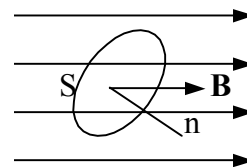


## 17 Elektromagnetická indukcia

- jav elektromagnetickej indukcie sa prejavuje v *nestacionárnom magnetickom poli*
- zdrojom nestacionárneho magnetického poľa je:
  - o nepohybujúci sa vodič s časovo premenným prúdom
  - o pohybujúci sa vodič s prúdom (konštantným alebo časovo premenným)
  - o pohybujúci sa permanentný magnet alebo elektromagnet

### 17.1 magnetický indukčný tok

- v homogénnom magnetickom poli uvažujeme o rovinnej ploche s obsahom  $S$ ; potom pre veľkosť *magnetického indukčného toku*  $\Phi$  platí:
  - o  $\Phi = BS \cdot \cos \alpha$ , kde  $B$  je veľkosť magnetickej indukcie v danom mieste poľa a  $\alpha$  je uhol, ktorý zvierá normála plochy s vektorom magnetickej indukcie
  - o jednotkou magnetickej indukcie je *weber*  $Wb$ ; platí:  $[\Phi] = T \cdot m^2 = Wb$
- magnetický indukčný tok dosahuje maximum, ak je plocha kolmá na magnetickú indukciu (pre  $\alpha = 0$ ); keď sú indukčné čiary rovnobežné s plochou, t.j. nijaká indukčná čiara nepretína plochu, je magnetický indukčný tok nulový (pre  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ )
- zmena magnetického indukčného toku môže nastať aj zmenou magnetickej indukcie alebo zmenou plochy  $S$ . Keď sa s časom mení aspoň jedna z veličín  $B$ ,  $S$  a  $\alpha$ , mení sa s časom aj magnetický indukčný tok. Mierou tejto zmeny je pomer  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
- pre valcovú cievku s  $N$  závitmi a prierezom  $S$ , ktorej os zvierá s indukčnými čiarami homogénneho magnetického poľa uhol  $\alpha$ , je magnetický indukčný tok daný vzťahom:
  - o  $\Phi = NBS \cdot \cos \alpha$



### 17.2 elektromagnetická indukcia

- v nestacionárnom magnetickom poli sa za istých podmienok vo vodiči (cievke) indukuje (vznikne) *elektromotorické napätie*; prúd, ktorý pritom v obvode vzniká, nazýva sa *indukovaný prúd*
- pre vznik indukovaného elektromotorického napätia nie je rozhodujúca zmena magnetickej indukcie, ale časová zmena magnetického indukčného toku
- napätie sa indukuje v týchto prípadoch:
  - o vo vodiči, ktorý sa pohybuje v časovo nepremennom magnetickom poli
  - o v nepohybujúcom sa vodiči, ktorý je v časovo premennom magnetickom poli
  - o vo vodiči, ktorý sa pohybuje v časovo premennom magnetickom poli
- napätie sa indukuje aj v týchto prípadoch:
  - o pri pohybe magnetu (elektromagnetu) v okolí cievky
  - o pri pohybe cievky v okolí magnetu (elektromagnetu)
  - o pri zasúvaní (vysúvaní) feromagnetického jadra do (z) cievky
  - o pri zmenšovaní (zväčšovaní) elektrického prúdu
  - o pri zapnutí (vypnutí)
- indukované elektromotorické napätie a indukovaný prúd vo vodiči vznikajú pôsobením sily na voľné nosiče náboja vo vodiči
  - o pri pohybe vodiča v časovo nepremennom magnetickom poli je to magnetická sila, ktorá pôsobí na voľné elektróny pohybujúce sa s vodičom v stálom magnetickom poli
  - o v nepohybujúcom vodiči v časovo premennom magnetickom poli pôsobí na voľné elektróny silou elektrického poľa, ktoré vzniká vždy pri časovej zmene magnetického poľa.

Toto elektrické pole sa nazýva indukované elektrické pole. Odlišuje sa od elektrostatičného poľa tým, že jeho siločiar sa nezačínajú ani nekončia na elektrickom náboji, ale sú to uzavreté krivky. Tento druh silového poľa sa volá aj vírové pole.

- o pri pohybe vodiča v časovo premennom magnetickom poli na voľné elektróny pôsobia súčasne oba druhy síl

### 17.2.1 Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie

- v homogénnom magnetickom poli sú dva priame rovnobežné a nepohyblivé vodiče pripojené k voltmetru. Ich vzájomná vzdialenosť je  $l$ . Po týchto vodičoch sa v priečnej polohe pohybuje rýchlosťou  $\vec{v}$  ďalší priamy vodič. Uvažujeme, že na koncoch vodiča je nenulové napätie.
- na každý voľný elektrón v uvažovanom pohybujúcom sa vodiči pôsobí magnetická sila  $F_m$  (Lorentzova sila), ktorá je kolmá na rýchlosť pohybujúceho sa vodiča a na magnetickú indukciu; pre jej veľkosť platí:

- o  $F_m = evB$

- ekvivalentné účinky na voľné elektróny by malo homogénne elektrické pole s intenzitou  $\vec{E}_i = \frac{\vec{F}_m}{-e}$ , pre veľkosť ktorej by platilo:

- o  $E_i = \frac{F_m}{e} = \frac{evB}{e} = vB$

- medzi koncami pohybujúceho sa vodiča je napätie s veľkosťou  $E_i l$ , ktorý sa rovná práve veľkosti elektromotorického napätia  $|U_i|$  indukovaného na vodiči s dĺžkou  $l$ :

- o  $|U_i| = E_i l = vBl$

- o veľkosť indukovaného napätia závisí od rýchlosti pohybujúceho sa vodiča, od veľkosti magnetickej indukcie a od jeho dĺžky  $l$

- platí:

- o  $|U_i| = Bl \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{B \cdot \Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ , kde  $\Delta s$  je dráha, ktorú vodič prejde za dobu  $\Delta t$ . Súčin  $\Delta s \cdot l$  sa rovná obsahu plochy  $\Delta S$  opísanej vodičom za dobu  $\Delta t$  a súčin  $B \cdot \Delta S$  vyjadruje veľkosť zmeny magnetického indukčného toku

- *Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie*: indukované elektromotorické napätie sa rovná časovej zmene magnetického indukčného toku

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

- okamžitá hodnota indukovaného elektromotorického napätia je:

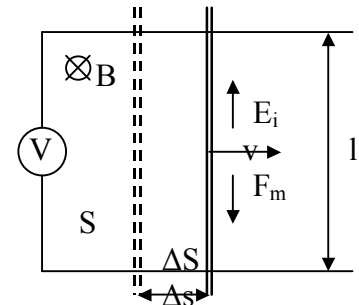
- o  $U_i = -\frac{d\Phi}{dt}$

- platnosť tohto vzťahu nie je obmedzená iba na prípad pohybu priameho vodiča v magnetickom poli; platí všeobecne vo všetkých prípadoch elektromagnetickej indukcie

- iné odvodenie:

- o vychádza z rovnosti Lorentzovej a elektrickej sily:

- $BQv = QE \Rightarrow E = Bv/l \Rightarrow El = Bvl \Rightarrow U = Bvl \Rightarrow U = B \frac{\Delta s}{\Delta t} l = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$



### 17.2.2 Lenzov zákon

- *Lenzov zákon*: indukovaný prúd pôsobí svojimi účinkami proti zmene, ktorá ho vyvolala

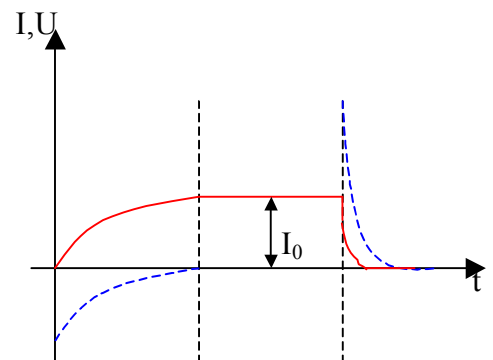
- o indukovaný prúd má vždy taký smer, že svojím magnetickým poľom znižuje zmenu magnetického poľa a tým aj zmenu indukčného toku cez danú plochu. Hovoríme, že indukovaný prúd pôsobí svojím magnetickým poľom proti zmene magnetického poľa, ktorá ho vyvolala.
- tieto indukované prúdy sa volajú **Foucaultove prúdy (vírivé prúdy)** (brzdia pohyb vodiča v magnetickom poli)

### 17.2.3 vlastná indukcia

- predchádzajúce prípady, keď sa vo vodiči indukovalo elektromotorické napätie, nazývajú sa **vzájomná indukcia**
- ďalším javom elektromagnetickej indukcie je **vlastná indukcia**
  - o keď cievkou prechádza časovo premenný prúd, mení sa s časom magnetické pole cievky aj magnetický indukčný tok, ktorý cievka v sebe tvorí a v cievke sa indukuje elektromotorické napätie
- magnetický indukčný tok cievkou, ktorá je v prostredí s konštantnou relatívnou permeabilitou, je priamo úmerný prúdu v cievke:
  - o  $\Phi = LI$
- keď sa prúd v cievke za dobu  $\Delta t$  zmení o  $\Delta I$ , zmení sa indukčný tok cievkou o:
  - o  $\Delta\Phi = L\Delta I$
- pre elektromotorické napätie indukované v cievke platí:
  - o  $U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$
- súčiniteľ  $L$  má pre danú cievku konštantnú veľkosť, ktorá závisí od relatívnej permeability prostredia, počtu závitov a geometrie; nazýva sa **indukčnosť cievky**
  - o pre jednotku indukčnosti platí:
    - $L = -U_i \frac{\Delta t}{\Delta I} \Rightarrow [L] = V \frac{s}{A} = \frac{Wb}{A} = H$
    - jednotkou indukčnosti je **henry**
    - cievka má jednotkovú indukčnosť, ak sa v nej pri rovnomernej zmene prúdu o 1 A za 1 s indukuje elektromotorické napätie 1 V
  - o indukčnosť  $L$  je okrem odporu  $R$  a kapacity  $C$  ďalším základným parametrom vodičov. Najčastejšie sa vyskytuje indukčnosť vodičov v tvare cievok. Cievka s feromagnetickým jadrom má oveľa väčšiu indukčnosť ako rovnaká cievka bez jadra, ale jej indukčnosť nie je konštantná; závisí od prúdu, ktorý ňou prechádza
- po zapnutí vypínača sa prúd v obvode zväčšuje a v cievke sa indukuje záporné elektromotorické napätie  $U_i = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}$ . Prúd v obvode je daný podielom celkového elektromotorického napätia a celkového odporu obvodu:

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

- v okamihu zapnutia spínača je  $I=0$  A a zo vzťahu pre prúd vyplýva, že  $U_i = -U_e$ . To znamená, že pri zapnutí spínača má indukované elektromotorické napätie v cievke rovnakú veľkosť ako elektromotorické napätie zdroja, ale v súhlase s Lenzovým zákonom je záporné.
- v čase  $t>0$  sa prúd zväčšuje stále pomalšie a súčasne sa znižuje veľkosť záporného indukovaného elektromotorického napätia  $U_i$ . Po istom čase prúd dosiahne takmer ustálenú veľkosť  $I_0 = \frac{U_e}{R}$  a indukované



elektromotorické napätie sa zmenší na nulovú hodnotu. Tento čas závisí od veľkosti  $R$  a  $L$ . V bežných prípadoch býva  $10^{-3}$  s až 10 s.

- pri vypnutí spínača v obvode začne prúd prudko klesať a v cievke sa indukuje kladné elektromotorické napätie, ktoré môže pri vhodne zvolených hodnotách  $R$  a  $L$  mnohonásobne prevýšiť elektromotorické napätie zdroja.

### 17.3 energia magnetického poľa cievky

- v jednoduchom obvode je zapojená cievka (bez jadra) s indukčnosťou  $L$ . Po zapnutí spínača sa prúd v cievke zväčšuje z nulovej hodnoty a po istom čase dosiahne hodnotu zodpovedajúcu ustálenému stavu. Súčasne sa tvorí magnetické pole cievky, pritom sa v cievke indukuje elektromotorické napätie  $U_i = -L \frac{dI}{dt}$ . Za veľmi krátku dobu  $dt$  sa prúd v cievke zväčšil o  $dI$  a energia magnetického poľa cievky sa zväčšila o  $dE_m$ . Túto energiu získalo magnetické pole cievky premenou veľkej časti elektrickej energie zdroja. Elektrické sily pôsobiace na voľné elektróny vo vodiči cievky vykonali pri tejto zmene prácu, ktorej veľkosť sa rovná práve  $dE_m$ . Veľkosť tejto práce je daná súčinom veľkosti elektromotorického napätia indukovaného v cievke, prúdu v cievke a doby  $dt$ :

$$\circ W = \int UI \cdot dt = \int \frac{L \cdot dI}{dt} I \cdot dt = L \int I \cdot dI = \frac{1}{2} LI^2$$

- pre cievku s feromagnetickým jadrom tento vzťah neplatí, pretože indukčnosť  $L$  cievky s týmto jadrom nie je konštantná
- po vypnutí vypínača nezastane prúd v obvode okamžite, ale vo veľmi krátkom čase. Za tento čas zanikne aj magnetické pole cievky. Jeho energia sa pritom premení na iné formy energie, zväčša na vnútornú energiu obvodu (Joulovo teplo)