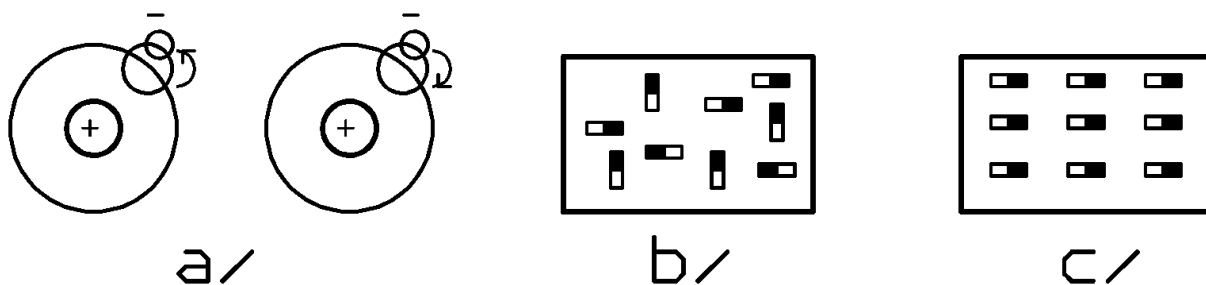


## MAGNETISMUS

**Magnetické pole** je silové pole, které vzniká **následkem pohybu elektrických nábojů**. Vytváří jej buď **permanентní magnet** nebo **elektromagnet**. Magnet přitahuje kovové předměty. Jeho silové účinky jsou zdánlivě soustředěny v místech, které nazýváme **póly**. Rozeznáváme **severní S (N – nord)** a **jižní J (S – south)** magnetický pól.

Stejně jako v prostoru kolem elektrického náboje vzniká elektrostatické pole, vzniká v **blízkosti elektrického proudu magnetické pole**. U permanentních magnetů si **magnetické pole vysvětlujeme pohybem elektronů**. Ty kromě pohybu okolo jádra atomů **rotují i okolo své osy**. Tomuto pohybu, který je příčinou magnetického pole, říkáme **spin elektronu**. V látce vznikají **elementární magnety** vytvořené dvěma opačnými spiny elektronů.

V magnetické látce jsou oblasti o rozměrech řádově jednotek mikrometrů, ve kterých jsou spiny orientovány. Říkáme jim **domény**. Každá doména je elementárním magnetem, jednotlivé domény nejsou **uspořádané**, jsou orientovány v různých směrech. Působením vnějšího magnetického pole se domény uspořádají a látka se **zmagnetuje**.



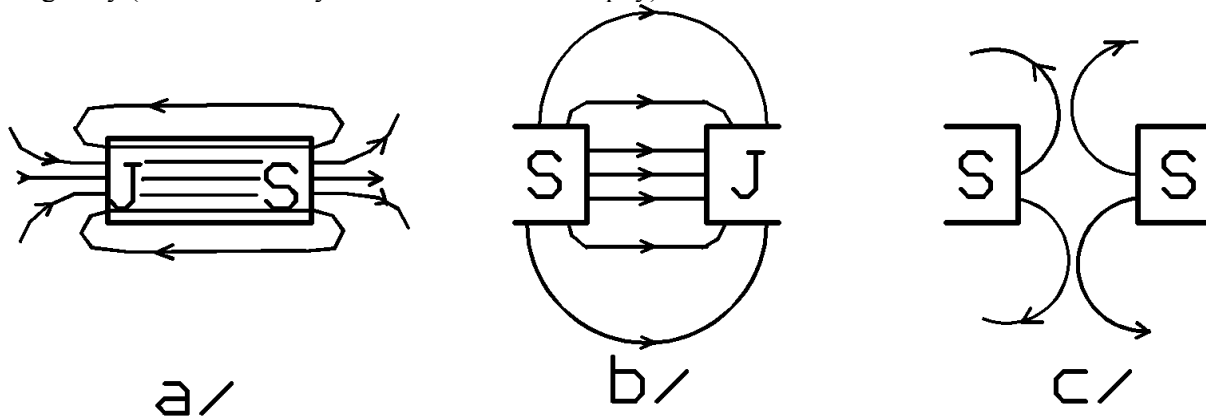
Obrázek a/ elementární magnet – dvojice elektronů s opačným spinem

b/ neuspořádané domény

c/ uspořádané domény

Magnetické pole zobrazujeme pomocí **magnetických indukčních čar**. Jsou to uzavřené křivky, které nikde nezačínají a nekončí. Zobrazují silové účinky magnetického pole.

Magnetické indukční čáry probíhají vně magnetu od severního pólu k jižnímu, uvnitř opačně. Kladný smysl je stanoven dohodou. Je dán směrem do něhož se v magnetickém poli natočí severní pól magnetky (na níže uvedených obrázcích směrem šipky).



Obrázek a/ magnetické pole tyčového magnetu

b/ magnetické pole mezi nesouhlasnými póly

c/ magnetické pole mezi souhlasnými póly

**Nesouhlasné póly magnetu se odpuzují, souhlasné se přitahují** (viz obrázek). Rozdělením tyčového magnetu vzniká větší počet samostatných magnetů, každý z nich má svůj severní a jižní pól. Severní a jižní pól nemohou existovat samostatně.

Největším magnetem je zeměkoule. Toho využíváme při orientaci pomocí **kompasu** který má v sobě permanentní magnet ukazující stále k severnímu magnetickému pólu.

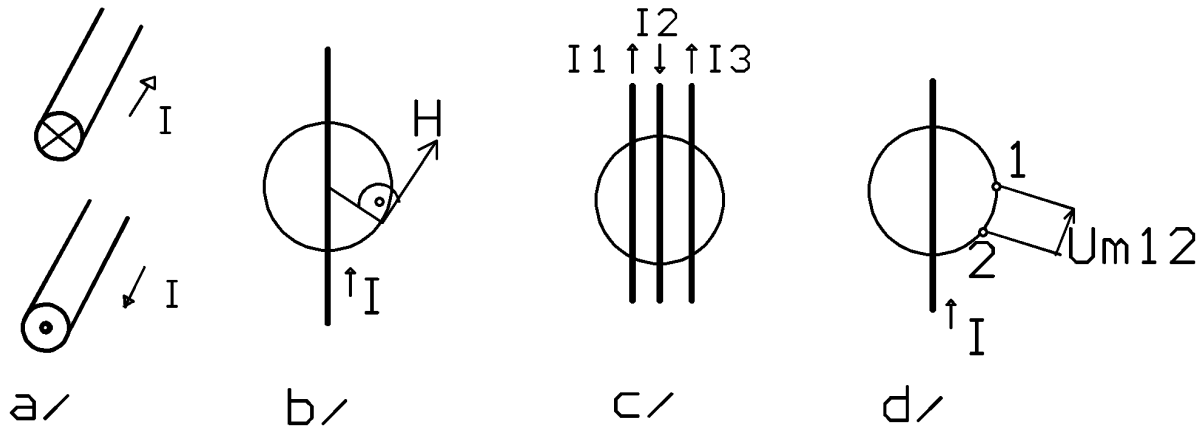
Mezi elektrickým a magnetickým polem je určitá podobnost. Elektrické napětí je příčinou elektrického proudu. Příčinou magnetického pole je elektrický proud, tzn. **elektromotorické napětí**  $F_m = I$ .

Obrázek: a/ magnetické stínění b/ interakce dvou magnetů c/ podkovovitý magnet

Při vybuzení magnetického pole několika proudy je magnetomotorické napětí dáno **algebraickým součtem proudů, které indukční čára obepíná**.  $F_m = I_1 - I_2 + I_3$  (viz. obrázek a). U cívky je magnetomotorické napětí vynásobeno počtem jejích závitů.

$$F_m = N \cdot I$$

Mezi každými dvěma body indukční čáry lze definovat magnetické napětí. délce indukční čáry a má velikost  $H = I / (2\pi r)$ .



Obrázek: a/ Označení směru proudu  
b/ Magnetické pole přímého vodiče  
c/ Magnetické pole několika vodičů  
d/ Magnetické napětí

**Intenzita magnetického pole H** je dána magnetickým napětím připadajícím na jednotku délky indukční čáry, neboli spádem magnetického napětí. Jednotkou je **A/m**. Jedná se o **vektorovou** veličinu. **V okolí přímého vodiče**, kterým prochází elektrický proud I tvoří **indukční čáry soustředné kružnice**. Ve vzdálenosti **r** od osy vodiče je intenzita magnetického pole stejná po celé délce indukční čáry  $H = U_m / l = I / 2\pi r$  ( $\text{Am}^{-1}$ , A, m).

Směr magnetického pole určíme Ampérovým pravidlem pravé ruky (případně si jej zapamatujeme podle výše uvedeného obrázku). Uchopíme-li pravou rukou vodič tak, že palec ukazuje směr proudu, prsty ukazují směr intenzity magnetického pole.

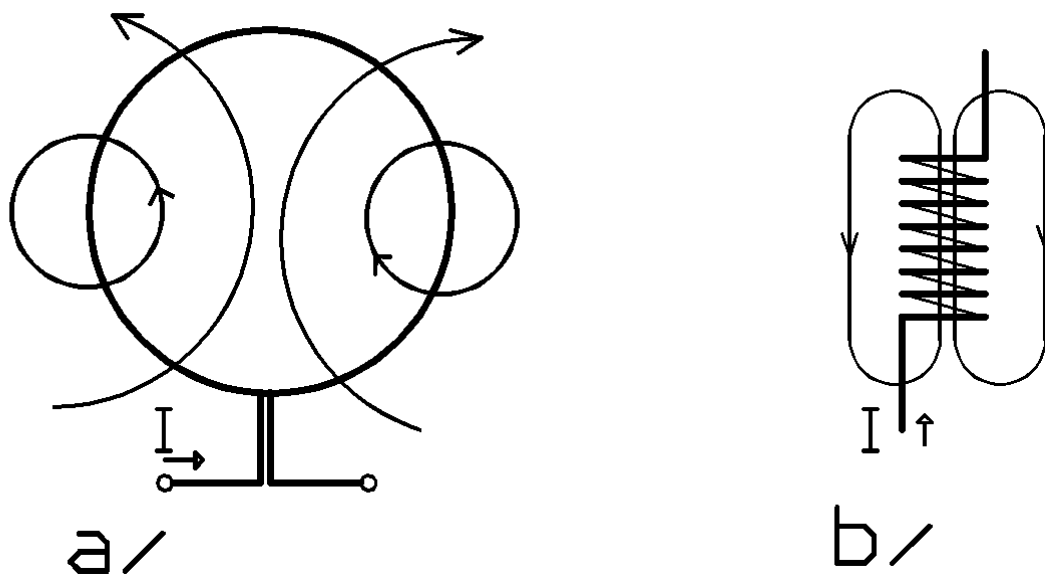
**Příklad:** Vypočítejte intenzitu magnetického pole ve vzdálenosti 0,2 m od osy vodiče, kterým teče proud 10 A.

$$H = 10 / (2 \cdot 3,14 \cdot 0,2) = 10 / 1,256 = 7,96 \text{ A/m}$$

Počítáme-li magnetické pole cívky, vynásobíme její proud počtem závitů.

Počet indukčních čar v magnetickém poli udává magnetický tok  $\phi$ , jednotka Wb (weber = V · s). Je to skalární veličina definovaná napětím vzniklým (indukovaným) při změně toku.  $u = \nabla\phi / \nabla t$ .

**Magnetický tok, který se rovnoměrně zmenšuje tak, že zanikne za 1 s, indukuje v závitě, který ho obepíná, napětí 1 V.**

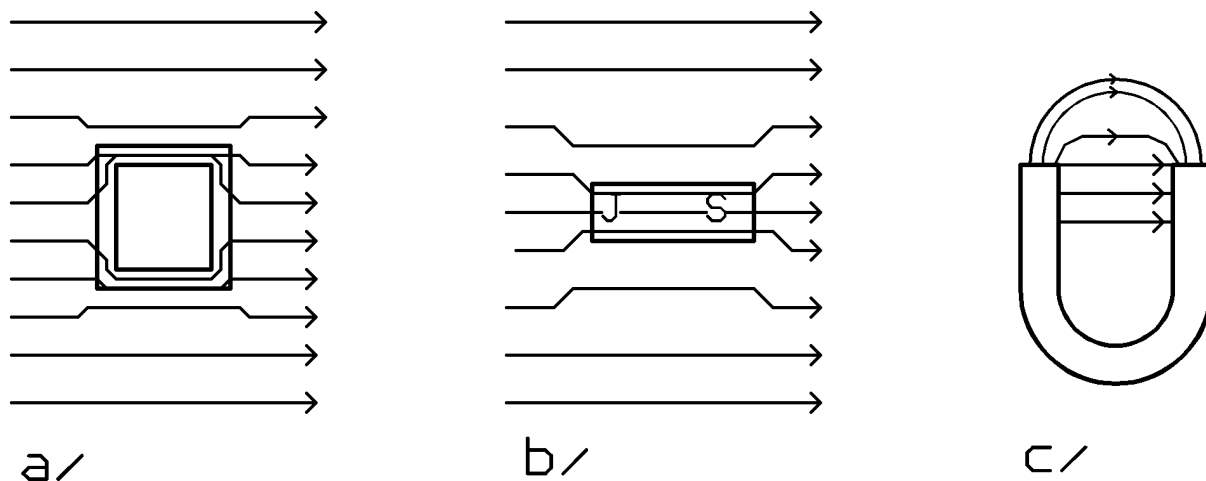


Obrázek: a/ Magnetické pole kruhového závitu b/ magnetické pole solenoidu

Z tvaru magnetického pole přímého vodiče můžeme odvodit tvar magnetického pole kruhového závitu a solenoidu. Uvnitř solenoidu je magnetické pole **homogenní**.

Směr působení magnetického pole solenoidu určíme podle pravidla pravé ruky: Uchopíme-li válcovou cívku do pravé ruky, aby prsty ukazovaly směr proudu, vychýlený palec ukazuje k severnímu pólu.

Vidíme, že cívka se chová podobně jako permanentní magnet – má severní a jižní pól, přitahuje kovové předměty, dochází k vzájemnému působení cívky a permanentního magnetu. Cívka, kterou prochází proud a která vybudí dostatečně silné magnetické pole (musí mít velký počet závitů), se používá jako **elektromagnet**.



Obrázek: a/ Magnetické stínění b/ Vzájemné působení dvou magnetů c/ Podkovovitý magnet

**Magnetická indukce** je dána počtem magnetických indukčních čar (tokem  $\Phi$ ) na jednotku ploch S.  $B = \Phi / S$ , jednotkou je tesla (T). Magnetická indukce vyjadřuje silové účinky magnetického pole. **Magnetické pole má indukcí 1 T, působí-li na vodič, kterým teče proud 1 A, silou 1 N na každý metr jeho délky.** Magnetickou indukci zobrazujeme pomocí **magnetických siločar**.

Magnetické pole lze vybudit v každém prostředí (vzduch, izolanty, kovy). Intenzita magnetického pole **H je na prostředí nezávislá**. Závisí pouze na velikosti budícího proudu (počtu závitů) a na vzdálenosti od vodiče. Je dána výše uvedenými vztahy.

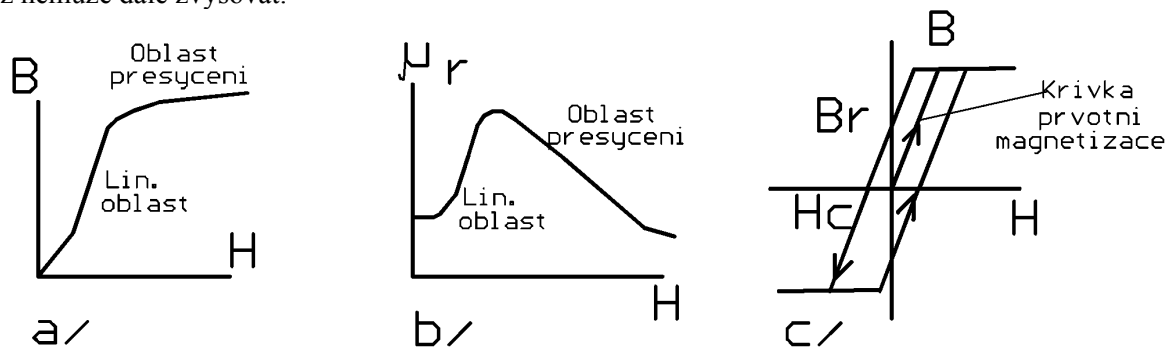
**Magnetická indukce  $B$  je vektor se stejným smyslem jako  $H$ . Jeho velikost závisí na prostředí. Mezi intenzitou magnetického pole  $H$  a magnetickou indukcí  $B$  platí vztah:**

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}$$

kde  $\mu_0$  je **permeabilita vakua**  $= 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] a  $\mu_r$  **relativní permeabilita [1]**, která popisuje magnetické vlastnosti látek. U většiny materiálů je  $\mu_r$  přibližně rovné 1 (látky diamagnetické  $\mu_r < 1$  a paramagnetické  $\mu_r > 1$ ), existují ale materiály (železo, kobalt, nikl) jejichž  $\mu_r$  je mnohonásobně větší (až  $10^3 - 10^5$ ). Příčinou jejich zmagnetování je jejich schopnost uspořádat působením vnějšího magnetického pole spin svých elektronů.

Tyto látky se nazývají **feromagnetické** a dělají se z nich jádra cívek. Mají schopnost výrazně zesilovat magnetické účinky proudu. Malým budícím proudem tak vytvoříme silné magnetické pole s velkými silovými účinky.

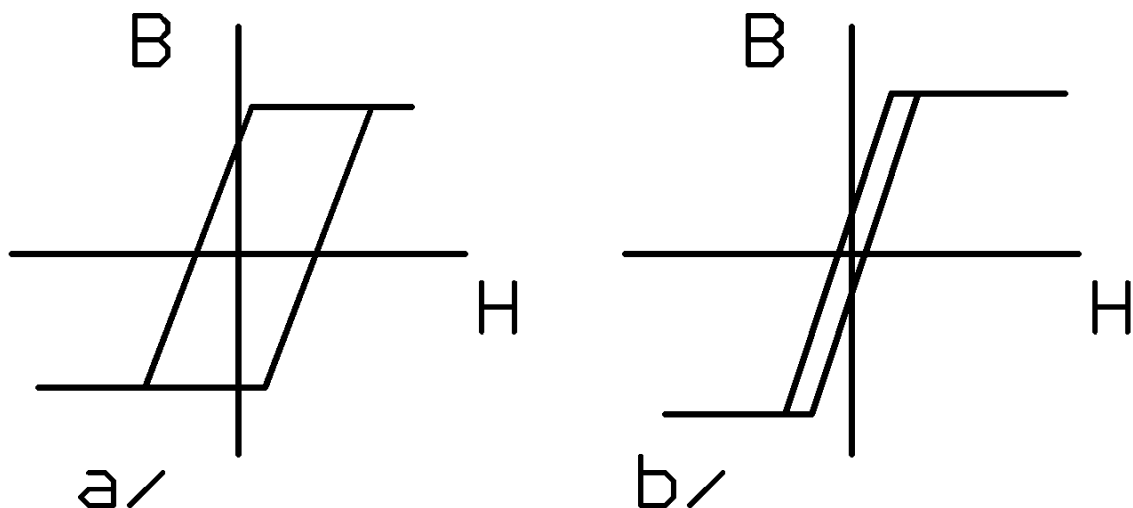
Závislost  $B$  na  $H$  není vždy lineární. Relativní permeabilita se mění v závislosti na intenzitě magnetického pole. S rostoucí  $H$  roste  $B$  zpočátku lineárně (přibližně). Při větších intenzitách magnetického pole dojde k přesycení materiálu, domény jsou již uspořádány - magnetická indukce se již nemůže dále zvyšovat.



Obrázek: a/ Závislost  $B$  na  $H$  b/ Závislost  $\mu$  na  $H$  c/ Hysterezní smyčka (ve skutečnosti je zaoblená)

Materiál, který byl jednou zmagnetován elektrickým proudem, si své magnetické účinky zachovává i po zániku elektrického proudu. Vznikne tak **permanentní magnet**, který jistě každý dobře zná. Magnetickou indukci permanentního magnetu popisuje tzn. **remanentní indukce  $B_r$** . Z výše uvedeného obrázku je vidět, že k odmagnetování permanentního magnetu je zapotřebí magnetické pole opačné polaroty (**koercitivita  $H_c$** ) a tedy proud opačné polaroty než jaký byl použit pro zmagnetování.

Magnetické materiály s **širokou** hysterezní křivkou nazýváme **materiály magneticky tvrdé** (např. permanentní magnet reproduktoru), materiály s **úzkou** hysterezní křivkou jsou **magneticky měkké** a používají se v obvodech střídavého proudu transformátor, motor), aby při přemagnetování nedocházelo k velkým ztrátám energie. **Ztráty jsou úměrné ploše hysterezní smyčky** (k přemagnetování potřebujeme energii, která se mění v teplo).



Obrázek.a/ Hysterezní křivka materiálu magneticky tvrdého

b/ Hysterezní křivka materiálu magneticky měkkého

Dojde-li k uspořádání magnetických domén v látce, nemůže se už magnetická indukce tak rychle zvyšovat. Dochází k magnetickému **nasycení** látky. Přestane-li budící proud působit, materiál si své magnetické vlastnosti zachovává. Stává se z něj **permanentní magnet**. Jeho magnetická indukce má hodnotu **remanentní indukce  $B_r$** .

**Hystereze** je závislost stavu feromagnetického materiálu na předchozích stavech zmagnetování.

Obdobně jako v proudovém magnetickém poli jsou důležité veličiny odpor a vodivost, v magnetickém poli určujeme **magnetický odpor  $R_m$  [ $H^{-1}$ ]** a jeho převrácenou hodnotu **magnetickou vodivost  $G_m$  [H - henry] =  $1/R_m$**

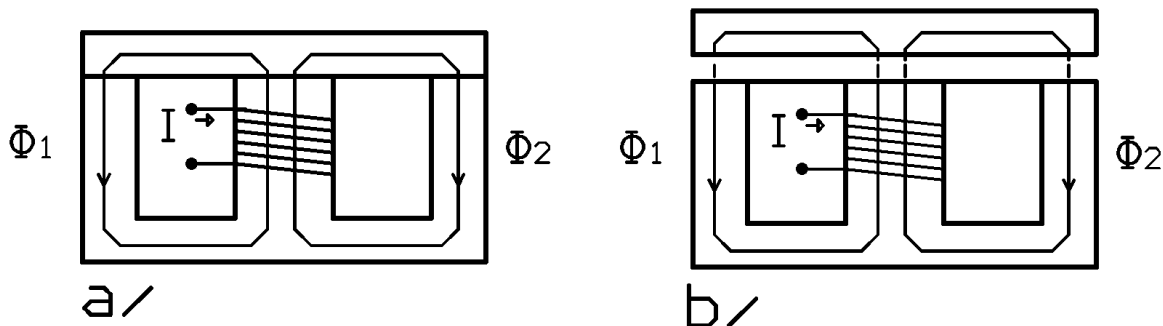
Odvození:  $\Phi = B \cdot S = \mu \cdot H \cdot S \Rightarrow H = U_m / l$

$\Phi = U_m \cdot \mu \cdot S / l = U_m / R_m$ , kde  $R_m = l / (\mu \cdot S)$  Hopkinsonův zákon je analogií Ohmova zákona. **Permeabilita** v magnetických obvodech má podobný význam jako **vodivost** v elektrických obvodech. V materiálech s vysokou permeabilitou je velká intenzita magnetického pole (v materiálech s vysokou vodivostí teče působením intenzity elektrického pole velký proud),  $\Phi \approx I$ ,  $U_m \approx U$ ,  $\mu \approx \gamma$ .

Proto magnetický tok prochází jádrem cívky (transformátoru) a jeho rozptylový magnetický tok do okolí je minimální. Permeabilita vzduchu je mnohonásobně menší oproti permeabilitě feromagnetických materiálů. Následující obrázek ukazuje magnetické pole, které se vybudí v cívce s jádrem a které se plně přizpůsobuje tvaru tohoto jádra.

Chceme-li zmenšit magnetickou indukci **B aby nedošlo k přesycení** (obvod je potom nelineární) vložíme magnetickému toku do cesty **vzduchovou mezeru**. **Podobně jako** do elektrického obvodu někdy vkládáme odpor, aby se omezil proud.

Magnetická indukce bude u obrázku **b** mnohem menší než u obrázku **a**. Hodnoty magnetické indukce **B** a tím i pracovní oblast feromagnetického materiálu u jádra se vzduchovou mezerou bude pohybovat v lineární oblasti hysterezní smyčky.



Obrázek a/ Cívka s EI plechy bez vzduchové mezery

b/ Cívka s EI plechy se vzduchovou mezerou

Vložíme-li nějaký obvod, který je v magnetickém poli, do krytu ze železného plechu, poteče tímto krytem veškerý magnetický tok. Uvnitř **stíněného** prostoru magnetické pole nebude (viz obr.elektrické stínění).

## ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE

**Změnou magnetického pole** ( $\nabla\phi / \nabla t$ ) se ve vodiči **indukuje elektrické pole**, uvedou se do pohybu volné elektrony vodiče. Magnetické pole může být příčinou elektrického napětí. **Smysl indukovaného napětí je takový, aby svými účinky působilo proti změně, která jej vyvolala** (Lencův zákon).

Tvoří-li vodič uzavřenou smyčku, teče v ní **indukovaný proud**.

Tvoří-li smyčka 1 závit, pak platí, že indukované napětí  $u = \nabla\phi / \nabla t$ .

Pro cívku s N závitů (pokud všemi závitů prochází stejný magnetický tok)  $u = N \nabla\phi / \nabla t$ .

Napětí se indukuje vždy s časovou změnou magnetického toku. V uzavřeném obvodu vznikne indukovaný proud.

$u = \nabla\phi / \nabla t$ .  $\phi = G_m \cdot N \cdot I$ , kde  $G_m$  je magnetická vodivost  $u = N^2 G_m \nabla i / \nabla t = L \cdot \nabla i / \nabla t$

**L je vlastní indukčnost cívky [H] (henry - Vs/A). Cívka má indukčnost 1 H, jestliže při změně proudu 1A/s se v ní indukuje napětí 1V.**

Vlastní indukčnost je základní parametr cívek. Udává, jak silné magnetické pole vybudí cívka působením proudu, jak moc se „brání“ změnám proudu, který jí protéká. Indukované napětí působí proti změně budícího proudu.

$L = N^2 G_m = N^2 \mu_0 \mu_r S / l$  tento vzorec platí pro ideální případ. Pro skutečné výpočty v praxi se používají častěji empirické vzorce.

Relativní permeabilita  $\mu_r$  je funkcí intenzity magnetického pole H (viz výše). Závisí tedy na budícím proudu. Z toho vyplývá, že i indukčnost závisí na proudu. **Cívka s feromagnetickým jádrem** je proto součástí s **nelineární** VA charakteristikou. Dá se linearizovat vzduchovou mezerou.

**Příklad:** Stanovte vlastní indukčnost vzduchové jednovrstvé cívky se 30 závitů, průměr vodiče je 0,8 mm. Jádro cívky má průměr 1,2 cm<sup>2</sup>.

Nejprve vypočítáme **délku cívky**  $l = d \cdot N = 0,8 \cdot 30 = 24 \text{ mm} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

$L = N^2 \mu_0 S / l = 30^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} / (24 \cdot 10^{-3}) = 5,65 \cdot 10^{-6} \text{ H} = 5,65 \mu\text{H}$

Všimněte si, že indukčnost je tím větší, čím kratší je cívka. Znamená to vinout závitů těsně vedle sebe. Co se týká průměru vodiče, musíme jej vypočítat tak, abychom neměli příliš velkou proudovou hustotu a odpor vinutí (viz kapitola proudové pole).

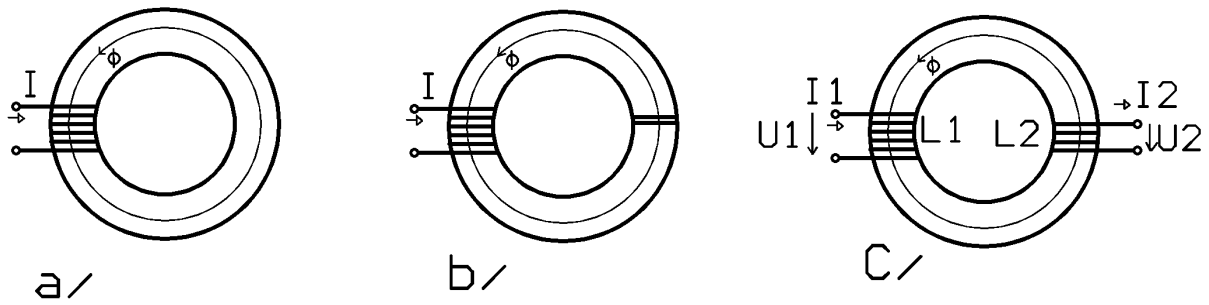
Praktický postup při návrhu cívky je následující: Nejprve zvolíme vhodné jádro, výše uvedeným způsobem vypočítáme počet závitů. Poté cívku navineme a změříme její indukčnost. Na základě předpokladu, že indukčnost cívky je přímo úměrná druhé mocnině počtu závitů ( $L = k \cdot N^2$  – platí pokud se rozměry cívky příliš nezmění) upravíme počet závitů (viz následující příklad)

**Příklad:** Cívka s  $N_1 = 60$  závitů má indukčnost  $L_1 = 20 \mu\text{H}$ . Jak musíme změnit počet závitů, aby indukčnost klesla na  $15 \mu\text{H}$ ?

$N_1/N_2 = \sqrt{L_1/L_2} = \sqrt{15/20} = 0,866$   $N_2 = 52$  závitů

**Příklad:** Vypočtete vlastní indukčnost cívky navinuté na toroidní kroužku. Cívka má 800 závitů, délka středové indukční čáry je 15 cm. Jádro má průřez 4 cm<sup>2</sup> a je z materiálu o relativní permeabilitě  $\mu_r = 500$ .

$L = N^2 \mu_0 \mu_r S / l = 800^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 4 \cdot 10^{-4} / (15 \cdot 10^{-2}) = 1,071 \text{ H}$



Obrázek: a / Toroidní jádro s jedním vinutím, uzavřené  
 b/ Toroidní jádro s jedním vinutím a se vzduchovou mezerou  
 c/ Cívky na společném jádře, mezi kterými je vzájemná indukčnost

Máme-li na společném jádru dvě vinutí, vzniká mezi nimi **vzájemná indukčnost**, kterou definujeme podobně jako vlastní indukčnost. Do jednoho vinutí – primárního – přivádíme elektrický proud. Na druhém vinutí – sekundárním – měříme napětí. Vzájemnou indukčnost  $M$  definujeme podobně jako vlastní indukčnost pomocí napětí, které se indukuje v sekundární cívice při změně proudu v primární cívice.  $u_2 = N \nabla \phi_{1,2} / \nabla t = M \nabla i_1 / \nabla t$   $M = u \nabla t / \nabla i_1$

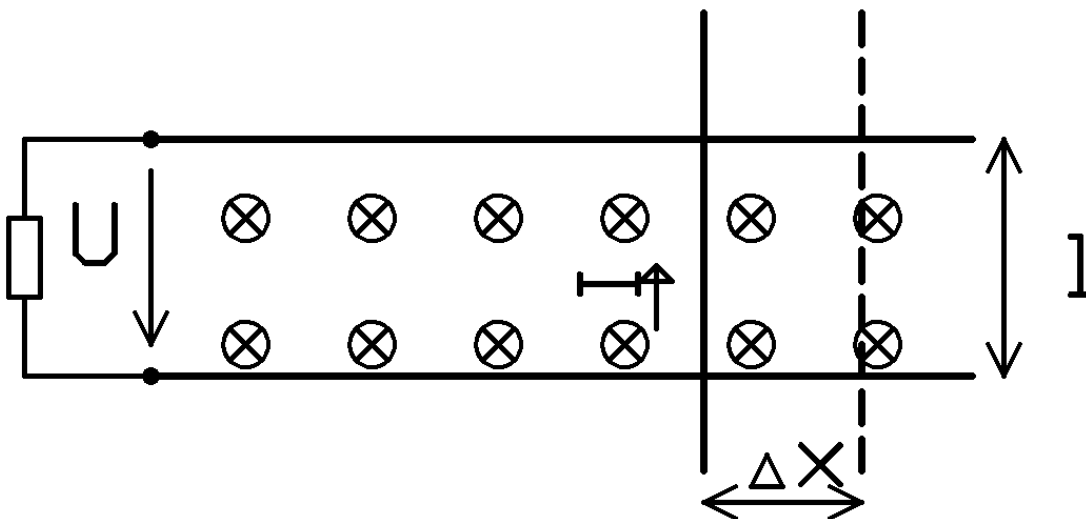
Jednotkou vzájemné indukčnosti je H (henry). Vzájemná indukčnost není prvkem elektronického obvodu, vyjadřuje pouze vzájemnou vazbu mezi dvěma vlastními indukčnostmi.

Máme-li dvě cívky na společném feromagnetickém jádru, můžeme předpokládat, že se celkový magnetický tok  $\phi$  nerozptyluje, protože relativní permeabilita feromagnetického materiálu je mnohem větší než 1. To znamená, že magnetický odpor vzduchu je mnohem větší než magnetický odpor jádra.

$M = N_1 N_2 G_m$  rovnici umocníme  $M^2 = N_1^2 N_2^2 G_m = N_1 G_m \cdot N_2 G_m = L_1 L_2$   
 $M = \sqrt{(L_1 L_2)}$  Ve skutečnosti existuje určitý rozptyl a  $M < \sqrt{(L_1 L_2)}$   $M = k \cdot \sqrt{(L_1 L_2)}$ , kde  $k < 1$  a nazývá se **činitel vazby**

Vodiče, které jsou blízko sebe a kterými prochází časově proměnný proud, se chovají jako cívky se vzájemnou indukčností. Působením proudu se v okolí jednoho vodiče vytvoří magnetické pole. To indukuje v druhém vodiči napětí. Tak vzniká **rušení**.

### Vznik indukovaného napětí pohybem vodiče v magnetickém poli



Obrázek: Pohyb vodiče v magnetickém poli

Po dvou rovnoběžných na jednom konci vodičů spojených vodičích se pohybuje vodič délky  $l$  naznačeným směrem. Vodiče kolmé na vodič  $l$  uzavírají smyčku. Kolmo k rovině této smyčky je stále magnetické pole s magnetickou indukcí  $B$  (indukční čáry jsou orientovány shora dolů, viz obrázek).

Jsou-li  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{l}$  a  $\mathbf{v}$  na sebe navzájem kolmé, pak směr indukovaného proudu stanovíme pomocí **pravidla pravé ruky**:

Pravou ruku vložíme do magnetického pole tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně, palec ukazoval směr pohybu, pak natažené prsty ukazují směr indukovaného proudu a napětí.  $\mathbf{u} = \mathbf{Blv}$

### **Využití magnetické indukce:**

**při výrobě elektrické energie** (viz kapitola Střídavý proud) – vodič se pohybuje v magnetickém poli a indukuje se v něm napětí

v **motorech** – reciproční jev, střídavý proud v magnetickém poli vytváří sílu a způsobuje pohyb

v **transformátorech** – primární proud vytvoří magnetické pole, které v sekundární cívice indukuje napětí

v **elektromagnetech** – stejnosměrný proud vytvoří magnetické pole, které působí silovými účinky na kovové předměty

v **relé** - stejnosměrný proud vytvoří magnetické pole, které svými silovými účinky sepne spínací kontakty

v **reproduktorech** – střídavý proud vytváří v pohyblivé cívice magnetické pole, na které působí magnetické pole trvalého magnetu. Vzájemným působením dvou magnetických polí vzniká síla, pohyb membrány, zvuk.

### **Energie magnetického pole**

Pro vytvoření magnetického toku  $\Phi$  musí proud  $I$  vykonat práci  $A$ . Tato energie je potřebná k vytvoření magnetického pole. Udržování magnetického pole nevyžaduje žádnou energii (nepočítáme ztráty výkonu na vodiči).  $W_m = \Phi \cdot U_m / 2$

Vypočítáme **objemovou energii magnetického pole** (množství energie nahromaděné v jednotce objemu  $V = S \cdot l$ )

$$w_m = W_m / V = \Phi \cdot U_m / (2 \cdot V) = \Phi \cdot U_m / (2 \cdot S \cdot l) = \mathbf{B \cdot H / 2}$$

$$\mathbf{W_m = (1/2) G_m \cdot N \cdot I \cdot N \cdot I = (1/2) G_m N^2 \cdot I^2 = L \cdot I^2 / 2}$$

### **Ztráty ve feromagnetických materiálech** jsou dvojího druhu:

Hysterezní ztráty jsou úměrné kmitočtu a ploše hysterezní smyčky – energie se spotřebovává k přemagnetování materiálu.

Ztráty vířivými proudy – je-li feromagnetický materiál vodivý, indukují se v něm působením magnetického pole proudy. Ty působí proti příčině, která je vyvolala. Zeslabují magnetické pole, jejich působením vznikají tepelné ztráty. Proto používáme materiály s velkým měrným odporem – ferity, trafoplechy z oceli s příměsí křemíku a dělené jádro složené ze vzájemně izolovaných plechů.

Obdobně jako rezistory a kondenzátory můžeme cívky spojovat paralelně nebo sériově.

Sériové spojení dvou cívek bez vzájemné indukčnosti  $\mathbf{L = L_1 + L_2}$

Sériové spojení dvou cívek se vzájemnou indukčností  $\mathbf{L = L_1 + L_2 \pm 2M}$  magnetická pole se buď sčítají nebo odčítají (viz kapitola střídavý proud).

Paralelní spojení dvou cívek bez vzájemné indukčnosti  $\mathbf{L = L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2)}$

### **Silové účinky magnetického pole**

Magnetické pole působí silou na pohybující se elektrony. Tato síla se přenáší na materiál vodiče.

Na vodič délky  $\mathbf{l}$ , kterým protéká proud  $\mathbf{I}$  a který je umístěn v magnetickém poli  $\mathbf{B}$  působí síla  $\mathbf{F}$ . Její směr určíme podle **pravidla levé ruky**: Levou ruku vložíme do magnetického pole tak, aby indukční čáry vstupovaly do dlaně a prsty ukazovaly směr proudu. Potom palec ukazuje směr síly

$$\mathbf{F = B \cdot I \cdot l}$$

Odvození: Výkon síly  $F$   $P = F \cdot s / t = F \cdot v$  se rovná elektrickému výkonu  $U I = B l v I$

Využití - měřicí přístroje

### **Silové účinky mezi dvěma vodiči**

Dva vodiče vedle sebe vytvářejí magnetická pole, která na sebe vzájemně působí. Proto na sebe působí tyto vodiče silou. Tuto sílu používáme k **definici ampéru**, který je základní jednotkou podle soustavy SI.



**1A je proud, který při průchodu dvěma rovnoběžnými nekonečně dlouhými a nekonečně tenkými vodiči vzdálenými od sebe 1 m vyvolá mezi nimi sílu  $2 \cdot 10^{-7}$  N na každý metr jejich délky.**

Vidíme, že pro běžné velikosti proudů (jednotky ampérů) jsou tyto síly malé. Musíme je brát v úvahu pouze při velmi velkých proudech, aby se nepoškodila izolace vodičů.