

Stacionární magnetické pole

Vzájemné silové působení vodičů s proudem a permanentních magnetů

Magnetické jevy - známy od středověku, přesnější poznatky 19. století.

Stacionární magnetické pole: zdrojem je nepohybující se perm.magnet nebo nepohybující se vodič s konst. proudem.

Silové působení:

- a) tyčový magnet přiblížíme k magnetce → působí na ni mgn. pole → nenulový moment sil → stočení magnetky do polohy s nulovým momentem mgn. sil → silové působení magnetky a magnetu je vzájemné (3. Newt. zákon)

Pozn.: k severnímu pólu (N) se přitáhne jižní (S) a naopak.

- b) přímý vodič s konst. proudem a magnetka nad vodičem → přetočení magnetky do nové rovnovážné polohy → v okolí vodičů s proudem je mgn. pole (mgn. pole budí i pohybující se náboj).

Pozn.: Není kvalitativní rozdíl mezi mgn. polem magnetu a vodiče s proudem.

- c) k volně zavěšenému vodiči s proudem přiblížíme magnet → vodič se vychýlí, změním-li póly magnetu → výchylka opačná

Silové působení mezi perm. magnety a mezi perm. magnety a vodiči s proudem je vždy vzájemné. Magnetické síly působí prostřednictvím mgn. pole. Říkáme, že mgn. pole působí mgn. silami na permanentní magnety a vodiče s proudem.

Magnetické indukční čáry

Jsou myšlené prostorově orientované křivky, jejichž tečny v daném bodě mají směr osy velmi malé magnetky umístěné v tomto bodě. Směr od N pólu k S pólu magnetky určuje orientaci indukční čáry. Mgn. indukční čáry jsou vždy uzavřené a nikde se neprotínají.

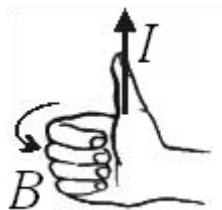
Magnet: vně magnetu ind. čáry směřují od N k S
uvnitř od S k N

Pro vodič s proudem:

Ampérovo pravidlo pravé ruky (APPR):

Naznačíme uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval směr proudu. Zahnuté prsty pak ukazují směr (orientaci) magnetických indukčních čar (viz obrázek).

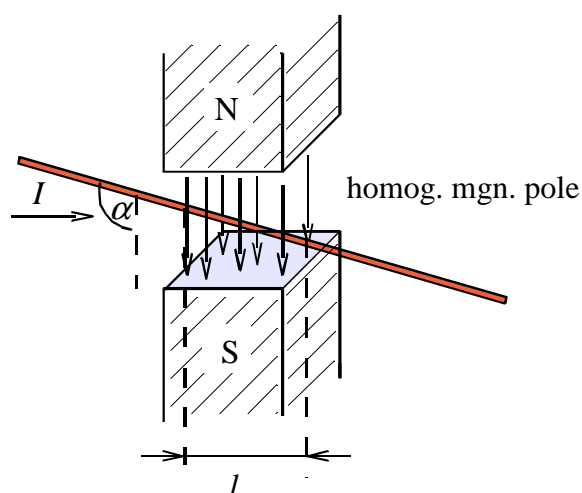
Obr. K Ampérovu pravidlu pravé ruky



Homogenní mgn. pole: indukční čáry jsou rovnoběžky – např. ve střední části válcové cívky

Magnetická indukce

Fyzikální veličina pro kvantitativní popis mgn. pole v každém jeho bodě.



l ... aktivní délka vodiče

na vodič působí síla

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$$

$l \cdot \sin \alpha$... průmět vodiče do vodorovné roviny (aktivní délka)

α ... úhel mezi vodičem a indukčními čarami $\alpha \in (0; \pi)$

$$\alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = 0 \Rightarrow F_m = 0 \text{ N}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \alpha = 1 \Rightarrow F = B \cdot I \cdot l \quad \text{maximum}$$

B ... magnetická indukce (vektorová fyzikální veličina)

$$B = \frac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin \alpha} \quad [B] = \text{T} \quad \text{tesla}$$

běžné hodnoty 0,01 T – 0,5T (v blízkosti perm. magnetů)
velmi silné mgn. pole 100 T

Směr \vec{B} ... směr souhlasně orient. tečny k indukční čáře v daném bodě

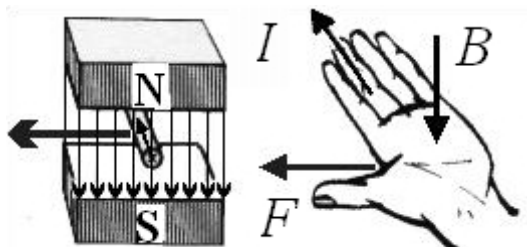
Pro homogenní mgn. pole je \vec{B} konstantní směrem i velikostí.

\vec{F}_m je kolmá na \vec{B} i na vodič.

Směr \vec{F}_m působící na přímý vodič s konstantním I v homogenním mgn. poli:

Flemingovo pravidlo levé ruky (FPLR):

Položíme-li otevřenou levou ruku k přímému vodiči tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly, kterou působí mgn. pole na vodič s proudem.

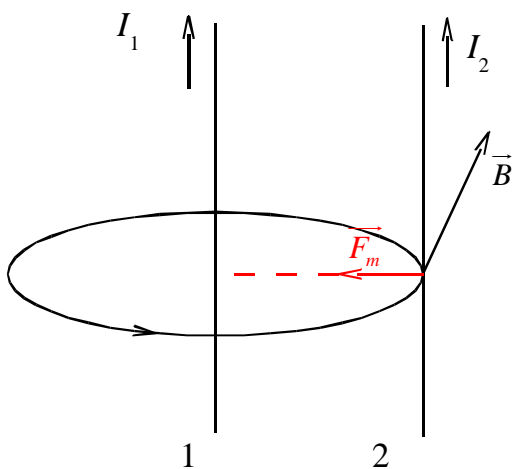


Vzájemné silové působení dvou přímých rovnoběžných vodičů s proudem

Přiblížíme-li k sobě dva vodiče s proudem, silově na sebe navzájem působí.

Dva svíslé pohyblivé vodiče:

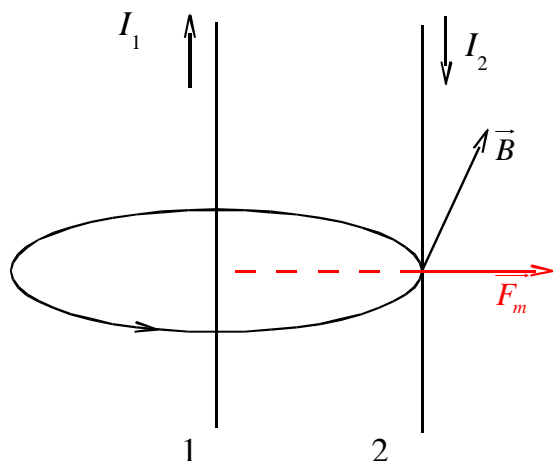
souhlasné proudy ... vodiče se přitahují



indukční čára kolem 1. vodiče podle APPR

silové účinky na 2. vodič od 1. vodiče podle FPLR (obdobně pro indukční čáry 2.vodiče a sil. účinky na 1. vodič)

nesouhlasné proudy ... vodiče se odpuzují



Pozn.:
Obdobné jevy pro dvě válcové sousední cívky s proudem

Velikost síly dvou velmi dlouhých rovnoběžných vodičů s I :

$$F = k \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d}$$

l ... délka vodičů

d ... vzdálenost vodičů d musí být $\ll l$

$$k = \frac{\mu}{2\pi} \quad \mu \dots \text{permeabilita prostředí}$$

$$\text{permeabilita vakua } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$$

relativní permeabilita $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ vakuum, vzduch $\mu_r = 1$

$$F = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \cdot l}{d} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 \cdot l}{d} \quad (*)$$

Užitím vztahu $B = \frac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}$ a vztahu (*) dostaneme vztah pro velikost vektoru mgn. indukce

ve vzdálenosti d od dlouhého přímého vodiče s proudem I : $B = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}$

Pozn.: $\sin \alpha = 1$; vodič kolmý na \vec{B}

Na základě vzájemného silového působení dvou vodičů s proudem vznikla definice ampéru.

Definice ampéru:

Ampér je stálý proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného průřezu umístěnými ve vakuu ve vzdálenosti 1 m od sebe vyvolá mezi vodiči sílu o velikosti $2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ na 1 m délky každého vodiče.

Magnetické pole cívky

Velikost vektoru magn. indukce nekonečně dlouhé hustě navinuté válcové cívky ve vakuu:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{l} \cdot I$$

μ_0 ... permeabilita vakua

l ... délka části cívky

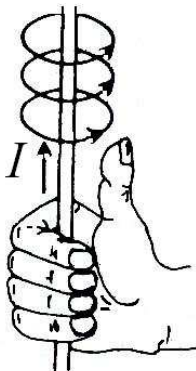
N ... počet závitů části cívky o délce l $\frac{N}{l}$... hustota závitů cívky

I ... procházející proud cívku

Orientaci mgn.ind. čar cívky určíme

Ampérovým pravidlem pravé ruky pro cívku:

Pravou ruku položíme na cívku tak, aby zahnuté prsty ukazovaly směr proudu v závitech cívky, palec ukazuje směr (orientaci) indukčních čar v dutině cívky.



Uprostřed dlouhé válcové cívky je téměř homogenní mgn. pole.

Helmholtzovy cívky (dvě stejné úzké kruhové cívky se společnou osou, jejichž vzájemná vzdálenost je rovna jejich poloměru, oběma prochází proud souhlasným směrem): zdroj téměř homogenního. slabého pole

Toroidní cívka (toroid): prstencová cívka (prstenec má kruh. průřez)

Částice s nábojem v mgn. poli

Síla půs. na vodič s I : $F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$

Jde vlastně o výslednici sil působících na jednotlivé částice s nábojem.

N elektronů \Rightarrow celkový $Q = -N \cdot e$

elektrony mají rychlost (stálou) v

za čas t urazí dráhu $l = t \cdot v$

proud, který projde vodičem za dobu $t \Rightarrow I = \frac{|Q|}{t}$

$$\Rightarrow F_m = B \cdot \frac{|Q|}{t} \cdot t \cdot v \cdot \sin \alpha = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

síla půs. na volný elektron:

$$F_m = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

α ... úhel mezi směrem pohybu náboje a indukčními čarami

\vec{F}_m je kolmá na \vec{v} a na \vec{B} .

Směr půs. síly určíme pomocí FPLR, místo \vec{i} dáme \vec{v}

- je-li $Q > 0$ síla má stejný směr jako podle FPLR

- je-li $Q < 0 \Rightarrow \vec{F}_m$ opačný směr než podle FPLR

Je-li částice s nábojem zároveň v el. a mgn. poli, působí na ní \vec{F}_m i \vec{F}_e

$$\Rightarrow \vec{F}_L = \vec{F}_m + \vec{F}_e \quad \dots \text{tzv. Lorentzova síla}$$

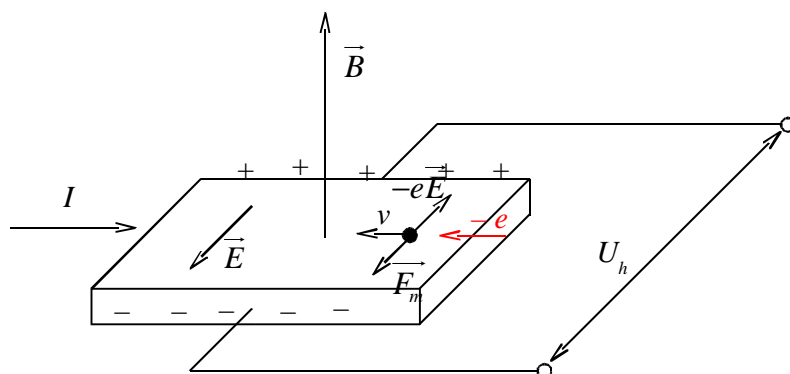
Vletí-li částice s nábojem do hom. mgn. pole kolmo na $\vec{B} \Rightarrow$ pohybuje se po kružnici v rovině kolmé na \vec{B}

$$\Rightarrow |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = m \cdot \frac{v^2}{r} \quad \alpha = 90^\circ \Rightarrow \sin \alpha = 1$$

$$\boxed{r = \frac{mv}{|Q| \cdot B}} \quad \dots \text{poloměr dráhy částice}$$

praktická aplikace silového působení mgn. pole na částice s nábojem – např. televizní obrazovka

Hallův jev: kovovou nebo polovodičovou destičku, kterou prochází el. proud vložíme do mgn. pole, aby vektor mgn. indukce byl na destičku kolmý \rightarrow mezi bočními hranami destičky se vytvoří tzv. Hallovo napětí U_h .

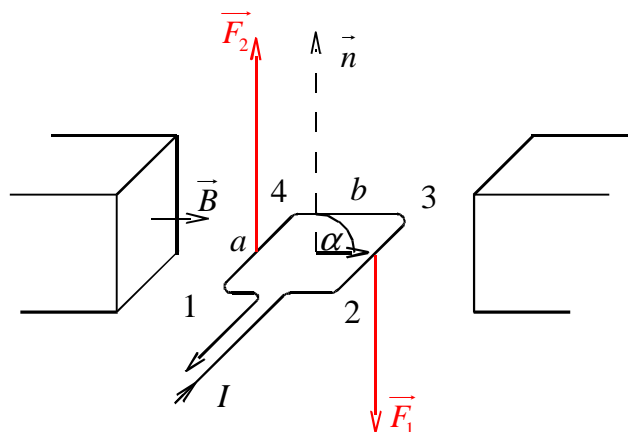


Mgn. síla \vec{F}_m působí na volné částice s nábojem v destičce a ty se přemísťují k jedné boční stěně destičky, zde vzniká nadbytek nositelů náboje, u druhé boční stěny je jich nedostatek \rightarrow vznikne příčné el. pole o intenzitě \vec{E} .

v rovnovážném stavu platí $\vec{F}_m = \vec{F}_e (= -e\vec{E})$. Tomu odpovídá Hallovo napětí, je přímo úměrné velikosti vektoru mgn. indukce ($U_H = k \cdot B$)

Závit s proudem v mgn. poli

Tak jako magnetka se stočí v magnet. poli i rovinný závit a to tak, že normála plochy má směr mgn. indukce \vec{B} .



U vodičů 23 a 41 na obrázku je směr síly dán podle FPLR, na vodiče 34 a 12 síla nepůsobí, neboť jejich kolmý průmět do roviny kolmé na vektor mgn. indukce je nulový.

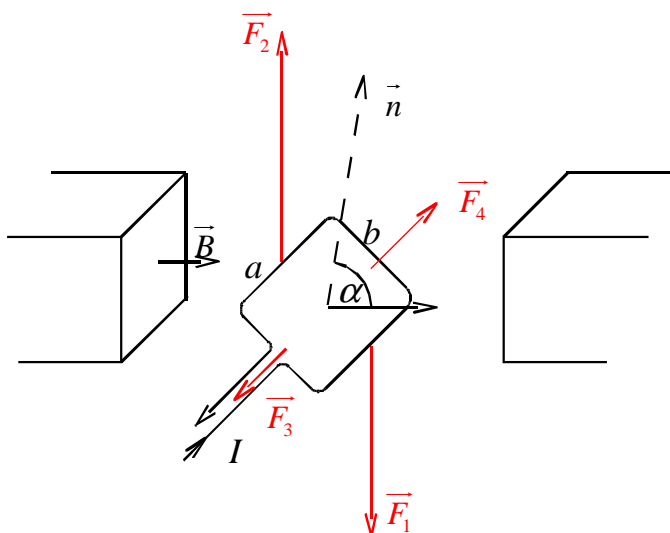
$$F_1 = F_2 = B \cdot I \cdot a \quad (\text{pozn.: } l \cdot \sin\alpha = a) \quad \alpha - \text{úhel mezi } \vec{n} \text{ a } \vec{B}$$

F_1, F_2 - Jedná se o dvojici sil (viz 1. ročník), její moment je definován $M = F \cdot d$

d ... vzdálenost působišť sil

$$M = B \cdot I \cdot a \cdot b = B \cdot I \cdot S \quad \text{v tomto případě je } \alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow M \text{ maximální}$$

Obecně: $M = B \cdot I \cdot S \cdot \sin\alpha$ (viz obrázek ↓)



Při obecné poloze závitu se síly \vec{F}_3 a \vec{F}_4 vyruší – nemají otáčivý účinek.

Ampérův magnetický moment

součin $I \cdot S = \vec{m} \quad [m] = \text{A} \cdot \text{m}^2$

Je kolmý na rovinu závitu, jeho směr je shodný se směrem vektoru mgn. indukce

vlastního mgn. pole závitů.

\vec{m} ... důležitá veličina pro všechny fyz. objekty, kt. vytváří mgn. pole, ty se vždy snaží zaujmout takovou polohu, kdy \vec{m} má stejný směr jako \vec{B} vnějšího pole.

Příklad 1:

Dlouhá válcová cívka, kterou prochází proud 10 A, má 400 závitů a délku 40 cm. Uprostřed její dutiny je kruhový závit o poloměru 2 cm, kterým prochází proud 0,10 A.

a) Jaký maximální moment síly může působit na závit?

b) Jakou výslednou polohu vzhledem k cívice zaujme závit, může-li se volně otáčet?

$I_1 = 10 \text{ A}$, $N = 400$, $l = 0,4 \text{ m}$, $I_2 = 0,10 \text{ A}$, $r = 0,02 \text{ m}$

$M = ?$, $\alpha = ?$

a)

$$M = B \cdot I_2 \cdot S \quad B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I_1}{l}$$

$$M = \frac{N \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu_0}{l}$$

$$\underline{\underline{M = 1,58 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}}}$$

b)

Výsledná poloha závitů: $\vec{m} \parallel \vec{B}$ ($\alpha = 0^\circ$)

Maximální moment síly působící na závit je $1,58 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ a závit zaujme vzhledem k cívice polohu takovou, že jeho normála je rovnoběžná s vektorem magnetické indukce pole cívky, tj. rovina závitů je kolmá k ose cívky.

Látky v magnetickém poli

- předměty z různých látek se chovají v magnetickém poli různě

Feromagnetické látky: reagují výrazně na mgn. pole

Neferomagnetické látky: ostatní

Elektrony mají dva různé mgn. momenty:

orbitální mgn. moment - v důsledku pohybu el. kolem jádra

spinový mgn. moment - vlastní mgn. moment elektronu

vektorový součet těchto momentů dá magnetický moment atomu m_a

Atomy se dělí na: diamagnetické ... $m_a = 0$

paramagnetické ... $m_a \neq 0$

Diamagnetické látky: z diamgn. atomů, nepatrně zeslabují vnější magnetické pole, $\mu_r < 1$,

inertní plyny, zlato, měď

Paramagnetické látky: z paramgn. atomů, nepatrně zesilují mgn. pole, $\mu_r > 1$, platina, hliník, mangan

Feromagnetické látky: z paramgn. atomů, mezi atomy působí tzv. výměnné síly (jejich původ vysvětluje kvantová mechanika), způsobují paralelní uspořádání mgn. momentů atomů – v celém vzorku není uspořádání stejné - vznikají mgn. domény (magneticky nasycené oblasti feromagnetické látky) a při větším mgn. poli nastává magnetování látky – domény zvětšují svůj objem a jejich mgn. momenty se stáčíjí do směru vektoru \vec{B}

Zvláštní postavení mají ferity: složitější než feromagnetické látky, mají velký el. odpor (jádra cívek, permanentní magnety)

Magnetická hystereze

velikost vektoru mgn. indukce dlouhé cívky ve vakuu:

$$B_0 = \mu_0 \frac{N}{l} \cdot I$$

velikost mgn. indukce mgn. pole v jádře cívky o relativní permeabilitě μ_r :

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \vec{B}_0$$

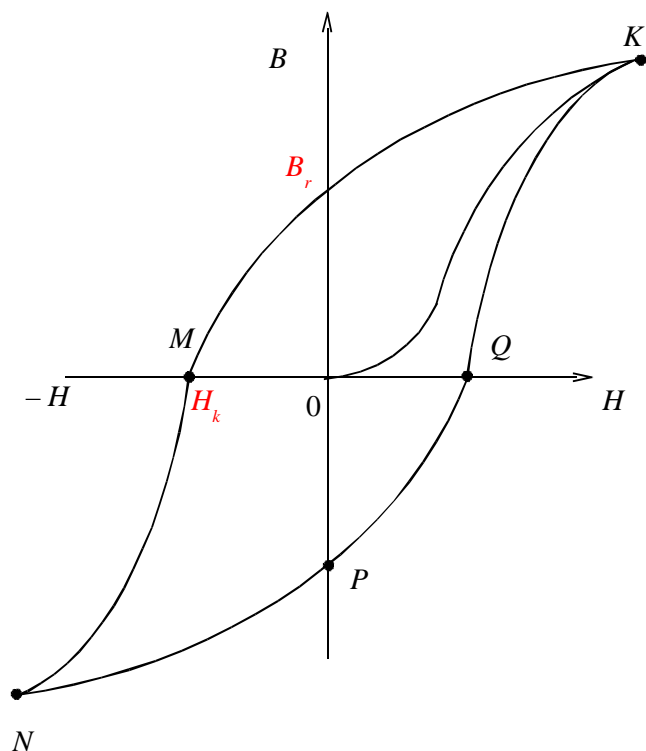
Zavedeme novou veličinu: intenzita mgn. pole \vec{H} :

$$H = \frac{N}{l} \cdot I \quad [H] = \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$$

pro jádro platí: $\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \vec{H} = \mu \cdot \vec{H}$

μ_r u feromagnetických látek není konst., závisí na \vec{H} \Rightarrow (závislost B na H) $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ není lineární, je popsána hysterezní smyčkou

Hysterezi smyčka (hystereze = nevratnost):



hyst. smyčka - charakteristika feromgn. látek:
 široká-mgn. tvrdé
 úzká-mgn. měkké

Křivka $0 - K$ – křivka prvotní magnetizace – bod K – nasycení látky (paralelní usp. domén)

Zmenšování intenzity mgn. pole – křivka $K - N$

Při dosažení nulové hodnoty intenzity mgn. pole neklesne hodnota B na nulu, ale na hodnotu B_r – remanentní mgn. indukce - látka je zmagnetovaná

Při změně směru \vec{H} na opačný $\rightarrow H_k$ - koercitivní hodnota intenzity mgn. pole – při ní klesne velikost mgn. indukce v látce na nulu – látka se odmagnetuje

Bod N – nasycení látky

Při dalším zmenšování \vec{H} a následné změně směru \vec{H} na opačný - křivka $N - K$

Magnetické materiály v technické praxi

mgn. tvrdé látky ... výroba permanentních magnetů

mgn. měkké látky ... jádra pro zesílení mgn. pole cívky

užití mgn. materiálů: elektromagnet. relé, měřicí přístroje s otočnou cívkou (magnetoelektrické, depréžské), elektromagnety aj...