Magnetické pole stacionární

Magnetické pole stacionární je generováno ss proudy, pokud je generováno ***permanentními magnety, pak je to pole magnetostatické*** a je vytvářeno elementárními proudy v mikroskopickém měřítku, dále se budeme zabývat MP od ss proudů.

Základní veličiny stacionárního magnetického pole jsou ***vektory***
H – intenzita magnetického pole a **B** – magnetická indukce,
dále jsou důležité ***veličiny skalární***:
ss proud I, magnetický indukční tok Φ, indukčnost L.

MP je ***vírové a nezřídlové,*** tzn., že ***vektorové čáry B jsou uzavřené***, vírové - protože zdrojem jsou elektrické proudy (víry). Tyto vlastnosti vyplývají z následujících rovnic, charakter pole snadno poznáme z tvaru vektorových čar.

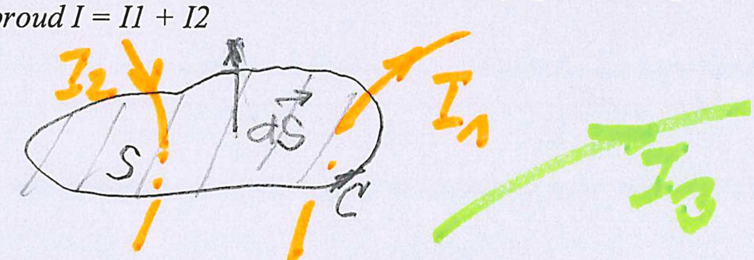
Ampérův zákon celkového proudu - 1. Maxwellova rovnice v integrálním tvaru

$$\oint_c \boldsymbol{H}\, d\boldsymbol{l} = I$$

Vysvětlení matematické:
cirkulace vektoru H je rovna proudu spřaženému s křivkou *c* (integrační drahou), jelikož cirkulace vektoru H je nenulová (rovná se proudu I), je toto pole ***vírové***

Vysvětlení fyzikální:
Zdrojem magnetického pole stacionárního je elektrický proud, jinými slovy, v okolí každého vodiče protékaného proudem je generováno MP

Vysvětlení pojmu spřažený proud (jelikož plocha S vymezená křivkou c je protékána pouze proudy I1 a I2) bude spřažený proud I = I1 + I2



Pro vektor B platí rovnice – 4. Maxwellova rovnice v integrálním tvaru

$$\oint_S \vec{B}\, d\vec{S} = 0$$

Jelikož tok vektoru B uzavřenou plochou je nulový, je to pole ***nezřídlové***, vektorové čáry jsou uzavřené.

Směr vektoru H závisí na směru proudu I – ***pravidlo pravé ruky***

pro přímý vodič platí
palec ve směru proudu, prsty ukáží směr H

pro cívku platí
prsty ve směru proudu, palec ukáže směr H

Mezi vektory B a H platí vztah

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

kde permeabilita $\mu = \mu_0 \mu_r$, je součin
permeability vakua $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m a permeability relativní

Z hlediska magnetických vlastností dělíme látky na ***nemagnetické***

diamagnetické $\mu_r < 1$ (vnější MP nepatrně zeslabují)
paramagnetické $\mu_r > 1$ (vnější MP nepatrně zesilují)

feromagnetické $\mu_r >> 1$

látky nemagnetické představují zpravidla lineární prostředí (závislost B= f(H) je přímka)
feromagnetické materiály představují zpravidla nelineární prostředí – magnetizační křivka B=f(H) není přímka, často však předpokládáme, že jsou rovněž lineární – viz řešení magnetických obvodů.

Základní úloha analýzy je určit rozložení MP pro dané proudy;
určit rozložení proudů pro požadované MP je úloha syntézy a často se používá při řešení magnetických obvodů.

Pro analýzu MP existuje celá řada metod a jsou k dispozici i profesionální programy, které umožní určit MP i pro velmi složité uspořádání, např. MP v elektrických strojích apod.

Nejjednodušší případ je ***analýza 1D (symetrického) pole pomocí 1.M.r. v integrálním tvaru,*** sem patří MP pole dlouhého přímého tenkého vodiče, válcového vodiče (plného i dutého) a koaxiálního kabelu. Ve všech těchto případech lze předpokládat, že ***MP válcově symetrické***, rozložení vektoru H se nemění podél vodiče a ve válcových souřadnicích bude záviset jen na souřadnici *r*: ***siločáry MP jsou pak soustředné kružnice se středem v ose vodiče a podél nich platí H = konst.*** V tomto případě lze 1. Maxwellovu rovnici upravit následovně

$\vec{H} \parallel \vec{dl}$

$$\oint_c \vec{H}\,\vec{dl} = \oint_c H\,dl = H \oint_c dl = I_c$$

$\vec{dl}$ $\vec{H}$

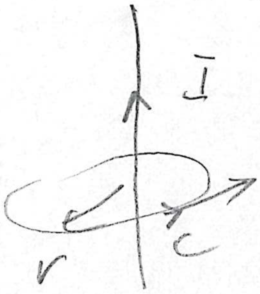
c ≡ siločára

nejdůležitější je určit správně spřažený proud s křivkou c - viz příklady.

$\vec{H} \parallel \vec{dl} \Rightarrow H\,dl$

$H = \text{konst. na } c \Rightarrow H \oint dl$

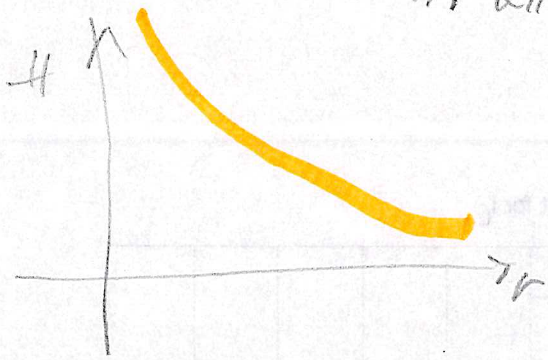
MP tenkého přímého vodiče s proudem I



pro $r>0$ platí

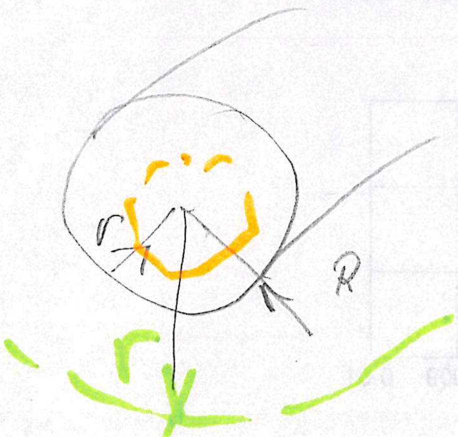
$$\oint_c \vec{H}\,d\vec{l} = H\oint_c dl = I_c$$

$$H \cdot 2\pi r = I \qquad \boxed{H = \frac{I}{2\pi r}}$$



MP válcového vodiče o poloměru R

2 oblasti $r \in \langle 0, R)$
$r > R$

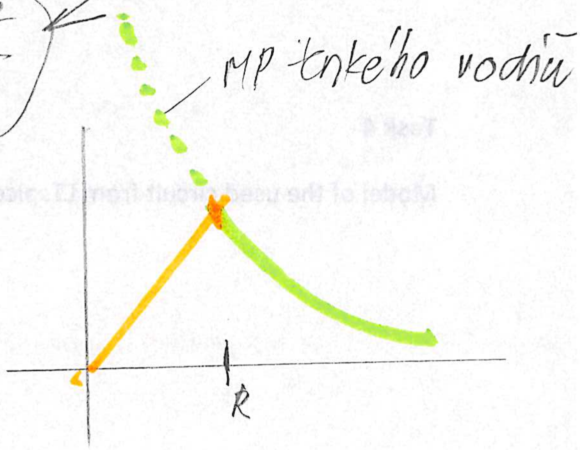


uvnitř vodiče $r \in \langle 0, R \rangle$

mění se velikost proudu obepnutého křivkou c

$$H \cdot 2\pi r = \frac{I}{\pi R^2} \cdot \pi r^2 = \frac{I r^2}{R^2}$$

$$\boxed{H = \frac{I r}{2\pi R^2}}$$



Vně vodiče $r > R$

každá křivka c je spřažena s celým proudem I

$$H \cdot 2\pi r = I \qquad \boxed{H = \frac{I}{2\pi r}}$$

Tenký vodič – MP pouze vně vodiče
se vzdáleností klesá H

Masivní vodič ($R \neq 0$)

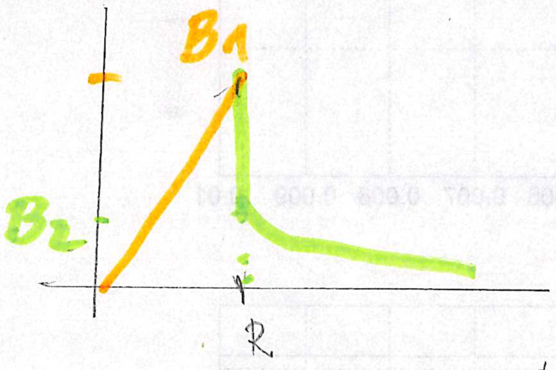
MP uvnitř (H roste)

MP vně (H klesá)

válcový vodič z feromagnet. materiálu

$r < R$ $\quad H = \frac{Ir}{2\pi R^2}$ $\quad B = \mu_0\mu_r \frac{Ir}{2\pi R^2}$

$r > R$ $\quad H = \frac{I}{2\pi r}$ $\quad B = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}$



povrch vodiče

rozhraní 2 prostředí

$\mu_0\mu_r \rightarrow \mu_0$

B má tečnou složku na povrchu

nemění se spojitě

obecně platí

normálové složky $B_{1n} = B_{2n}$

tečné složky $B_{1t} \neq B_{2t}$

Dutý vodič

$r \in \langle 0, a)$ $\quad \oint_c \vec{H} \, d\vec{l} = 0$

v dutině není proud

$\Rightarrow \underline{H = 0}$

$r \in \langle a, b)$ křivka c je spřažena s proudem

$$I(r) = \underbrace{\frac{I}{\pi(b^2-a^2)}}_{\text{proudová hustota}} \cdot \pi(r^2-a^2)$$

$$H \oint dl = H \cdot 2\pi r = I \frac{r^2-a^2}{b^2-a^2}$$

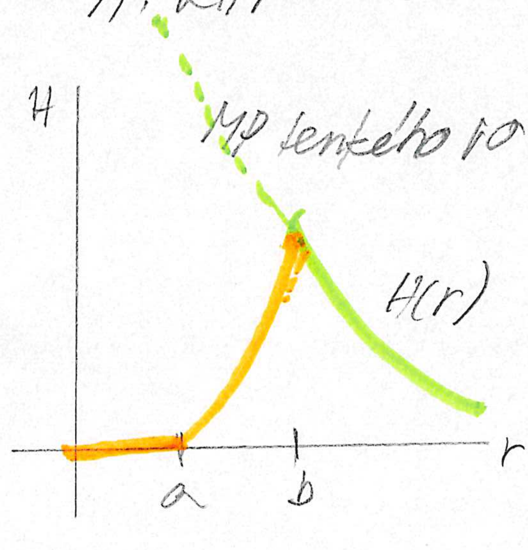
$$\boxed{H = \frac{I}{2\pi r} \frac{r^2-a^2}{b^2-a^2}}$$

Vně vodiče $r > b$

křivka c je spřažena s celkovým proudem I

$$H \cdot 2\pi r = I \qquad \boxed{H = \frac{I}{2\pi r}}$$

MP tenkého vodiče umístěného v ose

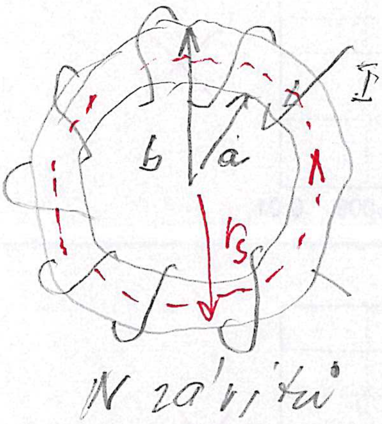


MP cívek

na prstencovém jádře – toroid

na válcovém jádře – solenoid

MP toroidu



předpoklad $a \approx b$

střední čára $r_s = \frac{a+b}{2}$

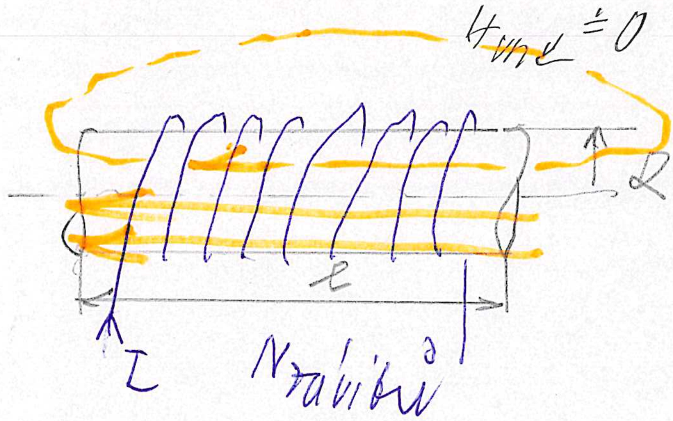
indukční čáry – soustředné kružnice

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = I_c = NI$$

$$H \cdot 2\pi r_s = NI$$

$$\boxed{H = \frac{NI}{2\pi r_s}}$$

MP solenoidu (velmi dlouhého)



$l >> R$

lze zanedbat MP vně

$$H_{vně} = 0$$

$$\oint_c \vec{H} d\vec{l} = H l = NI$$

$$\boxed{H = \frac{NI}{l}}$$

uvnitř solenoidu je homogenní MP $H = konst.$

je zanedbán okrajový jev a pole vně

platí pouze za předpokladu $l >> R$

Princip superpozice

uvažujeme lineární prostředí

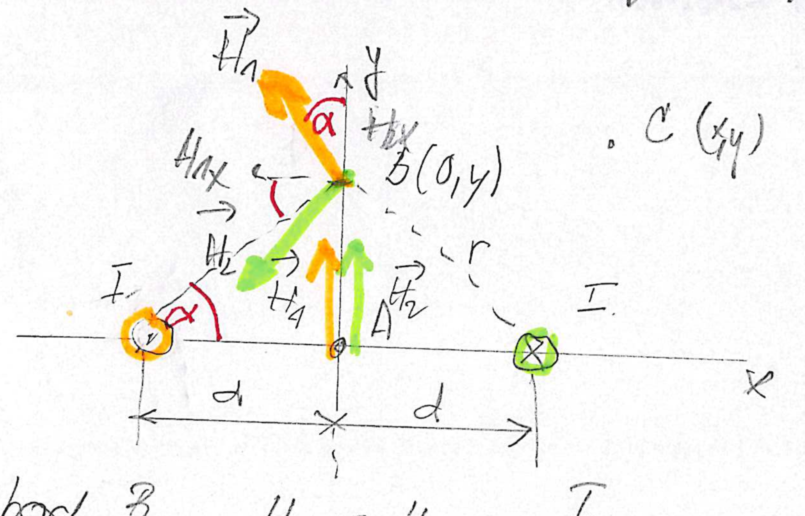
známe zdroje MP tj. proudy $I_1, I_2 \dots$

známe rozložení MP od proudů

$\vec{H}_1, \vec{H}_2, \dots$

MP od zdrojů $I_1 + I_2 + \dots$ je dáno superpozicí MP, tj. vektorovým součtem $\vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \dots$

Příklad: Vyšetřete MP dvouvodičového vedení (2 tenké rovnoběžné dlouhé vodiče protékané proudy v opačném směru)



bod A

$\vec{H}_1 \parallel \vec{H}_2 \quad H_1 = H_2 = \frac{I}{2\pi d}$

$$\boxed{H_A = \frac{I}{\pi d}}$$

bod B $\quad H_1 = H_2 = \frac{I}{2\pi r} \quad r = \sqrt{d^2 + y^2} \quad \sin\alpha = \frac{y}{r}$

$\vec{H}_1 = (H_{1x}, H_{1y}) \quad H_{1y} + H_{2y} = 0 \quad H_x = H_{1x} + H_{2x}$

$\vec{H}_2 = (H_{2x}, H_{2y}) \quad \underline{H_x = 2H_1 \sin\alpha}$

Vektorové čáry (siločáry) MP dvouvodičového vedení

a) opačný směr proudu b) shodný směr I