

Úloha č. 10: Magnetizmus

jarní semestr 2024

1 Magnetické pole stacionárních (ustálených) elektrických proudů

Magnetické pole je charakterizováno vektorem magnetické indukce \vec{B} a intenzitou magnetického pole \vec{H} . Ve vakuu je mezi nimi vztah $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, kde $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ mkg s}^{-2} \text{ A}^{-2}$ (přesně).

V prostředí s relativní permeabilitou μ_r platí

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}.$$

Činitel před \vec{H} je absolutní látková permeabilita

$$\mu = \mu_r \mu_0.$$

Magnetické vlastnosti materiálů popisuje též veličina nazývaná magnetická susceptibilita χ . Mezi magnetickou susceptibilitou a relativní permeabilitou platí vztah

$$\mu_r = 1 + \chi.$$

V okolí vodiče protékaného proudem I existuje magnetické pole. Magnetické pole v okolí libovolně vedených proudovodičů může být velmi komplikované.

Pro výpočet magnetické indukce lze užít Ampérův zákon

$$\int_C \vec{B} d\vec{l} = \mu \sum I,$$

který vyjadřuje, že integrál magnetické indukce \vec{B} podél uzavřené křivky C je roven součinu permeability a sumy proudů vstupujících do plochy uzavřené křivkou C . Přitom v integrálu vystupuje skalární součin vektoru intenzity \vec{B} a orientovaného elementu křivky $d\vec{l}$.

V případě vodiče nebo soustavy vodičů s jednoduchou geometrickou symetrií se řešení značně zjednoduší. Tyto případy si nyní probereme.

1.1 Velmi dlouhý přímý vodič

Pro určení intenzity magnetického pole použijeme Ampérův zákon. Jako křivku C uvažujeme kružnici o poloměru r se středem ve vodiči ležící v rovině kolmé na vodič. V tomto případě celkový proud vstupující do plochy uzavřené křivkou je proud protékající vodičem I . Ze symetrie je zřejmé, že podél uvažované kružnice je $|\vec{B}| = \text{konst.}$ a vektor magnetické indukce má směr tečny ke kružnici, bude tedy rovnoběžný s elementem délky $d\vec{l}$. Proto $\int_C \vec{B} d\vec{l} = 2\pi r |\vec{B}|$. Z Ampérova zákona dostáváme

$$2\pi r |\vec{B}| = \mu I.$$

Velikost magnetické indukce ve vzdálenosti r od vodiče s proudem I tedy je

$$|\vec{B}| = \frac{\mu I}{2\pi r}.$$

Pro stanovení orientace vektoru magnetické indukce se použije pravidlo pravé ruky – když myšleně pravou rukou držíme vodič tak, že palec ukazuje směr proudu, pak prsty na této ruce ukazují orientaci vektoru magnetické indukce, tedy z pohledu podél vodiče ve směru proudu je vektor magnetické indukce orientován ve směru pohybu hodinových ručiček.

1.2 Toroid

Vezměme dlouhou štíhlou cívku a ohněme ji do kruhu o poloměru R tak, aby se oba konce dotýkaly. Dostaneme tzv. toroid.

I případ toroidu lze snadno řešit užitím Ampérova zákona. Jako křivku C v tomto případě bereme středovou kružnici tělesa toroidu (poloměr kružnice R). Za předpokladu, že průměr vinutí je zanedbatelně malý ve srovnání s průměrem toroidu, platí

$$\int_C \vec{B} d\vec{l} = 2\pi R |\vec{B}|, \quad \sum I = NI,$$

kde N je počet závitů toroidu a I proud toroidem.

Velikost magnetické indukce v toroidu je

$$|\vec{B}| = \mu \frac{N}{2\pi R} I$$

Když zavedeme $n = N/2\pi R$ počet závitů na jednotku délky cívky, pak

$$|\vec{B}| = \mu n I. \quad (1)$$

1.3 Solenoid – dlouhá válcová cívka

Magnetické pole na ose dlouhé válcové cívky je symetrické vzhledem ke středu cívky.

Ve středu cívky

$$|\vec{B}| = \mu n I.$$

Na krajích cívky

$$|\vec{B}| = \frac{1}{2} \mu n I.$$

n je počet závitů na jednotku délky (hustota závitů) a I proud cívkou. Směr vektoru indukce magnetického pole určíme podle pravidla pravé ruky pro cívku: „Cívku uchopíme do pravé ruky tak, že ohnuté prsty ukazují směr elektrického proudu v jejích závitech; pak palec ukazuje směr \vec{B} .“ Skutečnost, že magnetická indukce je na konci (v ose) dlouhé cívky poloviční než ve středu (v ose) cívky, plyne z principu superpozice.

2 Silové působení na náboj v magnetickém poli

Na náboj q , který se pohybuje rychlostí \vec{v} v magnetickém poli \vec{B} , působí Lorentzova síla

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B},$$

kde \times je symbol pro vektorový součin. Obdobně proto na orientovaný element délky $\Delta \vec{l}$ proudovodiče protékaného proudem I působí v magnetickém poli síla

$$\Delta \vec{F} = I \Delta \vec{l} \times \vec{B}.$$

Dva rovnoběžné vodiče protékané elektrickým proudem

Podívejme se na situaci tak, že jeden vodič magnetické pole vytváří a druhý vodič se v tomto magnetickém poli nachází. Když vzdálenost mezi vodiči je r , pole vytvořené prvním vodičem, který je protékán proudem I_1 , je

$$|\vec{B}| = \frac{\mu I_1}{2\pi r}.$$

Síla, kterou toto pole působí na element délky druhého vodiče, který je protékán proudem I_2 , je

$$\Delta\vec{F} = I_2 \Delta\vec{l} \times \vec{B}.$$

V úseku o délce l , kde jsou vodiče rovnoběžné, je pro druhý vodič $\vec{B} = konst.$ a vektory $\Delta\vec{l}, \vec{B}$ jsou vzájemně kolmé. Proto celková síla mezi vodiči v úseku o délce l bude

$$|\vec{F}| = I_2 l |\vec{B}| = \mu I_1 I_2 \frac{l}{2\pi r}.$$

Proudová smyčka

Uvažujme malou plochou smyčku vytvořenou z proudovodiče protékaného proudem I – tzv. proudovou smyčku. Je-li plošný obsah smyčky S , na proudovou smyčku působí v magnetickém poli silový moment

$$\vec{M}_F = SI \vec{n} \times \vec{B},$$

kde \vec{n} je jednotkový vektor kolmý na plochu smyčky orientovaný ve směru magnetického pole ve středu proudové smyčky. Moment \vec{M}_F stáčí smyčku tak, aby se magnetické pole proudové smyčky zorientovalo do směru vnějšího magnetického pole. Součin $SI \vec{n}$ nazýváme Ampérovým magnetickým momentem \vec{m} .

3 Hallův jev a měření magnetického pole

Elektrický proud je zprostředkováván pohybem nabitých částic, například v kovech pohybem elektronů. Na pohybující se nabitě částice působí v magnetickém poli Lorentzova síla, která je vychyluje. Při vhodných podmínkách je toto vychýlení měřitelné jako změna elektrického napětí ve směru příčném ke směru protékajícího proudu; jedná se o tzv. Hallův jev. Velikost tohoto příčného napětí – Hallova napětí – je úměrná magnetickému poli. Změna směru magnetického pole změní znaménko Hallova napětí. Měřením Hallova napětí lze určit velikost složky magnetického pole ve směru kolmém na směr proudu a směr spojnice kontaktů pro měření Hallova napětí.

V praktiku je k dispozici Hallova sonda, která se připojuje k dataloggeru Vernier. Sonda měří složku magnetického pole ve směru kolmém na podstavu válcové sondy.

4 Látky v magnetickém poli

Vnější magnetické pole indukuje v elektronových obalech atomů magnetické pole, které je orientováno proti vnějšímu poli. Tento jev nazýváme diamagnetismem. Atom může mít i permanentní magnetický moment, magnetický moment bez vnějšího pole. Látky tvořené takovými atomy nazýváme paramagnetickými. Diamagnetismus je slabší než paramagnetismus. Proto se diamagnetismus projevuje jen u látek s atomy bez permanentního magnetického momentu. Takové látky nazýváme diamagnetickými.

V některých materiálech existují tzv. domény, oblasti se shodně orientovanými permanentními magnetickými momenty jednotlivých atomů. Takové materiály nazýváme feromagnetika. Při překročení určité mezní teploty, tzv. Curieovy teploty se orientace domén zruší a materiál přestane

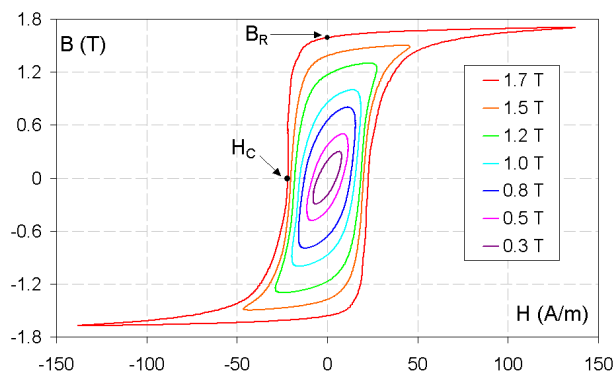
být feromagnetický. Existují tři feromagnetické prvky s Curieovou teplotou vyšší, než je teplota pokojová: železo, kobalt a nikl.

Různé typy materiálů (dia-, para-, feromagnetické materiály) můžeme odlišit podle chování v nehomogenním magnetickém poli:

- Malý kousek diamagnetické látky je z magnetického pole velmi slabě vypuzován.
- Malý kousek paramagnetické látky je do magnetického pole slabě vtahován.
- Pro feromagnetismus je typické výrazné silové působení, které feromagnet vtahuje do magnetického pole.

Odlišnost těchto látek vystihuje magnetická susceptibilita χ . Pro diamagnetika je $\chi < 0$, pro paramagnetika $\chi > 0$, pro feromagnetika $\chi \gg 0$.

4.1 Hysterezní křivka



Obrázek 1: Hysterezní křivka (intenzita magnetického pole \vec{H} vynesena na vodorovné ose je přímo úměrná elektrickému proudu).

Vložíme-li do cívky feromagnetický materiál, přestane být závislost magnetické indukce na proudu protékajícím cívku lineární (viz Obr. 1).

Uvažujme toroid s velkým poměrem průměru toroidu ku průměru vinutí toroidu. Vnitřek toroidu nechť je zcela vyplněn uvažovaným feromagnetickým materiálem. Tento předpoklad zjednodušuje (vzhledem k symetrii problému a stupni homogenity magnetického pole) úvahy o problému.

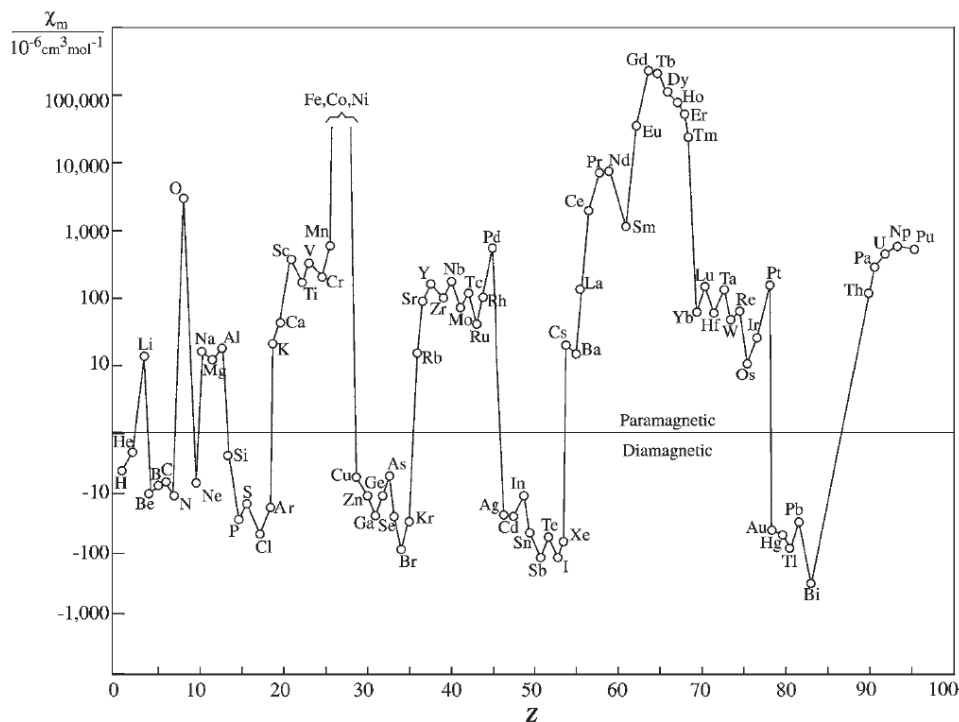
Vyjděme z předpokladu, že materiál je pro nulový proud cívku nezmagnetován. V tomto stavu jsou magnetické domény (mikroskopické oblasti se spontánním uspořádáním magnetických momentů atomů do určitého směru) orientovány náhodně a jejich magnetická pole se vzájemně ruší. S rostoucím proudem v toroidu se tato rovnováha poruší. Vlivem magnetického pole vytvářeného proudem cívky jsou magnetické domény různými mechanismy (například přesouváním hranic mezi doménami), postupně přeorientovány do směru souhlasného s vnějším polem. Přitom svým polem přispívají k celkové magnetické indukci. Magnetická indukce se tedy v našem toroidu s feromagnetikem zvyšuje mnohem rychleji, než v toroidu bez feromagnetika. Závislost magnetické indukce na proudu vinutím lze vyjádřit vztahem (1), po rozepsání μ dostaneme

$$B = \mu_0 \mu_r n I.$$

Relativní permeabilita feromagnetika μ_r závisí obecně na historii magnetizace materiálu, na deformaci materiálu (a teplotě). Nejedná se tedy o konstantu. Pro oceli nabývá hodnot řádově 10 000.¹

¹Existují i oceli, které nejsou feromagnetické – např. austenitické oceli s gamma fází krystalické mřížky jsou paramagnetické.

S dalším zvyšováním elektrického proudu vinutím se magnetická indukce blíží tzv. stavu nasycení, při kterém je dosaženo úplné orientace domén do směru magnetického pole. Po dosažení tohoto stavu nemá feromagnetický materiál na další nárůst magnetické indukce s růstem elektrického proudu žádný vliv. (Neuvažujeme-li zanedbatelný vliv indukovaného magnetického momentu, viz diamagnetismus.)



Obrázek 2: Na obrázku je znázorněna magnetická susceptibilita χ_m (v určitých jednotkách) jako funkce protonového čísla Z . Směrem nahoru je látka více paramagnetická (až feromagnetická), směrem dolů více diamagnetická. Stupnice na svislé ose není lineární!

Při opětovném snižování proudu se křivka pohybuje zpět jinou cestou a pro nulový proud dosahuje hodnoty nazývané remanentní magnetizace B_R . K dosažení nulové hodnoty magnetické indukce je zapotřebí proudu v opačném směru. Intenzita H_C magnetického pole odpovídající této hodnotě proudu (intenzita magnetického pole samotného vinutí ve vakuu) se nazývá koerzivní.

4.2 Měkká a tvrdá feromagnetika

Feromagnetické materiály dělíme na tzv. měkká a tvrdá feromagnetika. V měkkém feromagnetiku se domény po vypnutí vnějšího magnetického pole přeorientují tak, že materiál je navenek magneticky (téměř) neutrální. Naproti tomu tvrdá feromagnetika mohou zůstat trvale zmagnetovaná i bez vnějšího pole.

Tvrdá feromagnetika vhodná pro výrobu permanentních magnetů musí splňovat několik kritérií:

1. Dostatečně vysoká hodnota remanentní magnetizace, od cca 300 mT.
2. Dostatečně velké koerzivní pole. Vyjádřeno v ampéřzávitcích na mm od cca 75 A/mm.
3. Dostatečně vysoká pracovní teplota cca od 80°C. Tato teplota bývá mnohem nižší než Curieova teplota.

4.3 Odmagnetování feromagnetika

Úplné odmagnetování feromagnetika lze docílit v principu dvěma způsoby:

1. Ohřevem nad Curieovu teplotu. (Nelze doporučit u magnetů se složitější strukturou, anizotropií apod. Dochází k nevratným strukturním změnám.)
2. Přemagnetováváním v cívce střídavým proudem s postupným snižováním amplitudy proudu až na nulu.

Demagnetizace rozkladem. Částečné odmagnetování feromagnetika nastává také, když magnet rozložíme na části. Například když rozdělíme prstencové jádro toroidu – uzavřené jádro z magneticky tvrdé oceli – na více dílů, zjistíme, že ztratilo část své magnetizace. Tento jev se nazývá demagnetizace. Demagnetizaci charakterizujeme demagnetizačním faktorem, který závisí na geometrickém tvaru magnetu. Čím je magnet kratší (a plošší), tím je demagnetizační faktor větší.

O původu demagnetizace (tyčového) magnetu si můžeme udělat představu pomocí následující myšlenkové konstrukce. Zkusme poskládat tlustší tyčový magnet z několika tenčích kvádrů. Magnety bude nutno k sobě přitláčet silou, tedy magnety „jdou proti sobě, vzájemně se odmagetovávají“. Naopak, poskládat delší magnet z několika kratších je snadné, magnety se vzájemně drží samy. Protože si lze každý tyčový magnet představit jakoby poskládaný z několika tenčích uložených vedle sebe (které se odpuzují), magnetické pole, které je magnetem vytvářeno, posouvá pracovní bod, ve kterém se magnet nachází, do části hysterezní křivky někam mezi nulu a bod odpovídající hodnotě koercitivního pole i bez vlivu vnějších polí.

Poznámka: demagnetizace není v celém objemu tyčového magnetu stejná.

Úkoly

1. **Zviditelněte magn. indukční čáry od různých magnetů (podkovovitý, tyčový).**

- pomocí feromagnetických pilin
- pomocí feromagnetické fólie

Okomentujte symetrii získaných obrazců a porovnejte s obrazci magnetického pole cívek.

2. **Pomocí feromagnetických pilin zviditelněte magnetické indukční čáry přímého vodiče, válcové cívky (solenoidu), dvou válcových cívek zapojených buď souhlasně, nebo proti sobě.**

Použijte přípravek, kde na desce z plexiskla je zapojen přímý vodič a válcové cívky. Kromě zdroje a přípravku do obvodu zařaďte spínač, který vám dovolí spínat obvod krátce. Desku jemně posypte pilinami v místě, kde budete sledovat vliv magnetického pole proudu. Na regulovatelném zdroji nastavte maximální proud. **Krátce, na dobu max. 1 s, zapněte elektrický obvod.** Nesmí dojít k tavení desky.

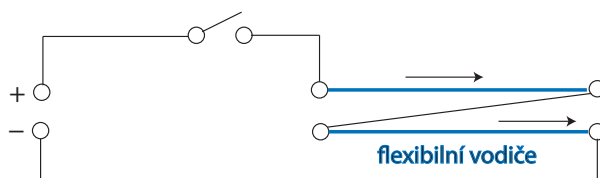
Pokud nedošlo ke zřetelnému uspořádání pilin, znovu krátce zapněte proud a přitom poklepávejte desku tak, aby piliny snáze dosáhly svých rovnovážných poloh.

Okomentujte symetrii získaných obrazců.

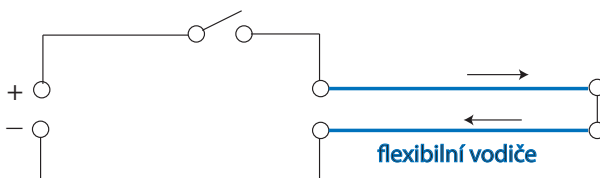
3. **Demonstrujte vzájemné silové působení mezi dvěma rovnoběžnými proudovodiči pro dvě různé vzájemné orientace proudu.**

Využijte k tomu přípravek s dvojicí volně zavěšených flexibilních vodičů vedených v prostoru souběžně. K napájení použijte akumulátor nebo zdroj stejnosměrného proudu Statron. Dobu průchodu proudu omezte na max. 1 s (jinak se vodiče začnou pálit). Aby proud v obou flexibilních vodičích měl stejnou velikost, je vhodné, aby vodiče byly zapojeny sériově.

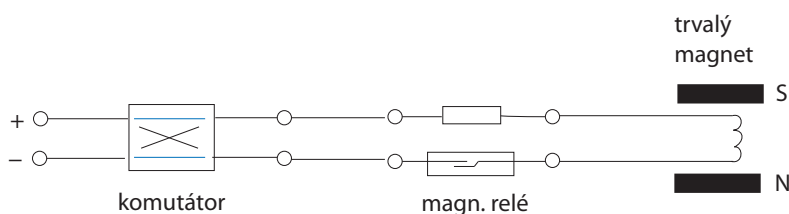
Vysvětlete pozorovanou skutečnost.



Obrázek 3: Síla mezi vodiči protékanými elektrickým proudem - proudy stejného směru



Obrázek 4: Síla mezi vodiči protékanými elektrickým proudem - proudy opačného směru



Obrázek 5: Cívka s proudem v poli trvalého magnetu

4. Demonstrujte působení silového momentu na cívku s proudem v magnetickém poli permanentního magnetu.

Cívku napájíme ze zdroje přes komutátor, který umožňuje měnit směr proudu. V obvodu cívky je zařazeno magnetické relé, které spínáme přiložením magnetu; tím je zajištěno, že proud bude cívku procházet pouze krátkodobě.

Vysvětlete (určete) orientaci silového momentu cívky při zadaném magnetickém momentu cívky a magnetickém poli permanentního magnetu.

Poznámka: Podobně se do směru vnějšího pole orientují i jednotlivé atomy s permanentním magnetickým momentem, tedy atomy paramagnetických látek. K úplnému zorientování však nedojde. Uspořádání působením vnějšího pole narušují tepelné excitace.

5. Měřte pole cívky Hallova sondou. Pro měření použijte datalogger Vernier, ke kterému je zapojena Hallova sonda a proudová sonda. Na stejnosměrném zdroji nastavte napětí 1 V a připojte ho přes proudovou sondu s max. proudem 10 A k cívce. Změřte velikost magnetického pole v ose válcové cívky jednak v jejím středu, jednak na koncích a výsledky porovnejte.

Naměřenou intenzitu magnetického pole porovnejte s vypočtenou hodnotou. Při výpočtu cívku považujte za velmi dlouhou cívku. Na cívce je udán počet závitů, délku cívky změřte; proud cívku měřte.

Pokuste se vysvětlit, proč je magnetické pole na koncích dlouhé cívky poloviční, než pole v jejím středu.

6. Zemské magnetické pole.

Určete orientaci zemského magnetického pole v laboratoři. Zvolte vhodný způsob s pomocí prostředků, které máte k dispozici.

7. Pokuste se ze silových účinků nehomogenního magnetického pole působícího na neznámý vzorek určit, o jakou látku se jedná.

Vzorky jsou zhotoveny z pyrolytického grafitu, bizmutu, paládia, platiny a jsou zavěšeny na torzních vážkách (raménko se vzorkem otočně zavěšené na vlákně). Nehomogenní magnetické pole vytvořte malým neodýmovým magnetem na tyčce. Potřebné údaje najdete v grafu 2.

8. Skládání magnetů z více kusů – problém demagnetizace.

Ze čtyř feritových čtvercových magnetů se pokuste poskládat

1. jeden 4x delší magnet, 2. magnet s 4x větší plochou

Která z operací se provádí snadněji a proč?

9. Zmagnetování materiálu v magnetickém obvodu s cívkou se stejnosměrným proudem.

Máme cívku s jádrem tvaru U; jádro tvoří neuzavřený magnetický obvod; přiložením plochého kvádříku z oceli se magnetický obvod uzavře. Proudovým impulsem ze stejnosměrného zdroje materiál kvádříku zmagnetujte. Odhadněte maximální přídržnou sílu tak, že rukou odtrhnete kvádřík od jádra. Po odtržení kvádřík opět k obvodu přiložte a zjistěte, jak se změnila přídržná síla. Rozdíl vysvětlete.

Změřte pomocí Hallovy sondy magnetickou indukci na pólech vámi zmagnetovaných vzorků.

10. Odhad H_C, B_R .

Odhadněte koercitivní pole H_C vzorku oceli postupným zvyšováním proudu v cívce ve směru opačném než při zmagnetovávání. Pokuste se vymyslet způsob, jak odhadnout zbytkovou (remanentní) magnetizaci B_R .

11. Odmagnetování materiálu v magnetickém obvodu s cívkou střídavým proudem.

V magnetickém obvodu s cívkou odmagnetujte střídavým proudem s proměnnou amplitudou vámi zmagnetované vzorky oceli. **Experiment provádějte pouze za přítomnosti vyučujícího – nebezpečí úrazu el. proudem.** Posuďte stupeň odmagnetování.

12. Odmagnetování feromagnetických vzorků ohřevem.

Máme tři různé vzorky. Změřte Curieovy teploty dvou vzorků. Určete, o jaké materiály se jedná, víte-li, že jsou to prvky.

Vzorky jsou zavěšeny na kovových drátcích a udržují se ve vychýlené poloze tak, že jsou přitahovány k magnetům. Vzorky jeden po druhém ofukujeme plamenem tak dlouho, až vazba s magnetem pomine. Jak vzorek ochladne pod Curieovu teplotu, vazba vzorku s magnetem se obnoví a závěsný drátek se opět vychýlí. Curieovu teplotu měříme připojeným digitálním teploměrem. Měřit teplotu ve fázi ochlazování je vhodnější (přesnější) než ve fázi ohřevu - to proto, že ve fázi ochlazování je teplota rozložena v různých částech vzorku rovnoměrněji. U jednoho ze tří vzorků teplotu neměříme, protože jeho Curieova teplota přesahuje možnosti použitého teploměru.

A Tabulka – Curieovy teploty feromagnetických prvků

Materiál	Curieova teplota (°C)
Fe	770
Co	1 121
Ni	358
Gd	16

B Užití v praxi

Magnetické materiály v částicové optice

V částicové optice se používají speciální magnetické materiály pro různé účely. Obecně rozlišujeme dva typy materiálů a to:

- Materiály pro magnetické čočky - jsou silně feromagnetické materiály, které mají za úkol tvarovat magnetické pole do požadované distribuce v prostoru. Nejčastější jsou Permaloye, slitiny niklu a železa (NiFe48, NiFe35, magnetická saturace do 1,9 T) či čisté železo ve feritické fázi (tzv. Behanit, magnetická saturace do 1,1 T) až po permendury, slitiny kobaltu a železa (ASTM A-801 high purity, CoFe48, magnetická saturace do 2,4 T).
- Materiály pro magnetické stínění – se na rozdíl od výše zmíněných užívají pro odstínění vnějších magnetických polí. Tyto materiály mají obrovskou relativní permeabilitu, i přes 100 000. Nejznámější je mu-metal – slitina niklu a železa v poměru 75 % Ni a 25 % Fe.