3.6. Magnetické pole a jeho vlastnosti

1. Vyjmenovat typické zdroje magnetického pole.
2. Znát vlastnosti homogenního a stacionárního magnetického pole.
3. Umět nakreslit magnetické indukční čáry v okolí permanentního magnetu, vodiče s proudem a Země.
4. Umět vysvětlit fyzikální význam veličiny magnetická indukce pomocí popisu silového působení magnetického pole na pohybující se nabitou částici.
5. Znát přibližnou polohu severního a jižního magnetického pólu Země. Popsat vznik polární záře.
6. Vědět, za jakých podmínek se pohybuje nabitá částice v magnetickém poli po kružnici a po šroubovici. Znát vztahy pro výpočet charakteristik kružnice a šroubovice.
7. Znát vztah vyjadřující magnetickou sílu působící na proudovodič, umět určit orientaci této síly.
8. Popsat chování proudové smyčky obdélníkového a kruhového tvaru v homogenním magnetickém poli, umět vyjádřit velikost momentu magnetických sil na rovinnou smyčku obecného tvaru v tomto poli.
9. Seznámit se s působením homogenního magnetického pole na cívku.

3.6.1. Základní pojmy

Již ze starověku je známé vzájemné silové působení některých nerostů (např. magnetit Fe_3O_4, maghemit γ-Fe_2O_3), pozorován byl zemský magnetismus. Například v Číně se magnet používal v běžném životě již před několika tisíci lety. Minerál schopný přitahovat železné předměty znali také ve starém Řecku. Podle místa výskytu mu dali název magnet. Zájem o magnetismus vzrostl v souvislosti s využíváním kompasu. Do Evropy byl přivezen arabskými vzdělanci. V nejstarším psaném dokumentu z r. 1187, v němž je zmínka o kompasu, se o něm píše jako o všeobecně známém přístroji (mnich řádu sv. Albana Alexandr Neckam). H. Ch. Oersted roku 1820 zjistil, že **magnetka** (malý magnet z trvale zmagnetovaného ocelového plechu) v blízkosti vodiče protékaného proudem se vychýlí ze směru určeného **zemským magnetickým polem**, čímž ověřil hypotézu vzájemné souvislosti elektřiny a magnetismu. Ona hypotéza pramenila z toho, že byl jako stoupenec německé klasické filosofie (např. I. Kant) přesvědčen o všeobecné souvislosti přírodních jevů, o tom, že jsou projevem jedné přírodní síly. Silové působení mezi dvěma vodiči, jimiž teče proud, experimentálně prokázal A. M. Ampère. Zdrojem magnetického pole jsou **zmagnetovaná tělesa** (např. permanentní magnety, elektromagnety), pohybující se nabité částice a makroskopické elektrické proudy. Magnetické pole se projevuje účinky magnetické síly na zmagnetovaná tělesa, vodiče s proudem a pohybující se nosiče elektrického náboje. Magnetická síla je ve skutečnosti jednou složkou síly elektromagnetické, druhou složku již znáte, neboť se jedná o sílu elektrickou. Magnetické pole, jehož vlastnosti nezávisí na čase, se nazývá stacionární. Vzniká v okolí nepohybujících se zmagnetovaných těles, vodičů s konstantním proudem, příčinou jeho vzniku mohou být též rovnoměrně přímočaře se pohybující nabité částice. Kvantitativní mírou magnetického pole je vektorová fyzikální veličina magnetická indukce. Magnetické pole zobrazujeme pomocí **magnetických indukčních čar**. Mírou velikosti vektoru magnetické indukce v určité části prostoru je hustota siločar. Magnetické pole, jehož magnetické indukční čáry jsou rovnoběžky, je homogenní magnetické pole.

Zmagnetovaná tělesa mají na svém povrchu dvě místa – **severní** (značka S nebo N podle anglického *north*) a **jižní** (značka J nebo S podle anglického *south*) **pól magnetu**, na nichž se největší měrou projevují magnetické vlastnosti. Je zajímavé, že pojem pól magnetu zavedl Pierre Peregrinus již v roce 1269. Vzájemná poloha zmagnetovaných těles určuje charakter silové interakce. Jestliže budou k sobě přiléhat opačné póly magnetu, projeví se přitažlivé působení a naopak. Představme si, že rozřežeme tyčový magnet na dvě části. V každé z nich vznikne nová dvojice pólů N a S. V tomto dělení bychom mohli pokračovat až do molekulární nebo atomární úrovně, aniž zanikne **magnetický dipól**. Dosud se neprokázala existence izolovaného magnetického pólu (tzv. **magnetického monopólu**). Magnetické pole přísluší některým elementárním částicím (např. proton, neutron, elektron) – jeho původ vysvětlen dosud není.

KO 3.6.-1 Jmenujte alespoň jeden nerost, který má magnetické vlastnosti.

KO 3.6.-2 Jaké znáte zdroje magnetického pole?

KO 3.6.-3 Definujte stacionární magnetické pole.

KO 3.6.-4 Čím se vyznačuje homogenní magnetické pole?

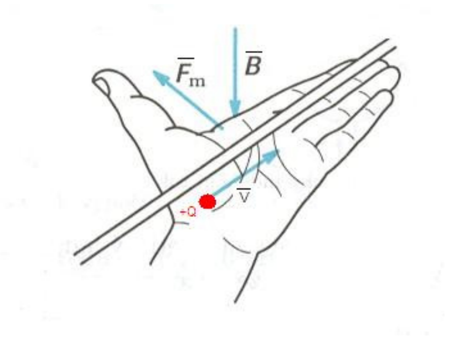
KO 3.6.-5 Jestliže budou k sobě přiléhat opačné póly magnetu, projeví se přitažlivé nebo odpudivé působení?

3.6.2. Aplikace pohybu náboje v magnetickém poli

Experimentálně byla prokázána souvislost mezi vektorem **magnetické síly** $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$, kterou magnetické pole působí na nabitou částici, vektorem rychlosti pohybu částice $\boldsymbol{v}$ a nábojem Q. Jestliže bychom vystřelovali v různých směrech nabitou částici do magnetického pole tak, aby procházela bodem A, v němž chceme pole charakterizovat, zjistili bychom, že existuje specifická přímka, obsahující bod A, s touto vlastností: Jestliže má nabitá částice v bodě A okamžitou rychlost, jejíž vektorová přímka splývá se specifickou přímkou, magnetická síla $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ na nabitou částici nepůsobí. Pokud jde o ostatní směry pohybu, působí na nabitou částici magnetická síla $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ o velikosti přímo úměrné velikosti náboje částice $|Q|$, sinu úhlu φ, který svírá vektor okamžité rychlosti se specifickou přímkou, velikosti okamžité rychlosti v částice a "síly" pole, tj. velikosti magnetické indukce B v bodě A:

$$F_\mathrm{m} = |Q| v B \sin\alpha . \qquad 3.6.\text{-}1$$

Bude-li se pohybovat nabitá částice ve směru kolmém k specifické přímce, dosáhne magnetická síla maximální velikost. Magnetická síla je vždy kolmá k vektoru rychlosti **v** částice a má stejnou resp. opačnou orientaci jako vektor $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$, pokud je náboj Q částice kladný resp. záporný. Vektorová přímka vektoru magnetické indukce $\boldsymbol{B}$ splývá se specifickou přímkou. Orientaci vektoru $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$ určuje pravidlo pravé ruky: palec ukazuje orientaci vektoru $\boldsymbol{v}$, ukazováček vektoru $\boldsymbol{B}$, kolmo k ukazováčku a palci vztyčený prostředník orientaci vektoru $\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}$.



Magnetická síla, která v daném bodě působí na nabitou a pohybující se částici, se nazývá **Lorentzova** a platí pro ni vektorová rovnice:

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{m} = Q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}. \qquad 3.6.\text{-}2$$

Protože je magnetická síla $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ vždy kolmá k vektoru rychlosti $\boldsymbol{v}$, může měnit pouze směr pohybu nabité částice, nikoliv velikost rychlosti. Je tedy zřejmé, že magnetická síla nekoná práci, čímž

Obr. 3.6.-1

se významně odlišuje od elektrické síly. Orientace síly $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ se určuje pravidlem levé ruky: Přiložíme-li levou ruku k nabité částici tak, aby prsty ukazovaly směr pohybu částice, vektor magnetické indukce vstupoval do dlaně, pro kladně nabitou částici je směr síly Fm určen vztyčeným palcem. Na záporně nabitou částici působí síla opačně orientovaná (Obr. 3.6.-1 a Obr. 3.6.-2).Vztah (3.6.-2) lze chápat jako definiční pro veličinu magnetická indukce. Jednotkou magnetické indukce je **tesla** (T). Podle (3.6.-2) je

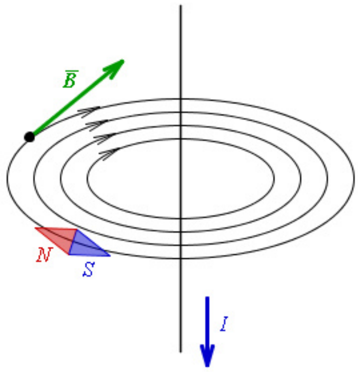
$$1\ \mathrm{T} = \mathrm{N \cdot s \cdot C^{-1} \cdot m^{-1}} = \mathrm{N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}}.$$

Magnetické pole Země má v blízkosti zemského povrchu indukci asi 10^{-4} T, hodnota indukce v mezihvězdném prostoru se pohybuje kolem 10^{-10} T, blízko tyčového magnetu 10^{-2} T, blízko velkého elektromagnetu 1,5 T a na povrchu neutronové hvězdy 10^{8} T.

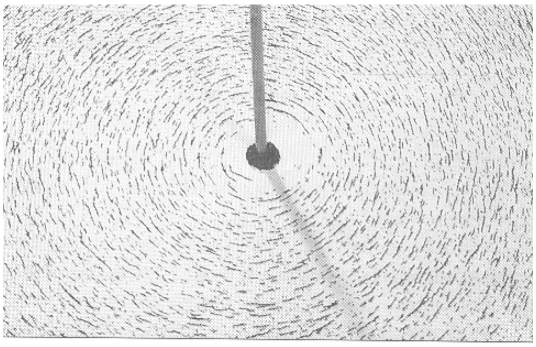
a) b)

Obr. 3.6.-2 Vliv znaménka náboje částice na orientaci vektoru magnetické síly. Roviny α a β jsou navzájem kolmé.

Aby se snížila míra abstrakce chápání magnetického pole, byl vytvořen jeho siločárový model. **Magnetická indukční čára** je orientovaná prostorová křivka, jejíž tečna v každém bodě splývá s vektorovou přímkou magnetické indukce a jejíž orientace odpovídá orientaci vektoru magnetické indukce. V dané oblasti je počet siločar mírou velikosti magnetické indukce. Magnetické indukční čáry jsou vždy uzavřené křivky – u zmagnetovaných těles jejich vnější část vychází ze severního pólu, v okolí přímého vodiče protékaného proudem mají tvar soustředných kružnic v rovině kolmé k vodiči (Obr. 3.6.-3) a jsou orientovány podle **Ampérova pravidla pravé ruky**: Přiložíme-li pravou ruku k vodiči tak, aby palec ukazoval dohodnutý směr proudu, pak zahnuté prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar. Jestliže v rovině kolmé k přímému vodiči rovnoměrně rozptýlíme železné piliny, po zapnutí proudu se každá pilina chová jako malá magnetka a proto se zorientuje ve směru siločar (Obr. 3.6.-4).



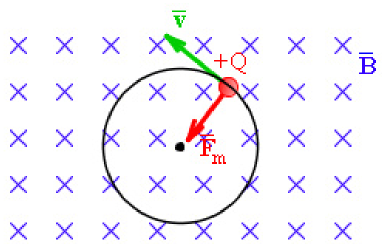
Obr. 3.6.-3 Magnetické indukční čáry v okolí a) tyčového magnetu, b) podkovovitého magnetu, c) přímého vodiče s proudem (zakreslena je poloha magnetky v rovině kolmé k přímému vodiči).



Obr. 3.6.-4

Země má své vlastní magnetické pole, jehož existenci můžeme celkem jednoduše zjistit tyčovým magnetem otáčivým ve vodorovné rovině. Je součástí kompasu a říká se mu střelka. Severní pól střelky je přitahován k **jižnímu magnetickému pólu Země**, který se nachází v oblasti Antarktidy a nazývá se **severní geomagnetický pól**. Stejně jako u každého zmagnetovaného tělesa, vycházejí magnetické indukční čáry Země ze severního magnetického pólu (jižní geomagnetický pól) a vcházejí do Země v jižním magnetickém pólu (severní geomagnetický pól).

Jestliže budou vystřelovány nabité částice s nábojem Q a hmotností m do homogenního magnetického pole o indukci B rychlostí v kolmo k magnetickým indukčním čarám a působení gravitace zanedbáme, bude v magnetickém poli na částici působit jediná síla: magnetická síla. Protože podle (3.6.-2) je vždy kolmá k rychlosti a vektory $\boldsymbol{v}$ a $\boldsymbol{B}$ jsou navzájem kolmé, bude se částice pohybovat v rovině, která vektory $\boldsymbol{v}$ a $\boldsymbol{B}$ obsahuje. Částice proto bude v magnetickém poli konat **rovnoměrný pohyb po kružnici** (Obr. 3.6.-5) o poloměru r pod vlivem dostředivé síly o velikosti $ma = mv^2/r$ (a je dostředivé zrychlení). Protože magnetická síla je zde silou



Obr. 3.6.-5

dostředivou, lze psát

$$|Q|vB = \frac{mv^2}{r}\,. \qquad 3.6.\text{-}3$$

Pro poloměr dostaneme

$$r = \frac{mv}{|Q|B}\,. \qquad 3.6.\text{-}4$$

Perioda je doba jednoho oběhu, kterému přísluší dráha $2\pi r$, a částice se pohybuje rovnoměrně, takže

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|Q|B}\,. \qquad 3.6.\text{-}5$$

V případě, že nabitá částice vletí do homogenního magnetického pole pod úhlem $\varphi \in (0°,90°)$, pohybuje se po šroubovici s osou ve směru magnetické indukce (Obr. 3.6.-6). Rychlost rozložme na složku $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}}$ kolmou k vektoru $\boldsymbol{B}$ a $\boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}$ rovnoběžnou s vektorem $\boldsymbol{B}$. Velikosti složek jsou rovny:

$$v_{\mathrm{h}} = v\cos\varphi \quad \text{a} \quad v_{\mathrm{R}} = v\sin\varphi\,. \qquad 3.6.\text{-}6$$

Magnetické pole působí na částici silou o velikosti

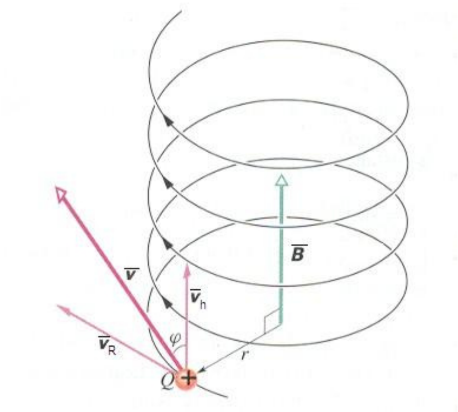
$$F_{\mathrm{m}} = |Q|vB\sin\varphi = |Q|Bv_{\mathrm{R}}, \qquad 3.6.\text{-}7$$

která je kolmá k vektoru $\boldsymbol{B}$. Pohyb částice je složený ze dvou, na sobě nezávislých pohybů. Jeden koná ve směru vektoru $\boldsymbol{B}$, druhý v rovině β kolmé k $\boldsymbol{B}$. Pohyb v rovině β jsme probírali, neboť rychlost $\boldsymbol{v}_{\mathrm{R}} \perp \boldsymbol{B}$. Využijme vztahů (3.6.-4) a (3.6.-6), abychom stanovili poloměr šroubovice:

$$r = \frac{mv_R}{|Q|B} = \frac{mv\sin\varphi}{|Q|B}\,. \qquad 3.6.\text{-}8$$

Veličina r je současně poloměrem kružnice, po níž se částice pohybuje v rovině β. Jeden oběh vykoná za dobu T, pro kterou jsme odvodili vztah (3.6.-5). Všimněte si, že s rostoucí magnetickou indukcí za jinak stejných podmínek se zmenšuje poloměr šroubovice.

Protože je $\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} \perp \boldsymbol{B}$ a $\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} \perp \boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}$, pohybuje se také částice rovnoměrně přímočaře ve směru vektoru $\boldsymbol{B}$ rychlostí $\boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}$. Neexistuje totiž síla (gravitaci zanedbáváme), která by částici ve směru magnetických indukčních čar udělovala zrychlení. Stoupání šroubovice h je vzdálenost mezi dvěma závity a je tudíž rovno vzdálenosti, o kterou se částice posune ve směru osy šroubovice za dobu jedné periody – označena T. Ve směru osy šroubovice se přitom částice posouvá rychlostí $\boldsymbol{v}_{\mathrm{h}}$. Odtud



Obr. 3.6.-6

$$h = v_h T = \frac{2\pi m}{|Q|B} v\cos\varphi\,. \qquad 3.6.\text{-}9$$

Také stoupání šroubovice je u silných magnetických polí menší, než u slabých.

Magnetické pole Země zachytává elektrony a protony – vznikají tak **Van Allenovy radiační pásy**. Nabité částice se pak pohybují po šroubovicích kolem magnetických indukčních čar mezi severním a jižním geomagnetickým pólem, jako by byly zachyceny do magnetické pasti. Tento stav je narušen po velké sluneční erupci, kdy do oblasti Van Allenových pásů doletí velké množství vysokoenergetických elektronů a protonů, které generují v místech odrazu elektronů elektrické pole, které ruší odraz a žene elektrony k Zemi. Po srážkách s molekulami kyslíku se emituje zelené světlo, s molekulami dusíku světlo růžové. Jestliže je intenzita světla velmi malá, vnímáme bílou barvu. Záření, které takto vzniká, se nazývá **polární záře** (Obr. 3.6.-7).

Obr. 3.6.-7

KO 3.6.-6 Vysvětlete fyzikální význam veličiny magnetická indukce (pomocí působení magnetického pole na pohybující se nabitou částici).

KO 3.6.-7 Co je Lorentzova síla a jak určíte její velikost?

KO 3.6.-8 Uveďte jednotku magnetické indukce.

KO 3.6.-9 Severní magnetický pól se nazývá jižní nebo severní geomagnetický pól?

KO 3.6.-10 Jak se bude v homogenním magnetickém poli o indukci B pohybovat nabitá částice s nábojem Q, hmotností m, vletí-li do něj rychlostí v a) kolmo, b) pod úhlem $\varphi \in (0°, 90°)$ k magnetickým indukčním čarám a působení gravitace zanedbáme? Určete parametry trajektorií.

KO 3.6.-11 Popište vznik polární záře.

Elektron v televizní obrazovce letí rychlostí $7 \cdot 10^6$ m·s^{-1} v magnetickém poli o indukci 83 mT. V určitém místě je zrychlení elektronu $4{,}6 \cdot 10^{14}$ m·s^{-2}. Jaký úhel svírá vektor rychlosti elektronu s vektorem magnetické indukce? Hmotnost elektronu je $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg, velikost náboje elektronu $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C.

$v = 7 \cdot 10^6$ m·s^{-1}; $B = 83$ mT; $a = 4{,}6 \cdot 10^{14}$ m·s^{-2}; $m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg; $|e| = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C

Na elektron působí Lorentzova síla o velikosti

$$F_m = |e| v B \sin\alpha \,. \qquad 3.6.\text{-}1$$

Předpokládáme-li, že na elektron působí pouze magnetické pole, je Lorentzova síla rovna síle výsledné, která elektronu uděluje zrychlení a. Tudíž

$$m_e a = |e| v B \sin\alpha \,.$$

Odtud již přímo dostaneme

$$\alpha = \arcsin \frac{m_e a}{|e| v B}$$

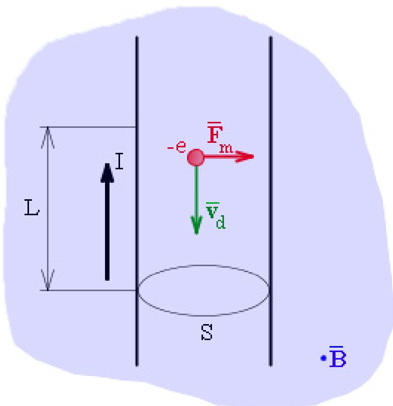
a

$\alpha = 0{,}26°$.

3.6.3. Síly působící na proudovodič (vodič, kterým prochází proud) v magnetickém poli

Lorentzova síla nepůsobí pouze na nabitou částici s nábojem Q, nýbrž i na každý makroskopický náboj. Představme si, že se v magnetickém poli pohybuje rychlostí 100 m·s^{-1} ve směru kolmém k vektoru magnetické indukce o velikosti 1 T kulička poloměru 2 cm nabita nábojem $2 \cdot 10^{-8}$ C. Lorentzova síla bude mít podle vztahu (3.6.-1) velikost $2 \cdot 10^{-6}$ N, což je jistě s ohledem na hmotnost například kovové kuličky, zcela nepatrná síla. Je známo, že magnetické pole působí na vodič, kterým protéká proud, nezanedbatelnou silou. To je však způsobeno tím, že ve vodiči je v pohybu velmi velký náboj. Například při proudu 1 A projde průřezem vodiče za jednu sekundu náboj 1 C.

Hledejme sílu, kterou působí magnetické pole kolmé na přímý úsek délky l kovového vodiče protékaného proudem I. Vodivostní elektron se přemísťuje ve vodiči driftovou rychlostí v_d ve směru osy vodiče, takže magnetické pole bude na něj působit silou o velikosti $|e| v_d B$.



Obr. 3.6.-8 Znázornění vzájemné orientace dohodnutého směru proudu ve vodiči, driftové rychlosti vodivostních elektronů, magnetické indukce vnějšího magnetického pole a magnetické síly na přímý úsek délky l vodiče působící. Všimněte si, že dohodnutý směr proudu je opačný k vektoru driftové rychlosti $\boldsymbol{v}_d$.

Vzájemná orientace dohodnutého směru proudu, driftové rychlosti a indukce magnetického pole je na Obr. 3.6.-8. V objemu vodiče o délce l se nachází celkový náboj vodivostních elektronů $|Q|$. Právě náboj $|Q|$ projde průřezem vodiče za dobu t a platí

$$|Q| = I\, t = \frac{I\, l}{v_d}.$$

Podle rovnosti (3.6.-1) je síla, kterou působí magnetické pole na úsek přímého vodiče délky l:

$F_\mathrm{m} = |Q| v_\mathrm{d} B = I\, lB$. 3.6.-10

V případě, že přímá část vodiče svírá s magnetickými indukčními čarami úhel α, bude v důsledku platnosti vztahu (3.6.-1)

$F_\mathrm{m} = I\, lB \sin\alpha$. 3.6.-11

Zaveďme vektor $\boldsymbol{l}$, shodně orientovaný s dohodnutým směrem proudu ve vodiči, s velikostí rovnou délce l. Pro vektor síly magnetického pole na přímou část vodiče délky l působící platí:

$\boldsymbol{F}_\mathrm{m} = I\, \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$. 3.6.-12

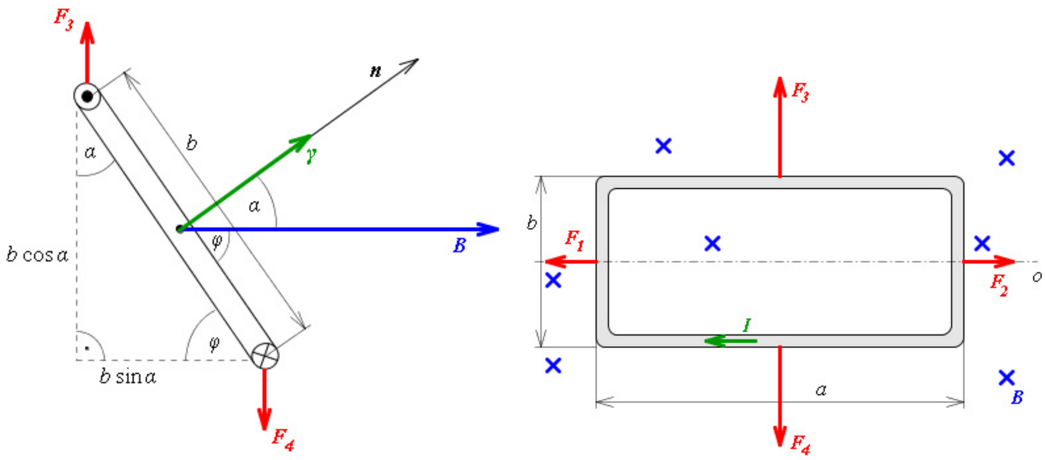
Orientaci síly $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ určujeme **Flemingovým pravidlem levé ruky**: Přiložíme-li levou ruku k vodiči tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, prsty kromě palce ukazovaly dohodnutý směr proudu, vztyčený palec ukazuje směr síly, kterou magnetické pole působí na přímou část vodiče v místě přiložení.

V případě, že hledáme sílu, kterou působí magnetické pole na tenký vodič libovolného tvaru, je nutné integrací sečíst příspěvky d$\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ k výsledné magnetické síle $\boldsymbol{F}_\mathrm{m}$ od všech délkových a orientovaných elementů d$\boldsymbol{l}$ vodiče

$\mathrm{d}\boldsymbol{F}_\mathrm{m} = I\, \mathrm{d}\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$. 3.6.-13

Sílu vyjádřenou podle (3.6.-11) resp. (3.6.-12) nazýváme **Ampérova síla**.

Popišme silové působení homogenního magnetického pole na proudovou smyčku tvaru obdélníku se stranami a a b. Budiž smyčka volně otáčivá kolem osy symetrie smyčky, která je rovnoběžná s delší stranou a a kolmá k magnetickým indukčním čarám. Definujme vektor normály $\boldsymbol{n}$ proudové smyčky s těmito vlastnostmi: a) Je jednotkový. b) Vychází ze středu smyčky. c) Z jeho koncového bodu vidíme, že proud teče smyčkou v kladném smyslu (proti směru pohybu hodinových ručiček). d) Je kolmý k rovině smyčky. V obecné poloze smyčky svírá vektor normály s magnetickou indukcí úhel α (Obr. 3.6.-9). Orientace magnetických



Obr. 3.6.-9 Magnetické síly působící na obdélníkový závit.

sil, jež působí na strany obdélníka, určíme podle vztahu (3.6.-12) nebo Flemingova pravidla levé ruky. Protilehlé magnetické síly mají stejné velikosti ($F_1 = F_2 = BIb\sin\varphi$ a $F_3 = F_4 = BIa$) a jsou opačně orientované, příslušná výslednice je tudíž nulová. Síly $\boldsymbol{F}_1$ a $\boldsymbol{F}_2$ jsou rovnoběžné s rotační osou, takže nevytvářejí silový moment narozdíl od sil $\boldsymbol{F}_3$ a $\boldsymbol{F}_4$. Velikost momentu síly je obecně dána součinem ramene síly (vzdálenost vektorové přímky síly od rotační osy) a velikosti síly; v našem případě dostaneme u momentů sil $\boldsymbol{F}_3$ a $\boldsymbol{F}_4$:

$$M_3 = F_3 \frac{b \sin\alpha}{2} = F_4 \frac{b \sin\alpha}{2} = BIa \frac{b \sin\alpha}{2} = M_4 \,.$$

M_3 resp. M_4 je moment síly $\boldsymbol{F}_3$ resp. $\boldsymbol{F}_4$.

Navíc momenty $\boldsymbol{M}_3$ a $\boldsymbol{M}_4$ mají stejnou orientaci, z čehož vyplývá, že velikost výsledného momentu magnetických sil působících na obdélníkovou smyčku s proudem je rovna součtu velikosti dílčích momentů:

$$M = M_3 + M_4 = BIab \sin\alpha = BIS \sin\alpha. \qquad 3.6.\text{-}14$$

S obsah plochy závitu

Součin IS je velikost vektorové veličiny $\boldsymbol{\mu}$, kterou nazýváme **magnetický dipólový moment** nebo také **Ampérův magnetický moment** a definujeme vektorovým zápisem:

$$\boldsymbol{\mu} = IS\boldsymbol{n}\,. \qquad 3.6.\text{-}15$$

Jak již bylo uvedeno, vektor $\boldsymbol{n}$ je jednotkový a je orientován kolmo k rovině smyčky tak, že z jeho koncového bodu vidíme téci proud ve smyčce proti směru hodinových ručiček. Rovnost (3.6.-14) přepišme do tvaru

$$M = B\mu \sin\alpha, \qquad 3.6.\text{-}16$$

kde α je úhel mezi vektory $\boldsymbol{\mu}$ a $\boldsymbol{B}$. Jestliže určíte orientaci momentu $\boldsymbol{M}$ pravidlem pravé ruky (viz. kapitola 1.6) s přihlédnutím k Obr. 3.6.-9, snadno odvodíte, že

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B}. \qquad 3.6.\text{-}17$$

Magnetický dipólový moment charakterizuje nejen obdélníkový závit s proudem, ale i všechny ostatní fyzikální objekty vytvářející magnetické pole (kruhové proudové smyčky, magnety, atomy, elementární částice apod., Obr. 3.6.-10).

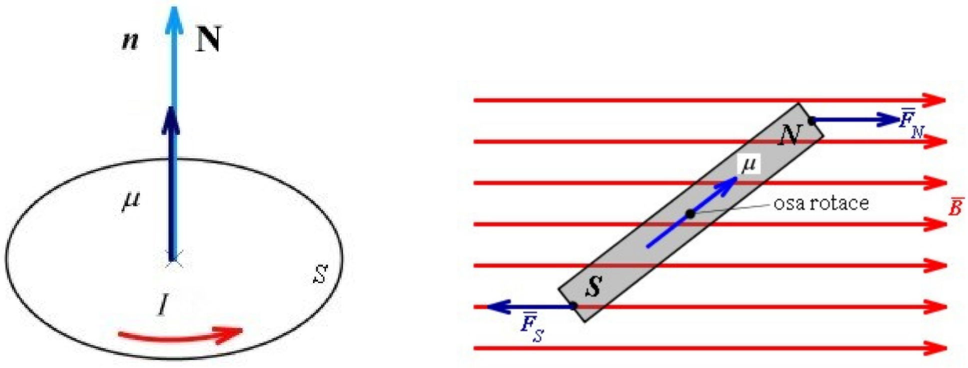
Vložme do homogenního magnetického pole kruhový vodič protékaný proudem (kruhová proudová smyčka) a nahraďme ji proudově ekvivalentní soustavou přilehlých, dlouhých a infinitezimálně úzkých obdélníkových smyček (Obr. 3.6.-11). Magnetické pole vyvolá na všech obdélníkových smyčkách shodně orientované momenty, neboť leží v jedné rovině a platí modifikovaný vztah (3.6.-17) ve tvaru

$$\mathrm{d}\boldsymbol{M} = \mathrm{d}\boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B}. \qquad 3.6.\text{-}18$$

Pro velikost infinitezimálních momentů obdélníkových smyček v analogii s (3.6.-14) dostaneme

$$\mathrm{d}M = BI\mathrm{d}S \sin\alpha. \qquad 3.6.\text{-}19$$

Integrace vztahů (3.6.-18) a (3.6.-19) vede k závěru, že závislosti (3.6.-14) a (3.6.-17) platí i pro kruhovou smyčku – podobně lze jejich platnost rozšířit na rovinnou smyčku libovolného tvaru.



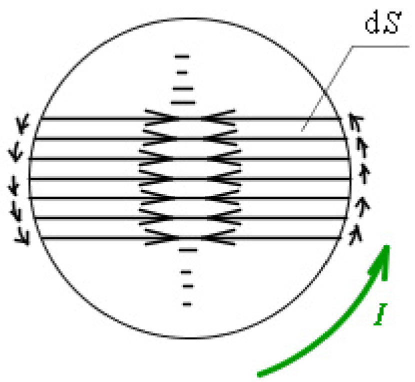
a) b)

Obr. 3.6.-10 a) Orientace vektoru magnetického dipólového momentu kruhové proudové smyčky a poloha jejího severního magnetického pólu. b) Totéž pro tyčový magnet. Navíc jsou nakresleny magnetické síly, které na magnet působí, pokud je vložen do homogenního magnetického pole.

V praxi se velmi často můžeme setkat s využitím působení magnetického pole na cívku s proudem (např. magnetoelektrický systém přístrojů pro měření stejnosměrných napětí a proudů). Na tzv. plochou cívku, kterou tvoří N rovinných smyček neboli závitů libovolného tvaru navinutých těsně k sobě, působí moment sil o velikosti (osa rotace cívky je kolmá k magnetickým indukčním čarám):

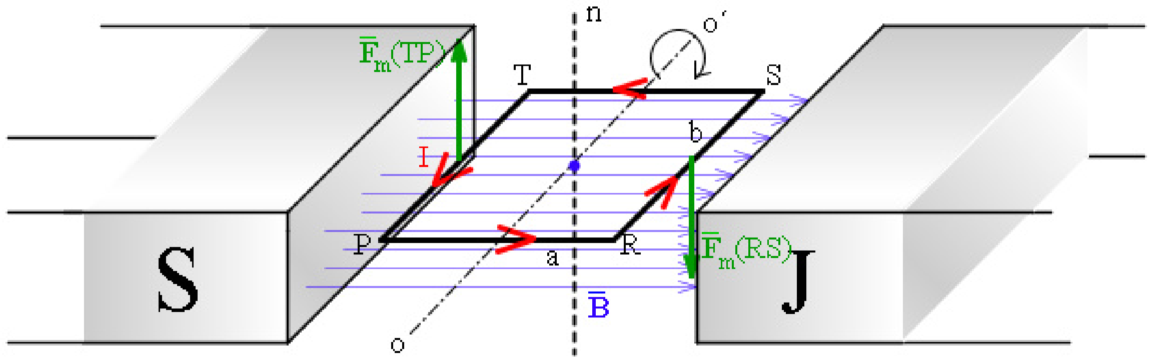
$$M = NISB\ \sin\alpha. \qquad 3.6.\text{-}20$$

Silové působení magnetického pole na vodič s proudem slouží k převodu elektrické energie na mechanickou, což se děje v **elektromotoru**. Elektromotor na stejnosměrný proud s elektromagnetem je konstrukčně nejjednodušší. Mezi póly permanentního magnetu je kotva (např. pravoúhlá smyčka) otáčivá kolem pevné osy (Obr. 3.6.-12), na kterou v obecné poloze působí moment magnetických sil. Aby orientace momentu byla v průběhu činnosti stejná, mění tzv. komutátor každou půlperiodu směr proudu v kotvě.

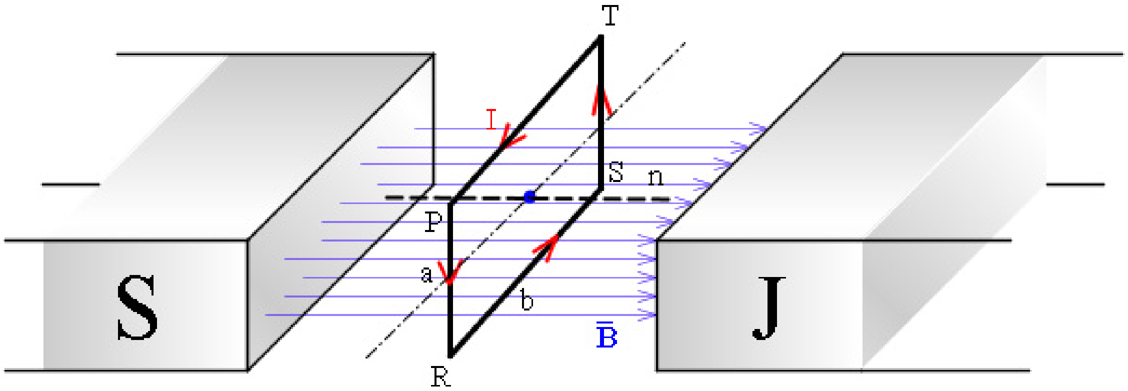


Obr. 3.6.-11

Pozn.: Proudovou smyčku nebo cívku si lze představit jako magnetický dipól, k jehož severnímu pólu směřuje vektor magnetického dipólového momentu (Obr. 3.6.-10).



a)



b)

Obr. 3.6.-12 Složení jednoduchého stejnosměrného motoru s pravoúhlou kotvou protékanou proudem *I*. Obrázek a) resp. b) znázorňuje polohu kotvy, kdy je moment magnetických sil maximální, resp. nulový.

KO 3.6.-12 Uveďte vztah určující vektor magnetické síly, která působí na přímou část vodiče délky *l*.

KO 3.6.-13 Vyslovte Flemingovo pravidlo levé ruky a napište, k čemu slouží.

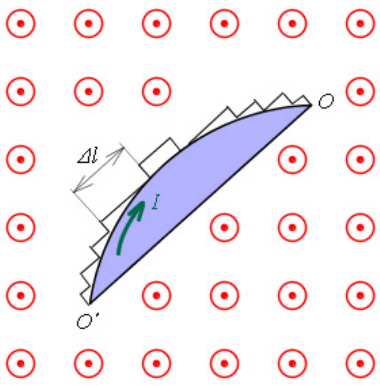
KO 3.6.-14 Slovy popište postup, jímž můžete spočítat sílu, kterou působí magnetické pole na tenký vodič libovolného tvaru.

KO 3.6.-15 Definujte magnetický dipólový moment obdélníkové smyčky protékané proudem *I*.

KO 3.6.-16 Jakým silovým momentem působí homogenní magnetické pole na plochou cívku s *N* závity v obecné poloze? Předpokládáme, že osa rotace cívky je kolmá k magnetickým indukčním čarám.

KO 3.6.-17 Určete jednotku magnetického dipólového momentu.

Drát protékaný proudem leží v rovině kolmé k magnetickým indukčním čarám homogenního magnetického pole (Obr. 3.6.-13). Dokažte, že magnetická síla nezávisí na tvaru drátu.



Nechť je drát nahrazen jiným, který sice tvar původního prakticky kopíruje, obsahuje však stupínky (Obr. 3.6.-13). Magnetická síla, která působí na rovnoběžné úseky délek Δl, má velikost $\Delta l IB$ a u všech úseků stejnou orientaci. Velikost výsledné síly působící na všechny úseky rovnoběžné s úsečkou OO´ je proto BIl, kde l je velikost úsečky OO´. Ke každému úseku vodiče, který je kolmý k OO´, existuje jiný úsek, na něž působí magnetická síla stejné velikosti ale opačné orientace (užij Flemingovo pravidlo levé ruky). Proto úseky vodiče kolmé na spojnici bodů OO´ ve skutečnosti nemají na výslednou magnetickou sílu vliv.

Obr. 3.6.-13

Magnetická indukce a působení magnetického pole na nabitou částici

Magnetická síla, která v daném bodě působí na nabitou a pohybující se částici, se nazývá **Lorentzova** a platí pro ni vektorová rovnice:

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} = Q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}. \qquad 3.6.\text{-}2$$

Na záporně nabitou částici působí síla opačně orientovaná než na kladnou (Obr. 3.6.-1 a Obr. 3.6.-2).Vztah (3.6.-2) lze chápat jako definiční pro veličinu magnetická indukce. Jednotkou magnetické indukce je tesla (T). Podle (3.6.-2) je

$1\ \mathrm{T} = \mathrm{N{\cdot}s{\cdot}C^{-1}{\cdot}m^{-1}} = \mathrm{N{\cdot}A^{-1}{\cdot}m^{-1}}$.

Magnetická indukční čára

Magnetická indukční čára je orientovaná prostorová křivka, jejíž tečna v každém bodě splývá s vektorovou přímkou magnetické indukce a jejíž orientace odpovídá orientaci vektoru magnetické indukce.

Pohyb nabité částice v homogenním magnetickém poli ve směru kolmém k indukci B

Jestliže budou vystřelovány nabité částice s nábojem Q a hmotností m do homogenního magnetického pole o indukci B rychlostí v kolmo k magnetickým indukčním čarám a působení gravitace zanedbáme, bude v magnetickém poli na částici působit jediná síla: magnetická síla. Protože podle (3.6.-2) je vždy kolmá k rychlosti a vektory $\boldsymbol{v}$ a $\boldsymbol{B}$ jsou navzájem kolmé, bude se částice pohybovat v rovině, která vektory $\boldsymbol{v}$ a $\boldsymbol{B}$ obsahuje. Částice proto bude v magnetickém poli konat rovnoměrný pohyb po kružnici (Obr. 3.6.-5) o poloměru

$$r = \frac{mv}{|Q|B} \qquad 3.6.\text{-}4$$

a s periodou

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{|Q|B}\,. \qquad 3.6.\text{-}5$$

Pohyb nabité částice v homogenním magnetickém poli pod úhlem $\varphi \in (0°,90°)$ k indukci B

Pohybuje se po šroubovici s osou ve směru magnetické indukce (Obr. 3.6.-6). Poloměr šroubovice vychází

$$r = \frac{mv_R}{|Q|B} = \frac{mv\sin\varphi}{|Q|B} \qquad 3.6.\text{-}8$$

a stoupání je

$$h = v_h T = \frac{2\pi m}{|Q|B} v\cos\varphi\,. \qquad 3.6.\text{-}9$$

Ampérova síla

Pro vektor síly magnetického pole na přímou část vodiče délky l působící platí:

$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} = I\,\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$. 3.6.-12

Orientaci síly $\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}$ určujeme **Flemingovým pravidlem levé ruky**. V případě, že hledáme sílu, kterou působí magnetické pole na tenký vodič libovolného tvaru, je nutné integrací sečíst příspěvky d$\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}$ k výsledné magnetické síle $\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}}$ od všech délkových a orientovaných elementů d$\boldsymbol{l}$ vodiče

$\mathrm{d}\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} = I\,\mathrm{d}\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$. 3.6.-13

Sílu vyjádřenou podle (3.6.-11) resp. (3.6.-12) nazýváme **Ampérova síla**.

Moment síly působící na proudovou smyčku a cívku

Na rovinnou proudovou smyčku libovolného tvaru působí magnetické pole momentem sil:

$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B}$. 3.6.-17

Magnetický dipólový moment $\boldsymbol{\mu}$ definujeme vektorovým zápisem

$\boldsymbol{\mu} = IS\boldsymbol{n}$. 3.6.-15

Vektor $\boldsymbol{n}$ je jednotkový a je orientován kolmo k rovině smyčky tak, že z jeho koncového bodu vidíme téci proud ve smyčce proti směru hodinových ručiček.

Na cívku s N závity působí moment sil o velikosti:

$M = NISB\ \sin\alpha$.. 3.6.-20

Klíč

KO 3.6.-5 přitažlivé – viz text podkapitoly 3.6.1.

KO 3.6.-10 a) Částice bude konat rovnoměrný pohyb po kružnici o poloměru $r = \dfrac{mv}{|Q|B}$. b) Trajektorií pohybu částice bude šroubovice s poloměrem $r = \dfrac{mv_R}{|Q|B} = \dfrac{mv\sin\varphi}{|Q|B}$ a stoupáním $h = v_h T = \dfrac{2\pi m}{|Q|B} v\cos\varphi$.

KO 3.6.-16 viz text podkapitoly 3.6.3. – vzorec (3.6.-20).

KO 3.6.-17 Vycházeje ze vztahu (3.6.-15) dostaneme [m] = A·m^2.