Stručný prehľad vlastností a vzťahov magnetického poľa

doc. Ing. Ivan BOJNA, PhD., STU FEI v Bratislave

ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

Elektromagnetické pole je fyzikálne pole, ktoré charakterizuje elektrické a magnetické sily v priestore. Skladá sa z dvoch fyzikálne prepojených polí – *elektrického poľa* a *magnetického poľa*. Vzájomnú súvislosť elektrického a magnetického poľa popisujú *Maxwellove rovnice* elektromagnetického poľa.

Ak sa elektromagnetické pole v čase nemení (*stacionárne elektromagnetické pole*), alebo ak sú časové zmeny pomalé, možno jeho dve zložky, čiže elektrické pole a magnetické pole vyšetrovať samostatne (vtedy nie je nevyhnutné poznať súčasne elektrickú aj magnetickú zložku poľa). Pri rýchlych časových zmenách hovoríme o *dynamickom elektromagnetickom poli*, kedy treba vyšetrovať súčasne elektrickú aj magnetickú zložku. Tento príspevok sa zaoberá stacionárnym stavom, resp. stavom pri pomalých časových zmenách (typický prípad je striedavé pole s frekvenciou 50 Hz), kedy možno vyšetrovať elektrické, resp. magnetické pole samostatne.

Elektrické pole vzniká v okolí každého náboja. Naproti tomu, magnetické pole vzniká len pri pohybujúcom sa elektrickom náboji, teda aj každý prúd vyvoláva magnetické pole. Napríklad pri elektromagnete je príčinou prúd v cievke elektromagnetu, v permanentnom magnete je to pohyb elektrónov v atómoch, ktorý možno považovať za malý (elementárny) magnet. Každý elektrón so svojou dráhou v atóme látky predstavuje elektrický prúd, čím vyvoláva magnetické pole.

VLASTNOSTI, ZÁKLADNÉ VELIČINY A VZŤAHY MAGNETICKÉHO POĽA

Magnetické pole je fyzikálne pole, ktorého zdrojom sú pohybujúce sa elektrické náboje, čiže elektrický prúd. Každý elektrický prúd vyvoláva magnetické pole. Magnetické pole môže byť vyvolané aj zmenami elektrického poľa (podobne ako zmeny magnetického poľa vyvolávajú elektrické pole).

Vo vodiči pohybujúcom sa v magnetickom poli sa indukuje elektrické napätie. Ak magnetické pole je časovo premenlivé, elektrické napätie sa indukuje aj vo vodiči nepohybujúcom sa voči magnetickému poľu (napr. transformátor).

Zdrojom magnetického poľa využívaného na praktické účely sú najmä

- elektromagnety (magnetické pole je vyvolané prúdom vo vodičoch vinutia elektromagnetu),
- permanentné magnety (magnetické pole je vyvolané pohybom elektrónov v atómoch, pričom každý elektrón so svojou dráhou v atóme predstavuje mikroskopický budiaci prúd).

Aj keď permanentné magnety a elektromagnety vyvolávajú principiálne rovnaké magnetické pole, z hľadiska praktického využitia majú elektromagnety viaceré výhody. Napríklad veľkosť magnetického poľa možno ľahko meniť zmenou veľkosti magnetizačného (budiaceho) prúdu, zmeniť orientáciu magnetického poľa možno zmenou smeru prúdu, možno vytvoriť striedavé magnetické pole, otáčavé pole a pod.

Vlastnosti magnetického poľa:

- Makroskopické magnetické pole môže existovať vo vákuu aj v látke.
- Magnetické pole pôsobí silou na vodiče pretekané prúdom, na pohybujúce sa elektrické náboje, ale aj na niektoré látky, ktoré sú v pokoji (magnetiká). Najvýznamnejšou skupinou magnetík sú feromagnetické látky (napríklad feromagnetickou látkou, z ktorej sa vyrábajú transformátorové plechy je železo s prímesami kremíka, fosforu, síry, uhlíka a mangánu).
- Vložením nemagnetickej látky do magnetického poľa sa pole nemení. Vložením magnetika do magnetického poľa sa pole v magnetiku výrazne zosilní.

SILOVÉ PÔSOBENIE ELEKTRICKÉHO A MAGNETICKÉHO POĽA NA NÁBOJ

Jedným zo základných prejavov elektromagnetického poľa je silové pôsobenie na elektrický náboj. Je to tzv. Lorentzova sila (pozn.: vektorové veličiny sú tučné)

$$\boldsymbol{F} = Q\boldsymbol{E} + Q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} =$$

kde $\boldsymbol{F}$ je sila pôsobiaca na elektrický náboj,

Q elektrický náboj,

$\boldsymbol{E}$ intenzita elektrického poľa,

$\boldsymbol{v}$ rýchlosť pohybujúceho sa náboja,

$\boldsymbol{B}$ magnetická indukcia.

Prvý člen vyjadruje silu elektrického poľa na náboj, druhý člen silové pôsobenie magnetického poľa. V praxi častejšie ako s pohybujúcimi sa nábojmi pracujeme s prúdmi vo vodičoch. Sila pôsobiaca na vodič, ktorým prechádza prúd I je

$$\boldsymbol{F} = Q\boldsymbol{E} + I\,\mathrm{d}\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$$

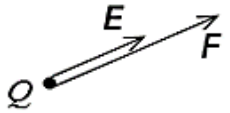
kde I je prúd prechádzajúci vodičom,

$\mathrm{d}\boldsymbol{l}$ dĺžkový element vodiča.

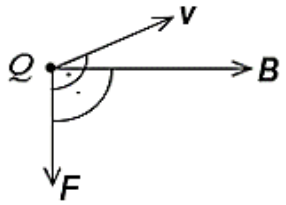
Z hľadiska silového pôsobenia na náboj sú medzi elektrickým a magnetickým poľom niektoré zásadné rozdiely:

1. Elektrické pole pôsobí na pohybujúce sa aj nepohybujúce sa náboje. Magnetické pole pôsobí len na pohybujúce sa náboje (vrátane prúdu).

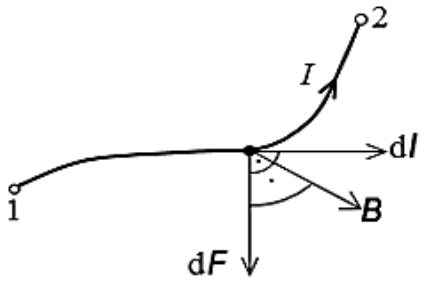
2. Elektrické pole pôsobí na náboj v smere poľa (elektrické pole je charakterizované vektorom intenzity elektrického poľa ***E,*** obrázok 1a). Magnetické pole pôsobí *kolmo* na smer magnetického poľa (magnetické pole je charakterizované vektorom magnetickej indukcie ***B***, obrázky 1b, resp. 1c).



Obr. 1a



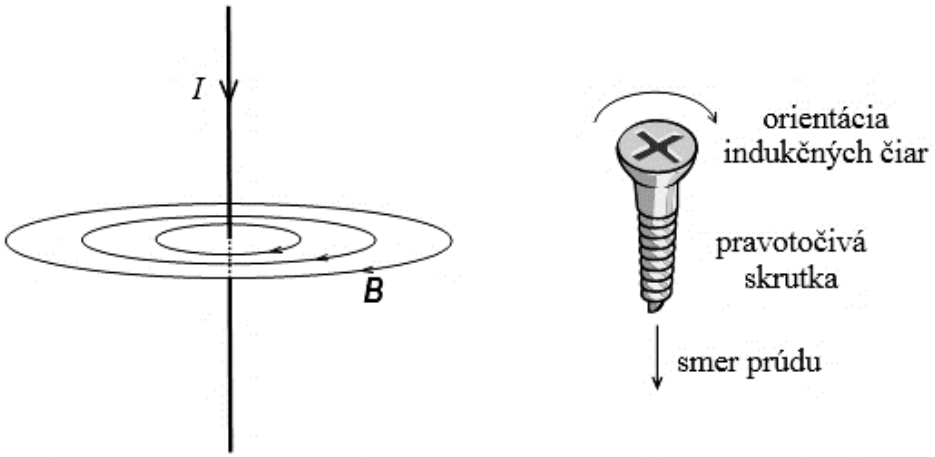
Obr. 1b



Obr. 1c

MAGNETICKÉ POLE VODIČOV

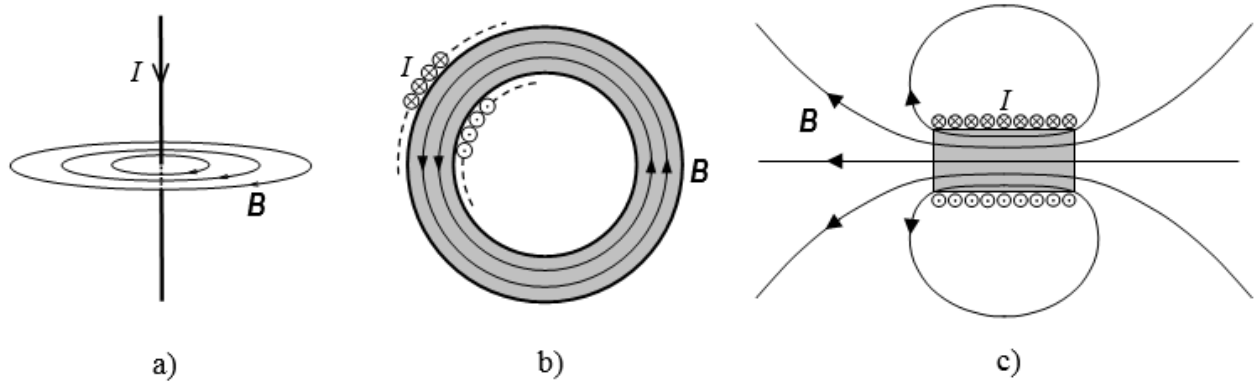
Magnetické pole sa znázorňuje pomocou indukčných čiar. Sú to orientované (*fiktívne*) čiary, ktoré v každom mieste charakterizujú smer vektora magnetickej indukcie ***B***. Inak povedané, dotyčnica k orientovanej indukčnej čiare udáva v každom bode smer vektora ***B*** (nie však jeho veľkosť, ktorá sa pozdĺž indukčnej čiary vo všeobecnosti môže meniť).



Obr. 2 Orientácia indukčných čiar podľa pravidla pravotočivej skrutky

Na rozdiel od elektrických siločiar, ktoré majú začiatok na kladnej elektróde a koniec na zápornej elektróde, indukčné čiary nemajú začiatok a koniec, ale vždy sú do seba uzavreté, pričom obopínajú vodič/vodiče s prúdom vyvolávajúcim toto magnetické pole. Orientácia indukčných čiar vo vzťahu k budiacemu prúdu je daná pravidlom pravotočivej skrutky (pri otáčaní skrutky v smere orientácie indukčných čiar, pravotočivá skrutka sa posúva v smere prúdu, pozri obr. 2).

Niektoré charakteristické prípady magnetického poľa vodičov so stacionárnym prúdom sú znázornené pomocou indukčných čiar na obr. 3 (predpokladáme nemagnetické vodiče v nemagnetickom prostredí, čiže v prostredí s permeabilitou $\mu = \mu_0$).



Obr. 3 Magnetické pole a) priameho nekonečne dlhého vodiča; b) cievky navinutej na prstencovom jadre; c) dlhej valcovej cievky

Indukčné čiary magnetického poľa v okolí priameho nekonečne dlhého vodiča (obr. 3a) sú sústredné kružnice, magnetická indukcia $\boldsymbol{B}$ je maximálna pri povrchu vodiča.

Indukčné čiary poľa cievky navinutej na prstencovom jadre (obr. 3b) sú sústredné kružnice uzatvárajúce sa vnútrom jadra (ak je cievka husto vinutá, magnetické pole mimo jadra je zanedbateľné).

Magnetické pole vo vnútri dlhej valcovej cievky (obr. 3c) je takmer homogénne (čiže magnetická indukcia vnútri cievky je takmer konštantná), indukčné čiary sa uzatvárajú vonkajším priestorom, pričom pri koncoch cievky a najmä mimo cievky je pole slabé (indukčné čiary mimo cievky sú „riedke“).

MAGNETICKÉ VLASTNOSTI LÁTOK

Z hľadiska magnetických vlastností možno urobiť základné delenie látok na dve skupiny:

– nemagnetické látky,

– magnetické látky (magnetiká).

Na charakterizovanie magnetického poľa v látkach sa zavádza ďalšia vektorová veličina – *intenzita magnetického poľa* $\boldsymbol{H}$, ktorá je užitočná pri charakterizovaní magnetického poľa najmä v magnetikách. Je daná vzťahom

$$\boldsymbol{H} = \frac{\boldsymbol{B}}{\mu}$$

kde μ je *permeabilita prostredia* – charakterizuje mieru magnetizácie látky v magnetickom poli.

Permeabilita prostredia μ sa vyjadruje v tvare $\mu = \mu_0 \mu_r$, kde μ_0 je permeabilita vákua ($\mu_0 = 4\pi \,.\, 10^{-7}$ H/m), μ_r je relatívna permeabilita látky.

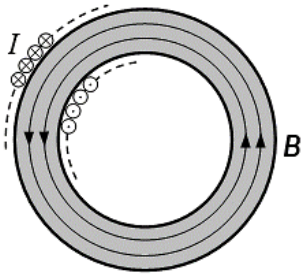
Relatívna permeabilita vákua a približne aj vzduchu a všetkých nemagnetických látok (napr. voda, meď, hliník) je $\mu_r = 1$, čo vyjadruje skutočnosť, že nemagnetické látky neovplyvňujú magnetické pole, permeabilita nezávisí od veľkosti ***H***, resp. ***B***.

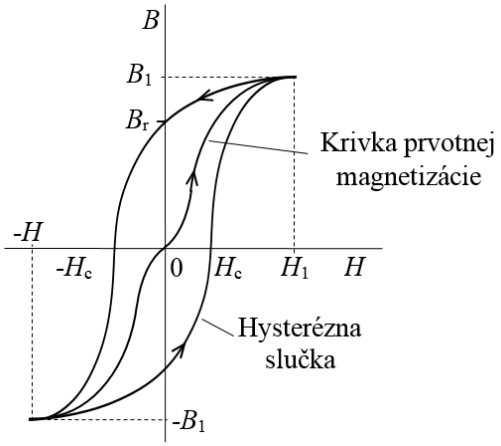
Magnetiká majú veľmi veľkú relatívnu permeabilitu (rádovo 10^2 až 10^5). Permeabilita magnetika vyjadruje jeho schopnosť zmagnetizovať sa a po vložení do magnetického poľa výrazne zosilňovať magnetickú indukciu B.

Magnetovanie magnetika môžeme robiť napríklad tak, že na prstenec z magnetika navinieme cievku a prúd v cievke postupne zvyšujeme (obr.4). Intenzita magnetického poľa je vždy úmerná veľkosti budiaceho prúdu $H \sim I$, pričom nezávisí od permeability prostredia μ. Naopak, magnetická indukcia $B = \mu H$ závisí aj od permeability prostredia.

Permeabilita magnetík nie je konštantná, preto závislosť $B = f(H)$ nie je lineárna. Ak magnetujeme magnetikum prvýkrát, závislosť $B = f(H)$ prebieha podľa krivky prvotnej magnetizácie (obr. 5).

Krivka spočiatku stúpa takmer lineárne a potom v oblasti „kolena“ sa zakrivuje a nastáva „nasýtenie“ látky, v tejto oblasti sa už permeabilita zmenšuje. Pri železe je koleno medzi 1 a 2 T (podľa skladby prímesí). Ak po dosiahnutí istej hodnoty B_1 zmenšujeme budiaci prúd (a tým aj veľkosť H), magnetická indukcia B klesá pomalšie ako podľa krivky prvotnej magnetizácie. Nastáva akési „zotrvávanie“, čiže *hysteréza*. Stav magnetika nezávisí len na veľkosti H, ale aj na predchádzajúcom stave – magnetikum má „pamäť“. Ak zanikne H (pri vypnutí budiaceho prúdu), zostáva v magnetiku určitá *remanentná indukcia* B_r. Magnetikum sa stalo *permanentným* (trvalým) magnetom. Ak chceme remanentnú indukciu zrušiť, musíme magnetikum magnetovať opačným prúdom tak, aby intenzita dosiahla veľkosť $-H_c$. Tá sa nazýva *koercivita*. Pri ďalšom priebehu dostaneme rovnakú, ale zápornú indukciu $-B_1$. Ak postup obrátime a opäť zväčšujeme budenie na veľkosť $+H_1$, dostaneme uzavretú *hysteréznu slučku*.





Obr. 4 Cievka na magnetickom prstenci *Obr. 5 Hysterézna slučka magnetika*

V lineárnej časti krivky prvotnej magnetizácie majú magnetiká permeabilitu podstatne väčšiu ako μ_0. Napríklad μ_r železa v lineárnej časti je 300 – 10 000, permalloy (zliatina niklu a železa) má μ_r 50 000 – 140 000. Na hysteréznej slučke stráca permeabilita definovaná vzťahom $\mu = B/H$ (tzv. statická permeabilita) zmysel (napr. v bode B_r by bola nekonečná).

Tvar hysteréznej slučky je pre rôzne magnetiká rozdielny. *Magneticky mäkké látky*, (napríklad *elektroplechy* – transformátorové alebo dynamové plechy) majú úzku hysteréznu slučku, ich koercivita je aj pod 100 A/m.

Magneticky tvrdé látky, z ktorých sa robia najmä permanentné magnety, majú koercivitu rádovo až 10^5 A/m, teda viac ako tisíckrát väčšiu ako magneticky mäkké materiály. Napríklad najnovšie neodýmové magnety (sú zmesou neodýmu, železa a bóru) sú v súčasnosti najsilnejším typom magnetu s vynikajúcimi magnetickými vlastnosťami. Sú schopné uniesť viac ako tisícnásobok vlastnej váhy – magnet veľkosti malej mince môže udržať železný predmet s hmotnosťou okolo 10 kg.

MAGNETICKÝ TOK, VLASTNÁ INDUKČNOSŤ

Uvažujme prúd prechádzajúci slučkou podľa obrázka 6. <u>*Magnetický tok*</u> Φ je definovaný ako tok (plošný integrál) vektora magnetickej indukcie $\boldsymbol{B}$ cez plochu slučky S

$$\Phi = \iint_S \boldsymbol{B} \bullet \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$ (znak $\bullet$ znamená vektorový súčin dvoch vektorov).

Ak je magnetická indukcia $\boldsymbol{B}$ konštantná po celej ploche $\boldsymbol{S}$ a je na ňu kolmá, možno písať

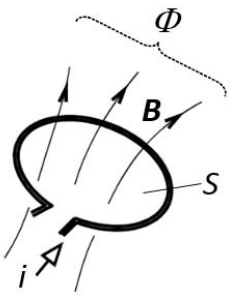
$$\Phi = B \,.\, S$$

<u>*Vlastná indukčnosť*</u> L je pomer magnetického toku Φ k prúdu i, ktorý ho vyvolal

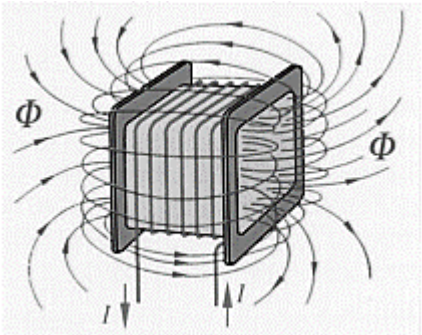
$$L = \frac{\Phi}{i}$$

a pre cievku s N závitmi (obr. 7) je

$$L = \frac{N\Phi}{i}$$



Obr. 6 K definícii vlastnej indukčnosti



Obr. 7 Cievka s N závitmi

Reálnym prvkom ktorého význačnou vlastnosťou je vlastná indukčnosť, je cievka. Vlastnú indukčnosť cievky výrazne ovplyvňuje prítomnosť magnetického jadra – konkrétne jeho permeabilita). V porovnaní s cievkou bez magnetického jadra (tzv. *vzduchová cievka*) rovnaká cievka s magnetickým jadrom má podstatne väčšiu vlastnú indukčnosť.

Ďalším podstatným rozdielom je, že vlastná indukčnosť vzduchovej cievky je konštantná, nezávisí od veľkosti budiaceho prúdu. Naproti tomu vlastná indukčnosť cievky s magnetickým jadrom nie je konštantná – pri zväčšujúcom sa prúde klesá. Je to v dôsledku nelinearity magnetika – s narastajúcim prúdom permeabilita magnetika klesá.

Neexistuje univerzálny vzťah na výpočet vlastnej indukčnosti rôznych druhov cievok. Vo všeobecnosti však platí, že vlastná indukčnosť je úmerná druhej mocnine počtu závitov N^2 a je úmerná permeabilite jadra μ.

INDUKTOR AKO IDEÁLNY MODEL CIEVKY

V elektrických obvodoch sa reálne prvky (odpory, kondenzátory, cievky) modelujú ideálnymi prvkami: rezistormi, kapacitormi, induktormi. Reálna cievka s vlastnou indukčnosťou L sa modeluje ideálnym prvkom – induktorom. Jediným parametrom induktora je vlastná indukčnosť L. Ak nemožno zanedbať odpor cievky, do série s induktorom sa zapája druhý ideálny prvok – rezistor, ktorý reprezentuje odpor cievky R.

Pomocou induktora možno výhodne charakterizovať chovanie a niektoré dôležité vlastnosti reálnych cievok:

1. Vzťah medzi napätím a prúdom induktora je

$$u_L(t) = L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}$$

Z tohto vzťahu vyplýva dôležitá vlastnosť induktora: Veľkosť napätia na induktore nezávisí od veľkosti prúdu, ale od rýchlosti jeho zmeny, ktorá je charakterizovaná deriváciou prúdu podľa času. Aj pri veľkom stacionárnom prúde je napätie na induktore nulové, naopak aj malý, ale rýchlo sa meniaci prúd môže vyvolať na induktore vysoké napätie (napr. vysokofrekvenčné prúdy, či bleskový prúd so strmou nábežnou hranou).

2. Induktor je prvok, ktorý je schopný akumulovať energiu magnetického poľa W_L

$$W_L(t) = \frac{1}{2}Li^2(t)$$

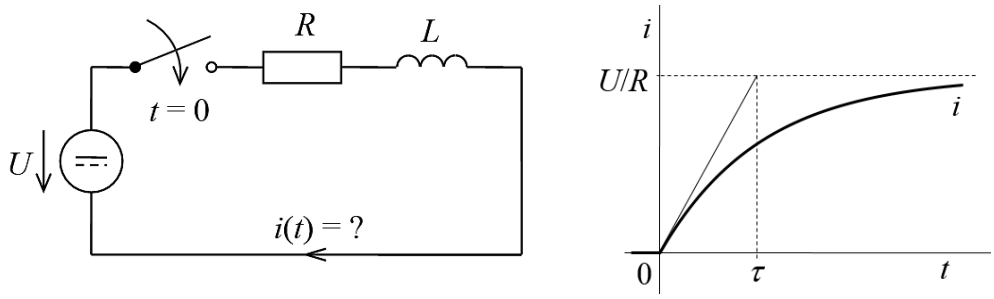
Pri narastaní prúdu energia magnetického poľa akumulovaná na induktore sa zväčšuje, pri poklese prúdu sa zmenšuje.

Pripojenie cievky k zdroju napätia

Z predchádzajúceho vzťahu vidno, že energia magnetického poľa cievky je úmerná kvadrátu okamihovej hodnoty prúdu. Z teórie relativity je známe, že rýchlosť šírenia energie nemôže byť nekonečná, môže nadobudnúť maximálne hodnotu rýchlosti svetla vo

vákuu. Keďže energia sa nemôže meniť skokom, skokom sa nemôže meniť ani prúd cez induktor $i_L(t)$. Preto po pripojení cievky k zdroju napätia prúd cievky narastá vždy postupne (i keď narastanie prúdu môže byť veľmi rýchle). Možno to ilustrovať jednoduchým príkladom.

V obvode na obr. 8a, ktorý reprezentuje cievku s vlastnou indukčnosťou L a odporom R, sa v čase $t = 0$ pripojí zdroj jednosmerného napätia U.



Obr. 8 a) pripojenie cievky k zdroju napätia; b) časový priebeh prúdu

Pre prúd možno v teórii obvodov odvodiť vzťah

$$i(t) = \frac{U}{R}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

kde τ *je* časová konštanta, pre ktorú platí $\tau = \frac{L}{R}$.

Časový priebeh prúdu je exponenciálne narastajúci (obrázok 8b). Ustálená hodnota prúdu je $I = U/R$, čiže nezávisí od hodnoty vlastnej indukčnosti L, pretože v ustálenom stave je na induktore nulové napätie. Strmosť narastania prúdu závisí od časovej konštanty $\tau = L/R$. Čím je časová konštanta väčšia, tým dlhšie trvá prechodný jav. Napríklad, ak by bol $R = 0{,}1\ \Omega$, $L = 1$ H, bola by časová konštanta $\tau = 10$ s.

Prechodný jav sa považuje za skončený za čas 5τ, v uvažovanom prípade 50 s.

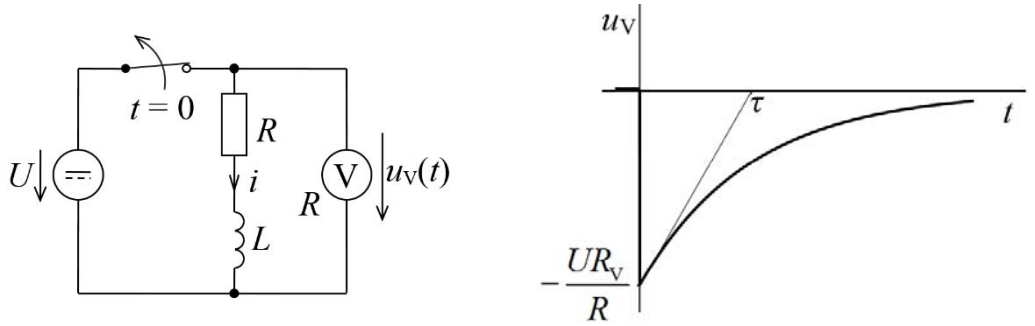
Odpojenie cievky od zdroja napätia

Rovnako dôležitým prípadom pre prax je aj odpojenie cievky od zdroja napätia. Obvod na obr. 9a je modelom cievky s odporom $R = 100\ \Omega$ a vlastnou indukčnosťou $L = 1$ H. Paralelne k cievke je pripojený jednosmerný voltmeter s vnútorným odporom $R_V = 10^5\ \Omega$. Obvod je pripojený na batériu s napätím $U = 12$ V. Aký je časový priebeh napätia na voltmetri, ak v čase $t = 0$ sa obvod odpojí od zdroja?

Pre napätie na voltmetri možno odvodiť vzťah

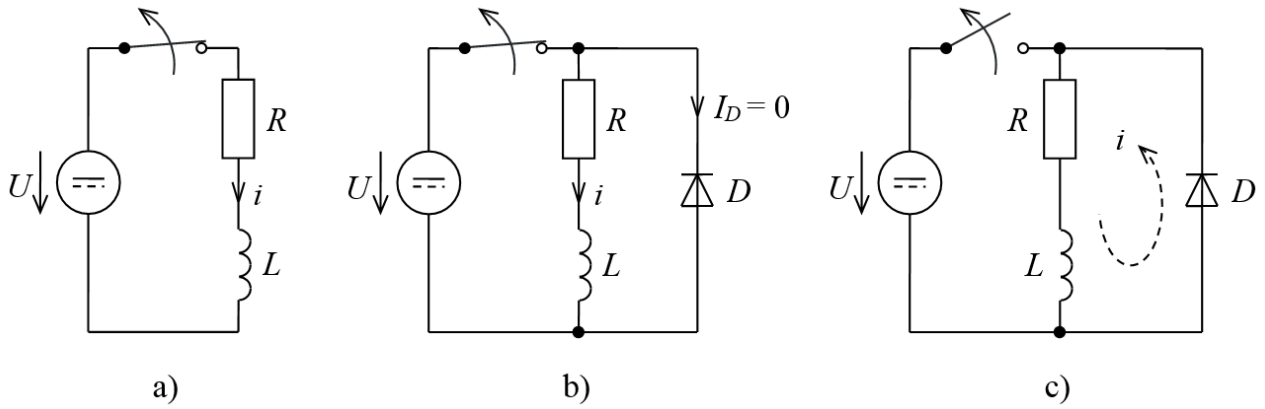
$$u_V(t) = -\frac{UR_V}{R}\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} \approx -1{,}2\,.\,10^4\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{10^{-5}}} = -12\,000\,\mathrm{e}^{-\frac{t}{10^{-5}}} \quad [\mathrm{V}]$$

Napätie na voltmetri je záporné, exponenciálne klesajúce k nule (obrázok 8b).



Obr. 9 a) odpojenie zdroja od cievky; b) časový priebeh napätia na voltmetri

V okamihu odpojenia (t = 0) je na voltmetri záporné napätie 12 kV. Z tohto príkladu vidno, že pri náhlom rozpojení obvodu s induktorom, ktorým v čase rozpojenia prechádza prúd, môže v obvode vzniknúť vysoké prepätie (v tomto prípade na voltmetri s odporom $R_V >> R$). Takéto vysoké prepätie môže poškodiť citlivé zariadenia.



Obr. 10 Paralelné zapojenie zhášacej diódy k obvodu RL

Ak by sa z dôvodu ochrany pred prepätím odpojil najprv voltmeter a až potom zdroj, v obvode by vznikol iný nepriaznivý jav. Pri rozpojení obvodu bez pripojeného voltmetra ide o rozpojenie sériového *RL* obvodu podľa obr. 10a. Prúd cez induktor sa nemôže meniť skokom, preto pri rozpojení obvodu sa energia magnetického poľa vybije do obvodu cez zdroj formou iskry medzi kontaktmi spínača, čo je krátkodobý rýchlo klesajúci prúd. Iskra spôsobuje opaľovanie kontaktov, čo pri opakovanom spínaní môže viesť k poškodeniu spínača.

Opaľovaniu kontaktov sériového obvodu s induktorom (napríklad pri vypínaní veľkých záťaží indukčného charakteru) sa dá zabrániť viacerými spôsobmi. Jedným spôsobom je zapojenie diódy *D* paralelne k úseku *RL*, ako je to znázornené na obr. 10b.

Predpokladajme ideálnu diódu, ktorá má v priepustnom smere nulový odpor, v závernom smere nekonečne veľký odpor. Kým je spínač zopnutý, diódou *D*, ktorá je vzhľadom na zdroj orientovaná v závernom smere, neprechádza prúd (obr. 10b). Po rozpojení spínača sa energia nazhromaždená na induktore vybije cez rezistor a diódu do obvodu (prúd exponenciálne klesne na nulu, obr. 10c).

Náhle rozpojenie úseku s induktorom má však aj praktické využitie, napríklad v spaľovacích motoroch. Náhle rozpojenie obvodu zapaľovacej cievky vyvoláva iskry medzi kontaktmi zapaľovacej sviečky benzínového motora. Na zvýšenie napätia sa používajú zapaľovacie cievky s dvoma vinutiami. Primárna cievka je zapojená v prerušovanom obvode, v sekundárnom vinutí sa indukuje vysoké napätie (až 20 kV), ktoré sa cez vysokonapäťový kábel privádza na zapaľovaciu sviečku benzínového motora. Iskra medzi kontaktmi sviečky spôsobí zapálenie zmesi vo valci.

Z uvedených príkladov vidno, že cievka tlmí prúdové nárazy – znemožňuje skokovú zmenu prúdu v úseku, v ktorom je zapojená. Aj preto sa pre cievku používa aj názov tlmivka.

Tlmiaci účinok cievky sa však prejavuje aj v iných prípadoch, napríklad v obvodoch obsahujúcich *vyššie harmonické*. Pri harmonickom (sínusovom) priebehu prúdu impedancia induktora s vlastnou indukčnosťou L je komplexná impedancia $\mathbf{Z}_L = \mathrm{j}\omega L$.

V obvodoch s neharmonickými priebehmi obsahujúcimi *vyššie harmonické*, impedancia induktora pre n-tú harmonickú je $\mathbf{Z}_{n\,L} = \mathrm{j}n\omega L$. Pre zväčšujúce sa n induktor viac potláča (tlmí) prúdy vyšších harmonických a „vyhladzuje“ prúd.

VYUŽITIE SILOVÝCH ÚČINKOV MAGNETICKÉHO POĽA – ELEKTROMAGNETY

Jednou z mnohých možností využitia silových účinkov magnetického poľa sú elektromagnety. Elektrický prúd prechádzajúci budiacou cievkou elektromagnetu je zdrojom magnetického poľa. Magnetické pole svojimi silovými účinkami pôsobí na kotvu (pohyblivú časť) elektromagnetu.

V podstate sú možné dve konštrukčné riešenia: elektromagnet s kotvou umiestnenou mimo cievky, priťahovanou na dosadaciu plochu a elektromagnet s kotvou vťahovanou do budiacej cievky (takéto elektromagnety umožňujú veľký zdvih kotvy).

Počas zdvihu kotvy elektromagnetu sa koná práca ako dôsledok premeny elektrickej energie zo zdroja na mechanickú energiu. Elektromagnet je v podstate elektromechanickým meničom energie, a preto je vlastne elektrickým strojom, podobne ako točivé elektrické stroje. Čas zdvihu je však krátky, a tým – na rozdiel od točivých strojov – vykonaná práca je malá. V dôsledku toho pri použití elektromagnetov nie je rozhodujúca veľkosť práce, ale veľkosť a priebeh ťahovej sily kotvy počas jej zdvihu.

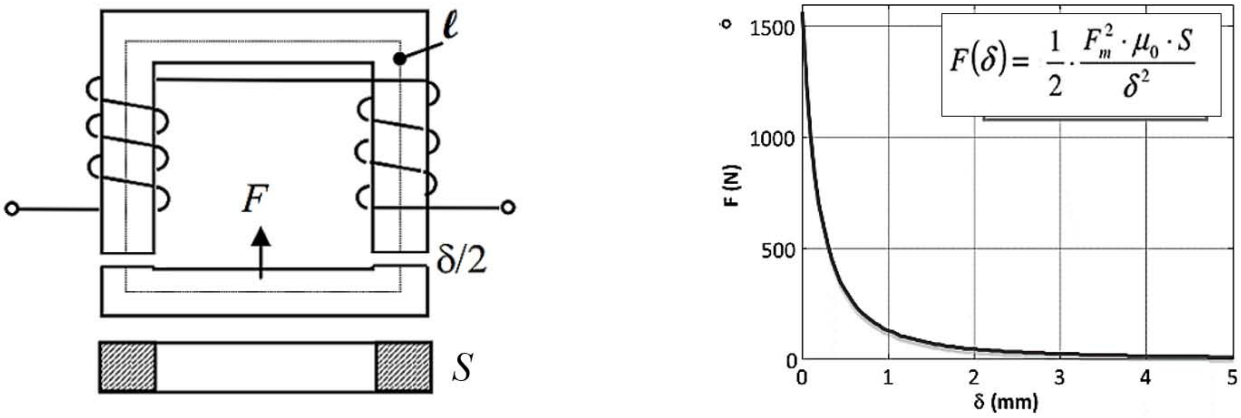
Jednosmerné elektromagnety

Magnetický obvod sa robí z plného feromagnetického materiálu, budiaca cievka sa napája jednosmerným prúdom. Jednosmerné elektromagnety sú výhodnejšie ako striedavé z hľadiska prúdových pomerov a ich vplyvu na silové pomery, rozmery a využitie magnetického obvodu. Prúd *v ustálenom stave* je daný iba napätím a odporom cievky a nezávisí na polohe kotvy. Po pritiahnutí kotvy je potrebná len malá sila na udržanie stavu a teda aj malý prúd. Cievky veľkých

jednosmerných elektromagnetov stýkačov sa preto niekedy navrhujú poddimenzované, po pritiahnutí sa prúd cievky zmenší zapojením odporu do obvodu, aby nedošlo k spáleniu cievky. Jednosmernými elektromagnetmi sa väčšinou realizuje priamy pohon.

$$F(\delta) = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_m^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{\delta^2}$$

Ťahová sila jednosmerného elektromagnetu v závislosti od veľkosti vzduchovej medzery δ je daná rovnicou v tvare



Obr. 11 Ťahová sila jednosmerného elektromagnetu

kde F_m je magnetomotorické napätie zdroja, S prierez jadra, δ dĺžka vzduchovej medzery. Znamená to, že závislosť ťahovej sily elektromagnetu je nepriamoúmerná kvadrátu veľkosti vzduchovej medzery (obr. 11).

Predchádzajúce úvahy predpokladajú, že celý magnetický tok daný budiacim prúdom sa podieľa na vytvorení ťahu. V skutočnosti sa v magnetickom obvode uplatňuje rozptyl. Preto je skutočný magnetický tok vo vzduchovej medzere a tým aj ťah menší.

Striedavé elektromagnety

Budiaca cievka striedavých jednofázových elektromagnetov býva obvykle napájaná zo zdroja harmonického striedavého napätia 50 Hz. Magnetický obvod je zložený z tenkých feromagnetických izolovaných plechov, aby sa znížili straty vo feromagnetiku, ktoré sa skladajú zo strát vírivými prúdmi a hysteréznych strát.

Striedavý elektromagnet je spotrebič indukčného charakteru, jeho najjednoduchším ideálnym modelom je sériové spojenie rezistora a induktora. Prúd cievky je daný veľkosťou rezistancie cievky R a vlastnej indukčnosti cievky L, ktorej veľkosť závisí od veľkosti vzduchovej medzery.

Vo východiskovej polohe pri veľkej vzduchovej medzere je vlastná indukčnosť cievky a tým aj impedancia $\boldsymbol{Z} = R + \mathrm{j}\omega L$ malá, cievka odoberá veľký prúd. Napätie na reaktancii ωL je malé, a tým je malý aj magnetický tok. Preto počiatočný ťah je pomerne malý. Keď sa vzduchová medzera zmenšuje, zväčšuje sa reaktancia ωL, tým aj magnetický tok a ťahová sila sa postupne zväčšuje. Ťahová charakteristika má tvar podobný ťahovej charakteristike jednosmerných magnetov.

Vplyv frekvencie pri striedavých elektromagnetoch

Vplyv frekvencie na Jouleove straty v budiacej cievke elektromagnetu možno ukázať na jednoduchom príklade: Elektromagnet, ktorý bol pôvodne navrhnutý na sieťovú frekvenciu 60 Hz, sa má prevádzkovať pri frekvencii 50 Hz. Meraním na elektromagnete sa určili parametre náhradného obvodu: R = 50 Ω, L = 275,7 mH. Aký vplyv má frekvencia na prúd a tepelné straty elektromagnetu?

Pri frekvencii ω_1 = 60 Hz je impedancia obvodu

$$\mathbf{Z}_{60} = R + \mathrm{j}\omega_1 L = 50 + \mathrm{j}\ 2\ \pi\ .\ 60\ .\ 0{,}2757 = 50 + \mathrm{j}103{,}9 = 115{,}3\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}64{,}31^\circ}\ [\Omega]$$

Efektívna hodnota prúdu pri menovitom napätí napájacej siete U = 230 V je

$$I_{60} = \frac{U^2}{Z_{60}} = \frac{230}{115{,}3} = 1{,}995\ \mathrm{A}$$

a Jouleove straty ΔP_{60}

$$\Delta P_{60} = RI_{60}^2 = 50\ .\ 1{,}995^2 = 199\ \mathrm{W}$$

Pri frekvencii ω_2 = 50 Hz a rovnakom napätí 230 V je

$$\mathbf{Z}_{50} = R + \mathrm{j}\omega_2 L = 50 + \mathrm{j}\ 2\ \pi\ .\ 50\ .\ 0{,}2757 = 50 + 86{,}6 = 100\ \mathrm{e}^{\mathrm{j}60^\circ}\ [\Omega]$$

$$I_{50} = \frac{U^2}{Z_{50}} = \frac{230}{100} = 2{,}300\ \mathrm{A}$$

$$\Delta P_{50} = RI_{50}^2 = 50\ .\ 2{,}3^2 = 264{,}5\ \mathrm{W}$$

Pomer prúdov, resp. strát je

$$\frac{I_{50}}{I_{60}} = \frac{2{,}3}{1{,}995} = 1{,}153 \qquad \frac{\Delta P_{50}}{\Delta P_{60}} = \frac{I_{50}^2}{I_{60}^2} = \frac{2{,}3^2}{1{,}995^2} = 1{,}329$$

Pri frekvencii 50 Hz je prúd približne o 15 % väčší, straty sú väčšie približne o 33 %.

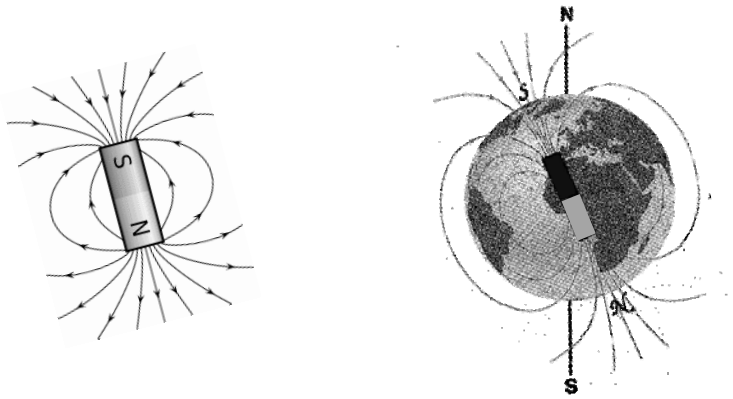
Aby nedochádzalo k nadmernému otepleniu, zariadenia sa v súčasnosti často dimenzujú tak, aby mohli pracovať pri frekvenciách 50 Hz aj 60 Hz (50 Hz sa používa napr. v Európe, 60 Hz napr. v Severnej Amerike či Japonsku). Navyše, často sú zariadenia konštruované tak, aby mohli pracovať pri menovitom napätí siete 220 V ÷ 240 V (používanom v Európe), aj pri napätí 100 ÷ 120 V (napr. v Severnej Amerike, Japonsku).

MAGNETICKÉ POLE ZEME

Magnetické pole Zeme (geomagnetizmus) je magnetické pole v priestore okolo Zeme (zemská magnetosféra) siahajúci do vzdialenosti mnoho tisíc až stotisíc kilometrov. Vytvára sa trením pri rotácii vonkajšieho, zrejme tekutého zemského jadra o pevné vnútorné jadro. Tento proces funguje ako obrovské hydrodynamické dynamo. Na privrátenej strane k Slnku je magnetosféra vplyvom slnečného vetra (prúd nabitých častíc) stlačená a na odvrátenej natiahnutá. Magnetické pole Zeme je dôležitým ochranným faktorom pre biosféru.

Magnetické pole Zeme má dipólový charakter, to znamená, že rozloženie jeho indukčných čiar je podobné indukčným čiaram v okolí tyčového magnetu (obrázok 13).

Jeho os neprechádza stredom Zeme, ale asi 520 km od neho. Navyše, odchýlky medzi magnetickým severom a skutočným severom sa neustále menia. Napríklad v roku 1580 magnetka v Londýne ukazovala 11,5° východne od skutočného severu, v roku 1819 to bolo asi 30° západne, a teraz 8° západne. Južný magnetický pól je vzdialený asi 1600 km od geografického severného pólu – na 75° severnej zemepisnej šírky a 101° západnej zemepisnej dĺžky. Severný magnetický pól je od geografického južného pólu ešte vzdialenejší – je na 65° južnej zemepisnej šírky a 140° východnej zemepisnej dĺžky.



Obr. 13 Magnetické pole tyčového magnetu a Zeme (N – severný pól, S – južný pól)

Veľkosť magnetickej indukcie na zemskom povrchu sa pohybuje medzi 25 a 65 mikroteslami (μT). Ako vidno z obrázka 13, indukčné čiary nevychádzajú zo zemského povrchu kolmo, magnetická indukcia magnetického poľa Zeme má na povrchu Zeme horizontálnu aj vertikálnu zložku. Pre zaujímavosť, vektor magnetickej indukcie v okolí Bratislavy má v súčasnosti hodnotu $B \approx 50\ \mu T = 50\ .\ 10^{-6}\ T$ a od horizontálnej roviny je odklonený o uhol $i \approx 65°$ (i je tzv. inklinácia). Teda veľkosť horizontálnej zložky je $B_h = 50\ .\ \cos 65° = 21\ \mu T$ a veľkosť vertikálnej zložky $B_v = 50\ .\ \sin 65° = 45\ \mu T$.

Vydal: **SLOVENSKÝ ELEKTROTECHNICKÝ ZVÄZ - KOMORA ELEKTROTECHNIKOV SLOVENSKA**
Radlinského 28, 811 07 Bratislava
www.sez-kes.sk, sekretariat@sez-kes.sk, info@sez-kes.sk

Autori: Kolektív

Vydanie: Prvé, november 2016

Počet strán: 156

Publikácia je nepredajná a je určená pre účastníkov 45. konferencie elektrotechnikov Slovenska.

Za obsah príspevkov zodpovedajú autori.

Publikácia neprešla jazykovou úpravou.

ISBN 978 – 80 – 972318 – 3 – 5