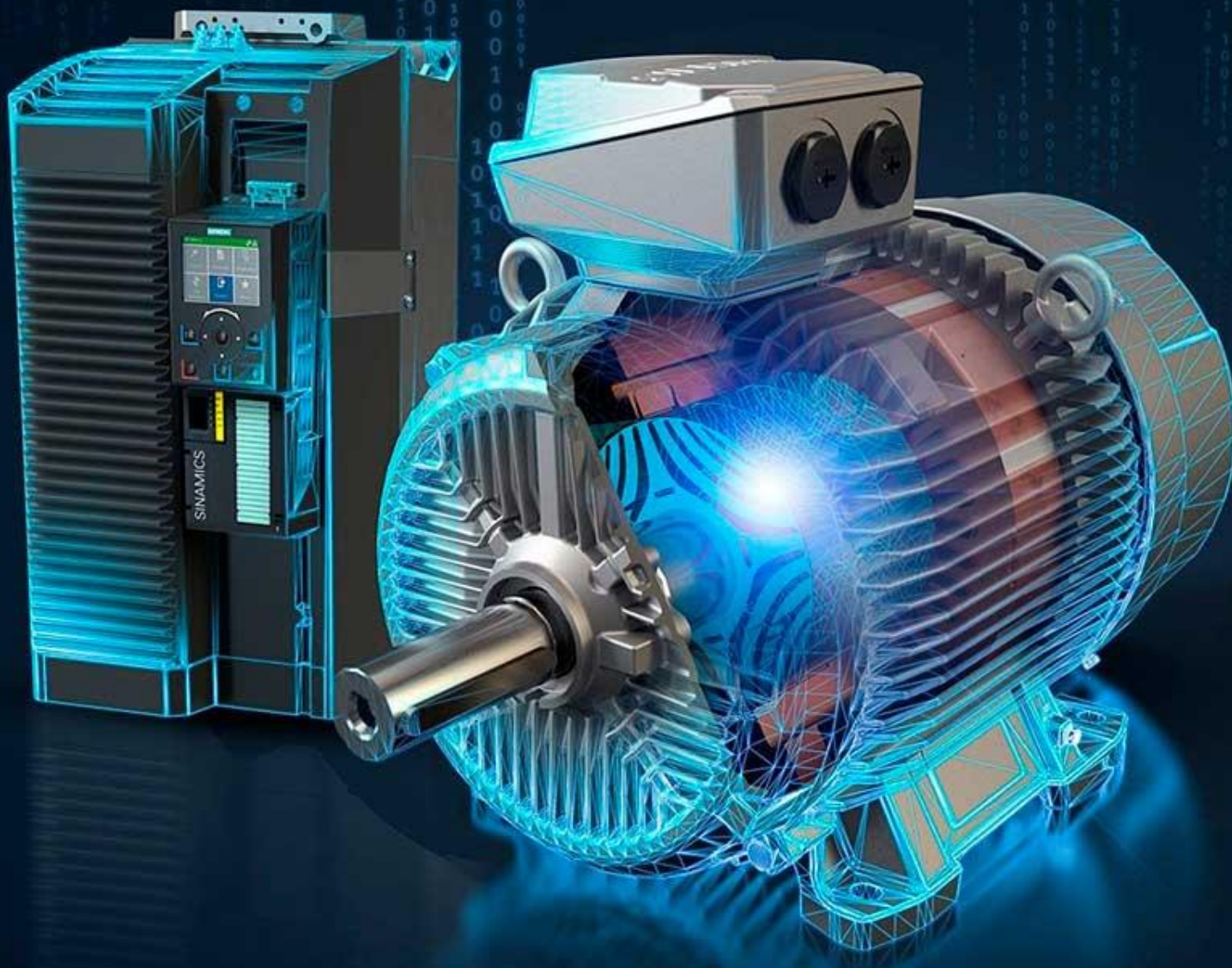


# Nestacionární magnetické pole



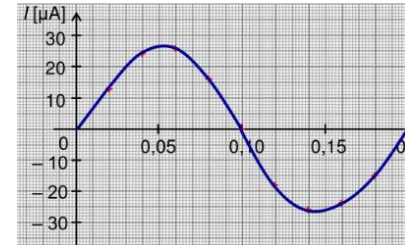
# 37. Elektromagnetická indukce

- **stacionární** (stálé) **magnetické pole** → časově neproměnné, s konstantní hodnotou  $\mathbf{B}$  → stejnosměrný proud ve vodiči, permanentní magnet
- **nestacionární magnetické pole** → časově proměnné, hodnota  $\mathbf{B}$  se v čase mění (skokově, periodicky → střídavý proud ve vodiči se sinusovým průběhem)

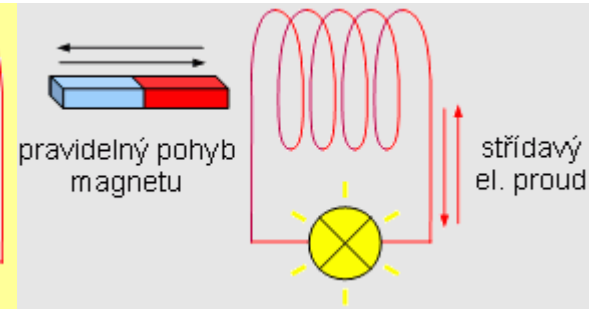
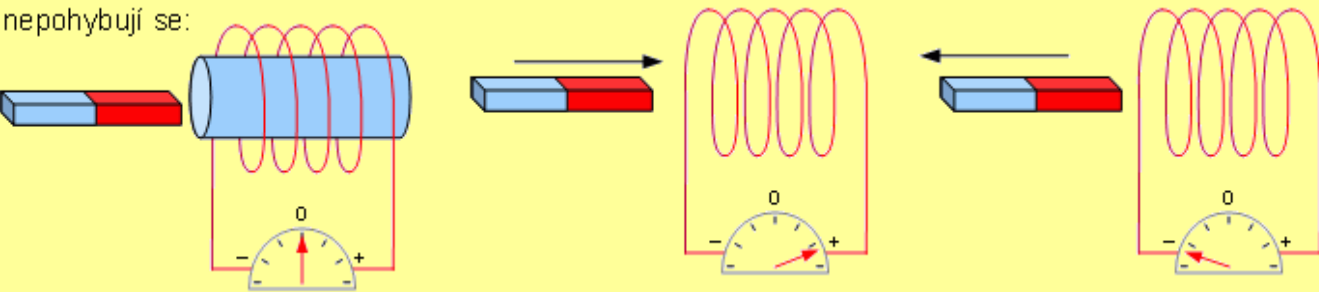


➤ sledujme vzájemný pohyb permanentního magnetu a cívky

<https://www.youtube.com/watch?v=0Lmt4Im5mVA>



nepohybují se:



## Velikost a směr indukovaného napětí závisí na:

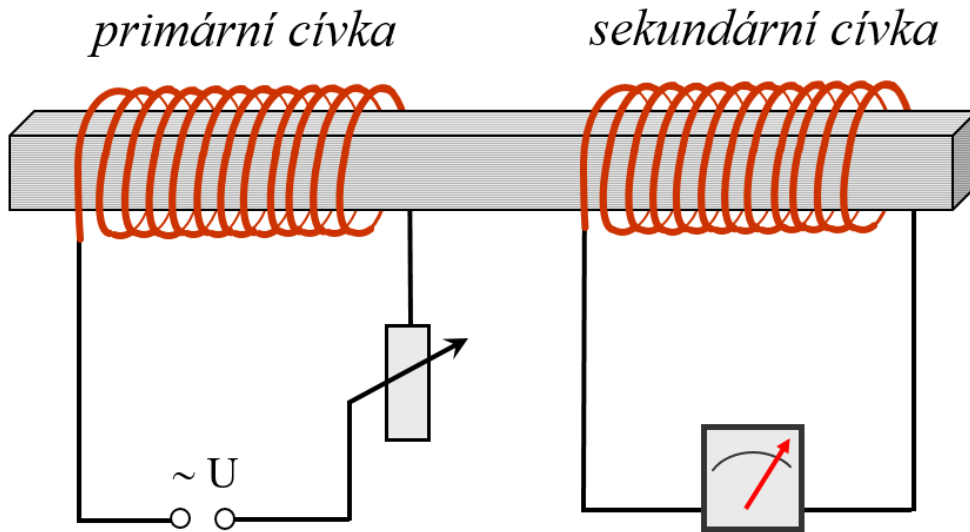
- **rychlosti pohybu** magnetu vůči cívce v klidu →  $U_i \sim \frac{\Delta v}{\Delta t}$
- **počtu závitů cívky** →  $U_i \sim N$
- na **velikosti magnetického pole** magnetu →  $U_i \sim \mathbf{B}$
- na polaritě magnetu → opačná výchylka pro N a S pól magnetu
- v cívce se při vzájemném pohybu magnetu vůči cívce v klidu nebo při pohybu cívky vůči magnetu v klidu indukuje napětí, pokud cívku připojíme na ampérmetr, můžeme měřit velikost indukovaného proudu

# 37. Elektromagnetická indukce

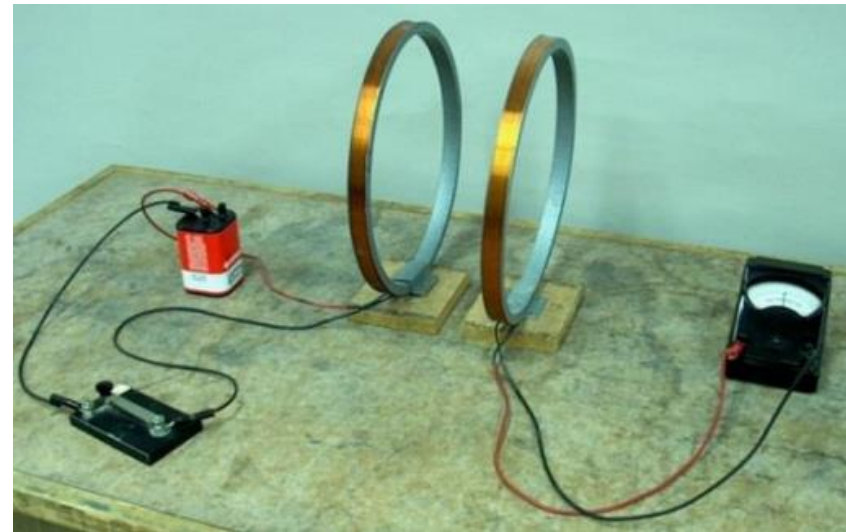


## ➤ Princip transformátoru – vzájemná indukce

<https://www.youtube.com/watch?v=vdDFAI66rNg>



Demonstrace se střídavým napětím na primární cívce



Demonstrace se stejnosměrným napětím na primární cívce a se spínačem

- střídavé napětí na primární cívce vytváří v magnetickém obvodu trvalé nestacionární magnetické pole
- na sekundární cívce se indukuje napětí trvale
- dočasné nestacionární magnetické pole vzniká v obvodu pouze při sepnutí a vypnutí spínače, kdy se na sekundární cívce se indukuje napětí pouze v tomto okamžiku

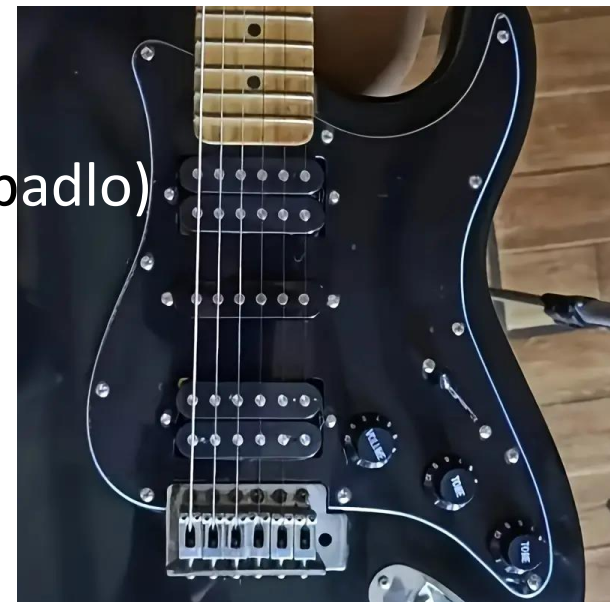
# 37. Elektromagnetická indukce

## Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je děj, při kterém **časově proměnné (nestacionární) magnetické pole indukuje ve vodiči (cívce) jiné nestacionární magnetické pole**, které se projevuje **indukovaným napětím  $U_i$  na koncích vodiče**. Je-li obvod uzavřený, protéká jím **indukovaný proud  $I_i$** .

## Využití elektromagnetické indukce

- Transformátory, přenosová soustava VN, VVN
- Elektromotory na střídavý proud (vrtačka, čerpadlo)
- Generátory střídavého proudu (alternátory)
- Indukční vařič (Foucaultovy vířivé proudy)
- Kytarové snímače
- Bezbatерiové svítilny (Faradayova svítilna)



# 38. Magnetický indukční tok

■ **Magnetický indukční tok –  $\Phi$**       $[\Phi] = \text{Wb (weber)}$

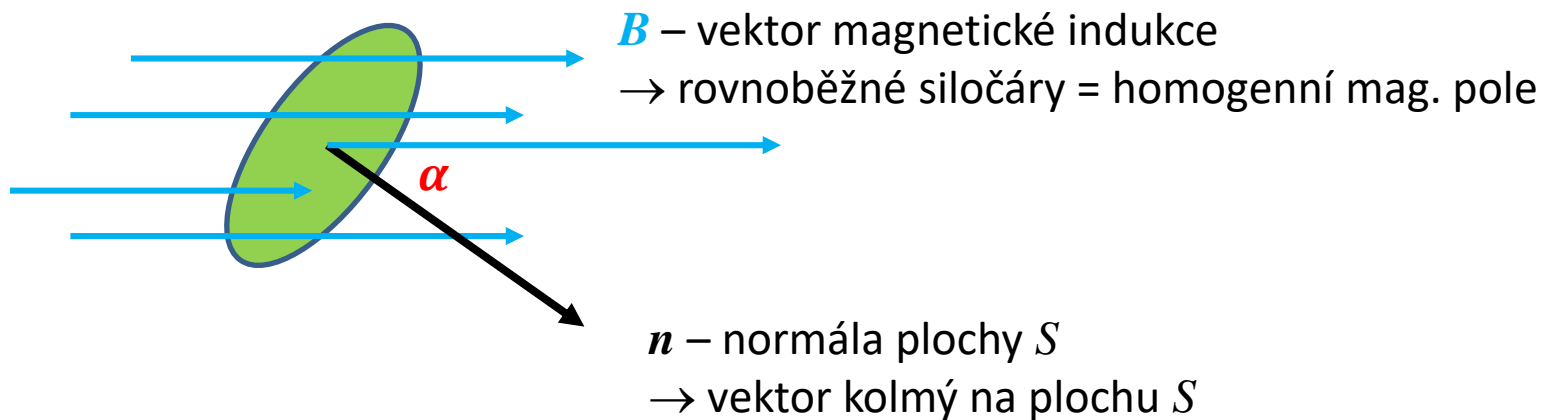
■ **skalární veličina**, kterou popisujeme magnetické pole

■  $B$  – magnetická indukce

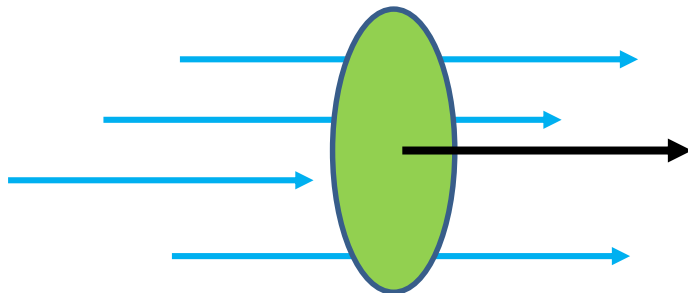
■  $S$  – plocha, kterou prochází magnetický indukční tok

■  $\alpha$  – **úhel mezi normálou plochy a směrem indukčních čar** (směr  $B$ )

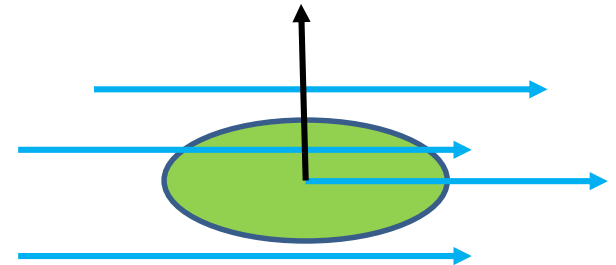
$$\Phi = BS \cos \alpha = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



Maximální indukční tok:  $\alpha = 0^\circ$



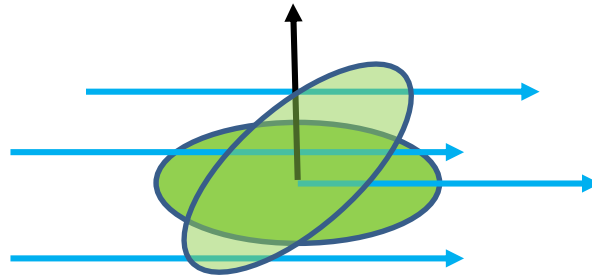
Nulový indukční tok:  $\alpha = 90^\circ$



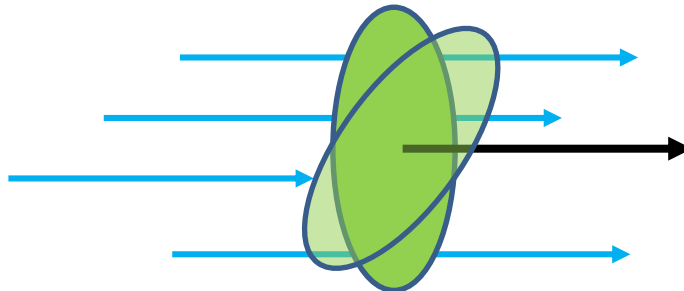
# 38. Magnetický indukční tok

## Časová změna magnetického indukčního toku

- největší napětí se indukuje v okamžiku, kdy při malé změně úhlu protne plocha větší počet indukčních čar → okolí  $0^\circ$



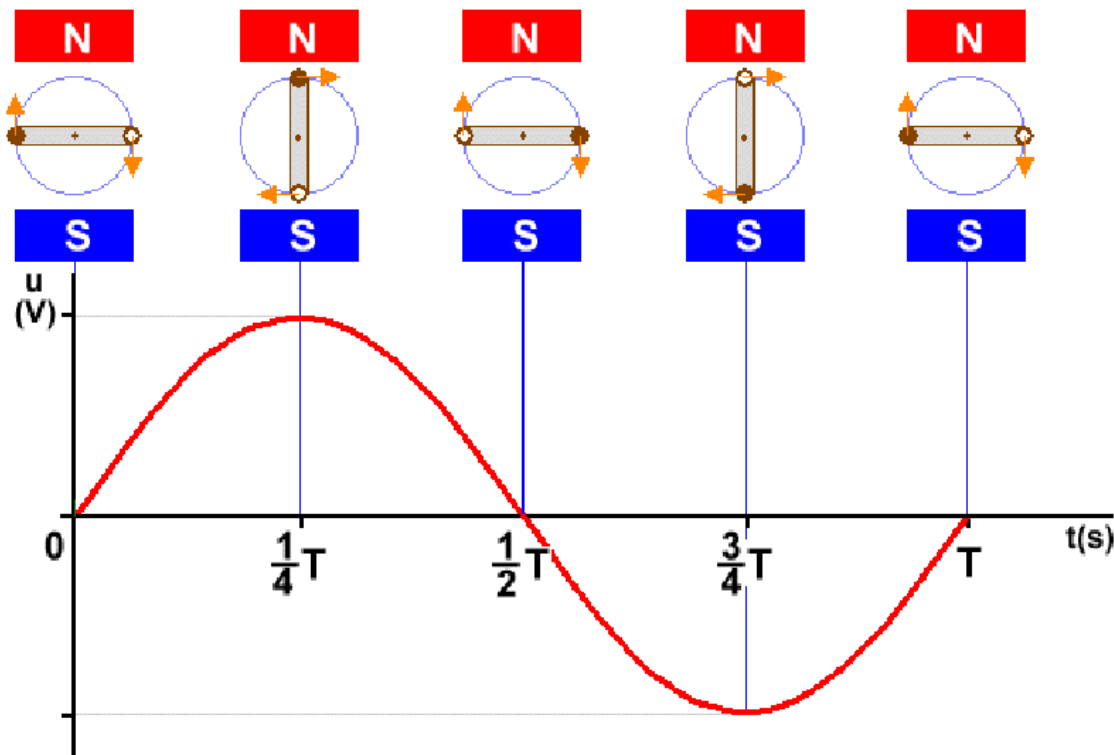
- nejmenší napětí se indukuje v okamžiku, kdy se naopak počet indukčních čar jdoucích plochou téměř nemění → okolí  $90^\circ$



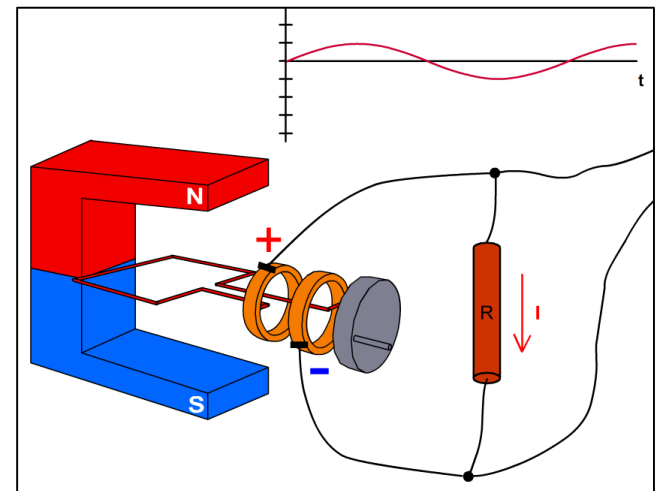
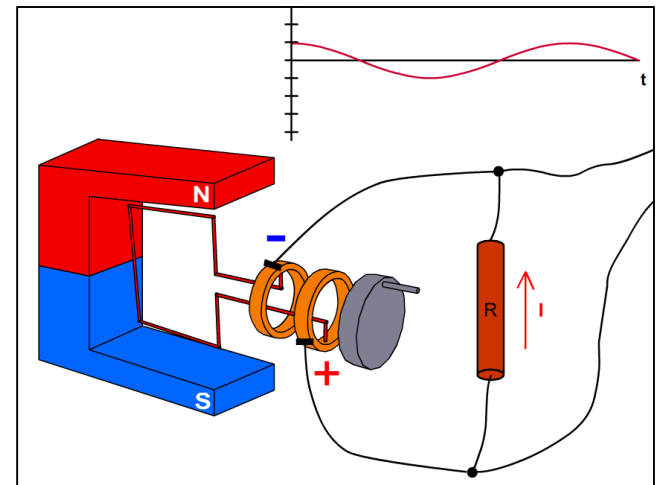
# 38. Magnetický indukční tok

## Časová změna magnetického indukčního toku

- největší napětí se indukuje v okamžiku, kdy je závit kolmý na směr indukčních čar
- nejmenší napětí se indukuje v okamžiku, kdy je závit cívky rovnoběžný se směrem  $B$



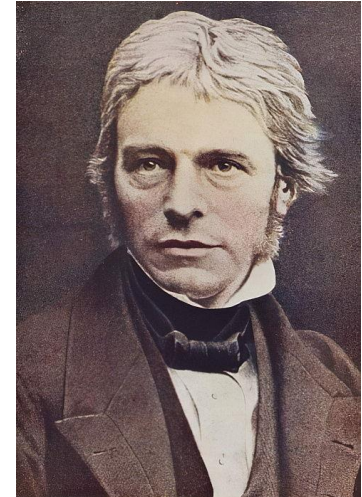
Průběh otáčení závitu cívky v homogenním magnetickém poli s časovým znázorněním funkce sinus



# 39. Faradayův zákon elektromagnetické indukce

## Michael Faraday (1791 – 1867)

- anglický chemik a fyzik
- **1831** – objev **zákona elmg. indukce**, definice mag. a el. siločar  
→ základ pro elektromotory, dynamy, alternátory  
→ definoval pojmy jako **anoda, katoda, elektroda, ion**
- v chemii objevil **zákony elektrolýzy**
- odmítl povýšení do šlechtického stavu
- objevil **princip moderní klimatizace** → stlačený amoniak v kapalném stavu při vypařování odebírá teplo ze svého okolí (ochlazuje okolní prostředí)
- Pojmy související s Faradayem:
  - Farad – jednotka kapacity
  - Faradayova konstanta (elektrolýza)
  - Faradayova klec (odstínění elektrického pole)
  - Faraday – loď pro pokládání podmořských kabelů 1874
  - 20 librová bankovka (1991-2001)
  - Faradayův paradox – uspořádání generátoru zdánlivě odporujícímu F. zákonu



# 39. Faradayův zákon elektromagnetické indukce

## Odvození vztahu pro indukované napětí

- vodič (fialová barva) o délce  $L$  se pohybuje konstantní rychlostí  $v$  zleva doprava v homogenním magnetickém poli o indukci  $B$ , které směřuje „do tabule“
- současně se dotýká vodivých kolejnic, čímž se uzavírá obvod, kterým protéká proud  $I$

- **Magnetická síla dle Flemingova pravidla levé ruky působí proti pohybu**

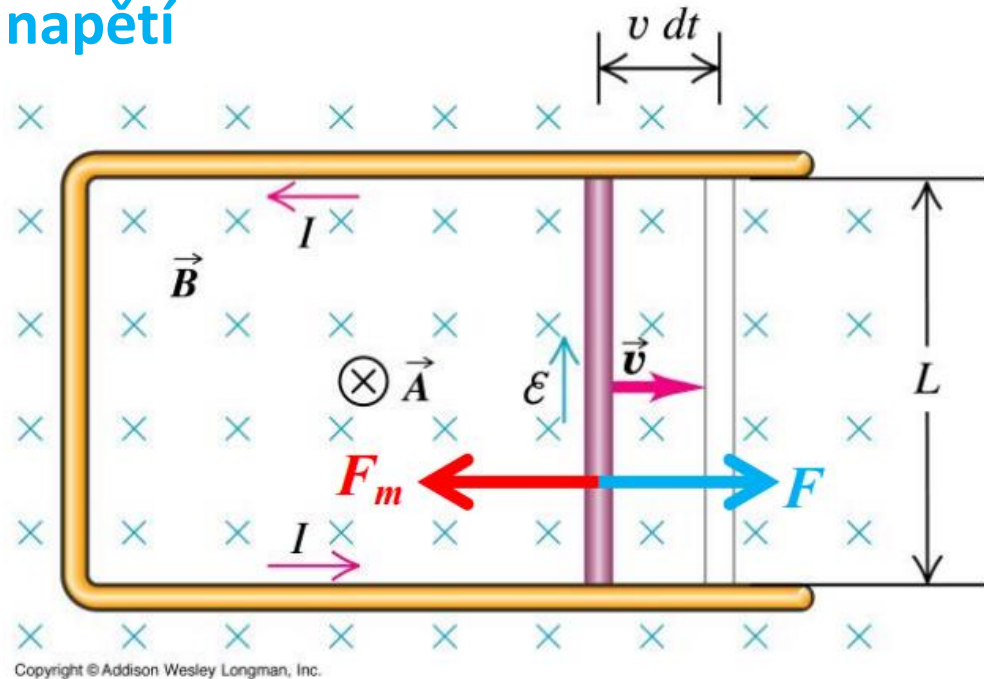
- při pohybu urazí vodič dráhu  $s = v dt = v \Delta t$ , čímž dojde ke zvětšení plochy závitu o  $\Delta S = s \cdot L$
- práce vykonaná vnější silou je rovna elektrické práci, tj.:

$$F \cdot s = UI\Delta t$$

$$BILs = UI\Delta t$$

$$B\Delta S = U\Delta t$$

$$\Delta\Phi = U_i\Delta t$$



# 39. Faradayův zákon elektromagnetické indukce

## Indukované napětí – $U_i$

Časová změna indukčního toku vyvolá při pohybu vodiče s proudem v magnetickém poli indukované napětí mezi konci vodiče. Znaménko mínus vysvětluje **Lenzův zákon**.

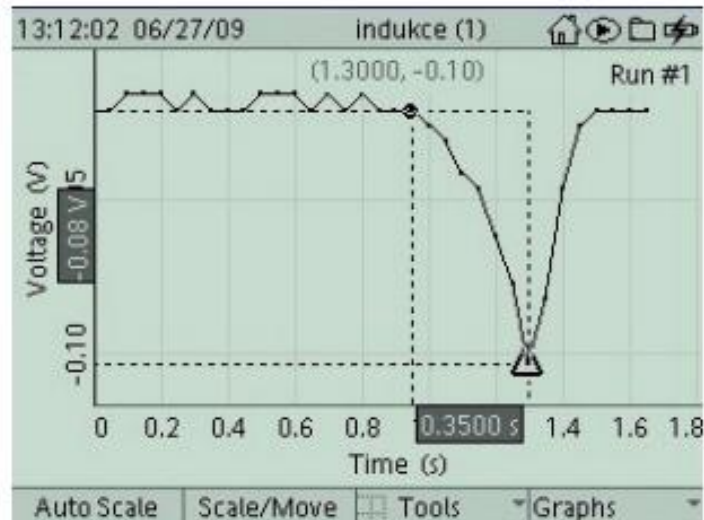
$$U_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

## Lenzův zákon

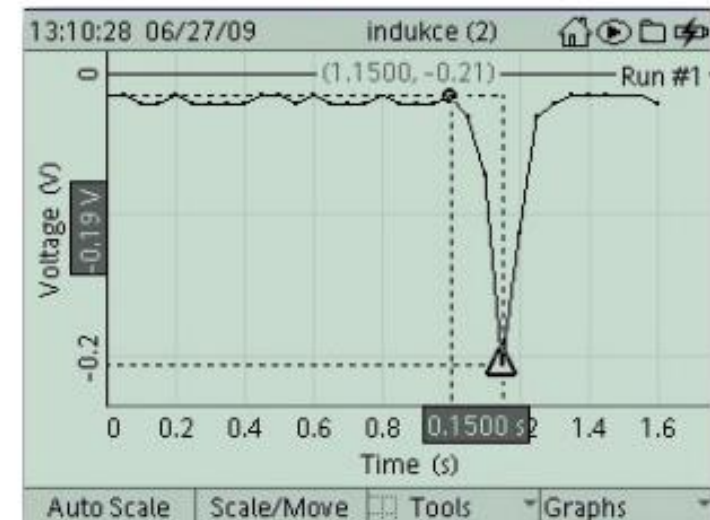
Indukované magnetické pole působí svými účinky vždy proti změně primárního magnetického pole, které vyvolalo sekundární (indukované) magnetické pole.

Cívka 600 závitů:

pomalý pohyb magnetu



rychlý pohyb magnetu

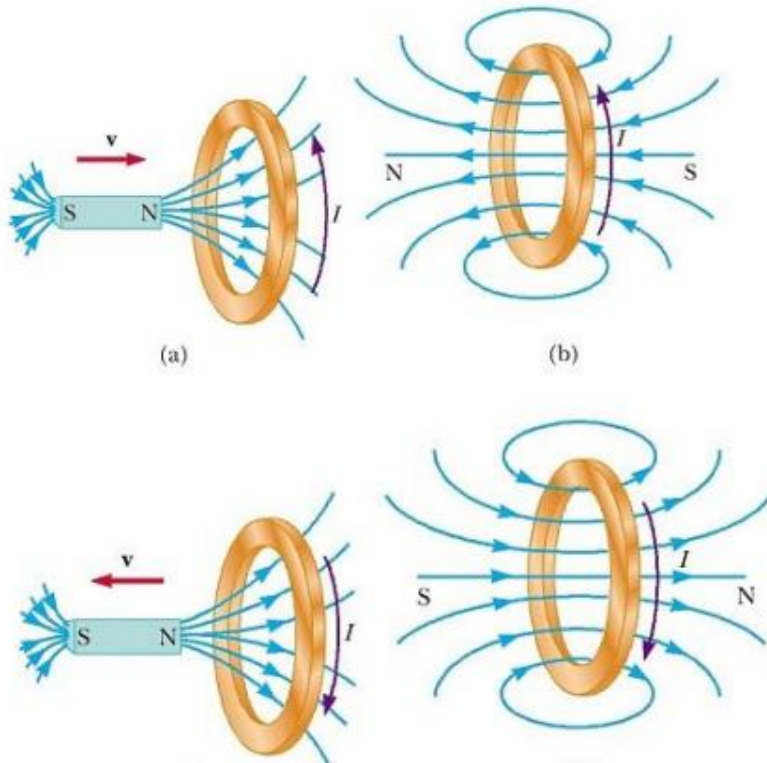


# 40. Lenzův zákon – Indukovaný proud v praxi



➤ sledujme pohyb zavěšeného prstence v závislosti na sepnutí/vypnutí zdroje

<https://www.youtube.com/watch?v=o5me1HxwA3w>



- při **sepnutí spínače**:
  - prstenec se od cívky odpuzuje
  - v prstenci se indukuje opačný proud než v cívce
  - prstenec-cívka vytváří souhlasné póly
- při **rozepnutí spínače**:
  - prstenec se k cívce přitahuje
  - v cívce zaniká magnetické pole
  - v prstenci se indukuje opačné pole snažící se zachovat původní mag. pole
  - prstenec-cívka vytváří nesouhlasné póly

## Lenzův zákon

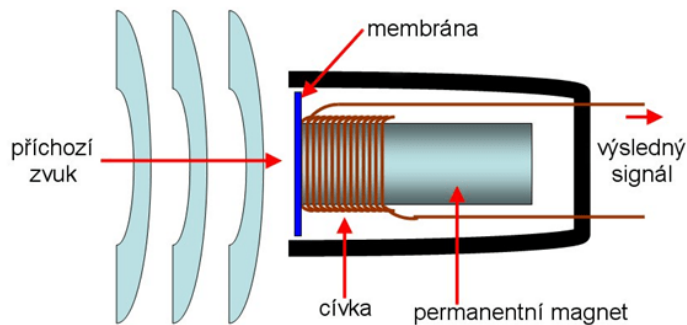
Indukované magnetické pole působí svými účinky vždy proti změně primárního magnetického pole, které vyvolalo sekundární (indukované) magnetické pole.

# 40. Lenzův zákon – Indukovaný proud v praxi

## Indukce v praxi

- využití **indukovaného proudu při pohybu vodiče v mag. poli**
- kytarový snímač
- elektrodynamický mikrofon
- elektrodynamický reproduktor

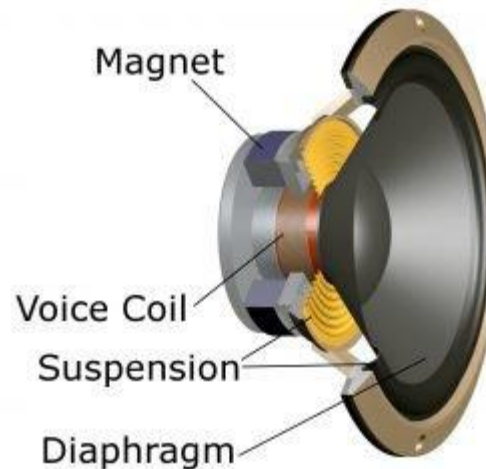
Dynamický mikrofon



- membrána je spojená s pohyblivou cívkou s jádrem z permanentního magnetu
- zvuková vlna způsobí pohyb membrány, který se přeneše na cívku, ve které se indukuje proud

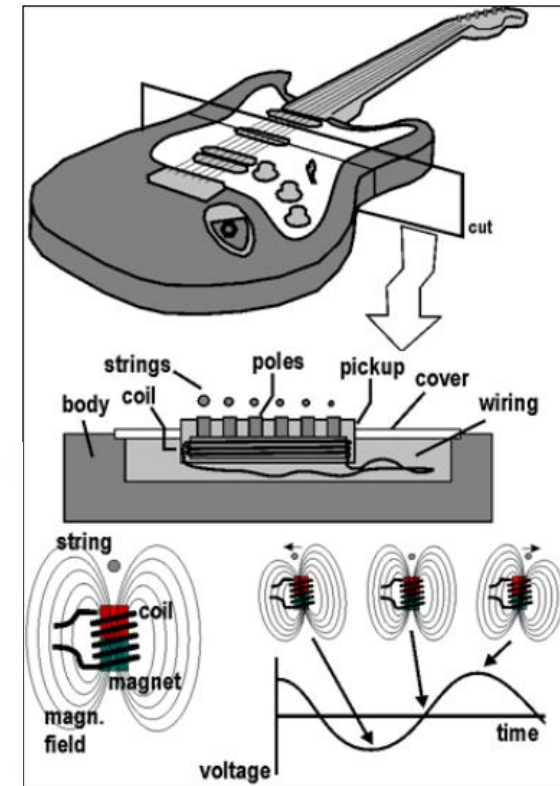
<https://eu.kef.com/pages/uni-q>

- **kytarový snímač** tvoří 6 malých cívek, každá obtočená kolem malého magnetu
- pohyb struny vyvolá v cívce indukované napětí, resp. proud



**reproduktor je svým principem obrácený mikrofon**

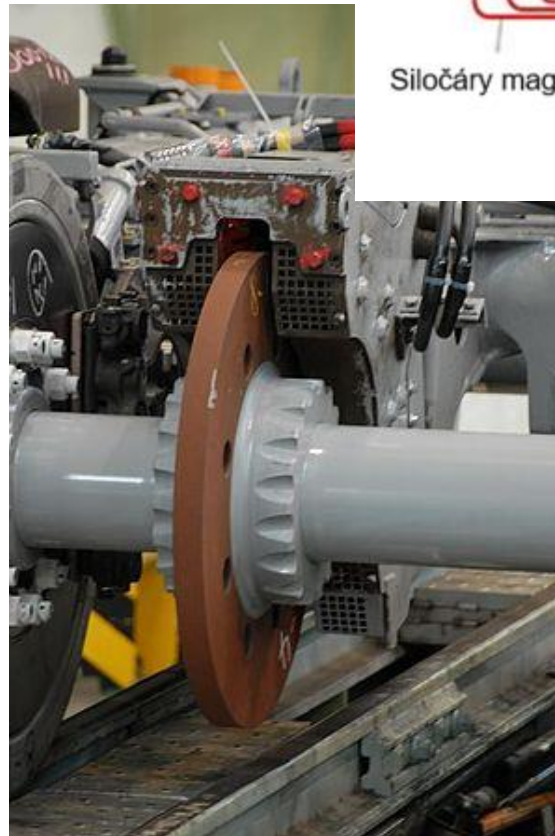
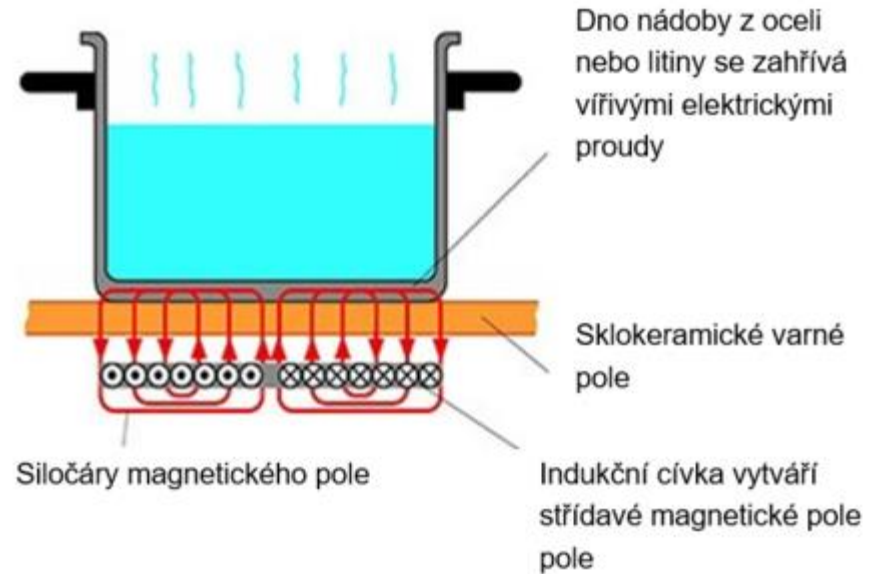
- střídavý signál (proud) ze zesilovače je přiveden na vývody cívky (voice coil) s magnetickým jádrem, která se pohybuje „v rytmu“ proudu
- pohyb cívky se přenáší mechanickým spojením přes pružný papírový závěs (suspension) na kuželovou membránu (diaphragm) reproduktoru
- pohyb membrány vytváří změnou tlaku zvukové vlnění



# 40. Lenzův zákon – Indukovaný proud v praxi

## Indukce v praxi

- využití tzv. **Foucaultových vířivých proudů**
  - staré elektroměry
  - indukční vařiče
  - indukční brzda (tramvaje, rotopedy)

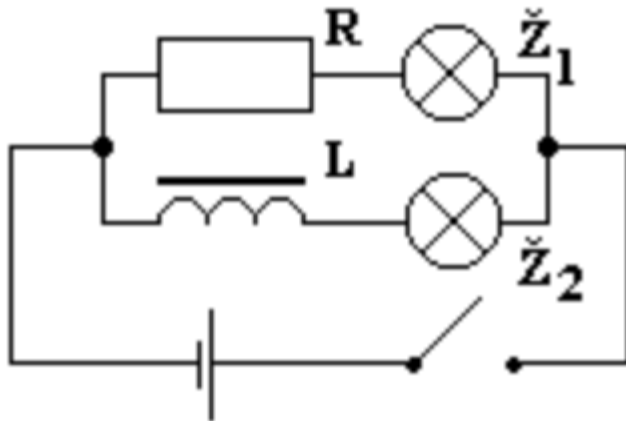


# 41. Vlastní indukce

## Experiment s paralelně zapojenou cívkou a rezistorem

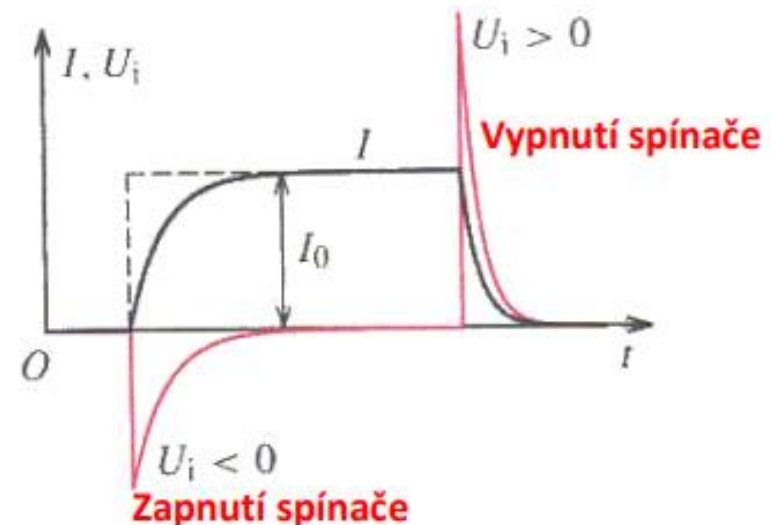
➤ sledujme svit žárovek v paralelním obvodu

<https://www.youtube.com/watch?v=0RNK7Skn5U8>



- po sepnutí spínače se žárovka Ž2 ve větvi s cívkou rozsvítí se zpožděním oproti žárovce Ž1
- po vypnutí spínače svítí Ž2 o zlomek sekundy déle než Ž1
- příčinou je tzv. **indukčnost cívky**

- v cívce se po **sepnutí spínače** indukuje napětí, které má opačnou polaritu než napětí zdroje → **indukovaný proud narůstá exponenciálně** až dosáhne konstantní hodnoty
- při **vypnutí spínače** se v cívce **indukuje velké kladné napětí** → indukovaný proud se exponenciálně zmenší



# 41. Vlastní indukce. Indukčnost cívky.

## Jev vlastní indukce

- indukovaný proud vytváří nestacionární magnetické pole, které vytváří indukované elektrické pole
- magnetický indukční tok je přímo úměrný velikosti proudu  $\Phi = LI$
- časová konstanta LR obvodu  
→ udává dobu náběhu proudu do konstantní fáze

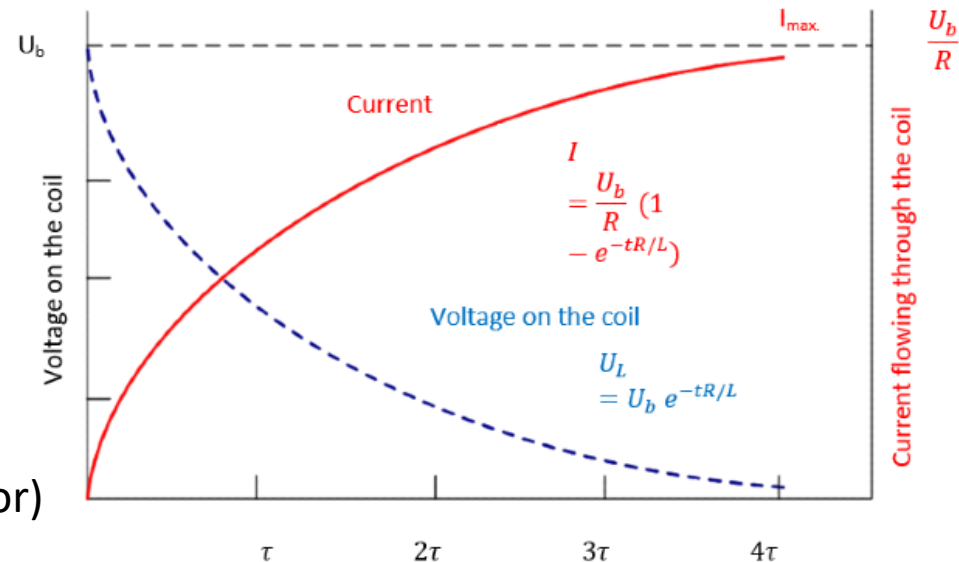
$$\tau = \frac{L}{R}$$

## Indukčnost cívky – $L$ [ $L$ ] = H (henry)

- závisí na geometrii cívky  
→ počet závitů  
→ typ jádra  
→ použitý vodič (průměr, délka, měrný odpor)

## Indukované napětí

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

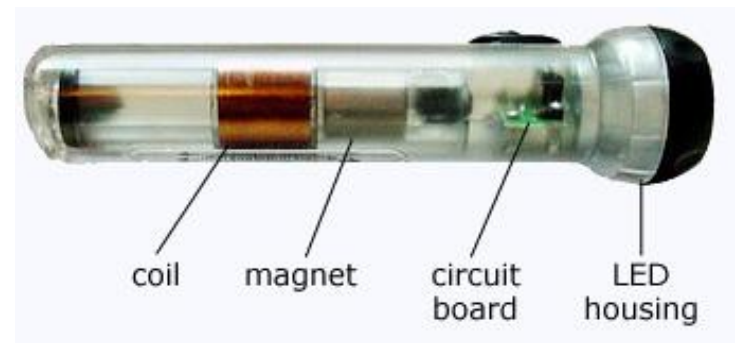
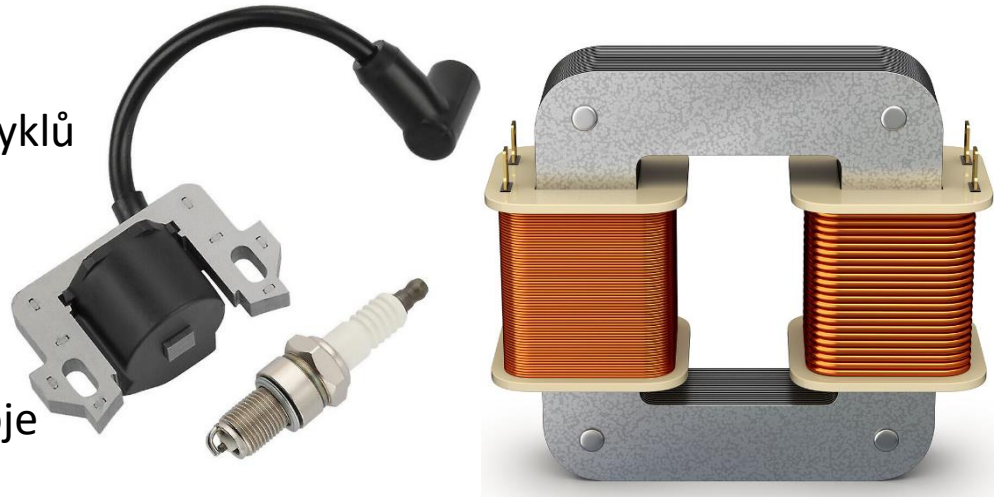


Pozn. RC obvod:  $\tau = RC$

# 41. Vlastní indukce. Indukčnost cívky.

## Využití indukčnosti cívek v praxi

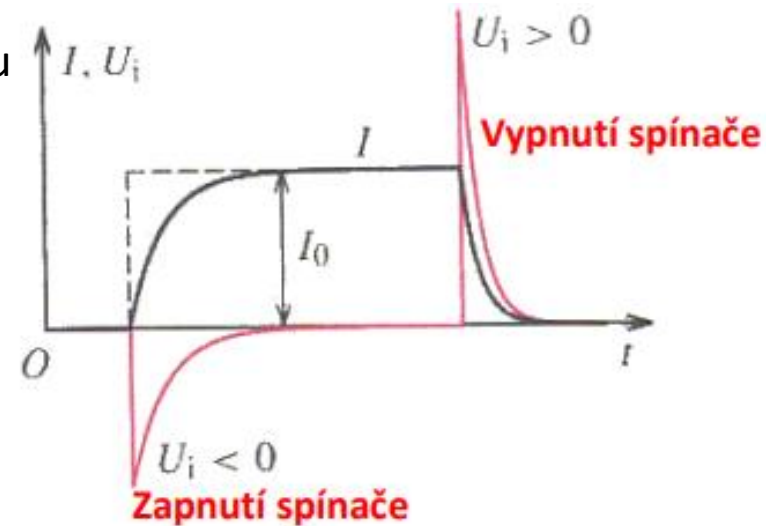
- zapalovací cívky u automobilů nebo motocyklů
- tlumivka
- transformátor
- Faradayova svítlna (věčné světlo)  
→ svítlna bez baterií
- induktory pro demonstraci jiskrového výboje  
→ **Ruhmkorffův transformátor**



# 42. Přejchodný děj. Energie magnetického pole cívky.

## Přejchodný děj

- projevuje se při náhlé změně proudu v obvodu s cívkou  
→ zapnutí/vypnutí spínače
- při **sepnutí spínače**:  
→ proud exponenciálně narůstá až dosáhne konstantní hodnoty,  $\Delta I > 0$   
→ indukuje se záporné napětí  $U_i < 0$  působící proti napětí zdroje, které dosáhne nulové hodnoty v okamžiku nasycení proudu
- při **rozepnutí spínače**:  
→ proud exponenciálně klesne na nulu (rychleji než u zapnutí),  $\Delta I < 0$   
→ indukuje se velké kladné napětí  $U_i > 0$  z důvodu kratšího časového intervalu změny proudu



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

# 42. Přejchodný děj. Energie magnetického pole cívky.

## Energie magnetického pole cívky

- odvození provedeme pro  $LC$  obvod, ve kterém se nabitý kondenzátor vybíjí přes cívku

- elektrická energie kondenzátoru:**

$$E_C = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}QU$$

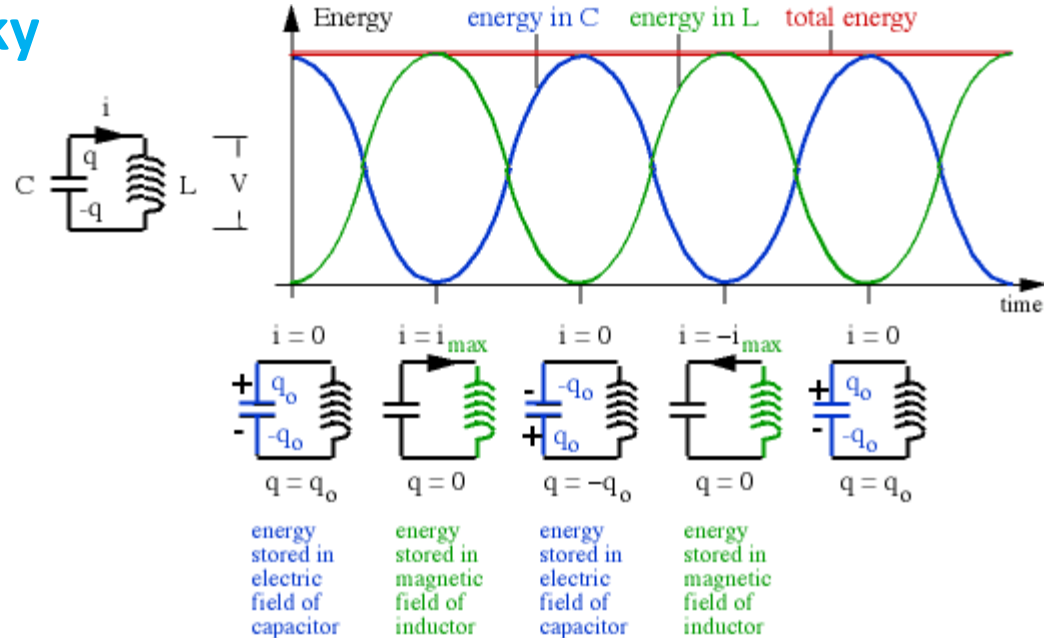
→ se postupně mění na magnetickou energii cívky

→ zopakujme:  $Q = It, U_i = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \frac{I}{t}$

$$E_C = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}It L \frac{I}{t} = \frac{1}{2}LI^2 = E_m$$

- magnetická energie cívky  $E_m$**

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



- obr.1 – **kondenzátor** je nabitý, má **maximální elektrickou energii**, na horní desce + náboj
- obr. 2 – kondenzátor se začíná vybíjet přes cívku, na cívce se postupně (exponenciálně) indukuje maximální napětí, které má opačnou polaritu než kondenzátor, **cívka** získává **maximální magnetickou energii** a proud nabíjí kondenzátor na opačnou polaritu
- obr. 3 – kondenzátor je nabitý, na horní desce – náboj
- obr. 4 – stejný proces jako na obr.2
- obr. 5 – dokončení jednoho cyklu, stejný stav jako na obr. 1