



## 4.5.8 Elektromagnetická indukce

**Předpoklady:** 4502, 4504

Elektromagnetická indukce je velmi důležitý jev, jeden ze základů moderní civilizace. Všude kolem je spousta elektrických spotřebičů, ale zatím jsme neprobrali žádný ekonomicky možný způsob výroby elektrické energie. Zatím známe:

- výroba elektřiny třením - z vypětím všech sil vyrobíme jiskřičku,
- galvanické články – prodávají se v obchodech, ale energie z nich je drahá, rozhodně by se na nich nedal za rozumnou cenu uvařit oběd.

⇒ Musí existovat jiný způsob, jak elektřinu vyrábět a tímto způsobem je elektromagnetická indukce.

**Michael Faraday:** 1821 – Oersted zjistil, že v okolí vodiče s proudem vzniká magnetické pole  
⇒ nebylo by možné jeho pokus obrátit a z magnetického pole vyrobit elektrický proud?

**Pedagogická poznámka:** Pokus s elektromagnetickou indukcí v cívice (600 závitů) zapojenou na demonstrační ampérmetr provádím jako druhý díl televizního seriálu o fyzikálních objevech. Přeneseme se do roku 1831, kdy se Faraday již desátý rok snaží přeměnit magnetismus v elektřinu. Faraday si mumlává, že to musí jít, že manželka bude koukat až na to, jak se bude slavný. Předkládá magnetu k cívice, poté cívku připojí k ampérmetru a čeká, kdy se objeví proud (kvůli tomu, že připojuje ampérmetr vždy až ve chvíli, kdy magnet v ústí cívice stojí, samozřejmě nic neměří). Faraday propadá s každým dalším pokusem v číslu beznaděje. Když ho napadne nová poloha magnetu v ústí cívice objeví se v jeho chování záchrana naděje, ale nakonec propadá naprosté beznaději. V záchratu bezmoci popadá magnet, který je zrovna uvnitř cívky (zapojené od minulého neúspěšného pokusu v ampérmetru) a se slovy „to se na to můžu klidně vykašlat“ ho odhazuje v dál. Zatím si vždycky někdo ze žáků všiml, že se ručička ampérmetru pohne. Smyslem představení je jednak trochu srandy a jednak upozornění na to, že elektrický proud vzniká v cívice pouze, když se magnetické pole mění. Žákům představení líbí, na druhou stranu je třeba upozornit, že velký didaktický přínos nemá. I když je už v samotném ději zakódována nutnost změny magnetického pole, žáci si spíše pamatují, jak se jmenoval Faradayův sluh.

Položíme do cívky magnet a připojíme ji k ampérmetru ⇒ ampérmetrem neprochází žádný proud. Začneme magnet z cívky vyndávat ⇒ ampérmetrem začne procházet elektrický proud ⇒ při pohybu magnetu v okolí cívky v ní vzniká napětí, které v cívice vybudí proud (přesně to, co jsme potřebovali).

Právě objevený fyzikální děj se nazývá **elektromagnetická indukce**. Říkáme, že při změně magnetického pole v okolí cívky se v cívice **indukuje elektrické napětí**.

**Př. 1:** Pomocí zákona zachování energie se pokus vysvětlit, proč pouhá přítomnost magnetu v okolí cívky nemůže stačit ke vzniku elektrického proudu v cívice.

Zákon zachování energie = energie nemůže vznikat z ničeho, pokud nějaké zařízení vyrábí libovolný druh energie (cívka, ve které se indukují elektrické napětí vyrábí elektrickou



energii), musí odebírat energii jinému předmětu (to se v případě magnetu stojícího vedle cívky evidentně neděje).

Jakmile se magnet začne pohybovat, musí existovat něco, co ho k pohybu přinutí a zřejmě i udrží (zdá se, že v případě, že bychom z cívky indukovaný proud odebírali, by měla cívka, zřejmě svým magnetickým polem, které vznikne průtokem indukovaného proudu, brzdit pohyb magnetu).

Vyndáváme magnet z cívky. Načem závisí velikost indukovaného napětí?

- Na síle magnetu: silnější magnet  $\Rightarrow$  větší indukované napětí,
- na rychlosti pohybu: rychlejší pohyb  $\Rightarrow$  větší indukované napětí (ale indukuje se po kratší dobu),
- počtu závitů cívky: více závitů  $\Rightarrow$  větší indukované napětí.

**Př. 2:** Pokud zkusíme experimentálně otestovat předchozí závěry, dojdeme ke dvěma překvapivým skutečnostem.

a) Při pomalém pohybu ukáže analogový ampérmetr menší indukovaný proud než při normálním pohybu. Při velmi rychlém pohybu, se však naměřený proud nezvýší, spíše je opět nižší. Vysvětli a navrhní řešení.

b) Na cívce o 300 závitů naměříme menší indukovaný proud. Ale na cívce o 1200 závitů není proud větší než na cívce 600 závitů.

a) Ručička přístroje má nenulovou hmotnost  $\Rightarrow$  její urychlení chvíli trvá  $\Rightarrow$  pokud je pohyb velmi rychlý, ručička nestihne zareagovat.

Řešení: Použití přístroje s lehčí ručičkou, použít digitální přístroj nebo měřit pomocí počítače.

b) O velikosti proudu, který protéká cívkou, nerozhoduje pouze velikost naindukovaného napětí, ale také odpor cívky. Ten je u cívky 1200 závitů určitě větší než u cívky 600 závitů (více závitů znamená delší a většinou tenčí drát).

Řešení: Můžeme k ampérmetru připojit sériově všechny zkoumané cívky najednou. Odpor obvodu bude pořád stejný a měnit se bude pouze indukované napětí na cívce, ze které právě vyndáváme magnet.

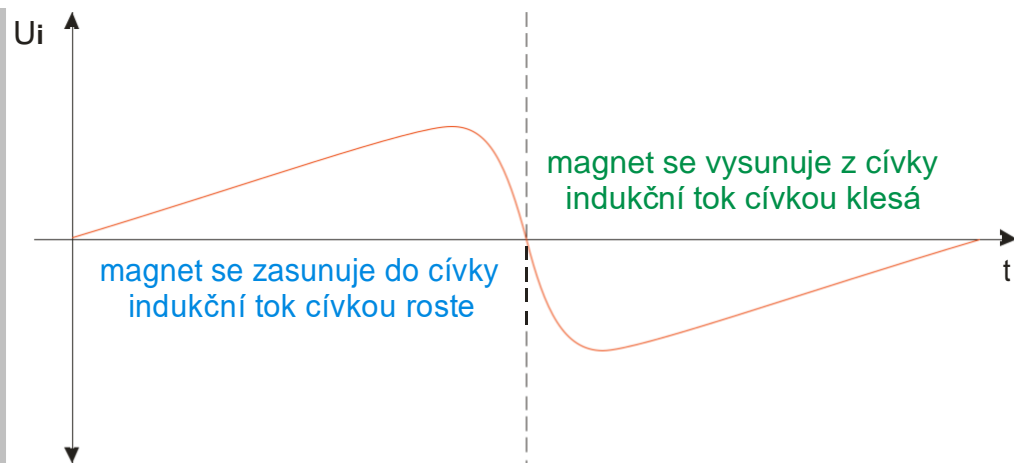
**Pedagogická poznámka a:** Ve svých hodinách pokusy vždy provádím. Příklad 2 pak samozřejmě nepromítám, jeho zadání vyplyne zední u katedry.

Úvahy se nám zjednoduší, pokud budeme napětí indukované na cívce počítat jako součet napětí vzniklých na jednotlivých závitů (tím pádem bude platit  $U_c = N \cdot U_{iz}$ , kde  $U_c$  je indukované napětí na cívce,  $N$  je počet závitů cívky a  $U_{iz}$  napětí indukované na jednom závitě).

**Př. 3:** Cívka upevněná tak, že její osa je svislá a je možné její dutinou nechat propadnout tyčový magnet, je připojena k milivoltmetru. Načrtni přibližný tvar časové závislosti indukovaného napětí:

- a) pokud prostrčíme dutinou rovnoměrně tyčový magnet
- b) pokud prostrčíme dutinou rovnoměrně tyčový magnet vyšší rychlostí než v předchozím případě
- c) pokud se tyčový magnet bude pohybovat dutinou volným pádem

a)

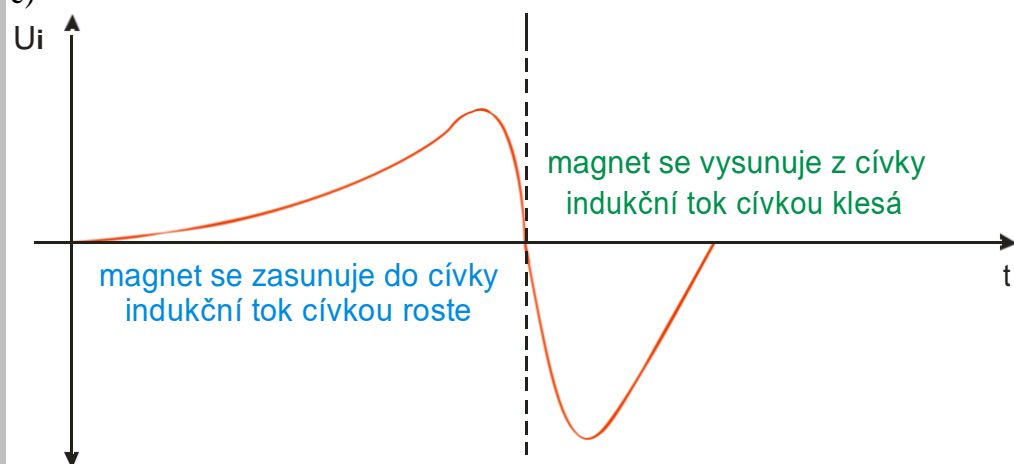


Při poklesu indukčního toku cívkou je jeho změna opačná než při jeho růstu  $\Rightarrow$  indukované napětí musí mít opačnou orientaci b)



Podobný průběh jako v předchozím případě, jenom pohyb je rychlejší  $\Rightarrow$  napětí se bude indukovat kratší čas (magnet rychleji projde cívkou) a bude mít větší maximální hodnotu (časová změna magnetického indukčního toku je rychlejší) V obou případech je stejný obsah plochy pod křivkou.

c)



Při zasouvání se cívka pohybuje pomaleji, kladné napětí se bude indukovat delší dobu, ale s menší výhylkou.

Kdy vzniká v cílce napětí?

- Když pohybujeme v okolí cívky magnetem.
- Když pohybujeme cívku v okolí magnetu.
- Když v blízkosti cívky zapínáme nebo vypínáme elektromagnet.

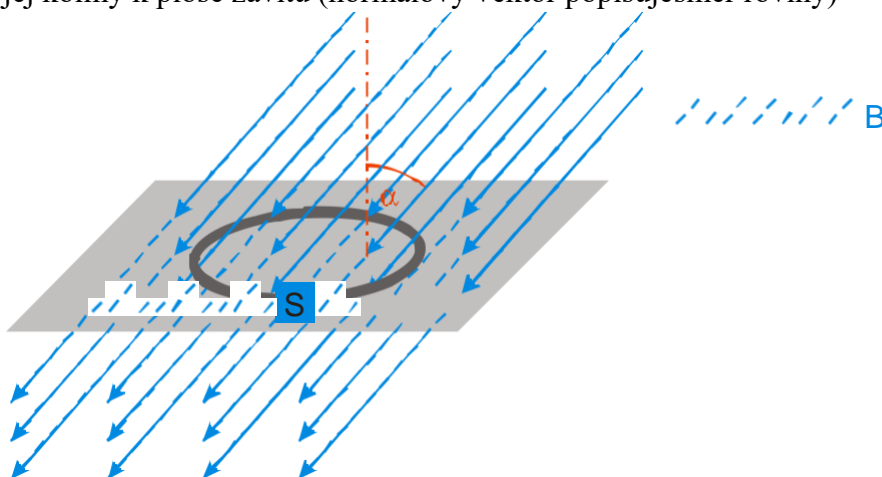
⇒ Napětí v cívce vzniká vždy, když se v okolí cívky mění magnetické pole.

Indukované napětí na jednom závitě závisí na tom, jak rychle a jak moc se změní „počet magnetických indukčních čar procházejících tímto závitem“.

Zatím nemáme veličinu, která by zachycovala „počet magnetických indukčních čar v závitě“. Této veličině se říká **magnetický indukční tok**, značí se a měří se ve Weberch (značka Wb).

Na čem závisí magnetický indukční tok:

- síla magnetického pole = magnetická indukce  $B$  (větší  $B$  znamená pole s hustšími indukčními čarami),
- plocha závitu  $S$  (větší plochou projde více indukčních čar),
- vzájemná poloha závitu a magnetického pole (smují indukční čáry do závitu nebo jsou s ním rovnoběžné?) - vyjadřujeme pomocí úhlu, který svírají indukční čáry s vektorem, který je kolmý k ploše závitu (normálový vektor popisující směr roviny)



Jaká bude situace v extrémních případech?

- $\alpha = 0^\circ$  - indukční čáry jsou kolmé na plochu závitu  $\Rightarrow \Phi = BS$ ,
- $\alpha = 90^\circ$  - indukční čáry jsou rovnoběžné s plochou závitu  $\Rightarrow \Phi = 0$  (žádné indukční čáry neprocházejí závitem),

⇒ magnetický indukční tok můžeme vypočítat podle vztahu:  $\Phi = BS \cos \alpha$ .

**Pedagogická poznámka:** Diskuse o členu  $\cos$  je v této hodině krátká a není nutné, aby ji v tomto okamžiku všichni studenti pochopili. Více se jí budeme věnovat v příští hodině.

Teď už můžeme zapsat vztah pro velikost indukovaného napětí:

Původní věta: Indukované napětí na jednom závitě závisí na tom, jak rychle a jak moc se změní „počet magnetických indukčních čar procházejících tímto závitem“.

Přeformulujeme pomocí magnetického indukčního toku: Indukované napětí na jednom závitě závisí na časové změně magnetického indukčního toku. Ve skutečnosti se indukované napětí přímo rovná této záporně vzaté změně.

Zapišeme vzorcem:

- časová změna magnetického indukčního toku:  $\frac{d\Phi}{dt}$ ,
- $\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$  (záporně vzatá časová změna magnetického indukčního toku):  $\epsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$ .

Tím jsme objevili **Faradayův zákon elektromagnetické indukce**:

**Změní-li se magnetický indukční tok uzavřeným vodičem za dobu  $t$ , indukuje se ve vodiči elektromotorické napětí, jehož střední hodnota je  $U = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .**

Pro cívku s  $N$  závitů získáme vztah:  $U_i = - N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ .

**Př. 4:** Magnetický indukční tok ve vodivé smyčce se rovnoměrně zmenšil za 0,5 sekundu z 0,5 Wb na 0,2 Wb. Urči hodnotu indukovaného napětí. Jaké napětí se na smyčce naindukuje, když se magnetický indukční tok rovnoměrně změní za 2s z 0 Wb na -1 Wb?

V obou příkladech určíme podle vzorce indukované napětí.

a) za 0,5 sekundu z 0,5 Wb na 0,2 Wb  $\Rightarrow \Delta \Phi = 0,2 - 0,5 \text{ Wb} = -0,3 \text{ Wb}$ ,  $t = 0,5 \text{ s}$

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{-0,3}{0,5} \text{ V} = 0,6 \text{ V}$$

b) za 2s z 0 Wb na -1 Wb  $\Rightarrow \Delta \Phi = -1 - 0 \text{ Wb} = -1 \text{ Wb}$ ,  $t = 2 \text{ s}$

$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{-1}{2} \text{ V} = 0,5 \text{ V}$$

V prvním případě se naindukuje ve smyčce napětí 0,6 V, ve druhém 0,5 V.

**Př. 5:** Najdi způsob, jak pomocí elektromagnetické indukce určit řádově magnetickou indukci pole školního tyčového magnetu.

Můžeme magnet zasunout do cívky a měřit hodnotu naindukovaného napětí. Dosazením do zákona elektromagnetické indukce získáme změnu magnetického indukčního toku. Z něj pak můžeme za předpokladu homogenity magnetického pole určit přibližnou hodnotu magnetické indukce.

**Shrnutí:** Při časové změně magnetického pole se v uzavřených vodičích indukuje elektrické napětí.