

## 4.5.8 Elektromagnetická indukce

**Předpoklady:** 4502, 4504

důležitý jev stojící v samých základech 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 tím způsobem je elektromagnetická indukce

**Michael Faraday:** 1821 – Oersted zjistit, že elektrický proud budí ve svém okolí magnetické pole  
⇒ nebylo by možné z magnetického pole vyrobit elektřinu?

**Pedagogická poznámka:** Pokus s elektromagnetickou indukcí v cívce (cca 600 z) 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. Farady si mumlá, že to musí jít, že manželka bude koukat až na to přijde bude slavný. Příkládá magnet různými k cívce, poté cívku připojí k ampérmetru a čeká, kdy se objeví proud (kvůli tomu, že připojuje ampérmetr vždy až ve chvíli, kdy magnet vůči cívce stojí, samozřejmě nic nenaměří). Farady propadá s každým dalším pokusem větší beznaději. Když ho napadne nová poloha magnetu vůči cívce objeví se v jeho chování záchvěv naděje, ale nakonec propadá naprosté beznaději. V záchvatu bezmoci popadá magnet, který je zrovna uvnitř cívky (zapojené od minulého neúspěšného pokusu v ampérmetru) a se slovy „to se na to můžu klidně ...“ ho odhazuje v dále. Zatím vždycky si někdo ze studentů všiml, že ručička ampérmetru se pohne. Smyslem představení je jednak trochu srandy a jednak upozornění na to, že elektrický proud vzniká v cívce pouze, když se magnetické pole mění.

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 (přesně to, co jsme potřebovali)

Kdy vzniká v cívce napětí?

- když pohybují v okolí cívky magnetem
- když pohybují cívkou v okolí magnetu
- když v blízkosti cívky zapínám nebo vypínám elektromagnet

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

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

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).

Na čem 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)

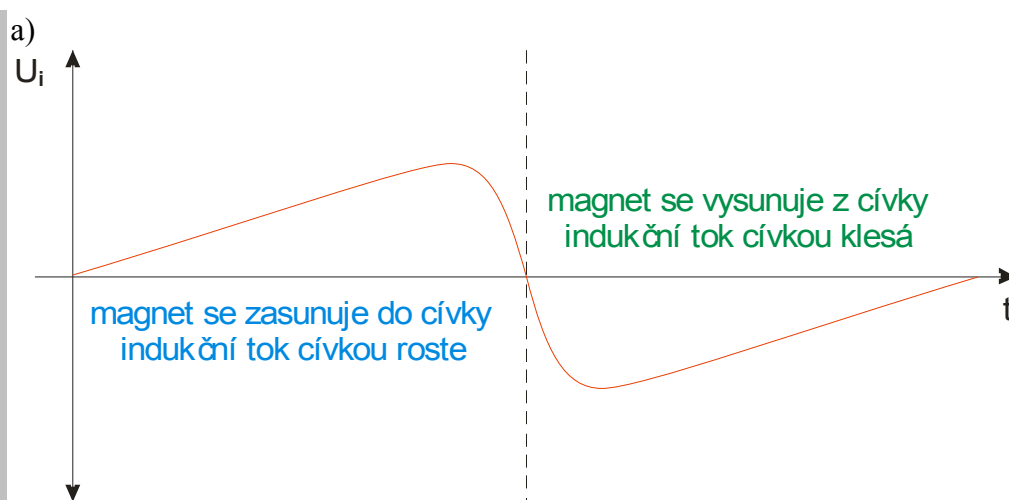
**Pedagogická poznámka:** Všechny předchozí návrhy ihned experimentálně testujeme. Největším oříškem je testování závislosti na počtu závitů, protože měřený proud závisí kromě indukovaného napětí na odporu cívky, který je samozřejmě u cívky s větším počtem závitů větší  $\Rightarrow$  studenti mají najít řešení této situace, které spočívá v tom, že všechny cívky zapojíme do obvodu sériově najednou (tím zajistíme konstantní elektrický odpor) a magnet střídavě vkládáme do jedné z nich.

Úvahy se nám zjednoduší, pokud budeme napětí indukované na cívce počítat jako součet napětí vzniklých na jednotlivých závitcích (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)

$\Rightarrow$  indukované napětí na jednom závitě závisí na tom, jak rychle a jak moc se změní „počet magnetických indukčních čar procházejících tímto závitěm“

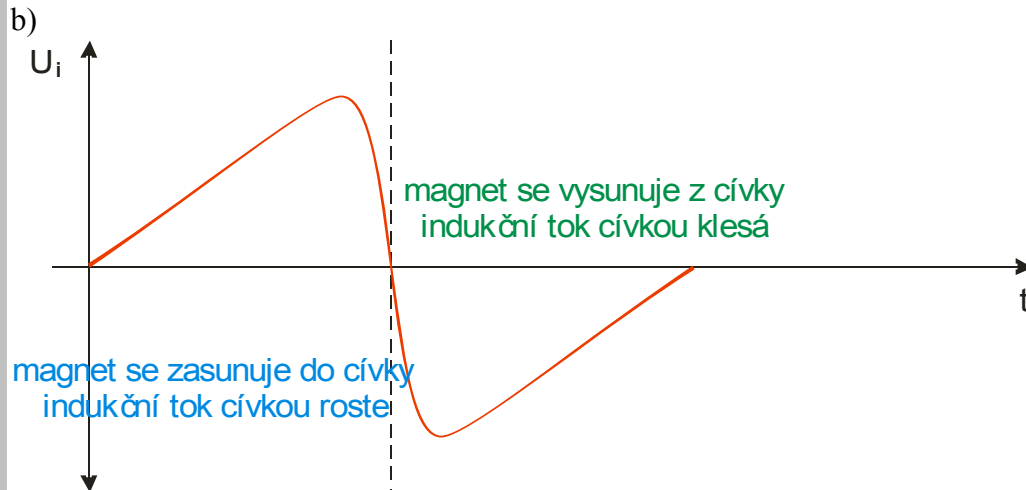
**Př. 2:** Cívka upevněná tak, že její osa je svislá a je možné její dutinou nechat propadnout tyčový magnet, je připojena k milivoltmetru. Načrtni přibližný tvar časové závislosti indukovaného napětí:

- 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



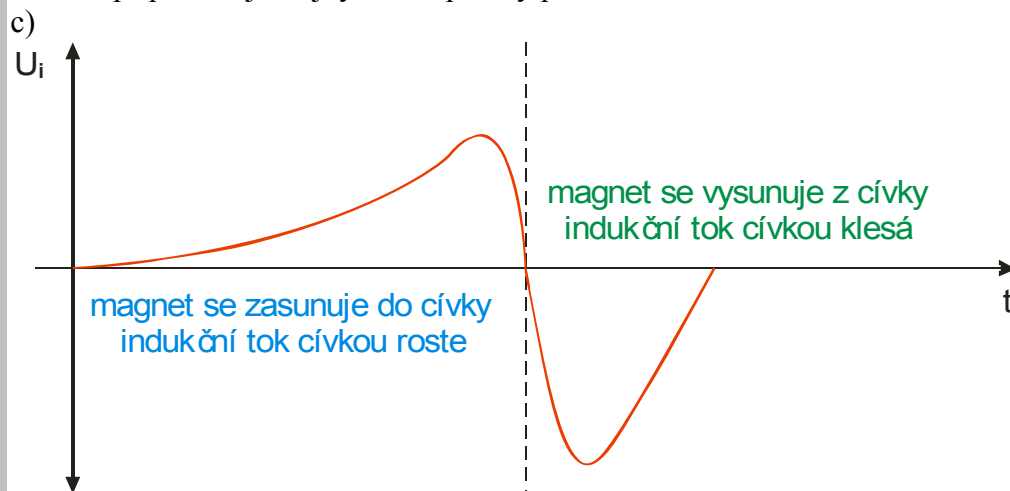
Při poklesu indukčního toku cívkou je jeho změna opačná než při jeho růstu  $\Rightarrow$

indukované napětí musí mít opačnou orientaci



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.



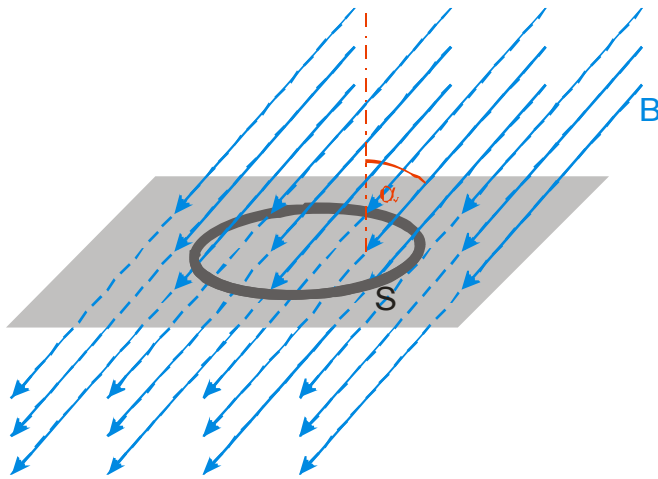
Při zasunování se cívka pohybuje pomaleji, kladné napětí se bude indukovat delší doby, ale s menší výchylkou.

Jak popíšeme indukované napětí vzorcem?

Zatím nemáme veličinu, která by zachycovala „počet magnetických indukčních čar v závitu“. Této veličině se říká **magnetický indukční tok**, značí se  $\Phi$  a měří se ve Weberech (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 (směřují 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)



Jaká bude situace v extrémních případech?

- $\alpha=0$  - 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 přes závit)
- $\Rightarrow$  magnetický indukční tok můžeme vypočítat podle vztahu:  $\Phi = BS \cos \alpha$

**Pedagogická poznámka:** Diskuse o členu  $\cos \alpha$  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 vztahem:

časová změna magnetického indukčního toku:  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$

záporně vzatá časová změna magnetického indukčního toku:  $-\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = U_i$

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

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

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

**Př. 3:** 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  $\Rightarrow \Delta \Phi = 0,2 - 0,5 \text{ Wb} = -0,3 \text{ Wb}$ ,  $\Delta t = 0,5 \text{ s}$

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

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

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

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

**Př. 4:** 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 homogenosti magnetického pole určit přibližnou hodnotu magnetické indukce.

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