetickou indukciou $\mathbf{B}_m$. Magnetické polia cievky a feromagnetického jadra sa skladajú a výsledné magnetické pole má magneticкую indukciu $\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_m$, väčšiu, než bola pôvodná magnetická indukcia $\mathbf{B}_0$ cievky.

Ako sme už spomenuli, relatívna permeabilita feromagnetik nie je konštanta. Ak zväčšujeme prúd prechádzajúci cievkou, zväčšuje sa magnetická indukcia v jej dutine. V dôsledku toho naďalej narastá počet domén, v ktorých sa magnetické momenty atómov orientujú súhlasne so smerom poľa cievky. Tak sa príspevok feromagnetической látky k celkovej magnetickej indukcii zväčšuje až dovtedy, kým už v látke neexistujú žiadne ďalšie domény, ktoré by sa ešte mohli orientovať do smeru magnetického poľa cievky. Tento stav označujeme ako stav magnetického nasýtenia jadra. Keď je feromagnetické jadro v stave magnetického nasýtenia, ďalšie zväčšovanie prúdu v cievke vedie len k zväčšovaniu magnetickej indukcie $\mathbf{B}_0$, zatiaľ čo magnetická indukcia $\mathbf{B}_m$ už dosiahla svoju maximálnu hodnotu a ďalej už sa nezväčšuje.

Úlohy

1. Čím sa líšia feromagnetické látky od ostatných magnetik?
2. V literatúre alebo na internetových stránkach hľadajte informácie o technickom zariadení, ktoré sa nazýva elektromagnet. Vysvetlite, ako sa elektromagnet dá použiť v technickej praxi – napr. ako elektromagnetický zeriav.
3. Urobte si jednoduchý model elektromagnetu. Potrebujete na to plochú, suchú batériu s napätím 4,5 V, väčší klinec s dĺžkou približne 8 cm a niekoľko decimetrov izolovaného vodiča.
 - a. Omotajte klinec viac ako 50 závitmi izolovaného vodiča (treba zachovávať stále rovnaký smer vinutia) v jednej, či dvoch vrstvách. Presvedčte sa najprv, že klinec je takmer nemagnetický (napr. že nepriťahuje alebo len nepatrne k sebe priťahuje drobné železné predmety – kancelárske spinky, pripínáčky...). Môžete tiež použiť magnetku.
 - b. Pripojte konce vinutia vášho elektromagnetu na zdroj napätia a pokus s drobnými feromagnetickými predmetmi opakujte.
 - c. Po prerušení prúdu väčšina drobných predmetov od jadra elektromagnetu odpadne. Skúmajte magnetické vlastnosti jadra ďalej a pravdepodobne zistíte, že klinec si časť svojich magnetických vlastností ponechal a stal sa stálym magnetom.

4. Opakujte predchádzajúci experiment, teraz ale zapojte vinutie tak, aby prúd mal opačný smer. Po skončení pokusu znova preskúmajte magnetizmus, ktorý si magnet ponechal. Aký smer majú teraz indukčné čiary jeho magnetického poľa? Má feromagnetická látka „pamäť“?

1.1.12 Magnetická hysterézia

V [predchádzajúcom článku](#) sme sa zoznámili s niektorými vlastnosťami feromagnetických látok: **Feromagnetiká majú veľkú permeabilitu**. To sa využíva vtedy, ak potrebujeme získať magnetické pole s veľkou magnetickou indukciou.

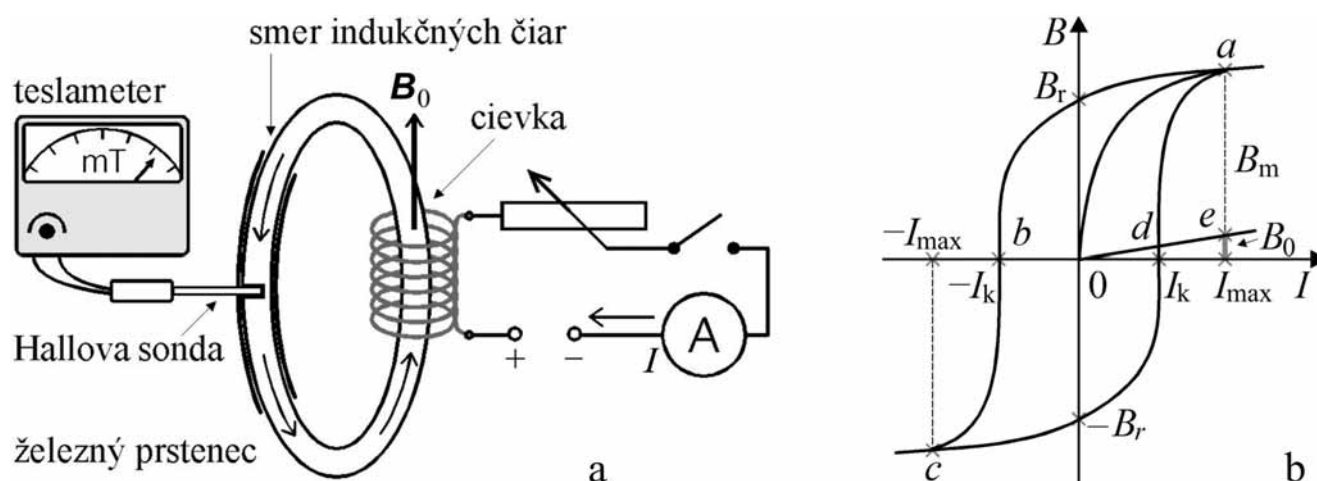
Feromagnetiká majú schopnosť získať v magnetickom poli magnetické vlastnosti a ponechať si ich aj keď ich z poľa vyberieme. Táto ich vlastnosť sa využíva pri zhotovovaní stálych magnetov.

Feromagnetiká majú aj ďalšiu zaujímavú vlastnosť, ktorá sa nazýva **magnetická hysterézia**. Správajú sa tak, ako by mali zvláštny druh pamäte – „magnetickú pamäť“.

Fyzik, ktorý sa oboznamuje s vlastnosťami feromagnetík, si iste skôr či neskôr položí otázku:

Čo sa stane s magnetom, ktorý vložíme do magnetického poľa opačného smeru, ako je smer vlastného poľa magnetu?

Pravdepodobne potom začne fyzik plánovať a pripravovať experiment, ktorým by získal na takú otázku odpoveď. Predovšetkým si obstará vhodnú feromagnetickú látku – napr. železný prstenec, na ktorý potom navinie cievku. Keď bude cievkou prechádzať prúd, vznikne v jej dutine magnetické pole, s magnetickou indukciou B_0 , ktorým sa prstenec zmagetizuje.



Obr. 1-28

- Návrh fyzikálneho experimentu na skúmanie vlastností feromagnetической látky: Pri zmenách prúdu I prechádzajúceho cievkou sa mení magnetická indukcia B_0 v jej dutine a v železnom jadre. Veľkosť B celkovej magnetickej indukcie v jadre sa skladá z hodnoty B_0 a príspevku B_m zmagetizovaného jadra: $B = B_0 + B_m$. Príspevok zmagetizovaného jadra meriame teslametrom pomocou Hallovej sondy.
- Výsledky merania. Krivka $abcda$ je *hysterézná slučka*. Krivka $0a$ je *krivka prvej magnetizácie*. Čiara $0e$ je graficky znázornená priama úmernosť medzi magnetickou indukciou B_0 cievky bez jadra a prúdom I v cievke

$$B_0 = \mu_0 \frac{n}{l} I$$

Železný prstenec je [feromagnetická látka](#) s veľkou [relatívnou permeabilitou](#) (pozri [článok 1.9](#)). V prstenci je preto omnoho väčšia magnetická indukcia, ako by bola v dutine cievky nevyplnenej železom. Môžeme uvažovať, že železný prstenec prispieva k celkovému magnetickému poľu v dutine cievky hodnotou B_m . Celková magnetická indukcia B v uzavretom železnom prstenci bude zložená z dvoch hodnôt

$$B = B_0 + B_m$$

Aby tento jav fyzik preskúmal, pokúsi sa zistiť, ako sa mení magnetická indukcia v železnom prstenci, ak sa postupne zväčšuje magnetická indukcia B_0 v dutine cievky. Preto si ešte obstará aj ampérmetr a teslameter na meranie magnetickej indukcie (pozri obr. 1-28). Veľkosť B_0 , magnetickej indukcie poľa cievky, vie vypočítať z meraných hodnôt prúdu I v cievke podľa vzťahu

$$B_0 = \mu_0 \frac{n}{l} I$$

$$\frac{n}{l}$$

V tomto vzťahu je I prúd prechádzajúci cievkou a $\frac{n}{l}$ je hustota závitov – počet závitov cievky, ktorý pripadá na jednotku dĺžky jej vinutia. Veľkosť B , celkovej magnetickej indukcie v prstenci sa dá merať napr. pomocou Hallovej sondy teslametrom (pozri [článok 1.4](#)).

Fyzik, ktorý jav skúma, by sa teraz pravdepodobne usiloval aj o kvantitatívne vyjadrenie veľkosti magnetickej indukcie $B = f(B_0)$ v jadre cievky v závislosti od magnetickej indukcie B_0 cievky. Pravdepodobne by sa mu to podarilo pri experimente, ktorý sme naznačili na [obr. 1-28a](#). Merané hodnoty (B_0, B) by zaznamenal do tabuľky a potom znázornil grafom tak, ako na [obr. 1-28b](#).

Z obrázka [obr. 1-28b](#) vyplýva, že pri magnetizovaní feromagnetickej látky magnetickým poľom s rastúcou magneticou indukciou B_0 je priebeh výslednej magnetickej indukcie B závislý od predchádzajúceho stavu látky. Pri magnetizovaní sa magnetická indukcia B_0 v dutine cievky mení priamo úmerne v závislosti od narastajúceho magnetizačného prúdu I . Celková magnetická indukcia $B = B_0 + B_m$, odmeraná vo vnútri feromagnetika v dutine cievky, sa zväčšuje nelineárne – tak, ako to znázorňuje krivka $0a$. Keď však prúd nadobudne hodnotu, ktorú sme označili $I_{\max}$, príspevok B_m magnetika sa už ďalej nezväčšuje, a preto je graf závislosti $B(I)$ od bodu a lineárny. Pri prúde $I_{\max}$ magnetické vlastnosti jadra dosiahli **stav magnetického nasýtenia**.

Zaujímavý je aj ďalší priebeh experimentu na [obr. 1-28b](#): Pri postupnom klesaní magnetizačného prúdu I k nulovej hodnote sa magnetická indukcia v jadre nezmenšuje po krivke $a0$, ako by sme očakávali, ale po celkom inej krivke, označenej ab . Ak v bode b zmeníme smer magnetizačného prúdu a „zväčšujeme“ ho k záporným hodnotám, dosiahneme opäť stav nasýtenia pri prúde $-I_{\max}$ (bod c na zobrazenej krivke).

Pokračujeme tak, že postupne zväčšujeme prúd smerom ku kladným hodnotám. Veľkosť B magnetickej indukcie sa mení tak, ako to znázorňuje krivka cda a krivka sa v bode a uzavrie.

Jav, pri ktorom sa magnetická indukcia vo feromagnetickom jadre mení podľa znázornenej uzavretej krivky $abcda$, sa nazýva **magnetická hysterézia** a krivka samotná sa zvykne **nazývať hysteréznou slučkou**.

Poznámky

Magnetická hysterézia je veľmi dôležitá vlastnosť feromagnetických látok, ktorá umožňuje vyrobiť z feromagnetických látok stále magnety. Feromagnetická *pamäť* niektorých látok sa využíva napr. pri zázname zvuku alebo obrazu. Páska používaná v magnetofóne alebo vo videokamere je vlastne páska z plastu pokrytá feromagnetickým filmom, ktorá sa konštantnou rýchlosťou posúva okolo magnetizačnej hlavy. Zvuk alebo obraz sa vo videokamere upravuje na elektrický signál, ktorý sa privádza do cievok v záznamovej hlave videokamery a tam vytvára meniace sa magnetické pole. Zmeny magnetického poľa hlavy zodpovedajú zaznamenávanému obrazu a zvuku. Magnetická štruktúra domén vo feromagnetickom filme pásky sa týmto premenlivým poľom sformuje – „zapamätá“ si ho. Ak potom pásku posúvame okolo prehrávacej hlavy, „zapamätaný“ magnetický záznam sa znova premení na elektrický signál a v televízore potom znova na obraz a zvuk.

Magnetickú pamäť feromagnetických látok dobre poznajú aj napr. archeológovia, ktorí skúmajú praveké sídliská. Zvyšky pecí a ohnísk, ktoré tam nachádzajú, mávajú dno vytmelené ílom – hlinou, ktorá obsahuje ako zložku feromagnetickú rudu. Vzorka vyrezaná z dna pravekej pece si „pamätá“ smer magnetického poľa v čase, v ktorom sa v peci kúrilo. Tak sa dozvedáme, ako bolo pred tisícročiami orientované magnetické pole Zeme. Pretože magnetické póly Zeme menia v závislosti od času svoju polohu, je tento archeologický poznatok dôležitý pre geofyzikov, ktorí skúmajú, ako sa vyvíjala naša Zem, aj so svojím magnetickým poľom.

Úlohy

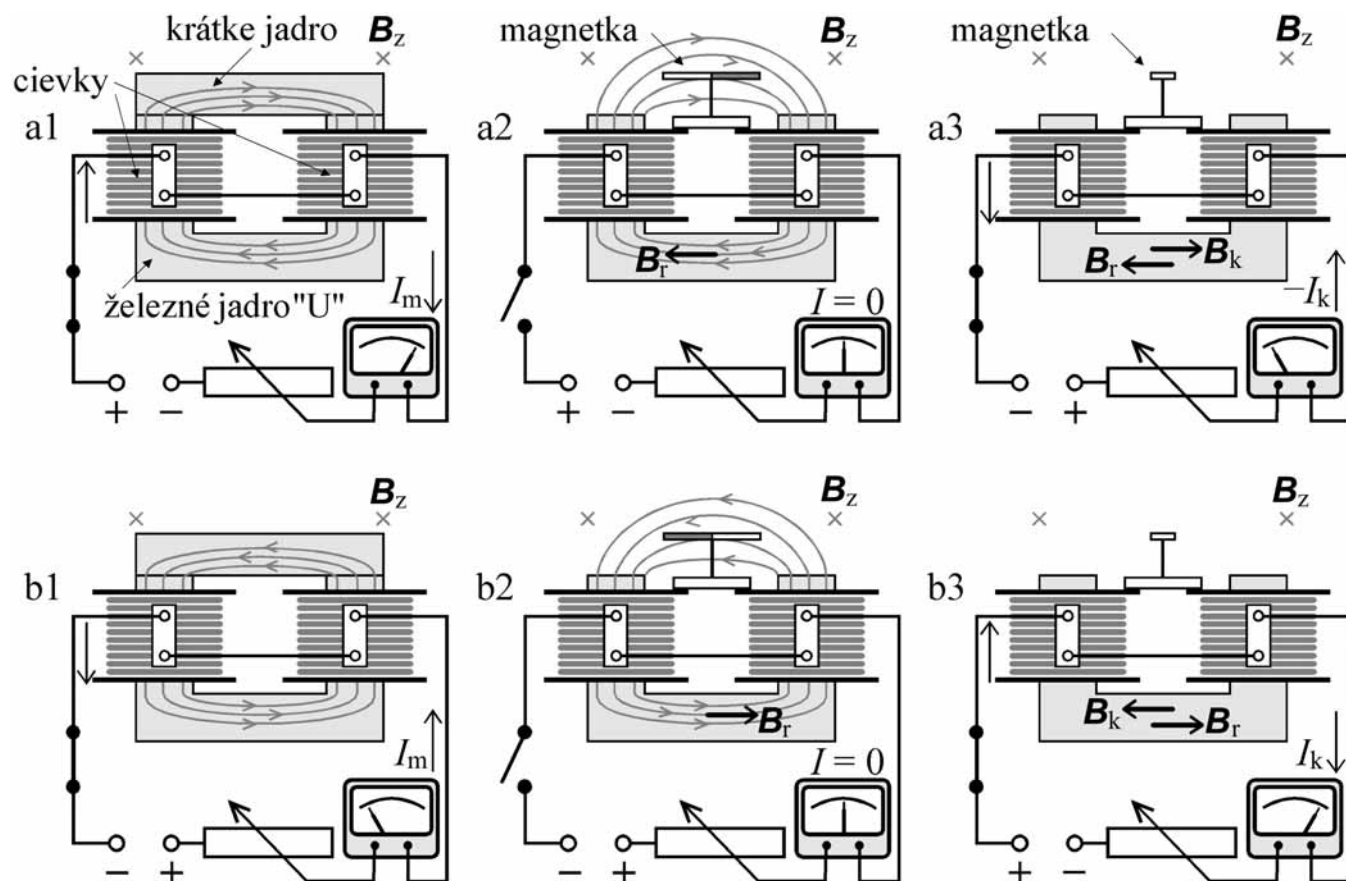
1. Pripravte a vykonajte experiment, pomocou ktorého by sme v školských podmienkach aspoň sčasti overili, že feromagnetická látka sa správa tak, ako to vyplýva z priebehu hysteréznej slučky na [obr. 1-28b](#). Najprv analyzujte jednotlivé fázy experimentu tak, ako sú znázornené na [obr. 1-29](#). Sledujte pritom sprievodný text, ktorý nasleduje za obrázkom.

- a) V druhej – praktickej časti – experiment vykonajte.

Pri riešení úlohy budeme potrebovať pomôcky:

Dve rovnaké cievky, napr. s 300 alebo 600 závitmi z rozkladného transformátora, železné jadro tvaru U a rovné jadro, reostat (napr. s odporom okolo 20 Ω), ampérmeter s rozsahom do 6 A, vypínač a spojovacie vodiče, krátku magnetku na ihlovom podstavci, zdroj napätia (napr. suchú plochú batériu s napätím 4,5 V alebo iný zdroj jednosmerného napätia).

V školských podmienkach zvyčajne používame špeciálne pomôcky – cievky, ktoré nasadíme na železné jadro tvaru písmena U. Jadro U hore uzavrieme *krátkym jadrom* – železným hranolom (pozri [obr. 1-29a](#)). Tak máme pripravenú sústavu cievok na uzavretom feromagnetickom jadre. Cievky pospájame tak, aby prúd, ktorými prechádza (magnetizačný prúd), vzbudil v jadre magnetické pole s indukčnými čiarami, ktoré sme vyznačili na [obr. 1-29](#). Aby sme mohli kedykoľvek zistiť, či jadro tvaru U má magnetické vlastnosti, budeme používať krátku magnetku. Na začiatku experimentu uložíme železné jadro do takej polohy, aby rovina písmena U bola kolmá na indukčné čiary magnetického poľa Zeme.



Obr. 1-29

Schematické zobrazenie priebehu experimentu, ktorým sa máme presvedčiť o magnetickej hysterézii železného jadra, na ktorom sú dve magnetizačné cievky

Pri experimente budeme hľadať odpovede na otázky:

- Stane sa jadro magnetom, keď v ňom na nejaký čas vzbudíme magnetické pole pomocou cievok?
- Ponechá si jadro magnetické vlastnosti, keď cievkami nebude prechádzať prúd?
- Čo sa stane, ak pri ďalšom pokuse necháme cievkou prechádzať prúd opačného smeru?

Odpovede na tieto otázky môžeme sčasti nájsť na [obr. 1-29](#).

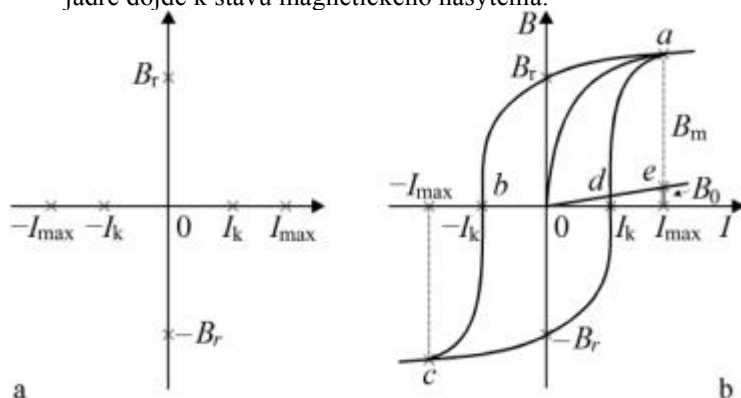
Opis jednotlivých fáz experimentu, ktoré sú znázornené na [obr. 1-29](#)

- a1: Cievkami prechádza prúd I , ktorý v železnom jadre vzbudí magnetické pole s vyznačeným smerom indukčných čiar. Reostatom regulujeme prúd až domaximálnej hodnoty $I_{\max}$. (Maximálne do hodnoty prúdu, ktorá je vyznačená na cievke, čo spravidla býva niekoľko ampérov. Na uvedenie uzavretého jadra dostavu magnetického nasýtenia však pri cievkach so 600 závitmi postačí spravidla prúd približne do 0,5 A. Pri tomto prúde sa jadro stane trvalým magnetom.)
- a2: Obvod prerušíme vypínačom a odstránime krátke jadro. Magnetka nad ramenami U jadra zaznamená magnetické pole smerujúce zľava doprava. Jadro „U“ ostalo zmagnetizované. Vo vnútri jadra je magnetické pole s magnetickou indukciou B_r , aj po zrušení magnetického poľa B_0 cievky.
- a3: Teraz zdroj napätia obrátíme a necháme cievkou prechádzať prúd v opačnom smere. Pri prúde, ktorý sme označili $-I_k$, zistíme, že magnetka ukazuje namagnetický sever. Zrejme sme magnetickú indukciu B_r poľa v jadre vyrovnali poľom opačného smeru s magnetickou indukciou B_k . Ak ale obvod prerušíme, zistíme, že sme magnetické pole „U“ jadra celkom neodstránili: magnetka znova ukazuje výchylku ako na obr. a2.

- b1: Jadro „U“ znova uzavrieme krátkym jadrom a pokračujeme v experimente so zdrojom zapojeným tak ako na obr. a3. Znova zväčšujeme prúd až do maximálnej hodnoty $-I_{\max}$.
- b2: Teraz sa presvedčíme, že jadro zmenilo svoj predchádzajúci magnetizmus – magnetka ukazuje výchylku opačného smeru ako na obr. a2. Jadro „U“ zmenilo svoje póly na opačné.
- b3: Ak chceme novovzniknuté magnetické pole vyrovnať (vykompenzovať) magnetickým poľom cievky pri prúde I_k , musíme znova obrátiť zdroj napätia a zapojiť ho tak, ako na obr. a2.

Z výsledkov experimentu môžeme urobiť niekoľko záverov:

- Feromagnetická látka – železné jadro tvaru „U“ – sa vo vonkajšom magnetickom poli stala stálym magnetom pri magnetizačnom prúde $I_{\max}$. Jadro si „zapamätalo“ smer magnetického poľa, v ktorom sme ho zmagnetizovali.
- Železné jadro si magnetické vlastnosti ponechalo a bolo aj naďalej stálym magnetom, aj keď sme prúd v cievke vypli.
- Magnetické pole stáleho magnetu s magnetickou indukciou B_r sme dokázali vykompenzovať (vyrovnať) opačne namiereným vonkajším magnetickým poľom cievky s magnetickou indukciou $B_k = -B_r$. Odmerali sme aj magnetizačný prúd I_k , ktorý vtedy musí cievkou prechádzať. Ak ale prúd I_k vypneme a vonkajším magnetické pole tak zrušíme, pôvodné magnetické pole sa obnoví. Jadro si svoje magnetické vlastnosti „zapamätalo“ – ostalo aj naďalej stálym magnetom, tak ako predtým.
- Ak sme nakoniec nechali cievkou prechádzať magnetizačný prúd $-I_{\max}$, magnet sa „prepóloval“ – jeho póly nadobudli opačné magnetické vlastnosti, ako mali predtým. Teraz už si magnet „pamätá“ magnetické pole opačného smeru.
- Povšimnutia hodné je, že k premagnetovaniu jadra dôjde pri našom experimente vždy vtedy, keď jadro „U“ uzavrieme krátkym jadrom. Vtedy uzavreté indukčné čiary prechádzajú cestou zloženou výhradne zo železných jadier poskladaných do **uzavretého magnetického obvodu** (pozri obr. [obr. 1-29a](#), [obr. 1-29b](#)). V magnetickom obvode zloženom z feromagnetík s veľkou relatívnou permeabilitou dosahuje magnetické pole vzbudené cievkou veľké hodnoty magnetickej indukcie B . Vtedy už pri pomerne malom prúde v cievke (do jedného ampéra) sa magnetické momenty vo väčšine domén orientujú rovnakým smerom – v jadre dôjde k stavu magnetického nasýtenia.



Obr. 1-30

- Výsledky školského experimentu z [obr. 1-29](#),
- b) hysterezná slučka

Výsledky školského experimentu na [obr. 1-29](#) neumožňujú znázorniť celú hystereznú slučku ale len niekoľko bodov, ktoré na nej ležia.

Na obr. [1-30a](#) sme do sústavy súradníc s osami I, B znázornili štyri body so súradnicami $(-I_k, 0)$, $(0, B_r)$, $(0, -B_r)$, $(I_k, 0)$. Pretože nemáme možnosť merať veľkosť magnetickej indukcie, hodnoty B_m a $-B_m$ sme si zvolili na zvislej osi B ľubovoľne, pričom predpokladáme, že majú rovnaké absolútne hodnoty. Vidíme však, že hodnoty $I_k, I_{\max}, -I_k, -I_{\max}, B_r, -B_r$, vyznačené na osiach grafu 1-30a, sú v súlade s bodmi na hystereznej slučke na obr. 1-30b.

- Ak ste si prečítali predchádzajúci odsek o súvislosti [archeológie a feromagnetizmu](#), možno vás napadlo, akú úlohu pri zapamätaní smeru magnetického poľa v ílovom podklade ohniska zohral Curieho bod. Pokúste sa o tom napísať niekoľko riadkov.
- Pozrite sa do vášho magnetofónu predtým, ako doň vložíte kazetu. Pozrite sa, kde sú uložené hlavy určené na záznam zvuku a jeho reprodukciu.

