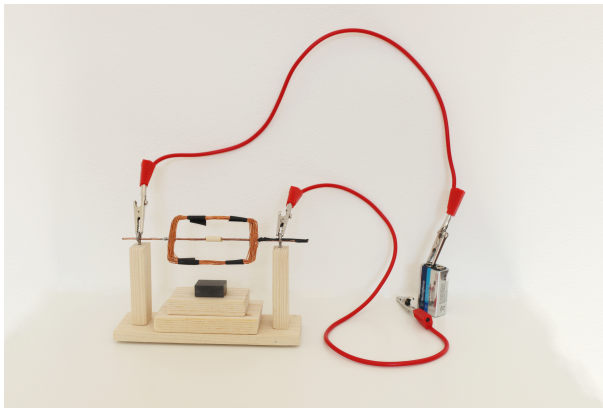


# Elektromotor

Jana Legerská

Letošní Hrašnice byla provázána červenou nití Mise na Mars. A protože na Marsu se nová civilizace neobejde bez všelikých pojízdných modulů a vozítek, je na místě navrhnout a sestavit elektromotorek, který by dotyčná zařízení mohl pohánět. A protože učitel fyziky se také neobejde bez pomůcek, bude tento model sloužit jako demonstrační pomůcka i v poměrech pozemských.



Obrázek 1: Model elektromotoru

## Co k tomu říká teorie

### Letí částice magnetickým polem aneb Lorentzova síla

Na nabitou částici vlétnuvší do magnetického pole působí síla zvaná Lorentzova, která zakřivuje dráhu částice do směru kolmého na její let a na směr magnetických indukčních čar. Pomocí rychlosti částice  $\vec{v}$ , vektoru magnetické indukce pole  $\vec{B}$  a náboje částice  $q$  ji můžeme vyjádřit jako

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

### Vodič s proudem v magnetickém poli

Vložíme-li do magnetického pole vodič a necháme-li jím procházet elektrický proud (tj. spoustu nabitých částic), bude na každou částici působit Lorentzova síla. Výslednou sílu působící na vodič pak dostaneme sečtením příspěvků od všech částic.

Určeme nejprve sílu působící na kousek objemu vodiče  $dV$ ,

$$d\vec{F} = \underbrace{NdV}_{\text{počet nábojů v objemu } dV} \underbrace{(q \vec{v} \times \vec{B})}_{\text{síla na jednu částici}} \quad (2)$$

kde  $N$  je počet nabitých částic v jednotkovém objemu vodiče.

Dále víme, že proudovou hustotu  $\vec{j}$  můžeme vyjádřit pomocí hustoty náboje  $\rho$  jako

$$\vec{j} = \rho \vec{v} = Nq\vec{v} \quad (3)$$

a že elektrický proud procházející průřezem  $S$  můžeme vyjádřit jako

$$I = jS. \quad (4)$$

Využijeme vztahu (3) pro úpravu rovnice (2) a dostaneme vztah

$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} dV. \quad (5)$$

Objem  $dV$  kousku vodiče můžeme vyjádřit pomocí délky dotyčného kousku  $dl$  a průřezu vodiče  $S$  jako

$$dV = S \cdot dl \quad (6)$$

a můžeme tak předchozí rovnici přepsat jako

$$d\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} S dl. \quad (7)$$

S využitím vztahu (4) pak dostaneme

$$d\vec{F} = I \vec{n} \times \vec{B} dl, \quad (8)$$

kde jednotkový vektor  $\vec{n}$  má směr toku proudu.

Použijeme-li zápis

$$\vec{I} \equiv I \vec{n}, \quad (9)$$

můžeme sílu působící na kousek vodiče zapsat jako

$$d\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} dl. \quad (10)$$

Výsledná síla působící na vodič délky  $l$  pak bude

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} l. \quad (11)$$

Pro velikost síly dostaneme známý středoškolský vzoreček

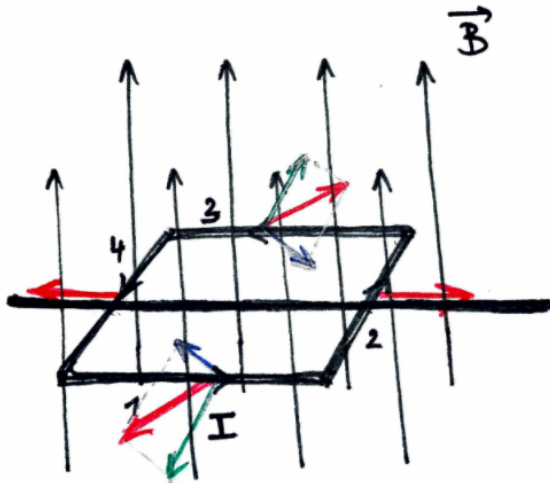
$$F = BIl \sin \alpha, \quad (12)$$

kde  $\alpha$  je úhel svíraný mezi vektorem magnetické indukce a směrem, kterým teče proud.

Vidíme tedy, že největší síly působící na vodič v magnetickém poli dosáhneme tehdy, když bude  $\sin \alpha = 1$ , tedy když bude vodič kolmý ke směru magnetické indukce.

## Vodivá smyčka s proudem v magnetickém poli

Už víme, jak se v magnetickém poli chová přímý vodič. Pokud jej stočíme do obdélníkové smyčky, bude na všechny části smyčky působit Lorentzova síla jako v předešlé situaci. Smyčku navíc upevníme na osičku, kolem které se bude moci volně otáčet, jako na obrázku. Síla působící na části vodiče 2, 4, které jsou kolmé na osičku, nebude mít otáčivé účinky, zaměříme se tedy na části smyčky 1 a 3.



Obrázek 2: Proudová smyčka v magnetickém poli

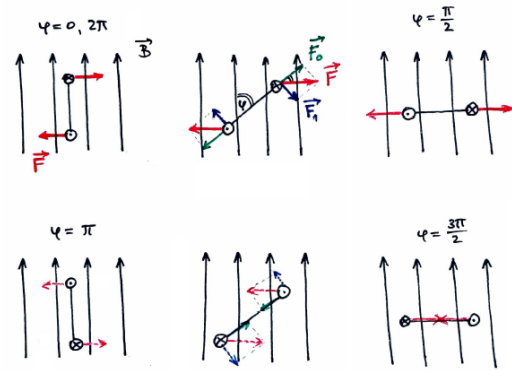
Na každý z vodičů 1, 3 působí síla o velikosti  $F$  (červeně), kterou lze rozložit na složky  $F_0$  (zeleně) a  $F_1$  (modře), jak ukazuje obrázek. Složka  $F_0$  nemá otáčivé účinky, zatímco složka  $F_1$  proudovou smyčku roztáčí. Její velikost vypočteme pomocí vztahu

$$F_1 = F \sin \varphi, \quad (13)$$

kde  $\varphi$  je úhel natočení proudové smyčky vůči magnetickým indukčním čarám.

Na obrázcích je v řezu zakreslena situace pro různá natočení smyčky spolu se silami, které na smyčku působí. Dvojice sil  $\vec{F}$ ,  $-\vec{F}$  má vždy stejnou velikost (protože úhel  $\alpha$  mezi směrem proudu a magnetickými indukčními čarami se nemění, je stále  $\frac{\pi}{2}$ ), mění se ovšem velikost složky  $F_1$  v závislosti na úhlu  $\varphi$ .

Ve svislé poloze smyčky je  $F = F_1$  a otáčivé účinky jsou maximální. V poloze na druhém obrázku jsou otáčivé účinky síly  $F_1$  menší, v poloze, kdy je smyčka kolmá na magnetické indukční čáry a  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , jsou otáčivé účinky síly nulové. V dalším obrázku, kdy má za sebou smyčka jednu půlotočku a  $\varphi = \pi$ , má síla maximální otáčivé účinky v opačném směru. Za další čtvrtotočku se



Obrázek 3: Řez proudovou smyčkou v magnetickém poli

smyčka opět dostane do vodorovné polohy ( $\varphi = \frac{3\pi}{4}$ ), kdy jsou otáčivé účinky nulové, až se vrátí do původní polohy  $\varphi = 2\pi$ .

Vidíme, že pokud bychom proud procházející smyčkou vypnuli v polohách, kdy síla „štouchá“ smyčku proti směru původního pohybu, tj. v polohách, kdy  $\varphi \in [\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}]$ , smyčka by se díky setrvačnosti otáčela stále stejným směrem. Tohoto principu využijeme při konstrukci našeho elektromotoru. Druhou možností by bylo ve zmíněných polohách smyčku přepólovat komutátorem a proud nechat protékat opačným směrem.

## Co k tomu řekla praxe

K sestavení elektromotoru tedy stačí sestavit proudovou smyčku na otočné ose, vložit ji do magnetického pole a zajistit správné vypínání nebo přepólování proudu v určitých polohách smyčky. Druhým úkolem by pak bylo krotivý moment z osy přenášet na požadovaný systém, který chceme pohánět, například nápravu autíčka, atd.

## Konstrukce elektromotoru

Začala jsem konstrukcí statoru, to jest dřevěným stojánkem s vodivými očky, ve kterých se bude protáčet osička se smyčkou a na kterém bude připevněn permanentní magnet.

Osičku jsem vyrobila ze dvou částí tuhého měděného drátu spojeného dřevěným válečkem tak, aby byly obě části osy v jedné přímce, ale zároveň od sebe byly elektricky izolované. Dále jsem navinula obdélníkovou cívku z měkkého měděného drátu o průměru 5 mm se 20 závitů, kterou jsem upevnila na osičku a konce cívky připájela každý na jednu polovinu osičky.

Zároveň jsem konce osičky na spodní straně (při svislé poloze smyčky) osmirkovala od laku, aby po vložení osičky do oček statoru byla smyčka vodivě

