

## Fyzika – elektrotechnika 1.část

Ing. Jiří Vlček

*Tento soubor je doplňkem mojí publikace Středoškolská fyzika. Je určen studentům středních škol neelektrických oborů pro velmi stručné seznámení s tímto oborem. Vzhledem k jeho velikosti jsem jej rozdělil na dvě části (fy1elektro, fy2elektro).*

### PROUDOVÉ POLE

Elektrický proud je dán uspořádaným pohybem elektrických nábojů v určitém směru

$$\mathbf{I} = \mathbf{Q}/t \text{ [A, C : s]}$$

**Proud 1 A představuje náboj jednoho coulombu, který projde vodičem za 1 sekundu.** Elektrický proud značíme písmenem **I**, jednotkou je **ampér (A)**. Definujeme jej pomocí silových účinků proudového pole. **Elektrický náboj** značíme **Q** a udáváme jej v **coulombech (C)**. V každém atomu existuje kladný náboj – proton a záporný náboj – elektron. Náboj nelze od částice oddělit. Nejmenší velikost má náboj elektronu. Označujeme jej  $e = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{C}$ . ( $1\text{C} = 6,242 \cdot 10^{18}$  elektronů). Hmotnost elektronu  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28}\text{kg}$ .

Elektrický náboj se udává často v ampérhodinách (Ah).  $1 \text{ Ah} = 3\,600 \text{ As} = 3\,600 \text{ C}$ . Touto veličinou se udává např. náboj (nepřesně kapacita) baterie.

Příčinou elektrického proudu je zdroj elektrické energie, který vytváří **elektrické napětí**.

Značíme jej **U** a udáváme jej ve **voltech (V)**. **Mezi dvěma body je napětí 1V, pokud k přenesení náboje 1 C mezi nimi musíme vykonat práci 1 J.**

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}/\mathbf{Q} \text{ [V,J,C]}$$

Vodič se průchodem proudu zahřívá. Nosiče náboje – (nejčastěji volné elektrony kovů) narážejí na jádra atomů a způsobují jejich pohyb – teplo.

**Proudová hustota  $\mathbf{J} = \mathbf{I}/\mathbf{S}$** , udává se v ampérech na  $\text{m}^2$  (častěji v  $\text{A}/\text{mm}^2$ ). Aby se vodič průchodem proudu příliš nezahřívá, nemá být proudová hustota obvykle vyšší než  $4 \text{ A}/\text{mm}^2$  (platí pro měď nebo hliník).

Příklad: Vodičem prochází proud  $0,5 \text{ A}$ . Vypočítejte jeho minimální průměr, pokud nesmí být překročena proudová hustota  $4 \text{ A}/\text{mm}^2$ .

$$S = I/J = 0,5/4 = 0,125 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$S = \pi d^2/4 \quad d = \sqrt{(4S/\pi)} = 0,4 \text{ mm}$$

Výsledek zaokrouhlíme nahoru na nejbližší vyráběnou hodnotu.

**Intenzita elektrického pole  $\mathbf{E}$**  udává jak se mění napětí v závislosti na délce vodiče **l**, udává spád napětí.

$$\mathbf{E} = \mathbf{U}/\mathbf{l} \text{ (V/m, V, m)}$$

Proud a napětí jsou veličiny skalární – celkové. Používají se pro homogenní proudové pole. Proudová hustota a intenzita elektrického pole jsou veličiny vektorové – místní. Používají se v nehomogenním (nestejnorodém) elektrickém poli.

### OHMŮV ZÁKON – ELEKTRICKÝ ODPOR

Elektrický odpor **R** vyjadřuje vlastnosti prostředí, kterým prochází elektrický proud. Každý vodič má elektrický odpor. Součástka, jejíž základní vlastností je odpor, se nazývá **rezistor** (hovorově též odpor, není ale správné)

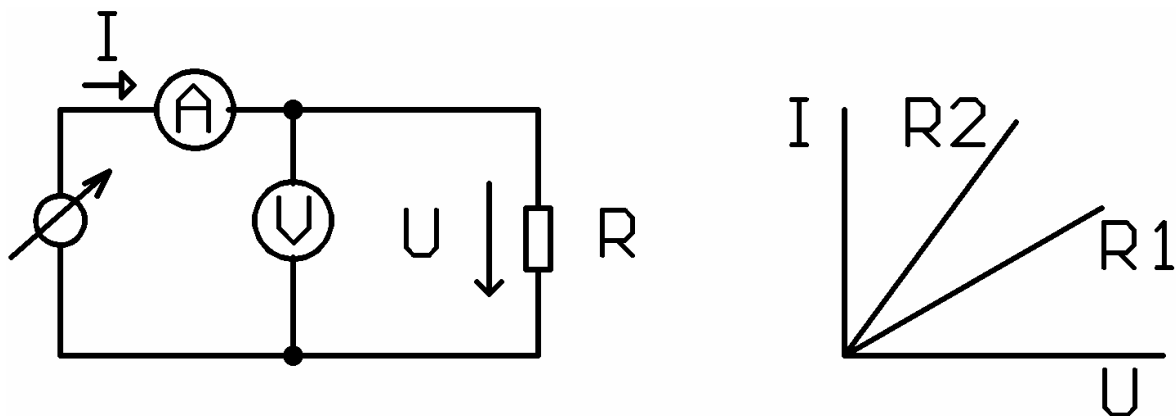
$$\mathbf{R} = \mathbf{U}/\mathbf{I} \text{ (}\Omega, \text{V, A)}$$

Jednotkou elektrického odporu jsou ohmy (kiloohmy  $\text{k}\Omega$ , megaohmy  $\text{M}\Omega$ ). **Vodič má odpor 1 ohm, jestliže na něm při proudu 1 A naměříme úbytek napětí 1 V.**

O platnosti Ohmova zákona se můžeme přesvědčit jednoduchým pokusem:

Připojíme rezistor k regulovanému zdroji napětí, pro měření proudu zapojíme ampérmetr **A** (do série s rezistorem), pro měření napětí voltmetr **V** (paralelně s rezistorem). Postupně zvyšujeme napětí zdroje, do tabulky zapíšeme naměřené hodnoty proudu a napětí. Naměřené hodnoty graficky znázorníme.

Závislost proudu na napětí (voltampérová – VA charakteristika) je přímka, která prochází počátkem souřadnic. Říkáme, že **závislost napětí a proudu je lineární**, rezistor je tedy **lineární součástka**. Obvod složený pouze z lineárních součástek se nazývá **lineární obvod**. Nahradíme-li původní rezistor  $R_1$  jiným (v tomto případě menším) rezistorem  $R_2$  získáme jiné hodnoty. Pro každý rezistor bude platit, že poměr napětí a proudu je vždy konstantní (VA charakteristika je přímka).



Obrázek č. 1 Ověření Ohmova zákona (V= voltmetr, A= ampérmetr)

Stejných výsledků bychom dosáhli, kdybychom místo rezistorů použili vodiče z různých materiálů, různé délky a různého průřezu. Elektrický odpor je charakteristickou vlastností každého vodiče.

**Odpor vodiče je přímo úměrný jeho délce, nepřímo úměrný jeho průřezu.** Vlastnosti materiálu popisuje veličina **měrný odpor**  $\zeta$  (rezistivita), která se číselně rovná odporu vodiče 1 m dlouhého o průřezu  $1 \text{ m}^2$ .

$$\text{Odpor vodiče } R = \zeta \cdot l/S \text{ (}\Omega, \Omega \cdot \text{m, m, m}^2\text{)}$$

V praxi se udává měrný odpor jako odpor vodiče dlouhého 1 m o průřezu  $1 \text{ mm}^2$  ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \text{m}^{-1}$ )

Převrácenou hodnotou elektrického odporu je vodivost. Značí se G, jednotka siemens (S).

Vodič má vodivost 1 siemens, má-li odpor 1  $\Omega$ . Obdobně definujeme měrnou vodivost  $G = 1/R = I/U$  (S, A, V) =  $\gamma S/l$ , kde  $\gamma = 1/\zeta$  je **měrná vodivost**

#### Teplotní závislost odporu

Měrný odpor se udává při teplotě 20 °C. S rostoucí teplotou jeho hodnota u kovů roste (tepelný pohyb atomů překáží pohybu volných elektronů). U nevodivců a polovodivců se naopak s rostoucí teplotou zvyšuje pravděpodobnost roztržení vazby mezi ionty nebo uvolnění elektronů. Tím se odpor snižuje.

Teplotní závislost měrného odporu na teplotě udává koeficient  $\alpha$  - **teplotní součinitel odporu** ( $\text{K}^{-1}$ ). Číselně vyjadřuje poměr změny odporu při ohřátí o 1 K k jeho původní velikosti. Velikost odporu v závislosti na oteplení bude  $R = R_{20} [1 + \alpha(t - 20 \text{ }^\circ\text{C})]$ , kde  $R_{20}$  je velikost odporu při teplotě 20 °C.

Nejlepšími vodiči jsou stříbro, **měď** a hliník. Nejpoužívanější je měď. Stříbro je příliš drahé. Hliník je sice levnější než měď, snadno se ale láme, vlivem tlaku se deformuje (uvolnění kontaktů na svorkovnicích a velmi těžko se pájí).

Zlato se používá k povrchové úpravě kvalitních konektorů

Existují speciální slitiny (konstantan, manganin) a s minimálním teplotním součinitelem odporu.

Kov	měrný odpor ( $\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$ )	$\alpha$ ( $\text{K}^{-1}$ )
stříbro	0,016 3	0,004
měď	0,017 8	0,004 2
hliník	0,028 5	0,004
zlato	0,023	0,003 7
železo	0,1	0,005 5
konstantan	0,5	$2 \cdot 10^{-6}$

Z výše uvedených vztahů  $I = J \cdot S$ ,  $U = E \cdot l$ ,  $R = \zeta l/S$  po dosažení do Ohmova zákona  $U = R \cdot I$  získáme vztah mezi proudovou hustotou a intenzitou elektrického pole. (Ohmův zákon v

diferenciálním tvaru)  $E = \zeta J$   $J = \gamma E$ . Tyto vztahy platí v každém místě vodiče. Jejich

sumarizaci v homogenním prostředí vznikne integrální tvar Ohmova zákona  $U = R \cdot I$

**Příklad:** Jak velký odpor má měděný vodič délky 15 m o průměru 0,1 mm? Jaký úbytek napětí na něm vznikne, protéká-li jím proud 0,1 A?

$$S = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 0,1^2/4 = 0,00785 \text{ mm}^2$$

$$R = \zeta \cdot l/S = 0,0178 \cdot 15/0,00785 = 34 \Omega$$

$$U = R \cdot I = 34 \cdot 0,1 = 3,4 \text{ V}$$

Vidíme, že příliš malý průměr vodiče ve srovnání s protékajícím proudem není vhodný (ve výše uvedeném případě 12,73 A/mm<sup>2</sup>). Vzniká na něm velký úbytek napětí, vodič se zahřívá a může se přepálit (viz dále).

Pro srovnání vypočítáme stejný příklad pro d = 0,4 mm.

S = 0,125 mm<sup>2</sup>, R = 2,1 Ω. Zvětšením průměru 4krát se odpor vodiče zmenšil 16krát.

**Příklad:** Jaký musí být průměr měděného vodiče, který je dlouhý 2 m, aby na něm při proudu 4 A byl úbytek napětí 0,5 V?

$$R = U/I = 0,5/4 = 0,125 \Omega$$

$$S = \zeta / R = 0,0178 \cdot 2/0,125 = 0,285 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{0,3628} = 0,6 \text{ mm}$$

**Příklad:** O kolik procent vzroste odpor měděného vinutí transformátoru při zvětšení teploty z 20°C?

$$R = R_{20} (1 + \alpha (t_2 - 20)) = R_{20} (1 + 0,0042 \cdot (60 - 20)) = R_{20} (1 + 0,168)$$

Odpor vzroste o 16,8 %.

**Příklad:** Jak dlouhý musí být měděný vodič, aby měl při teplotě 100 °C odpor 0,8 Ω při průměru 1,5 mm<sup>2</sup>.

$$R_{100} = R_{20} (1 + 0,0042 \cdot 80) = 1,336 \cdot R_{20}$$

$$R_{20} = R_{100} / 1,336 = 0,8 / 1,336 = 0,599 \Omega = 0,6 \Omega$$

$$S = \pi d^2/4 = 3,14 \cdot 1,5^2/4 = 1,766 \text{ mm}^2$$

$$l = R_{20} \cdot S / \zeta = 0,6 \cdot 1,766/0,0178 = 59,53 \text{ m}$$

## PRÁCE, VÝKON A TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Z definice napětí (práce potřebná k přenesení náboje) můžeme snadno odvodit vztah mezi výkonem, proudem a napětím (Joule-Lencův zákon)

$$A = Q \cdot U = I \cdot t \cdot U$$

$$P \cdot t = I \cdot t \cdot U$$

$$\underline{P = I \cdot U} \text{ (W, A, V)}$$

Tímto vzorcem je možné také definovat napětí: 1 volt je napětí, při němž se na vodiči proudem 1 A vyvine výkon 1 W.

**Elektrická práce, kterou vykoná stejnosměrný proud mezi dvěma místy v proudovém obvodu za určitou dobu je dána napětím U mezi těmito místy, proudem I a dobou t, po kterou tento proud obvodem prochází.**

Elektrický proud, který obvodem prochází je vlastně pohybem elektrických nábojů, který koná práci. Práce se mění v teplo.

Ztrátový výkon na vodiči nebo na rezistoru můžeme po dosazení do Ohmova zákona vypočítat ze vztahů:

$$\underline{P = U \cdot I = U^2/R = R \cdot I^2}$$

Při výpočtu používáme kterýkoliv z těchto vzorců. U výše uvedených příkladů vypočítejte ztrátový výkon na vodiči všemi způsoby, ověřte shodnost výsledků.

Při daném odporu vodiče jsou tepelné ztráty na vodiči úměrné druhé mocnině procházejícího proudu.

Při přenosu elektrické energie na velkou vzdálenost používáme vysokých napětí a tím i malých proudů, abychom tyto ztráty snížili na minimum.

Elektrickou práci udáváme buď v **joulech** (wattsekunda) nebo v **kilowatthodinách**

$$\underline{1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}}$$

V elektrických zařízeních (motor, transformátor) dochází k přeměně energie z jedné formy na druhou. Využití energie není nikdy stoprocentní, část energie se ztrácí ve formě tepla. Definujeme **příkon P<sub>1</sub>**,

**výkon P<sub>2</sub> a účinnost η**

$$\underline{\eta = 100 \% \cdot P_2/P_1 \text{ (%), (W, W)}}$$

**Příklad:** Topnou spirálou vařiče prochází při napětí 220 V proud 2,5 A. Jakou práci vykoná elektrický proud za 40 minut? Jaký je příkon vařiče?

$$P = U \cdot I = 220 \cdot 2,5 = 550 \text{ W} - \text{příkon vařiče}$$

$$A = P \cdot t = 550 \cdot 40 \cdot 60 = 1\,320\,000 \text{ J} = 0,367 \text{ kWh}$$

**Příklad:** Motor odebírá při napětí 230 V proud 1,2 A. Jaký je jeho výkon, pokud účinnost je 90%.

$$P_1 \text{ (příkon)} = U \cdot I = 230 \cdot 1,2 = 276 \text{ W}$$

$$P_2 \text{ (výkon)} = P_1 \cdot \eta = 276 \cdot 0,9 = 248,4 \text{ W}$$

**Příklad:** Na rezistoru 100  $\Omega$  jsme naměřili úbytek napětí 5 V. Jak velký proud jím teče a jak velký je ztrátový výkon?

$$R = U/I = 5/100 = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

$$P = U^2/R = 5^2/100 = 0,25 \text{ W} \text{ nebo } P = U \cdot I = 5 \cdot 0,05 = 0,25 \text{ W}$$

**Příklad:** Rezistor má hodnotu 4,7  $\Omega$  a maximální dovolené výkonové zatížení 0,2 W. Jak velký proud jím může protékat a pak velké napětí na něm může trvale být?

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{(0,2 \cdot 4,7)} = \sqrt{0,94} = 0,97 \text{ V}$$

$$I = \sqrt{P/R} = \sqrt{(0,2/4,7)} = \sqrt{0,04255} = 0,206 \text{ A}$$

## ZDROJE NAPĚTÍ A PROUDU

Zdroje dodávají do elektrického obvodu napětí a proud a tím i výkon. Zdrojem stejnosměrného napětí je nejčastěji **baterie** (akumulátor), kde vzniká napětí a proud díky chemickým reakcím. Zdrojem střídavého napětí jsou nejčastěji **generátory** v elektrárnách. Ze střídavého napětí můžeme vyrobit stejnosměrné v přístroji, který se nazývá **laboratorní zdroj**.

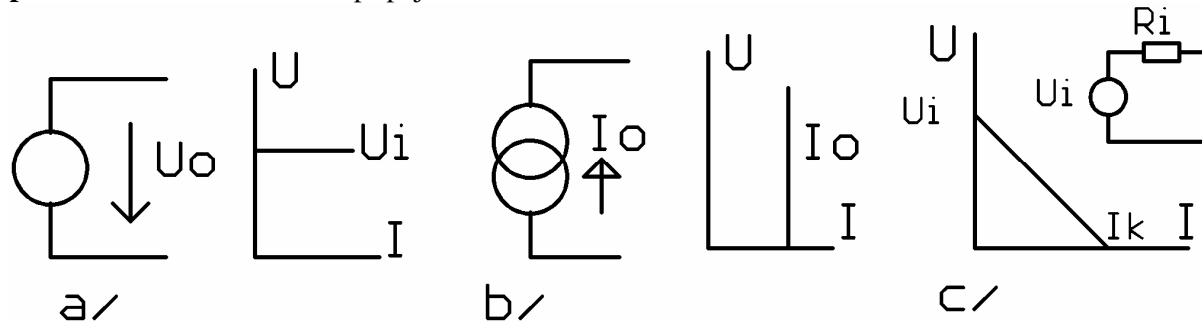
Vývody stejnosměrného zdroje označujeme + a - . Technický směr proudu byl dříve zaveden od + k - . K později se zjistilo, že směr pohybu elektronů, které jsou nositeli proudu je opačný. Při řešení obvodů používáme ideální zdroje. **Ideální zdroj napětí** dává **konstantní napětí** bez ohledu na velikost odebíraného proudu. **U skutečného zdroje dochází vždy při odběru proudu k poklesu svorkového napětí**. Napětí zdroje **naprázdno** nazýváme **vnitřní napětí zdroje  $U_i$** . V sérii s tímto zdrojem je **vnitřní odpor zdroje  $R_i$** .

Závislost svorkového napětí na odebíraném proudu vyjadřuje **zatěžovací charakteristika**. Ve většině případů (lineární zdroje) se jedná o přímku, která spojuje 2 body  $U_i$  a  $I_k$ , kde  $I_k$  je zkratový proud zdroje  $I_k = U_i/R_i$ . U většiny zdrojů musíme zajistit, aby nepracovaly do zkratu, jinak hrozí jejich zničení akumulátory (např. autobaterie) mají velmi malý vnitřní odpor (řádově 0,1  $\Omega$ , jejich zkratový proud je 100-200 A. Tepelné účinky tohoto proudu mohou být nebezpečné.

Běžné tužkové monočlánky mají vnitřní odpor řádově 1  $\Omega$ , při zkratu se silně zahřejí a brzy se zničí.

Laboratorní (stabilizovaný) zdroj se chová jako ideální zdroj napětí. Při překročení přednastaveného proudového odběru (jednotky miliampér až jednotky ampér) dojde k prudkému poklesu napětí, aby se zdroj nezničil nebo se nepoškodily obvody k němu připojené. Odpor sítě (400/230 V) je rovněž velmi malý. Proti zkratu je rozvod napětí chráněn jističi. Zkratový proud by jinak poškodil vedení a mohl způsobit požár.

**Ideální zdroj proudu má nekonečně velký vnitřní odpor**. Dodává do zátěže stále **stejný proud** nezávisle na velikosti připojené zátěže.



Obrázek. a/ Schematická značka a zatěžovací charakteristika ideálního zdroje napětí b/ Schematická značka a zatěžovací charakteristika ideálního zdroje proudu.

c/ Náhradní schéma a zatěžovací charakteristika skutečného lineárního zdroje.

Zdroje napětí můžeme bez problémů zapojovat do série za účelem zvýšení napětí. Při paralelním zapojení na účelem zvýšení odběru proudu je nutná velká opatrnost. Zdroje musí mít stejné s vnitřní napětí i vnitřní odpor, jinak hrozí jejich zničení vyrovnávacími proudy.

**1. KIRHOFFŮV ZÁKON** – algebraický součet proudů do uzlu vstupujících se rovná součtu proudů z uzlu vystupujících. Uzel je místo, kde se stýkají 2 nebo více vodičů. Tento zákon je v podstatě zákonem zachování elektrického náboje. Znaménkem, které proudům přiřadíme, rozlišujeme proudy do uzlu vstupující (např. +) a proudy z uzlu vystupující (např. -).

Jako příklad si odvodíme vzorec pro **PARALELNÍ ŘAZENÍ REZISTORŮ**

Pro uzel A platí:  $I = I_1 + I_2$  do tohoto vztahu dosadíme:

$$I_1 = U/R_1 \quad I_2 = U/R_2 \quad R = U/I \quad \text{na všech rezistorech je stejné napětí}$$

$$U/R = U/R_1 + U/R_2 \quad \text{vydělíme } U$$

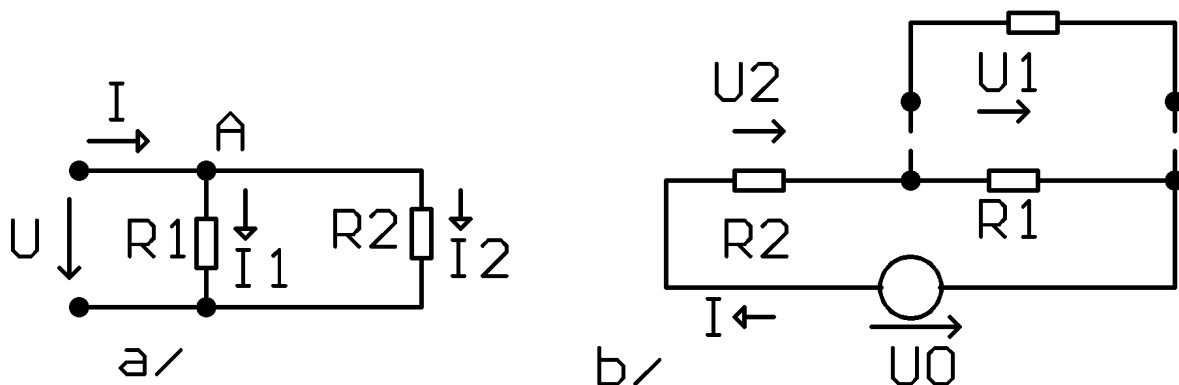
$$\underline{1/R = 1/R_1 + 1/R_2} \quad \text{častěji uvádíme ve tvaru } \underline{R = (R_1 R_2)/(R_1 + R_2)}$$

**2. KIRHOFFŮV ZÁKON** – algebraický součet svorkových napětí zdrojů a všech úbytků napětí na spotřebičích v uzavřené smyčce se rovná 0 nule. Smyčka je uzavřená dráha v části obvodu.

Jako příklad použití si odvodíme vzorec pro **SÉRIOVÉ ŘAZENÍ REZISTORŮ**.

$$R_1 I + R_2 I - U_0 = 0$$

$$(R_1 + R_2) I = U_0 \quad R = U_0/I \quad \underline{R = R_1 + R_2} \quad \text{všemi rezistory teče stejný proud}$$



Obrázek: Odvození vzorce pro a / paralelní (dělič proudu) b / sériové (dělič napětí) řazení rezistorů

V obvodu vyznačíme šipkou smysly proudů v jednotlivých smyčkách. Směr proudu si můžeme zvolit libovolně. Pokud proud vyjde záporný, znamená to, že jeho směr je opačný.

Vyjdeme od zvoleného uzlu a postupujeme smyčkou stále stejným směrem. Součiny  $R \cdot I$  zapisujeme jako kladné, pokud je-li směr proudu totožný se směrem našeho postupu ve smyčce.

### DĚLIČ NAPĚTÍ

Z obrázku sériového zapojení rezistorů si odvodíme důležitý vztah pro dělič napětí

$$U_1 = R_1 I \quad U_2 = R_2 I \quad U = (R_1 + R_2) \cdot I$$

$$\underline{U_1/U = R_1 I / (R_1 + R_2) I = R_1 / (R_1 + R_2)}$$

**Příklad:** Jaký je výsledný odpor paralelního spojení dvou rezistorů o hodnotách 1 kΩ?

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2) = 1/2 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

Zapamatujte si, že odpor paralelního spojení dvou stejných rezistorů se rovná polovině hodnoty tohoto rezistoru.

Přidáme-li k rezistoru paralelně jiný, jeho odpor se vždy zmenší.

## ELEKTROSTATICKÉ POLE

Elektrické náboje, které jsou v klidu, se projevují silovými účinky a vytvářejí elektrické pole. Elektrické náboje jsou kladné (nedostatek elektronů) a záporné (přebytek elektronů). Souhlasné náboje se odpuzují, nesouhlasně přitahují. Coulombův zákon říká, že **síla, kterou náboje na sebe působí, je přímo úměrná součinu jejich velikosti a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti**

$\mathbf{F} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$  (A; N.m<sup>2</sup>.C<sup>-2</sup>, C, C, m)  $k = 1/(4 \pi \epsilon_0)$  kde  $\epsilon_0$  je **permitivita vakua** (viz dále)

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

**Intenzita elektrického pole E je síla působící na jednotkový kladný náboj**

$$\mathbf{E} = \mathbf{F}/Q \text{ (N.C}^{-1}\text{, N, C)}$$

Je to vektorová veličina, která má v každém bodě elektrostatického pole o velikost a orientaci totožnou se smyslem síly, která na kladný jednotkový náboj působí.

Jednotkou intenzity elektrického pole je N/C (newton/coulomb), v praxi se používá V/m

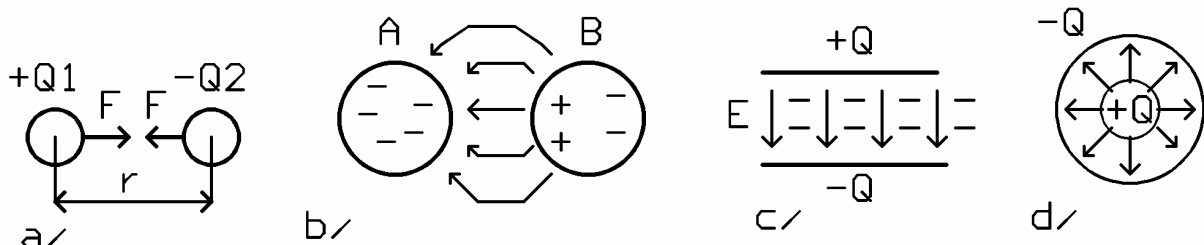
$$[F] = \text{J/m} = \text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s/m} \quad [Q] = \text{C} = \text{A} \cdot \text{s} \quad [E] = \text{V/m}$$

Intenzita elektrického pole se v každém místě rovná spádu napětí.

Každému bodu elektrostatického pole můžeme přiřadit určitý **potenciál** (napětí vůči jedné referenční elektrodě). Místa, která mají vzhledem k některé elektrodě **stejně napětí**, se nazývají **ekvipotenciální hladiny**.

**Vektor intenzity elektrického pole je vždy kolmý k ekvipotenciálním hladinám.** Ve vodičích je téměř nulová hodnota E, viz vztah  $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$ . Kdyby tomu tak nebylo, blížila by se hodnota J nekonečnu.

Přiblížíme-li sobě dvě vodivá tělesa, jedno nabitě např. záporným náboje (A), druhé bez náboje (B), nastane v nenabitě tělese posun elektrických nábojů. Poruší se jeho elektrická rovnováha. Volné elektrony jsou odpuzovány do vzdálenější části tělesa, do bližší části k tělesu a jsou přitahovány kladné náboje. Náboje ve vodiči B označujeme jako **indukované** a celý jev nazýváme **elektrostatickou indukcí**.



Obrázek: Elektrostatické pole

a/ síla působící mezi 2 nabitými tělesy    b/ elektrická indukce

c/homogenní elektrické pole    d/ nehomogenní elektrické pole

## ELEKTRICKÁ INDUKCE

Veličinu elektrostatická indukce označujeme D (C/m<sup>2</sup>). Jedná se o podíl náboje Q indukovaného na ploše S.  $\mathbf{D} = \mathbf{Q}/S$ . Jedná se o vektorovou veličinu, její směr je kolmý k ploše v takové poloze, kdy indukovaný náboj je největší.

Příčinou elektrické indukce je elektrický náboj (který je z tělesa A). Říkáme, že z tělesa A vychází **indukční tok**  $\Psi$ , který se číselně rovná tomuto náboji.

$$\Psi = Q = D \cdot S$$

**Gausova věta: Indukční tok vycházející z libovolné uzavřené plochy se číselně rovná algebraickému součtu nábojů, které se nacházejí v prostoru omezeném touto plochou.**

**Příklad:** Elektrostatické pole má konstantní intenzitu elektrického pole 15 kV/m. Jaké je napětí mezi 2 vodiči, které jsou od sebe vzdáleny 5 cm?

$$U = E l = 15 \cdot 0,05 = 0,75 \text{ kV} = 750 \text{ V}$$

**Příklad:** V prostoru mezi deskami je elektrická indukce  $0,1 \text{ C/m}^2$ . Plocha desek je  $30 \text{ cm}^2$ . Vypočítejte náboj na deskách

$$Q = D \cdot S = 0,1 \cdot 30 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

Elektrostatické pole zobrazujeme pomocí elektrických **siločar**. Jsou to myšlené čáry, které sledují směr silového působení těles. Začínají a končí vždy na povrchu vodivých těles. Jejich smysl je shodný se směrem pohybu kladného náboje vloženého do pole. V elektrostatickém poli neexistují uzavřené siločáry. Siločáry se nikdy neprotínají.

Na siločáry jsou kolmé tzn. **ekvipotenciály** – křivky spojující místa se stejným elektrickým potenciálem.

V **homogenním elektrostatickém poli** jsou **siločáry rovnoběžné**. Intenzita elektrického pole je zde konstantní. Příkladem je pole mezi 2 rovnoběžnými deskami kondenzátoru.

V nehomogenním elektrickém poli není hustota indukčních čar stejná, intenzita není konstantní. Příkladem je elektrostatické pole mezi 2 opačně nabitými koulemi, mezi 2 vodiči, mezi dvěma soustřednými válci (koaxiální vodič).

## HOMOGENNÍ A NEHOMOGENNÍ POLE

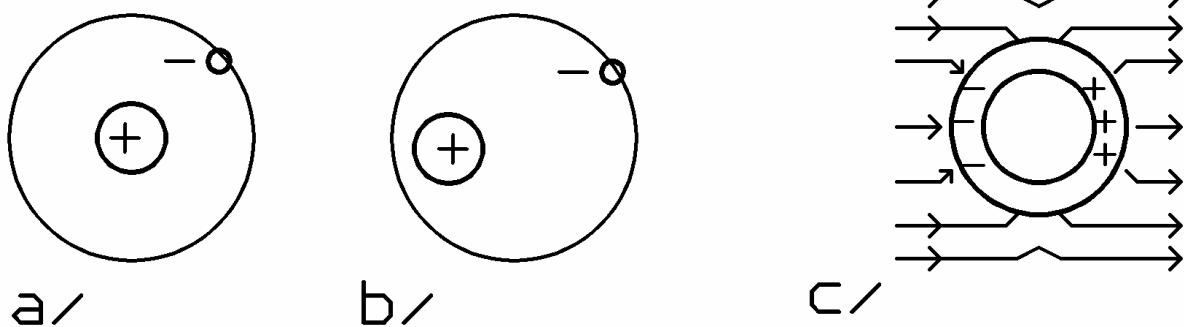
Mezi intenzitou elektrického pole a elektrickou indukcí platí vztah  **$D = \epsilon E$** ,  $\epsilon$  se nazývá **permitivita dielektrika**

**$D = \epsilon_0 \epsilon_r E$** , kde  $\epsilon_0$  je **permitivita vakua**  $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  a  $\epsilon_r$  je **relativní permitivita** (bezrozměrná).

Permitivita je charakteristickou vlastností izolantů (jako u vodičů vodivost). V izolantech jsou elektrické náboje (elektrony) vázány na pevné místo. V izolantech může existovat elektrické pole které je polarizuje. Uvnitř atomů nebo molekul dochází k posunu nábojů, vznikají **dipóly**.

Relativní permitivita popisuje schopnost dielektrika se **polarizovat** působením elektrostatického pole. Relativní permitivita vyjadřuje, kolikrát je intenzita elektrického pole v dielektriku menší než ve vakuu. **Vztah mezi D a E** je u většiny materiálů **lineární**. Při překročení elektrické pevnosti se u dielektrika roztrhnou vazby mezi náboji, nastává **průraz**, dielektrikum se začne chovat jako vodič. **Elektrická pevnost** je důležitou vlastností izolantů, závisí na teplotě, vlhkosti, apod. Typické hodnoty jsou pro vzduch 2 až 3 kV/mm, olej 20 - 30 kV/mm, polystyrén, sklo, slída 20 - 80 kV/mm.

Pokud potřebujeme odstranit elektrostatické pole z určitého prostoru, obklopíme jej vodivým krytem – **stínící kryt**. Elektrostatické pole nemůže existovat uvnitř vodivého prostoru, elektrické siločáry vždy končí na povrchu vodiče.



Obrázek Polarizace a/ atom nepolarizovaného dielektrika b/ polarizovaného dielektrika c/ princip stínění

**Kapacita** je schopnost vodiče vázat určitou velikost náboje při jednotkovém napětí. Součástky, jejichž základní vlastnost je kapacita, se nazývají **kondenzátory**. Jednotkou kapacity je **farad F**. **Kondenzátor má kapacitu 1 F, jestliže při napětí 1 V udrží náboj 1 C.**  **$C = Q/U$** .

V základní podobě tvoří kondenzátor 2 vodivé, rovnoběžné desky. Prostor mezi nimi je vyplněn dielektrikem.

Odvodíme vztah pro výpočet kapacity z rozměrů kondenzátoru. **S** = plocha desek, **d** = vzdálenost mezi nimi.

$$Q = D \cdot S = \epsilon_0 \epsilon_r E \cdot S = \epsilon_0 \epsilon_r S \cdot U/d$$

$$C = Q/U = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot S/d$$

Jako dielektrikum se používá kondenzátorový papír, slída, keramika, plastové folie:

U elektrolytických kondenzátorů tvoří dielektrikum tenká vrstva kysličníku na povrchu hliníkové nebo tantalové elektrody. Ta se vytváří a udržuje působením elektrického proudu, je-li elektroda ponořena ve vhodném elektrolytu. Vývody těchto kondenzátorů jsou označeny + a -.

Případná jejich záměna (přivedení napětí opačné polarity) by způsobila depolarizaci této vrstvy a tím zničení kondenzátoru.

Protože základní jednotka kapacity je příliš velká pro běžné použití, používají se menší jednotky: mikrofaraď  $\mu\text{F}$  ( $10^{-6}$  F), nanofaraď  $\text{nF}$  ( $10^{-9}$  F) a pikofaraď  $\text{pF}$  ( $10^{-12}$  F). Za základní jednotku se často považuje v praxi pikofaraď.

**Kapacita je úměrná ploše elektrod a nepřímo úměrná jejich vzdálenosti. Dielektrikum svojí polarizací zvětšuje kapacitu** – schopnost vázat elektrický náboj. Plochu elektrod zvětšíme svitkovým uspořádáním.

**Příklad:** Stanovte kapacitu rovinného kondenzátoru  $S = 10^3 \text{ cm}^2$ ,  $d = 0,2 \text{ mm}$ ,  $\epsilon_r = 5$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r S/d = 5 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3 / (0,2 \cdot 10^{-3}) = 22,13 \cdot 10^{-9} \text{ F} = 22,13 \text{ nF}$$

**Příklad:** Plocha elektrod kondenzátoru je  $6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2$ , vzdálenost mezi nimi 0,5 mm. Jaká musí být minimální permitivita dielektrika, aby kapacita kondenzátoru nebyla menší než 470 nF?

$$C = 6 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} / 0,5 \cdot 10^{-3} = 106,25 \text{ nF} \quad \text{kapacita vzduchového kondenzátoru}$$

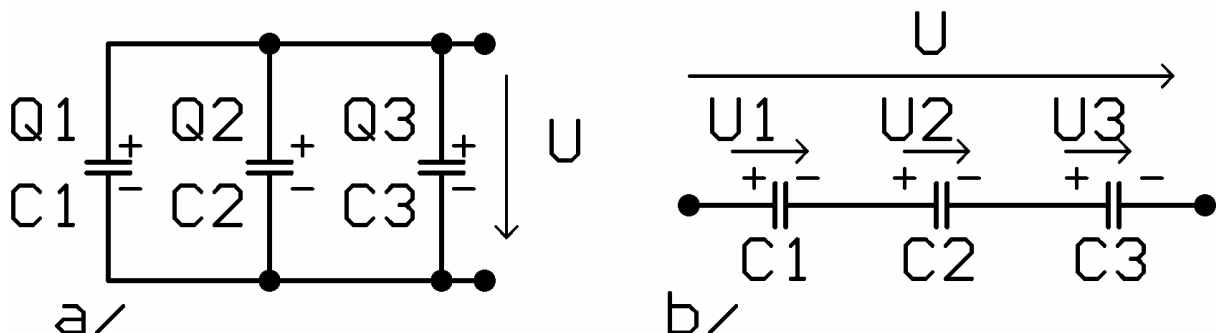
$$\epsilon_r = C_{\text{s dielektrika}} / C_{\text{bez dielektrika}} = 470 / 106,25 = 4,42$$

Jaké bude průrazné napětí tohoto kondenzátoru, je-li průrazné napětí dielektrika 40 kV/mm?

$$U_{\text{průrazné}} = E_p \cdot d = 40 \cdot 0,5 = 20 \text{ kV.}$$

Maximální povolené napětí na kondenzátoru musí být pochopitelně výrazně menší než takto vypočtená hodnota. Je třeba brát v úvahu výrobní tolerance, vliv nečistot, vlhkosti, teploty apod. S rostoucí tloušťkou dielektrika vzrůstá průrazné napětí kondenzátoru, vzrůstá ale i jeho velikost.

## SÉRIOVÉ A PARALELNÍ SPOJENÍ KONDENZÁTORŮ.



Obrázek Zapojení kondenzátorů a/ paralelní b/ sériové

Při paralelním spojení je na všech kondenzátorech stejné napětí, náboj se rozdělí v poměru kapacit

$$Q_1 = C_1 \cdot U \quad Q_2 = C_2 \cdot U \quad Q = (C_1 + C_2) \cdot U \quad \underline{C = C_1 + C_2}$$

Při **paralelním** spojení kondenzátorů je **výsledná kapacita součtem jednotlivých kapacit.**

Při sériovém zapojení kapacit náboj přivedený na první kondenzátor váže stejný náboj na druhém kondenzátoru. V dielektrikách bude stejný indukční tok, na všech kondenzátorech bude stejný náboj.

Toto spojení můžeme nahradit jedním kondenzátorem o kapacitě C na kterém bude napětí

$$U = U_1 + U_2 \quad Q/C = Q/C_1 + Q/C_2$$

$$\underline{1/C = 1/C_1 + 1/C_2} \quad \underline{C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)}$$

Při **sériovém** spojení kondenzátorů se podobně jako u paralelního zapojení rezistorů **sčítají jejich převrácené hodnoty.**

**Příklad:** Deskový kondenzátor, jehož desky byly od sebe vzdáleny 1 mm se nabil na  $U_0 = 10 \text{ V}$ . Jaké bude jeho napětí po oddálení desek na 2 cm?



Platí **zákon zachování elektrického náboje**  $Q_0 = Q_1$ . Kapacita kondenzátoru se zmenšila 20x  $C_1 = 0,05 C_0$   $C_0 U_0 = C_1 U_1$   $U_1 = 20 U_0 = 200 V$ .

Z tohoto příkladu vidíme, že **statické napětí** o vysoké hodnotě může vzniknout prakticky „z ničeho“. Elektrické náboje vznikají mechanickým třením nesejnorodých látek (pohyb dopravních pásů, pohyb sypkých materiálů, v tiskárnách, v letadlech, v automobilech). Mezi elektrostatické jevy patří i blesky.

Problémy přináší elektrostatický náboj při práci s těkavými hořlavými látkami a při práci s některými typy polovodičů (technologie MOS).

Před škodlivými účinky těchto nábojů se chráníme těmito způsoby: vodivým pospojováním a uzemněním kovových částí přístrojů, použitím vhodných (polovodivých) podlahových krytin (antistatické linoleum), vhodnou podložkou na pracovním stole, vhodná obuv a oblečení (bavlna, nikoliv umělá vlákna), zvýšením vodivosti vzduchu – zvlhčení, ultrafialové záření.

**Příklad:** Vybitý kondenzátor o kapacitě 5 mF se nabíjí proudem 1 mA po dobu 3 s. Na jaké napětí se nabije?

$$Q = I \cdot t = 3 \cdot 10^{-3} \text{ C} \quad \text{náboj, na který se kondenzátor nabije}$$

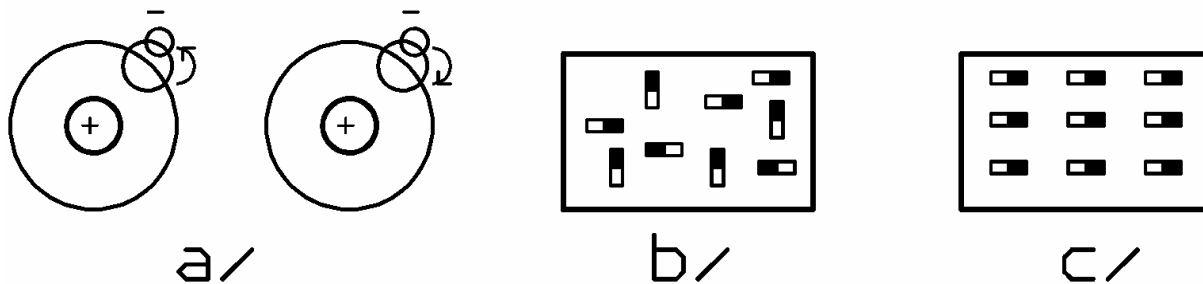
$$U = Q/C = 3 \cdot 10^{-3} / (5 \cdot 10^{-3}) = 0,6 \text{ V.}$$

## MAGNETISMUS

**Magnetické pole** je silové pole, které vzniká **následkem pohybu elektrických nábojů**. Vytváří jej buď **permanentní 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**.

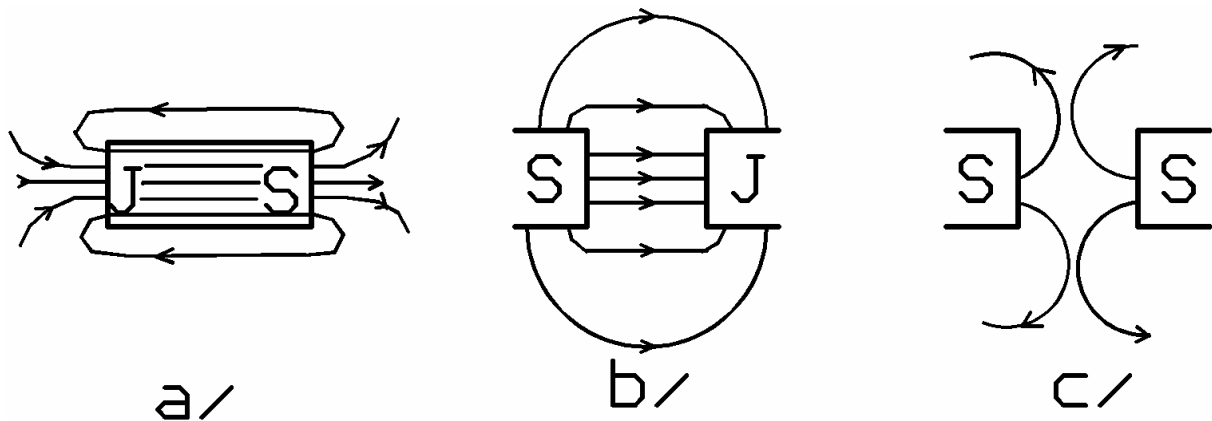
*Obrázek a/ elementární magnet – dvojice elektronů s opačným spinem*

*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.

Cívka, kterou prochází proud, 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**.

**Magnetická indukce** je dána počtem magnetických indukčních čar (tokem  $\Phi$ ) na jednotku plochy  $S$ .  $\mathbf{B} = \Phi / S$ , jednotkou je tesla (T). Magnetická indukce vyjadřuje silové účinky magnetického pole. **Magnetické pole má indukci 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:

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

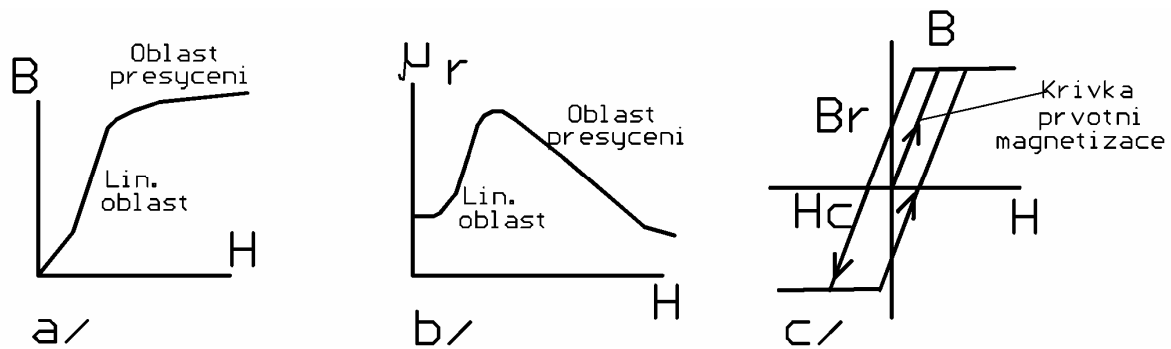
kde  $\mu_0$  je **permeabilita vakua** =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [H/m] a  $\mu_r$  **relativní permeabilita [1]**, která popisuje magnetické vlastnosti látek. U většiny materiálů je  $\mu_r$  přibližně rovné 1 (látky diamagnetické  $\mu_r < 1$  a paramagnetické  $\mu_r > 1$ ), existují ale materiály (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 permitivita se mění v závislosti na intenzitě

magnetického pole. S rostoucí H roste B zpočátku lineárně (přibližně). Při větších intenzitách

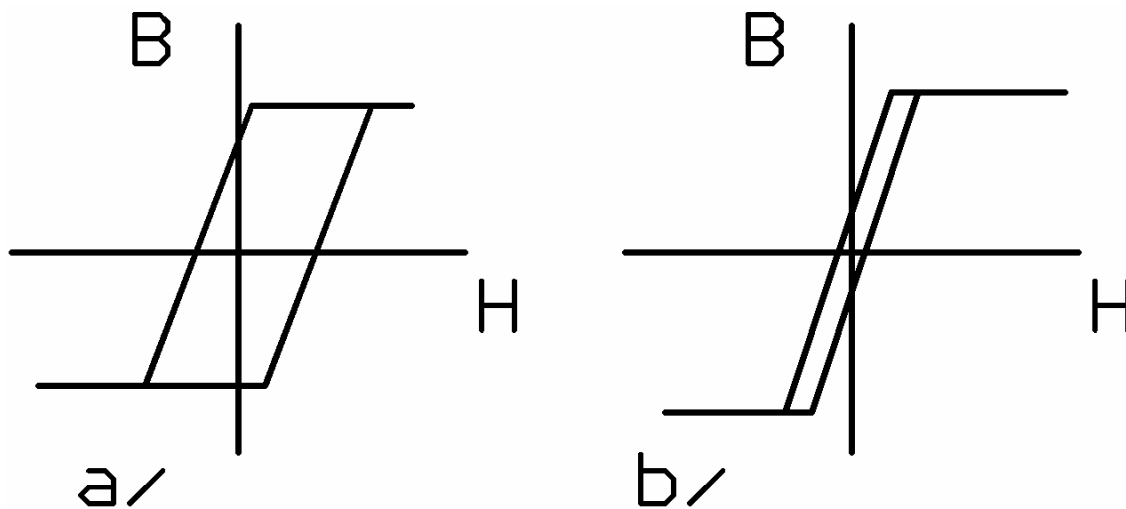
magnetického pole dojde k přesycení materiálu, domény jsou již uspořádány - magnetická indukce se již nemůže dále zvyšovat.



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 polarity (**koercitivita  $H_c$** ) a tedy proud opačné polarity 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).

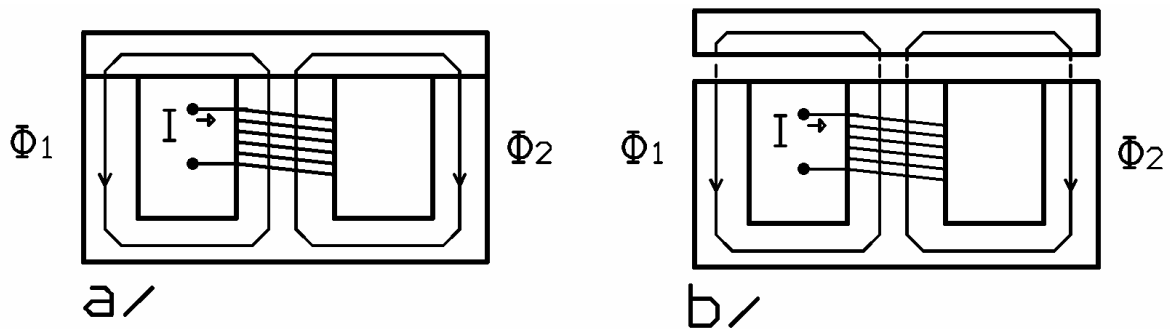


Obrázek. a/ Hysterezní křivka materiálu magneticky tvrdého

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.



Obrázek a/ Cívka s EI plechy bez vzduchové mezery (transformátor)  
 b/ Cívka s EI plechy se vzduchovou mezerou (tlumivka)

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  $u = \nabla\phi / \nabla t$ .

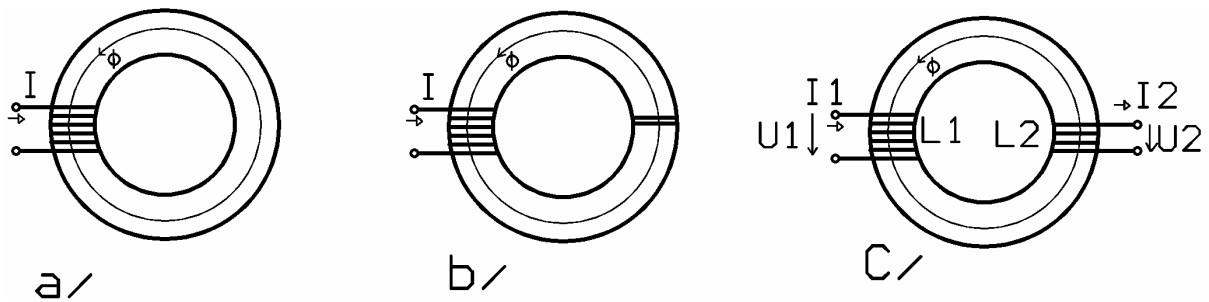
Pro cívku s N závity (pokud všemi závity prochází stejný magnetický tok)  $u = N \nabla\phi / \nabla t$ .

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

$$u = L \cdot \nabla i / \nabla t$$

**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 cívky. 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.



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 jádře 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 cívce při změně proudu v primární cívce.  $u_2 = N \nabla\phi_{1,2} / \nabla t = M \nabla i_1 / \nabla t$   $M = u \nabla t / \nabla i_1$

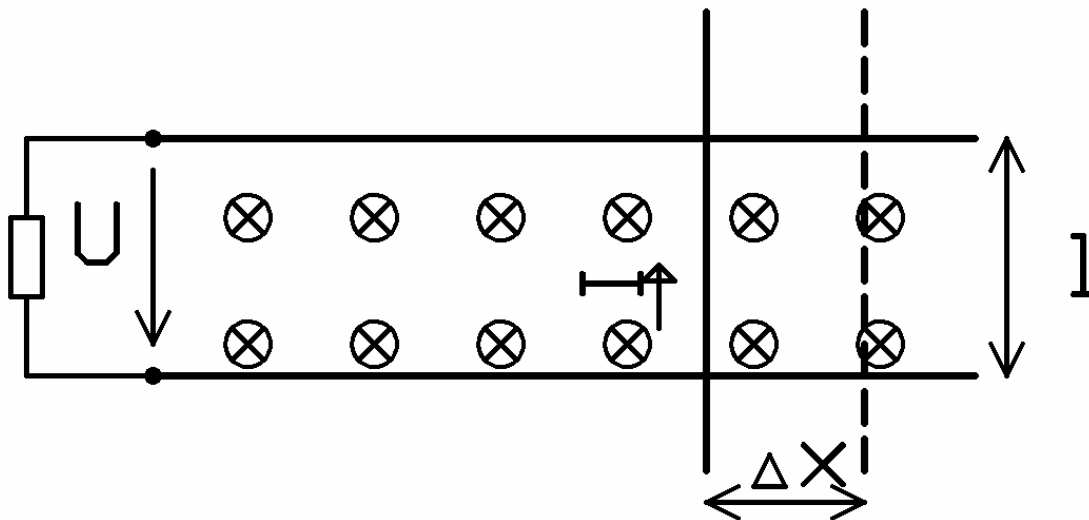
Jednotkou vzájemné indukčnosti je H (henry). Vzájemná indukčnost není prvkem elektronického obvodu, vyjadřuje pouze vzájemnou vazbu mezi dvěma vlastními indukčnostmi.

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 vodičů se pohybuje vodič délky  $l$  naznačeným směrem. Vodiče kolmé na vodič  $l$  uzavírají smyčku. Kolmo k rovině této smyčky je stálé magnetické pole s magnetickou indukcí  $B$  (indukční čáry jsou orientovány shora dolů, viz obrázek

Indukované napětí  $u = B \cdot l \cdot v$

### **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.