

A large, three-dimensional red sign with white text is the central focus of the image. The sign is composed of several rectangular blocks stacked together, creating a sense of depth. The text is in a bold, sans-serif font. The background shows a modern exhibition space with a high ceiling, industrial-style lighting fixtures, and other red and white architectural elements. The overall aesthetic is clean and contemporary.

**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ  
V BRNĚ**



# **NEXT GENERATION VUT: Zvyšování kvality a relevance vzdělávání na VUT CZ.02.02.XX/00/23\_022/0009052**

## **Magnetismus**

doc. RNDr. Milada Bartlová, Ph.D.,  
doc. Ing. Vlasta Sedláková, Ph.D.,  
Ing. Jitka Brüstlová, CSc.,  
Mgr. Naděžda Bogatyreva, Ph.D.



**Spolufinancováno  
Evropskou unií**



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



# Obsah

- **Magnetické pole, magnetická indukce**
- **Lorentzova síla**
- **Amperův zákon**
- **Magnetický indukční tok**
- **Elektromagnetická indukce**
- **Indukované elektromotorické napětí**
- **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**
- **Lenzův zákon**
- **Příklady**

# Magnetické pole

Magnetické pole vzniká v okolí permanentních (trvalých) magnetů nebo kolem pohybujících se elektrických nábojů (vodičů s proudem).

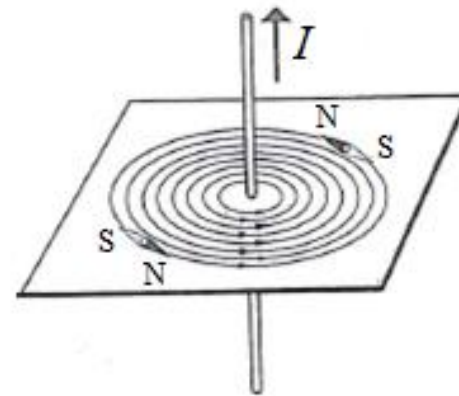
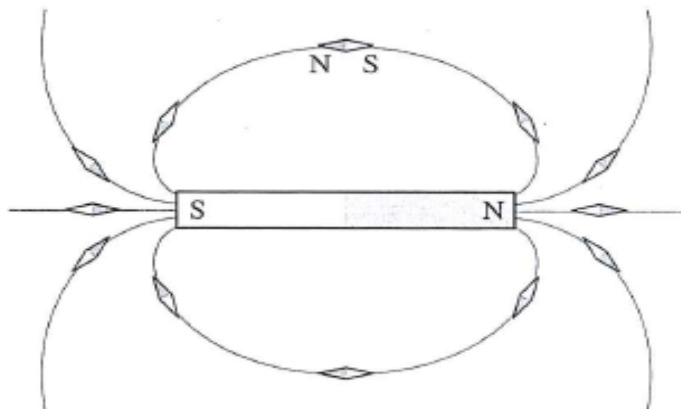
Tyčový permanentní magnet má vždy 2 póly, které nelze ani po rozdělení od sebe oddělit. Severní pól označujeme **N** (north) a jižní **S** (south). Opačné póly se přitahují, souhlasné póly se odpuzují.

Magnetické pole může být stacionární – neproměnné nebo nestacionární neboli proměnné.

Graficky můžeme magnetické pole zobrazit pomocí magnetických indukčních čar, což jsou prostorově orientované křivky, jejichž tečny v daném místě prostoru mají směr osy velmi malé magnetky, umístěné v tomto bodě.

Magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky, které se nikde neprotínají.

Orientace indukčních čar je od severního pólu **N** k jižnímu pólu **S**.

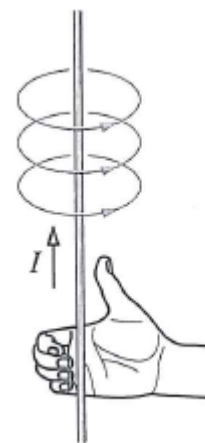


Magnetické pole tyčového magnetu a vodiče s proudem.

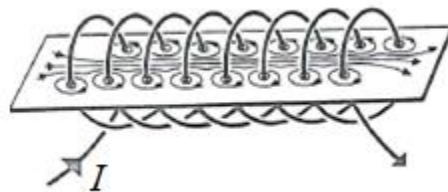
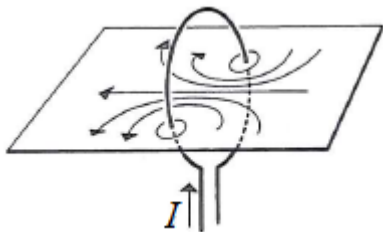
# Pravidlo pravé ruky

Orientaci magnetických indukčních čar v okolí vodičů protékaných proudem určíme pomocí Ampérova pravidla pravé ruky:

*Naznačíme uchopení vodiče do pravé ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu ve vodiči, prsty pak ukazují orientaci indukčních čar.*



Magnetické pole smyčky a cívky



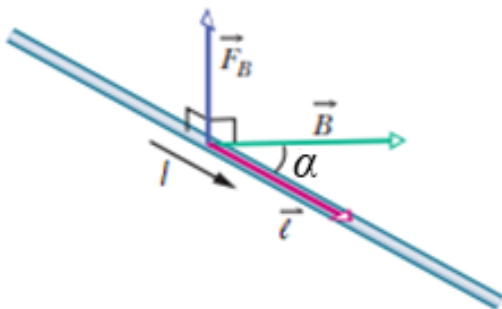
Vodič protékaný proudem. Ampérovo pravidlo pro určení orientace magnetické indukce.

# Magnetická indukce

Na přímkový vodič délky  $\ell$  protékaný elektrickým proudem  $I$  a umístěný v homogenním magnetickém poli působí toto pole magnetickou silou  $\vec{F}_m$ , jejíž velikost je

$$F_m = BI\ell \sin \alpha,$$

kde  $\alpha$  je úhel mezi vodičem a magnetickými indukčními čarami a  $B$  je velikost magnetické indukce  $\vec{B}$ , která charakterizuje magnetické pole.



Síla  $\vec{F}_m$  je kolmá na rovinu danou vodičem a vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ ,  $\alpha \in \langle 0, \pi \rangle$ .

Z předchozího vztahu vyplývá, že pro směr proudu kolmý k indukčním čarám je velikost magnetické indukce

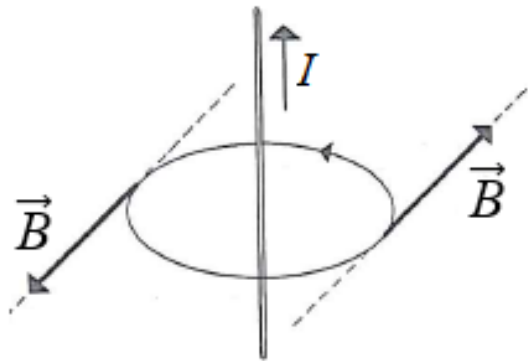
$$B = \frac{F_m}{I\ell}$$

Jednotkou magnetické indukce  $\vec{B}$  je **tesla** (T),  $T = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$ .

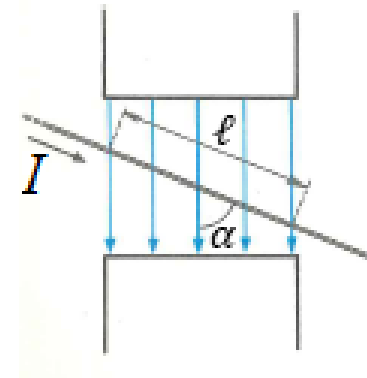
Magnetické pole má indukci 1 T (jednoho tesly), jestliže na vodič aktivní délky 1 m, kolmý k indukčním čarám, protéká-li jím proud 1 A, působí silou 1 N.

# Směr magnetické indukce

Směr magnetické indukce  $\vec{B}$  je shodný se směrem tečny k magnetické indukční čáře. Indukční čáry v homogenním magnetickém poli jsou rovnoběžné.

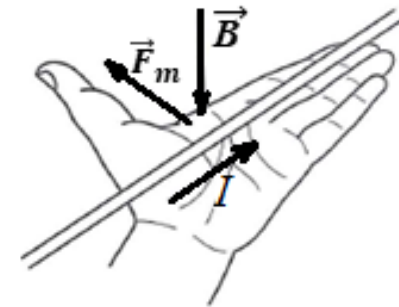
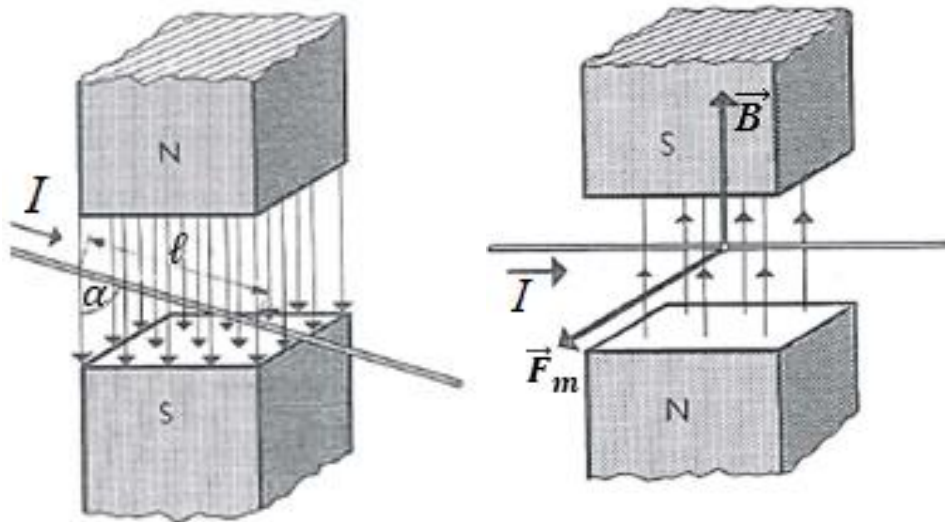


Směr magnetické indukce v okolí vodiče.



Homogenní magnetické pole.

# Vodič s proudem v magnetickém poli



Vodič s proudem v homogenním magnetickém poli.

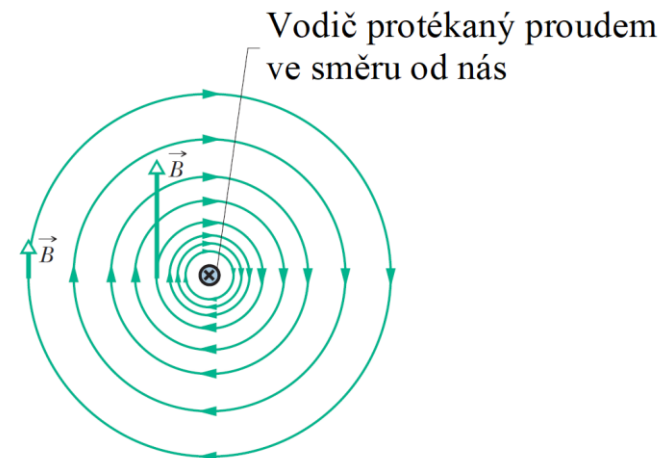
Flemingovo pravidlo levé ruky pro orientaci  $\vec{F}_m$ .

# Magnetické pole vodičů s proudem

V okolí každého vodiče s proudem je magnetické pole.

Velikost magnetické indukce tohoto pole je přímo úměrná proudu  $I$  ve vodiči, avšak závisí také na vzdálenosti od vodiče, na tvaru vodiče a na magnetických vlastnostech prostředí, v němž se vodič nachází.

**U přímého vodiče** protékaného proudem  $I$  mají indukční čáry **tvar soustředných kružnic** rozložených v rovině kolmé k vodiči se středem v ose vodiče.



# Magnetické pole vodičů s proudem

Velikost magnetické indukce  $B$  ve vzdálenosti  $d$  od **dlouhého přímého vodiče** je

$$B = \mu \frac{I}{2\pi d},$$

kde  $\mu$  je permeabilita prostředí,  $\mu = \mu_r \mu_0$ .

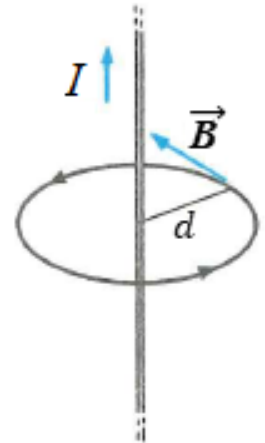
$\mu_0$  je permeabilita vakua neboli magnetická konstanta,

$\mu_r$  je relativní permeabilita prostředí.

Permeabilita vakua je konstanta, jejíž hodnotu definujeme přesně:

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

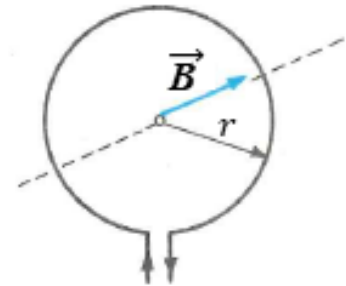
Pro vzduch je  $\mu_r \doteq 1$ .



# Magnetické pole vodičů s proudem

Ve středu rovinného kruhového závitu o poloměru  $r$  je velikost magnetické indukce

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

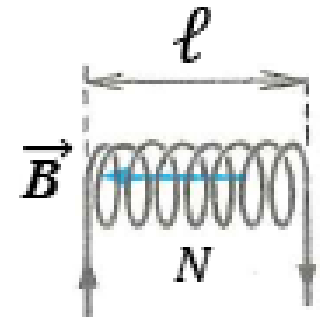


Magnetická indukce **uvnitř dlouhé válcové cívky (solenoidu)** hustě navinuté tenkým vodičem má homogenní magnetická indukce velikost

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell},$$

kde  $I$  je proud v cívce a  $N$  je počet závitů připadajících na délku  $\ell$  cívky.

Podíl  $n = \frac{N}{\ell}$  udává hustotu závitů.



# Magnetické vlastnosti látek

Podle magnetických vlastností rozdělujeme látky na

diamagnetické	$\mu_r < 1$	mírně zeslabují magnetické pole (Au, Cu, Hg, inertní plyny, aj.)
paramagnetické	$\mu_r > 1$	mírně zesilují magnetické pole (Al, Pt, Mn, O, Na, K, aj.)
feromagnetické	$\mu_r \gg 1$	značně zesilují magnetické pole (Fe, Ni, Co, ocel, aj.)

V praxi mají velký význam zejména feromagnetické látky, které zesilují magnetické pole vakua 100 až 100 000-krát.

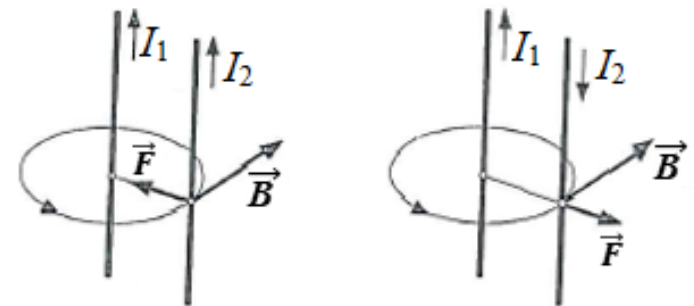
# Silové působení mezi dvěma rovnoběžnými vodiči s proudem

Dva rovnoběžné přímé vodiče délky  $\ell$ , jejichž vzdálenost je  $d$ , na sebe navzájem působí magnetickou silou  $\vec{F}_m$  o velikosti

$$F_m = \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi d} \ell,$$

$I_1$  a  $I_2$  jsou proudy protékající vodiči.

Při souhlasném směru proudů se vodiče přitahují, při nesouhlasném odpuzují. Této síly bylo použito k definici ampéru jako jednotky proudu.



Vzájemné silové působení dvou přímých vodičů s proudem

# Definice ampéru jako jednotky proudu

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

# Částice s nábojem v magnetickém poli

Na přímý vodič délky  $\ell$  s proudem působí v homogenním magnetickém poli síla o velikosti

$$F_m = BI\ell \sin \alpha.$$

Chápeme-li elektrický proud jako tok elektronů o celkovém náboji  $Q = N \cdot e$ , které se pohybují rychlostí o velikosti  $v$  ve směru vodiče, pak proud  $I = Q/t$ .

Dráhu  $\ell$  urazí částice za čas  $t$  podle vztahu  $\ell = v \cdot t$ , pak velikost

$$F_m = B \frac{Q}{t} v t \sin \alpha.$$

# Částice s nábojem v magnetickém poli

Na částici s nábojem  $Q$ , která se pohybuje v magnetickém poli rychlostí  $\vec{v}$  působí magnetická síla  $\vec{F}_m$ , která je v každém okamžiku kolmá k vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$  i k vektoru rychlosti částice  $\vec{v}$ .

Její velikost je

$$F_m = |Q|vB \sin \alpha,$$

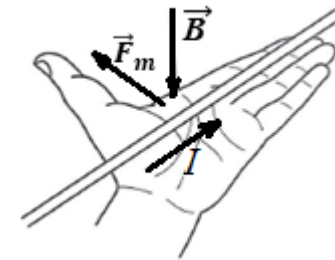
kde  $\alpha$  je úhel, jež svírají vektory  $\vec{B}$  a  $\vec{v}$ .

Na jeden volný elektron působí síla o velikosti

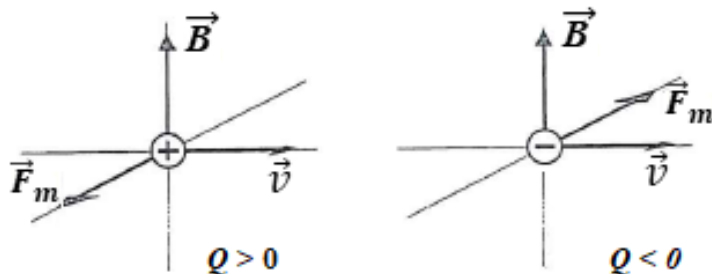
$$F_m = evB \sin \alpha.$$

# Směr působící magnetické síly

Směr působící magnetické síly určíme pomocí Flemingova pravidla levé ruky.



Směr magnetické síly působící na částici s nábojem, která se pohybuje v magnetickém poli, určíme podle obrázku.



# Částice s nábojem v magnetickém poli

Protože  $F_m$  je vždy orientována kolmo na směr pohybu částice, magnetická síla nekoná práci a kinetická energie částice se nemění, a proto se mění pouze směr vektoru rychlosti částice.

Vnikne-li částice s nábojem do homogenního magnetického pole kolmo k indukčním čarám ( $\alpha = 90^\circ$ , takže  $\sin \alpha = 1$ ), pohybuje se dále po kružnici v rovině kolmé na indukční čáry.

Platí: 
$$F_m = |Q|vB \sin \alpha = \frac{mv^2}{r},$$

z čeho je poloměr kruhové dráhy  $r = \frac{mv}{QB}.$

# Lorentzova síla

Pohybuje-li se částice s nábojem  $Q$  současně v elektrickém i magnetickém poli, působí na ni síla, která je vektorovým součtem elektrické síly  $F_e$  a magnetické síly  $F_m$ .

Elektrická síla je  $\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}$  a magnetická síla je určena vektorovým součinem  $\vec{F}_m = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ .

Platí tedy  $\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m$ .

Tato výsledná síla  $\vec{F}_L$  se nazývá Lorentzova síla.

# Příklady

V příkladech byly použity tyto hodnoty fyzikálních konstant:

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

elementární náboj  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

# Příklady

1. Nabitá částice se pohybuje rychlostí  $2 \cdot 10^6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  po kružnici o poloměru 10 m v rovině kolmé na směr indukčních čar magnetického pole o magnetické indukci 2,5 T. Kinetická energie částice je 0,05 J. Vypočítejte velikost elektrického náboje částice.

**Řešení:**

Na částici pohybující se v magnetickém poli působí síla  $F_m = |Q|vB \sin\alpha$ .

Úhel  $\alpha = 90^\circ$ , takže  $\sin\alpha = 1$  a magnetická síla má velikost  $F_m = |Q|vB$ .

Tato síla způsobuje zakřivení dráhy částice – je to síla dostředivá.

Platí tedy  $F_d = F_m$ , tj.  $\frac{mv^2}{r} = |Q|vB$ .

# Příklady

Ze vztahu pro kinetickou energii  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$  vyjádříme

$mv^2 = 2E_k$  a po dosazení do předchozí rovnice a úpravě obdržíme pro velikost náboje

$$|Q| = \frac{2E_k}{vBr}$$

$$\text{Číselně } |Q| = \frac{2 \cdot 0,05 \text{ J}}{2 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 2,5 \text{ T} \cdot 10 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ C.}$$

Velikost elektrického náboje částice je  $2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ .

# Neřešené příklady

2. Přímý vodič délky 8,5 cm, který se celý nachází v homogenním magnetickém poli, svírá s vektorem magnetické indukce stálý úhel  $30^\circ$ .

Jakou hodnotu má magnetická indukce pole, jestliže při zvýšení proudu ve vodiči o 2 A se síla, působící na vodič v magnetickém poli, zvětší o 0,17 N?

$$[ B = 2 \text{ T } ]$$

3. Částice o náboji  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  a o hmotnosti  $9,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$  se pohybuje v homogenním magnetickém poli o magnetické indukci  $9 \cdot 10^{-4} \text{ T}$  po kružnici o poloměru 2 cm. Určete obvodovou rychlost této částice.

$$[ v = 3 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1} ]$$

# Neřešené příklady

4. Určete kinetickou energii částice nesoucí náboj  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, která se v homogenním magnetickém poli o magnetické indukci  $3 \cdot 10^{-4}$  T pohybuje po kružnici o poloměru 1 m. Hmotnost částice je  $1,6 \cdot 10^{-27}$  kg.

$$[ E_k = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ J} ]$$

5. Solenoid o délce 30 cm má 400 závitů a protéká jím proud 0,6 A.

- Určete velikost indukce magnetického pole uvnitř solenoidu.
- Jak se změní tato velikost, jestliže cívku roztáhneme na dvojnásobnou délku? (Volte  $\mu = \mu_0$ .)

$$[ \text{a) } B_1 = 1005,3 \cdot 10^{-6} \text{ T} , \text{ b) } B_2 = \frac{1}{2} B_1 ]$$

# Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Faradayův zákon elektromagnetické indukce je děj vyvolaný nestacionárním magnetickým polem. Měnící se magnetické pole vzbuzuje ve vodiči indukované elektrické pole a pokud je vodič částí uzavřeného elektrického obvodu, vzniká v něm indukovaný elektrický proud.

V homogenním magnetickém poli o magnetické indukci  $B$  prochází plochou o obsahu  $S$ , která je kolmá k vektoru indukce, magnetický indukční tok

$$\Phi = BS.$$

# Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Není-li plocha  $S$  kolmá k indukci, pak magnetický indukční tok  $\Phi$  plochou  $S$  je určen vztahem

$$\Phi = BS \cos \alpha,$$

kde  $\alpha$  je úhel, který svírá normála plochy  $S$  se směrem vektoru indukce  $\vec{B}$ ,  $\alpha \in \langle 0, \frac{\pi}{2} \rangle$ .

Jednotkou magnetického indukčního toku je weber,  $\text{Wb} = \text{T}\cdot\text{m}^2$ .

# Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Při změnách magnetického indukčního toku plochou ohraničenou vodičem o  $\Delta\Phi$  za dobu  $\Delta t$  vzniká ve vodiči **indukované elektromotorické napětí  $U_i$**  a uzavřeným obvodem teče **indukovaný elektrický proud  $I_i$** .

Ten má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.

Pro střední hodnoty platí

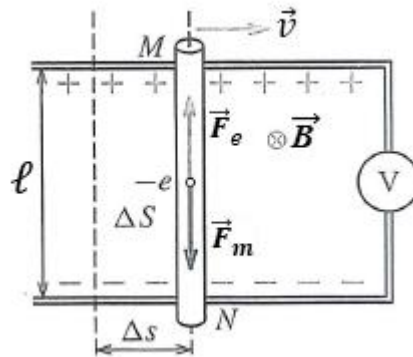
$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, I_i = \frac{U_i}{R},$$

znaménko minus je vyjádřením Lenzova zákona (viz dále). Napětí je číselně rovné změně indukčního toku za 1 sekundu.

# Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Jestliže se vodič délky  $\ell$  pohybuje v magnetickém poli kolmo k indukci  $B$  rychlostí  $v$ , určíme indukované napětí podle vztahu

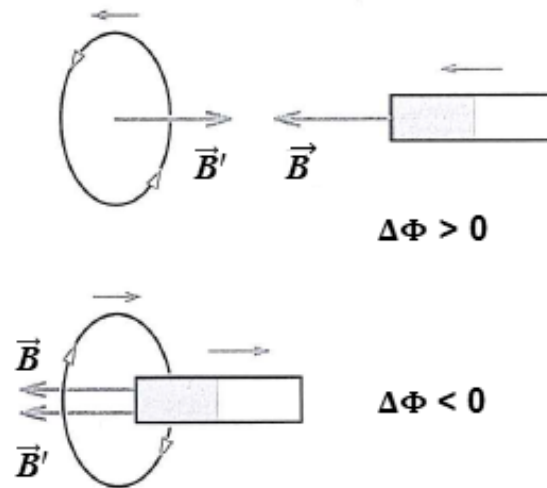
$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B\ell v.$$



Ilustrace Faradayova zákona elektromagnetické indukce.

# Lenzův zákon

Směr indukovaného elektrického proudu v elektrickém obvodu je určen podle tzv. Lenzova zákona tak, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického pole, která indukovaný proud vyvolala.



Lenzovo pravidlo pro určení směru indukovaného proudu.

# Vlastní indukčnost cívky

Změní-li se proud protékající cívkou o hodnotu  $\Delta I$  za čas  $\Delta t$ , indukuje se v cívce napětí

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

kde  $L$  je **vlastní indukčnost cívky**. Vlastní indukčnost se měří v jednotkách **henry** (H).

Vlastní indukčnost 1 H má vodič, na jehož koncích se změnou proudu o 1 A za 1 sekundu indukuje napětí 1 V.

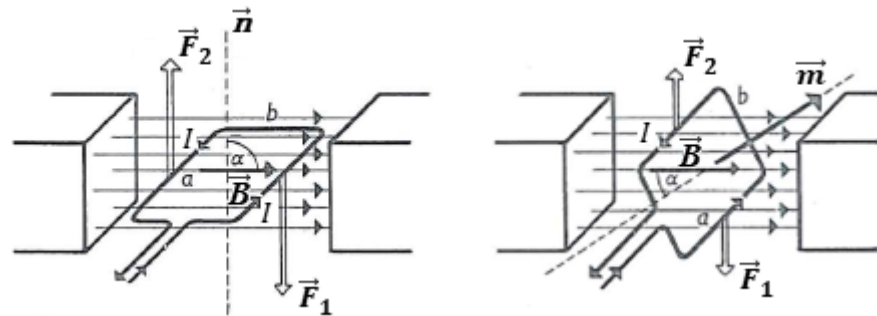
Vlastní indukce je závislá na indukčnosti  $L$  což je veličina charakteristická pro každý prvek elektrického obvodu. Projevuje se především u cívek, ostatní prvky mají indukčnost velmi malou.

# Energie magnetického pole cívky

Energie magnetického pole cívky o indukčnosti  $L$ , protékané proudem  $I$  je

$$E_m = \frac{1}{2} LI^2.$$

Elektromagnetická indukce umožňuje přímou přeměnu mechanické energie na energii elektrického proudu.



Silové působení homogenního magnetického pole na závit s proudem.

# Příklady

V příkladech byly použity tyto hodnoty fyzikálních konstant:

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

elementární náboj  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

# Příklady

1. Magnetická indukce homogenního magnetického pole má velikost 1,4 T. Vypočítejte magnetický indukční tok kruhovou plochou o poloměru 10 cm, jestliže rovina plochy svírá se směrem magnetické indukce úhel  $60^\circ$ .

## Řešení:

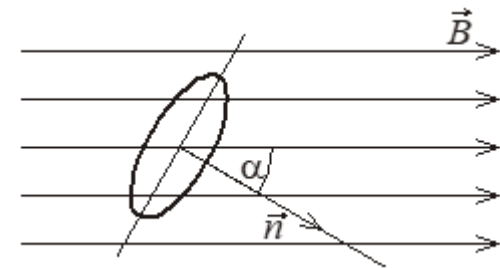
Magnetický indukční tok plochou je určen vztahem  $\Phi = BS \cos \alpha$ , kde  $\alpha$  je úhel, který svírá normála plochy  $S$  s vektorem magnetické indukce.

Z obrázku je zřejmé, že úhel

$$\alpha = 90^\circ - 60^\circ = 30^\circ.$$

Vzhledem k tomu, že  $S = \pi r^2$ ,

je magnetický indukční tok plochou  $\Phi = B\pi r^2 \cos(30^\circ)$ .



# Příklady

Po dosazení

$$\Phi = 1,4 \text{ T} \cdot \pi \cdot 0,1^2 \text{ m}^2 \cdot 0,866,$$
$$\Phi = 0,038 \text{ Wb}.$$

Magnetický indukční tok kruhovou plochou je 0,038 Wb.

# Příklady

2. Jakou rychlostí by se měl pohybovat vodič délky 20 cm ve směru kolmém na indukční čáry homogenního magnetického pole o magnetické indukci 0,1 T, aby se na jeho koncích indukovalo napětí 0,01 V?

**Řešení:**

Na koncích vodiče, který se pohybuje v magnetickém poli se indukuje napětí  $U_i = B\ell v \sin \alpha$ ,

kde  $\ell$  je délka vodiče,  $v$  je velikost rychlosti jeho pohybu v magnetickém poli o indukci  $B$  a  $\alpha$  je úhel, který svírá rychlost  $\vec{v}$  s vektorem magnetické indukce  $\vec{B}$ .

Rychlost pohybu vodiče je tedy  $v = \frac{U_i}{B\ell \sin \alpha}$ .

# Příklady

Po dosazení

$$v = \frac{0,01 \text{ V}}{0,1 \text{ T} \cdot 0,2 \text{ m} \cdot \sin(90^\circ)} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vodič by se měl pohybovat rychlostí  $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

# Neřešené příklady

3. Určete elektrický proud, který prochází dlouhou válcovou cívkou, je-li velikost magnetické indukce v cívce  $3,14 \cdot 10^{-3}$  T. Hustota závitů cívky je  $2,5 \cdot 10^3 \text{ m}^{-1}$ .

$$[ I = 1 \text{ A} ]$$

4. Rovná kovová tyč délky 20 cm se celá pohybuje v homogenním magnetickém poli rychlostí  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  kolmo k magnetickým indukčním čarám tak, že její délka je stále kolmá ke směru magnetických indukčních čar i ke směru vektoru rychlosti. Indukce magnetického pole má hodnotu 0,5 T.

Určete elektromotorické napětí indukované ve vodiči.

$$[ U_i = 0,4 \text{ V} ]$$

# Neřešené příklady

5. Přímý vodič délky 1 m se pohybuje stálou rychlostí  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  v homogenním magnetickém poli o magnetické indukci 2 T. Vodič svírá s vektorem magnetické indukce stálý úhel  $90^\circ$ .

Směr pohybu vodiče je kolmý na vodič i na vektor magnetické indukce. Oba konce vodiče jsou spojeny odporovým drátem tak, že celkový odpor tohoto uzavřeného obvodu je  $3 \Omega$ .

Vypočítejte velikost indukovaného napětí a proud ve vodiči.

$$[ U_i = 30 \text{ V}, I_i = 10 \text{ A} ]$$

# Literatura

1. Svoboda, E. a kolektiv. Přehled středoškolské fyziky. SPN, Praha, 1991.
2. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fyzika, VUTIUM, Brno, 2000.
3. Uργοšik, B. Fyzika, STNL, Praha, 1987.
4. Lepil, O., Bednařík, M., Hýblová, R. Fyzika pro střední školy. Prometheus, Praha, 1993.
5. Lepil, O., Houdek, V., Pecho, A. Fyzika pro III. Ročník gymnázií, SPN, Praha, 1986.
6. Hradilová, E., Uhdeová, N. Fyzika Příjímací zkoušky na vysoké školy, VUT v Brně, Brno, 2003.
7. Mechlová, E., Košťál, K. a kol. Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky. Prometheus, Praha, 2001.

**Děkujeme za pozornost**



**Spolufinancováno  
Evropskou unií**

**MŠMT**  
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY