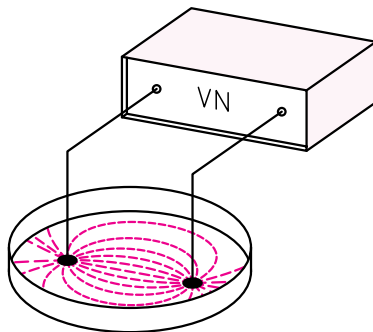


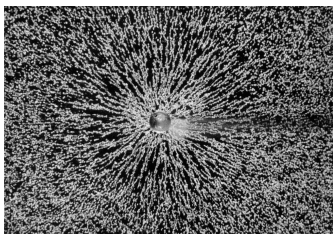
R1 ELEKTRICKÝ NÁBOJ A ELEKTRICKÉ POLE

R1.1 Elektrické pole bodových nábojů

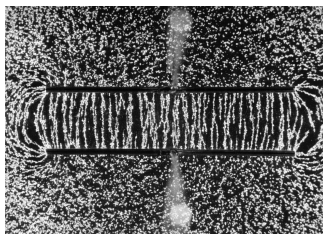
V čl. 1.3 je vyložen siločárový model radiálního pole kladného a záporného bodového náboje. Názorně si můžeme elektrické pole zobrazit pokusem podle obr. R1-1. Plochá miska je naplněna olejem, v němž jsou rozptýleny drobné částičky (např. krupice). Do oleje je vložena jedna, popř. dvě elektrody připojené ke zdroji vysokého napětí. Kolem elektrod vznikne obdobné elektrické pole, jaké vytvoří bodové náboje. Působením elektrických sil v tomto poli se rozptýlené částičky uspořádají do obrazce, který odpovídá rozložení siločar v elektrickém poli. Na obr. R1-2 jsou takto vytvořené modely základních typů elektrických polí bodových nábojů.



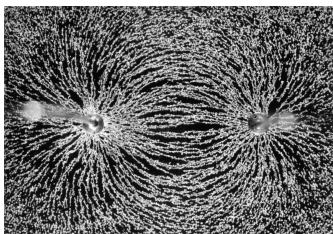
R1-1 Vytvoření elektrického pole v oleji



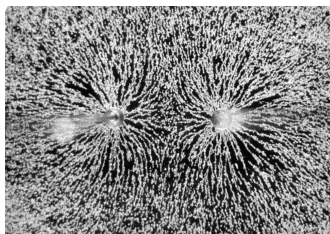
a) Model radiálního elektrického pole



b) Model homogenního elektrického pole



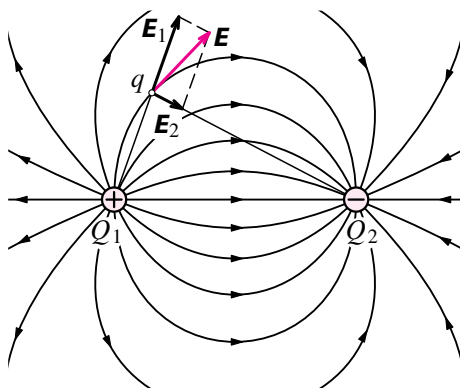
c) Model elektrického pole dvou nesouhlasných bodových nábojů



d) Model elektrického pole dvou souhlasných bodových nábojů

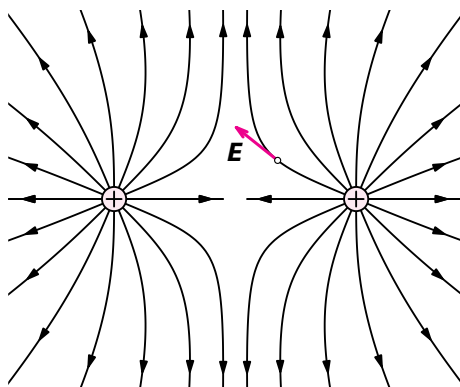
R1-2 Modely elektrických polí bodových nábojů

Na obr. R1-2c a R1-2d je patrné, že elektrické pole dvou, popř. i více nabitých těles je poměrně složité. Podrobněji rozebereme elektrické pole dvou nesouhlasných bodových nábojů (obr. R1-3). Jestliže do tohoto pole vložíme kladný náboj q , působí na něj kladný náboj Q_1 odpudivou silou a záporný náboj Q_2 přitažlivou silou. V radiálních polích obou nábojů by v místě náboje q byly intenzity elektrických polí $\mathbf{E}_1$ a $\mathbf{E}_2$ a vektorovým sčítáním obou intenzit získáme výslednou intenzitu $\mathbf{E}$. Siločára má v místě náboje q takový tvar, že **vektor výsledné intenzity $\mathbf{E}$ elektrického pole má směr tečny k siločáře.**



R1-3 Siločárový model elektrického pole dvou nesouhlasných nábojů

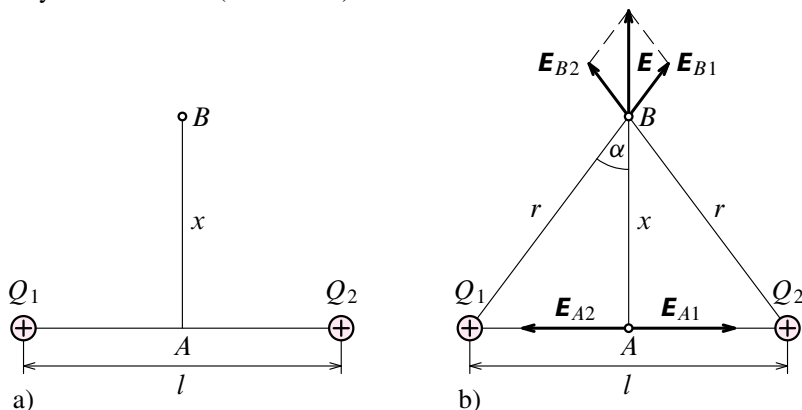
Obdobným způsobem získáme rozložení siločar elektrického pole souhlasných kladných, popř. záporných nábojů (obr. R1-4). Vektor výsledné intenzity $\mathbf{E}$ elektrického pole v obou případech leží na vektorové přímce, která je tečnou k siločáře, ale směry vektorů jsou opačné.



R1-4 Siločárový model elektrického pole dvou souhlasných nábojů

Příklad

Dva stejné kladné bodové náboje $Q = 10 \mu\text{C}$ jsou ve vzájemné vzdálenosti $l = 12 \text{ cm}$. Určete intenzitu elektrického pole a) v bodě A uprostřed mezi náboji na jejich spojnici, b) v bodě B ve vzdálenosti $x = 8 \text{ cm}$ na kolmici vztyčené v bodě A (obr. R1-5a).



R1-5 Výpočet intenzity elektrického pole dvou souhlasných nábojů

Řešení

$$Q = 10 \mu\text{C} = 10^{-5} \text{ C}, l = 12 \text{ cm} = 12 \cdot 10^{-2} \text{ m}, x = 8 \text{ cm} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ m}; E_A = ?, E_B = ?$$

a) Poněvadž jsou oba náboje kladné a stejně velké, budou mít vektory $\mathbf{E}_{A1}$ a $\mathbf{E}_{A2}$ v bodě A stejnou velikost, ale opačný směr (obr. R1-5b) a výsledná intenzita $\mathbf{E}$ elektrického pole

$$\mathbf{E}_{A1} + \mathbf{E}_{A2} = \mathbf{0}.$$

b) Bod B je ve stejné vzdálenosti r od obou nábojů a platí

$$r = \sqrt{x^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}.$$

Z obr. R1-5b je patrné, že intenzity $\mathbf{E}_{B1}$ a $\mathbf{E}_{B2}$ mají stejnou velikost ($E_{B1} = E_{B2}$), ale různý směr, takže velikost vektoru výsledné intenzity elektrického pole je

$$E = 2E_{B1} \cos \alpha = \frac{2kQ}{r^2} \cos \alpha,$$

kde $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$ a

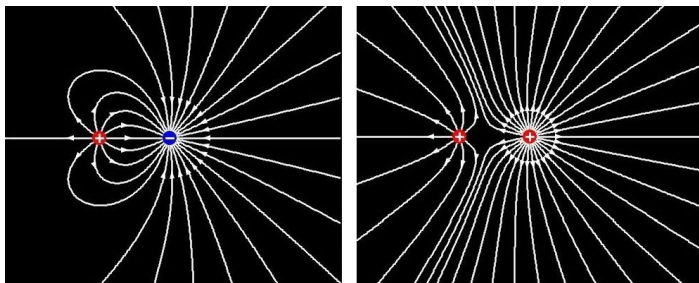
$$\cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}}.$$

Pro velikost intenzity E v bodě B platí:

$$\begin{aligned} E &= \frac{2kQr}{\left(x^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{3/2}} = \\ &= \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-5} \cdot 8 \cdot 10^{-2}}{(6,4 \cdot 10^{-3} + 3,6 \cdot 10^{-3})^{3/2}} \text{ N} \cdot \text{C}^{-1} \doteq 1,4 \cdot 10^7 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}. \end{aligned}$$

Vektor intenzity elektrického pole $\mathbf{E}$ leží na kolmici ke spojnici nábojů a míří vzhůru.

Konstrukce siločárového modelu elektrického pole výpočtem intenzity $\mathbf{E}$ v jednotlivých bodech elektrického pole by byla pracná a zdlouhavá. Pro vytváření těchto modelů však existuje řada počítačových programů. Takto byl např. vytvořen model elektrického pole dvou různě velkých nesouhlasných a souhlasných nábojů na obr. R1-6.



R1-6 Siločárové modely elektrických polí různě velkých nábojů

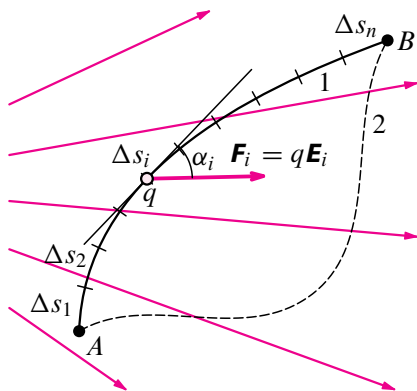
Úlohy

- 1** Jak se změní řešení uvedeného příkladu, jestliže bodové náboje budou mít stejně velky, ale opačný náboj?
- 2** Bodové náboje 4 nC a -5 nC jsou ve vzájemné vzdálenosti $0,6 \text{ m}$. Určete intenzitu elektrického pole uprostřed jejich spojnice.

- 3** Ve dvou protilehlých vrcholech čtverce o straně 30 cm jsou umístěny bodové náboje $0,2 \mu\text{C}$. Určete intenzitu elektrického pole ve zbývajících vrcholech čtverce.
- 4** Vzdálenost mezi náboji 10 nC a -10 nC je 10 cm. Určete intenzitu elektrického pole v bodě A , který je vzdálen 6 cm od kladného náboje a 8 cm od záporného náboje.
- 5** Dva kladné náboje o velikosti Q a $9Q$ jsou ve vzájemné vzdálenosti 8 cm. Určete polohu bodu na jejich spojnici, v němž je intenzita elektrického pole nulová.

R1.2 Práce v elektrickém poli

V čl. 1.4 jsme se zabývali konáním práce při přemísťování kladného náboje v homogenním elektrickém poli. Řešení tohoto případu je jednoduché, poněvadž na náboj působí ve všech bodech pole stejná elektrická síla. Uvažujme však častější případ, kdy elektrická síla nemá stálou velikost a nepůsobí ve směru pohybu. Na obr. R1-7 je znázorněna situace při pohybu kladného bodového



R1-7 K výpočtu práce elektrické síly

náboje q z bodu A do bodu B po trajektorii 1. Dráhu s rozdělíme na malé úseky $\Delta s_1, \Delta s_2, \dots, \Delta s_n$, ve kterých můžeme elektrickou sílu považovat za konstantní. V každém úseku vypočítáme dílčí práci ΔW

$$\Delta W_i = F_i \Delta s_i \cos \alpha_i = q E_i \Delta s_i \cos \alpha_i,$$

a získané výsledky sečteme

$$W_{AB} = \sum_{i=1}^n \Delta W_i.$$

Kdybychom se vrátili z bodu B do bodu A , měla by práce elektrické síly opačnou hodnotu $W_{BA} = -W_{AB}$.

Práce W_{AB} nezávisí na trajektorii, po které se náboj q přemísťuje z bodu A do bodu B . Kdyby například práce W_{A1B} vykonaná na trajektorii 1 byla větší než práce W_{A2B} vykonaná na trajektorii 2, mohli bychom náboj q nechat obíhat po uzavřené křivce tvořené oběma trajektoriemi a při každém oběhu bychom získali výslednou práci $W = W_{A1B} - W_{A2B} > 0$, aniž bychom do soustavy přiváděli energii. Získali bychom tedy perpetuum mobile, což je v rozporu se zákonem zachování energie.

Potenciál v radiálním elektrickém poli

Současně s konáním práce se mění také potenciální energie E_p náboje, která tedy závisí na jeho poloze v elektrickém poli. Budeme uvažovat radiální elektrické pole kladného náboje Q , v němž se podél siločáry pohybuje souhlasný náboj q . Musíme si však uvědomit, že síla působící na náboj není konstantní, ale s rostoucí vzdáleností r od náboje Q se zmenšuje. Přímkovou trajektorii pohybu náboje rozdělíme na velmi malé úseky Δr a práce elektrické síly v každém úseku bude

$$\Delta W_i = qE_i \Delta r_i.$$

Celková práce vykonaná při přemístění náboje q z bodu A do bodu B radiálního pole:

$$W_{AB} = \sum_{i=1}^n qE_i \Delta r_i = \sum_{i=1}^n q \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \Delta r_i = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta r_i}{r_i^2}.$$

Poznámka: Matematicky provedeme výpočet práce W_{AB} integrováním malých přírůstků práce při nepatrných posunutích dr náboje q v intervalu vzdáleností r_A až r_B :

$$W_{AB} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{r_A}^{r_B} = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right).$$

Z výsledku získaného integrováním je zřejmé, že práce potřebná k přemístění náboje do určitého bodu elektrického pole, a tedy i potenciální energie náboje v tomto bodě, je nepřímo úměrná vzdálenosti od náboje, který pole vytváří. Když

přibližujeme ve vakuu (popř. ve vzduchu) náboj q k souhlasnému náboji Q do vzdálenosti r , musíme překonat odpudivou sílu $\mathbf{F}_e$ elektrického pole (obr. 1-8). Vnější síla koná práci W a náboj získá elektrickou potenciální energii

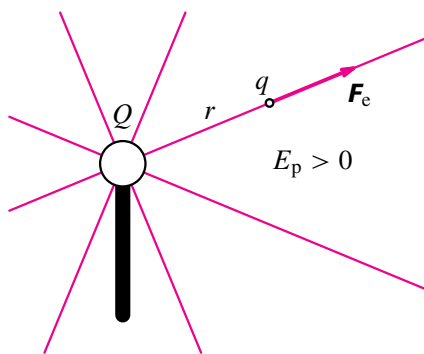
$$E_p = W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r}.$$

Ke stejnému výsledku dospějeme i v případě, že se náboj v elektrickém poli bude přemísťovat po libovolné trajektorii.

Pro potenciál φ v radiálním poli osamoceného bodového náboje Q ve vakuu plyne

$$\varphi = \frac{E_p}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Pokud se náboj q přemísťuje působením elektrické síly $\mathbf{F}_e$ a od náboje Q se vzdaluje, konají práci síly pole. Potenciální energie náboje se zmenšuje a menší je také potenciál φ v místě, v němž se náboj nachází. Ve velké vzdálenosti ($r \rightarrow \infty$) od osamoceného bodového náboje je potenciál elektrického pole nulový.



R1-8 Bodový náboj q v elektrickém poli souhlasného náboje Q

Úlohy

- 1** Jakou práci vykonají vnější síly, které přemístí náboj $+10^{-2} \mu\text{C}$ z nekonečně velké vzdálenosti na povrch kulového vodiče o poloměru 3 cm? Kulový vodič má náboj $+1 \mu\text{C}$.
- 2** Dva stejně velké náboje 10 nC jsou ve vzájemné vzdálenosti 50 cm. Jakou práci musí vykonat elektrická síla působící na jeden z nábojů, aby se náboj přiblížil ke druhému náboji do vzdálenosti 20 cm?

R1.3 Elektrické pole nabitého vodivého tělesa

Plošná hustota náboje

Náboj přivedený na izolované vodivé těleso (např. ze zdroje vysokého napětí) se rozloží pouze **na vnějším povrchu tělesa**. Velmi malá ploška ΔS povrchu tělesa nese malou část ΔQ celkového náboje tělesa. Rozložení náboje na povrchu tělesa popisuje veličina **plošná hustota náboje**

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta S}.$$

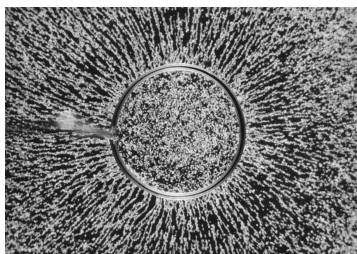
Na tělese kulového tvaru o poloměru R je náboj rozložen rovnoměrně a hustota náboje je na celém povrchu S ($S = 4\pi R^2$) stejná

$$\sigma = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

Na obr. R1-9 je znázorněno elektrické pole nabitě koule. Je patrné, že v okolí koule je stejné radiální pole, jaké by vzniklo, kdyby celý náboj Q byl soustředěn v jejím středu. Velikost intenzity elektrického pole na povrchu koule je tedy

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{R^2} = \frac{|\sigma|}{\epsilon_0}.$$

V blízkosti povrchu nabitého tělesa je intenzita elektrického pole tím větší, čím větší je plošná hustota náboje. S rostoucí vzdáleností od tělesa se intenzita elektrického pole rychle zmenšuje ($E \sim 1/r^2$).

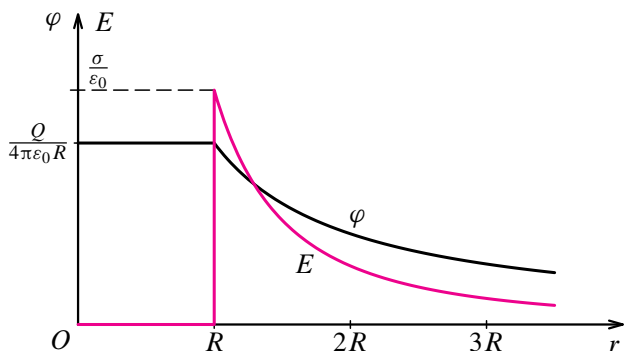


R1-9 Model elektrického pole nabitě vodivé koule

Uvnitř koule se ve všech bodech účinky jednotlivých částí náboje Q ruší a intenzita pole je nulová. Potenciál uvnitř koule je proto všude stejný jako na povrchu. Platí vztah, který jsme odvodili v čl. R1.2:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

S rostoucí vzdáleností od koule se potenciál elektrického pole zmenšuje, ale pozvolněji než intenzita pole ($\varphi \sim 1/r$). Závislost E a φ na vzdálenosti od středu koule je znázorněna grafem na obr. R1-10.

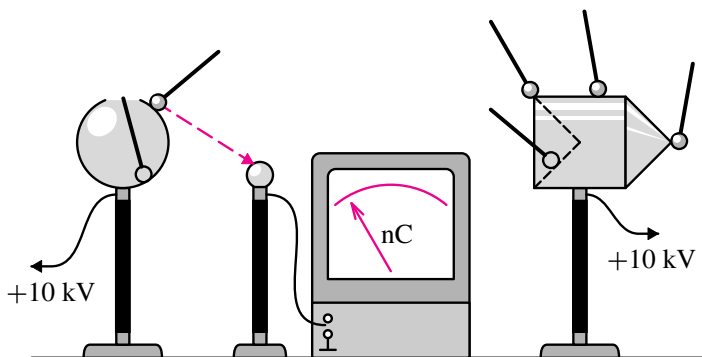


R1-10 Intenzita a potenciál v elektrickém poli nabité vodivé koule

Elektrické pole nabitého tělesa umístěného v dielektriku o relativní permitivitě $\epsilon_r > 1$ je tímto dielektrikem výrazně ovlivněno (viz čl. 1.5).

Náboj na povrchu nepravidelného tělesa

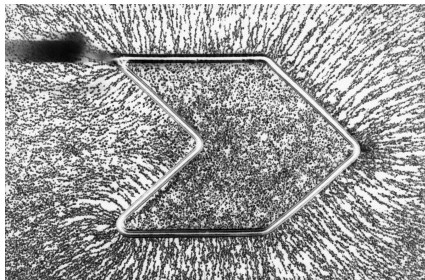
Na povrchu nepravidelných těles je hustota náboje v různých místech povrchu různá. Malá je v dutinách a největší je na hranách a hrotech. O tom se přesvědčíme pokusem podle obr. R1-11. Kulíčkou na izolačním držadle přenášíme do



R1-11 Porovnání plošné hustoty náboje na vnitřním a vnějším povrchu dutého kulového vodiče a na různých místech nepravidelného vodivého tělesa

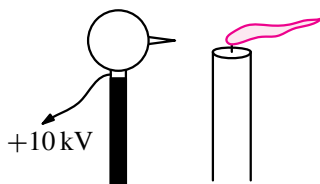
měřiče náboje náboj z různých míst na povrchu nabitých těles a porovnáváme velikost nábojů, které se na kuličku přenesou.

Pole nepravidelného nabitého vodivého tělesa znázorňuje obr. R1-12. Uvnitř tělesa je opět intenzita elektrického pole všude nulová a elektrický potenciál je stejný jako na povrchu, tzn. tvoří ekvipotenciální plochu. O tom svědčí průběh znázorněných siločár, které z povrchu tělesa všude vystupují kolmo.



R1-12 Model elektrického pole nepravidelného vodivého tělesa

V místech s největším zakřivením povrchu, tzn. na hrotech a hranách tělesa, je hustota náboje největší a tomu odpovídá velká intenzita elektrického pole v okolí. Částice vzduchu získávají elektrický náboj souhlasný s nábojem, jaký má hrot, jsou hrotem odpuzovány a strhují sousední molekuly vzduchu, čímž vzniká „elektrický vítr“ (obr. R1-13). Částice s opačným nábojem se přibližují k hrotu a neutralizují jeho náboj. Tento jev označovaný jako „sršení elektřiny“ je příčinou ztrát při přenosu elektrické energie vedením velmi vysokého napětí.

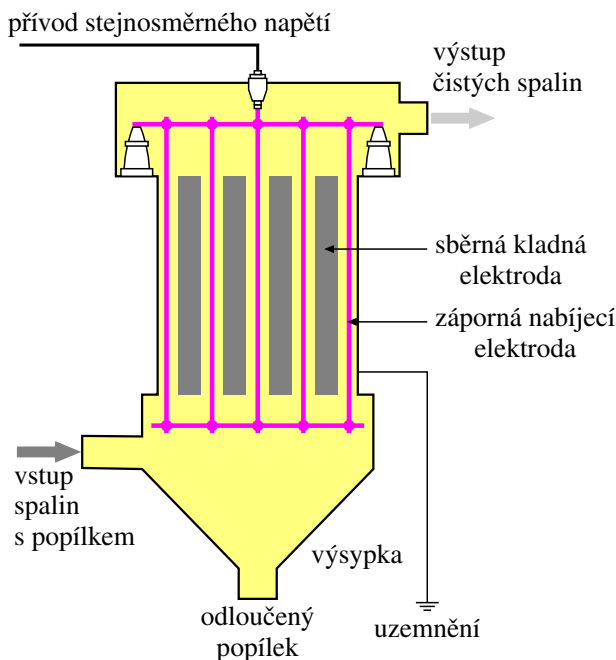


R1-13 „Elektrický vítr“

Velká intenzita elektrického pole v okolí hrotu se uplatňuje také v činnosti *hromosvodu*. Elektrické napětí mezi bouřkovým mrakem a zemí vyvolá vznik nabitých částic v blízkosti hrotu hromosvodu. Vytváří se tak vodivá cesta pro blesk, jehož náboj se vodičem spojeným s hromosvodem přenesou do země, a tím se zneškodní.

Sršení elektřiny v elektrickém poli o velké intenzitě se využívá v *elektrostatických filtrech*, které se v elektrárnách používají k odstraňování popílku z kouřových plynů. Částičky popílku získávají v komoře filtru záporný náboj dotykem nabíjecí elektrody, kterou tvoří drát o malém průměru nabitý na záporný potenciál až -75 kV. Intenzita elektrického pole drátu je tak velká, že dochází k sršení elektřiny a částičky popílku jsou strhávány k sběrné elektrodě,

kde se hromadí. Mechanickým poklepem dochází k uvolnění částic, které padají do spodní části filtru, odkud se odstraňují (obr. R1-14).



R1-14 Elektrostatický filtr kouřových plynů

Skutečnost, že v dutých vodičích je intenzita elektrického pole nulová, zjistil již v 1. polovině 19. století MICHAEL FARADAY . Takovým dutým tělesem může být třeba válecek zhotovený z drátěné sítě, pro který se používá název *Faradayova klec*. Na obr. R1-15 je znázorněn pokus s Faradayovou klecí, která je opatřena na vnějším i vnitřním povrchu proužky alobalu. Jestliže síť nabijeme, odchylují se od pletiva jen vnější proužky. Uvnitř klece elektrické síly na proužky nepůsobí. Princip Faradayovy klece je v technické praxi využíván ke stínění kabelů, které zabráňuje pronikání rušivých napětí do kabelu přenášejícího data. Odstínění elektrického pole slouží



R1-15 Faradayova klec

k ochraně před vysokým napětím, popř. před bleskem (jako Faradayova klec působí např. také karoserie auta) apod.

Úlohy

- 1** Jak je rozložen náboj na nepravidelném vodivém tělese?
- 2** Jaký směr má vektor intenzity elektrického pole v těsné blízkosti vodivého tělesa?
- 3** Na vodivou kouli o poloměru 5 cm přivedeme náboj 5 nC. Jaká bude plošná hustota náboje? Jakou intenzitu bude mít elektrické pole v těsné blízkosti koule? Jaký potenciál bude mít její povrch?

R1.4 Kondenzátory a jejich spojování

V článku 1.6 je uvedeno, že **kapacita izolované vodivé koule** o poloměru R je velmi malá. Potenciál vodivé koule ve vakuu (viz čl. R1.2)

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} = k \frac{Q}{R},$$

kde $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$.

Kapacita koule je tedy

$$C = \frac{Q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 R \approx \frac{R}{9 \cdot 10^9} \text{ F}.$$

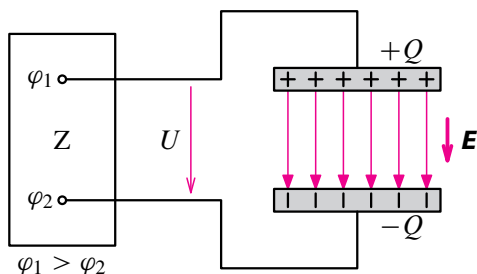
Kdybychom zeměkouli ($R \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$) považovali za izolované vodivé těleso, měla by kapacitu

$$C = \frac{6,4 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9} \text{ F} \approx 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ F} = 700 \mu\text{F}.$$

Vztah pro **kapacitu deskového kondenzátoru** odvodíme následující úvahou.

Připojíme-li deskový kondenzátor ke svorkám zdroje elektrického napětí, je na desce s vyšším potenciálem kladný náboj $+Q$ a na desce s nižším potenciálem stejně velký záporný náboj $-Q$ (obr. R1-16). Mezi deskami vznikne homogenní elektrické pole s intenzitou

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U}{d}.$$



R1-16 Deskový kondenzátor bez dielektrika

Při malé vzdálenosti desek kondenzátoru se pole vně obou desek vzájemně ruší.

Intenzita pole mezi deskami kondenzátoru bez dielektrika a plošná hustota náboje na deskách splňují vztah

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon_0 S}.$$

Porovnáním vztahů pro intenzitu elektrického pole dostaneme

$$\frac{Q}{\varepsilon_0 S} = \frac{U}{d}$$

a kapacita C_0 kondenzátoru bez dielektrika tak je

$$C_0 = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 S}{d}.$$

Vyplníme-li prostor mezi deskami kondenzátoru dielektrikem o relativní permitivitě ε_r , jeho kapacita se zvětší:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} = \varepsilon_r C_0.$$

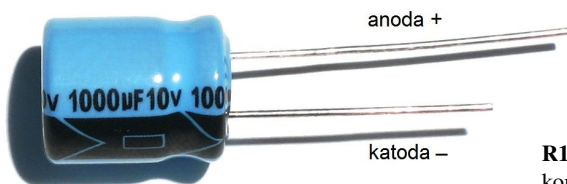
Poznámka: Ze vztahu pro C_0 vyplývá také jednotka permitivity vakua, popř. elektrické konstanty *farad na metr* (viz čl. 1.2):

$$[\varepsilon_0] = \frac{[C_0][d]}{[S]} = \frac{\text{F} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = \text{F} \cdot \text{m}^{-1}.$$

Technické kondenzátory

Ze vztahu pro kapacitu deskového kondenzátoru s dielektrikem je zřejmé, jak lze v technické praxi dosáhnout co největší kapacity. Zvětšení plochy S bylo v čl. 1.6 ukázáno na příkladu *svitkového kondenzátoru*. Jiné řešení představuje *elektrolytický kondenzátor*. Tvoří ho dvě hliníkové fólie, mezi kterými je vrstva

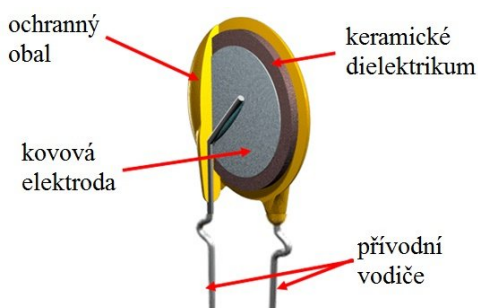
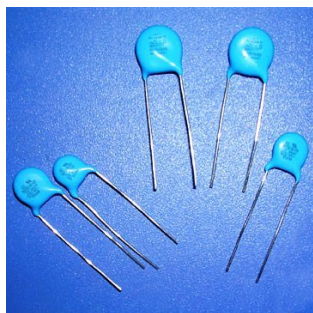
papíru napuštěná vodivou látkou – elektrolytem. Elektrolyt tvoří jednu elektrodu kondenzátoru (*katodu*) a hliníková fólie druhou elektrodu (*anodu*). Obě elektrody jsou odděleny mikroskopicky tenkou vrstvou dielektrika, kterým je oxid hlinitý (Al_2O_3) s velkou relativní permitivitou ($\epsilon_r = 10$). Ten se vytvoří přímo na povrchu hliníkové anody při tzv. formátování kondenzátoru. Díky malé tloušťce dielektrika mají elektrolytické kondenzátory značnou kapacitu (řádově 10^{-6} F až 10^{-2} F) i při malých rozměrech (obr. R1-17).



R1-17 Elektrolytický kondenzátor

Poznámka: Z konstrukce elektrolytického kondenzátoru vyplývají dvě jeho charakteristické vlastnosti: 1. Při zapojování do elektrického obvodu je třeba dbát na polaritu elektrod. Anoda musí mít vždy vyšší potenciál než katoda. Při nesprávné polaritě hrozí nebezpečí zničení kondenzátoru. 2. Vzhledem k mikroskopické tloušťce dielektrika lze elektrolytický kondenzátor nabít jen na malé napětí. Při překročení tzv. průrazného napětí se vrstva dielektrika poruší a kondenzátor se opět zničí.

Kapacitu kondenzátoru lze také zvýšit použitím dielektrika z materiálu, který má co největší relativní permitivitu ϵ_r . To se využívá u miniaturních *keramických kondenzátorů* (obr. R1-18), jejichž dielektrikum tvoří keramický materiál o velké permitivitě (až 10^3), který nahradil dříve používanou slídu. Kondenzátory sice nemají příliš velkou kapacitu, ale na jejich elektrodách může být i poměrně vysoké elektrické napětí (řádově 10^3 V). Používají se ve vysokofrekvenčních elektrických obvodech.



R1-18 Kondenzátory s keramickým dielektrikem

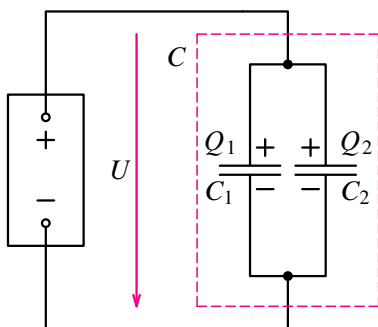
Nové možnosti praktického využití kondenzátorů poskytují tzv. *superkapacitory*, což jsou speciální elektrolytické kondenzátory s mnohonásobně větší kapacitou (až 3 000 F), než je obvyklé u běžného elektrolytického kondenzátoru. Velká kapacita se dosahuje použitím elektrod s pórovitým povrchem, takže jejich plocha je obrovská. Mimořádně malá je také tloušťka dielektrika mezi elektrodami (řádově 10^{-10} m). Velká kapacita umožňuje akumulovat v superkapacitoru značnou elektrickou energii, přičemž se kondenzátor velmi rychle nabíjí. Z nabitého superkapacitoru lze pak po určitou dobu odebírat velký proud. Tím jsou superkapacitory předurčeny např. pro využití v dopravní technice k tzv. *rekuperaci* energie. Motory elektrických vozidel (tramvaje, elektrické lokomotivy, automobily na hybridní pohon) při brzdění produkují elektrickou energii, která je rychle uložena do superkapacitoru a využije se zpětně při velkém odběru proudu v okamžiku akcelerace vozidla. Existují ale i další možnosti využití superkapacitorů, např. jako záložních zdrojů počítačů.

Spojování kondenzátorů

V technické praxi často potřebujeme zvětšit kapacitu v elektrických obvodech s kondenzátory o malé kapacitě. Proto je třeba kondenzátory vhodným způsobem spojit. Používají se dva základní způsoby spojování kondenzátorů – paralelní a sériové.

Paralelní spojení dvou kondenzátorů je na obr. R1-19. Vodiči jsou propojeny vždy dvojice desek kondenzátorů, čímž se zvětší celková plocha nabitých desek, a tedy i kapacita paralelně spojených kondenzátorů. Na vodivě spojených deskách je celkový náboj

$$Q = Q_1 + Q_2 = UC_1 + UC_2 = U(C_1 + C_2) = UC.$$



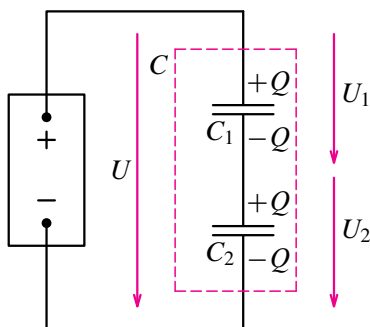
R1-19 Paralelní spojení kondenzátorů

Kapacita paralelně spojených kondenzátorů se zvětší a je

$$C = C_1 + C_2.$$

Sériové spojení kondenzátorů je na obr. R1-20. Jestliže se desky kondenzátorů spojených se zdrojem napětí nabijí náboji $+Q$ a $-Q$, pak se na sousedících deskách elektrostatickou indukcí vytvoří stejně velké opačné náboje. Kondenzátory tedy mají stejné náboje, ale napětí na deskách závisí na kapacitách kondenzátorů. Na dvojici sériově spojených kondenzátorů je napětí

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{Q}{C}.$$



R1-20 Sériové spojení kondenzátorů

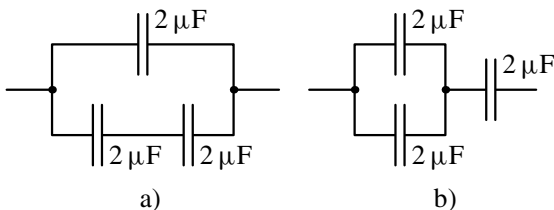
Kapacita sériově spojených kondenzátorů se zmenší, ale lze je nabít na větší napětí. Platí

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{neboli} \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Úlohy

- 1** Jak velký náboj je na osamocené kouli o poloměru 5,0 cm, je-li její potenciál 10 kV? Jaká je její kapacita?
- 2** Trojice kondenzátorů o kapacitě $2 \mu\text{F}$ je spojena podle obr. R1-21a a R1-21b. Určete celkovou kapacitu obou spojení kondenzátorů.

- 3 Jakou celkovou kapacitu C má n stejných kondenzátorů o kapacitě C_1 zapojených a) paralelně, b) sériově?
- 4 Ke kondenzátoru o kapacitě $1,0 \mu\text{F}$ nabitému na napětí 50 V a odpojenému od zdroje připojíme paralelně jiný kondenzátor o kapacitě $4,0 \mu\text{F}$ bez náboje. Jak se změní napětí prvního kondenzátoru? Jak se změní celková elektrická energie soustavy?
- 5 Najděte na internetu informace o typech a konstrukci kondenzátorů používaných v technické praxi a zjistěte, k jakým účelům se používají.



R1-21 K úloze 2

R2 ELEKTRICKÝ PROUD

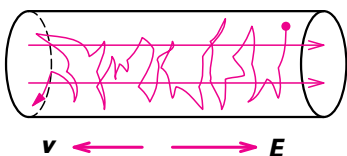
R2.1 Model vedení elektrického proudu v kovovém vodiči

Vedení elektrického proudu v kovových vodičích umožňují elektrony, které jsou v atomech kovu vázány jen slabými silami (valenční elektrony). V krystalu kovu jsou prakticky volné a chaoticky se pohybují mezi kladnými ionty krystalové mřížky. Tento stav vodivostních elektronů se označuje také jako **elektronový plyn** a chaotický pohyb elektronů můžeme přirovnat k tepelnému pohybu molekul plynu. Celkový počet těchto **vodivostních elektronů** je srovnatelný s počtem atomů ve vodiči. Například v mědi, kde na jeden atom připadá přibližně jeden vodivostní elektron, je hustota N_V atomů, tzn. jejich počet v 1 m^3 mědi

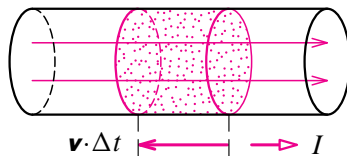
$$N_V = \frac{\rho_{\text{Cu}}}{A_r m_u} = \frac{8930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{63,5 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}.$$

Střední rychlost chaotického pohybu vodivostních elektronů je značná (řádově $10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) a prakticky nezávisí na teplotě.

Připojíme-li vodič ke svorkám stejnosměrného zdroje, vznikne v celém objemu vodiče elektrické pole. Jeho působením je záporně nabitý elektronový plyn unášen proti směru intenzity pole. Vedle chaotického pohybu vodivostních elektronů nastává jejich uspořádaný **unášivý pohyb**, který je podstatou elektrického proudu v kovu (obr. R2-1). Nepravdivosti krystalové mřížky kovu brzdí uspořádaný pohyb elektronů a projevují se navenek jako odpor vodiče.



R2-1 Pohyb vodivostního elektronu v elektrickém poli uvnitř vodiče



R2-2 Elektrický proud jako uspořádaný pohyb elektronového plynu

Jestliže hustota vodivostních elektronů je N_V a rychlost jejich unášivého pohybu má velikost v (obr. R2-2), projde průřezem vodiče S za dobu Δt náboj

$$\Delta Q = S v \Delta t N_V e$$

a příslušný elektrický proud je

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = S v N_{Ve}.$$

Rychlost uspořádaného pohybu elektronového plynu (*unášivá rychlost*) je na rozdíl od rychlosti tepelného pohybu elektronů velmi malá. Například pro měděný vodič při proudové hustotě

$$\frac{I}{S} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2},$$

která je v technické praxi běžná (odpovídá přibližně proudu 2 A v měděném drátu o průměru 1 mm), dostáváme

$$\begin{aligned} v &= \frac{I}{S N_{Ve}} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = \\ &= 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 0,2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}. \end{aligned}$$

Elektrický odpor kovových vodičů je důsledkem srážek elektronů s ionty krystalové mřížky, které mají mnohem větší hmotnosti. Při srážkách se elektrony od iontů pružně odrážejí a předávají jim současně část své energie. U čistých kovů za obvyklých teplot (přibližně 300 K) tento děj ovlivňují tepelné kmity iontů mřížky. S rostoucí teplotou se amplituda kmitů zvětšuje a srážky iontů s elektrony jsou častější – odpor vodiče roste a unášivá rychlost se zmenšuje. Teplotní součinitel odporu má u čistých kovů hodnotu okolo $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Ve slitinách kovů se mnohem více uplatňují trvalé nepravidelnosti mřížky. Rezistivita slitin je proto větší než u čistých kovů, ze kterých je slitina vytvořena. Teplotní součinitel odporu těchto slitin je naopak malý (viz např. konstantan, tab. 2-2, čl. 2.3).

Supravodivost

Zkoumání elektrických vlastností kovů při termodynamických teplotách blízkých 0 K vedlo k objevu supravodivosti – jednoho z nejprekvapivějších jevů ve fyzice pevných látek. Holandský fyzik HEIKE KAMERLINGH-ONNES (1853–1926) v roce 1908 zkapalnil helium, jehož teplota varu je 4,2 K. Při experimentech s kapalným heliem r. 1911 zjistil, že odpor rtuti ochlazené pod kritickou teplotu 4,15 K klesá náhle na neměřitelnou hodnotu. U olova nastává supravodivý stav už při poklesu teploty pod 7,2 K. U mědi, železa a stříbra se supravodivost nezjistila.

U supravodičů se vodivostní elektrony spojují do párů a pohybují se bez

jakýchkoliv srážek s krystalovou mříží. Elektrický proud vyvolaný v prstenci ze supravodiče by se udržel bez pozorovatelného útlumu po dobu několika let.

V supravodivých kabelech ze slitin NbTi nebo Nb₃Sn chlazených kapalným heliem je možno dosáhnout proudové hustoty větší než $10^3 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Toho se využívá ve speciálních elektromagnetech k získání velmi silných magnetických polí, například pro potřeby výzkumu elementárních částic. Intenzivně se studují možnosti využití supravodičů při výrobě a přenosu elektrické energie, ale i v mikroelektronice.

Převrat v oblasti supravodivých materiálů nastal v roce 1987, kdy byla objevena keramická sloučenina, u níž supravodivý stav vzniká již při teplotě kolem 90 K. To znamená, že k získání supravodivosti látky není třeba používat nákladné zařízení s kapalným heliem, ale lze použít snadno dostupný kapalný dusík s kritickou teplotou 77 K. Tím se otevřely další možnosti využití supravodivosti v technické praxi. Např. byly zkonstruovány supravodivé elektromagnety s tak silným magnetickým polem, že se v něm v malé vzdálenosti nad magnety vznášejí a pohybuje bez tření velkou rychlostí speciální vlak. Např. letiště v Šanghaji spojuje s centrem města vlak Maglev, jehož název vznikl spojením slov *magnetická levitace* (obr. R2-3). Vlak může dosáhnout rychlost přesahující $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.



R2-3 Japonský vlak Maglev vznášející se v magnetickém poli supravodivých magnetů

Úlohy

- 1** Jak závisí rychlost uspořádaného pohybu elektronů při určitém proudu na průřezu vodiče? Porovnejte elektrický proud v kovovém vodiči s pohybem kapaliny v potrubí.
- 2** Vysvětlete, proč se žárovka připojená ke zdroji vodiči dlouhými několik metrů rozsvítí okamžitě po uzavření obvodu, když rychlost uspořádaného pohybu elektronů je menší než $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

- 3 Na internetu najdete informace o možnostech praktického využití supravodivosti.

R2.2 Zdroje elektrického napětí

Druhy zdrojů elektrického napětí

Zdroje elektrického napětí se liší podle toho, jaká energie se v nich přeměňuje na energii elektrickou:

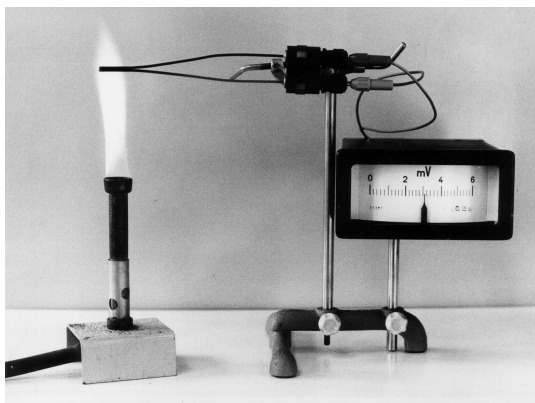
a) **Elektrochemický článek**, označovaný také jako galvanický článek, je založen na využití energie uvolněné při chemické reakci kovových elektrod s vodivou kapalinou – elektrolytem (viz čl. 4.3). Tento typ zdroje napětí je v podobě tzv. monočlánků, popř. baterií široce využíván zejména k napájení přenosných elektronických zařízení.

b) **Fotoelektrický zdroj napětí** využívá přeměnu energie světla ve speciální polovodičové součástce – *fotočlátku*. Fotočlánky jsou základními prvky tzv. *fotovoltaických* nebo *solárních panelů*, které jsou významnými alternativními zdroji elektrické energie (obr. R2-4).



R2-4 Solární panely

c) **Termoelektrický zdroj napětí** využívá *termoelektrický jev*. Spojíme-li dva různé kovové vodiče, přejde část elektronů z jednoho kovu do druhého a na spoji obou kovů vznikne malé kontaktní napětí, jehož velikost závisí na teplotě spoje. Takovou dvojici vhodně zvolených kovů nazýváme *termočlánek*. Na obr. R2-5 je zobrazena demonstrace vzniku elektrického napětí v termočlátku tvořeném dvojicí kovů měď a konstantan (slitina mědi a niklu). Spoj termočlátku zahřejeme plamenem a vzniklé napětí měříme voltmetrem připojeným



R2-5 Demonstrace vzniku termoelektrického napětí

k chladnějšímu konci termočláнку. Termočláanky se využívají zejména v měřicí technice jako čidla teploty.

d) **Elektrodynamické zdroje napětí** využívají jev *elektromagnetické indukce*, při němž se elektrická energie získává přeměnou mechanické energie vodiče, který se pohybuje v magnetickém poli (viz kap. 6). Na tomto principu se získává elektrická energie v elektrárnách, kde je základním technickým zařízením *generátor střídavého proudu* (čl. 8.1).

Spojování zdrojů napětí

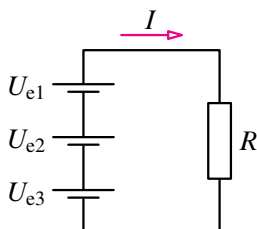
Jistě jste si všimli, že v řadě elektronických přenosných zařízení (rozhlasových přístrojů, fotoaparátů, ovladačů televizoru) je třeba pro zajištění jejich funkce vložit do přístroje dva nebo i více tzv. **monočláнкů**. Je tomu tak proto, že napětí jednoho monočláнку je příliš malé a k zajištění funkce zařízení nestačí. Větší napětí, popř. větší proud dostaneme vzájemným spojením monočláнкů nebo jiných zdrojů napětí a toto spojení zdrojů tvoří **baterii**.

Zdroje napětí spojujeme podobně jako rezistory dvojím způsobem. V praxi častější je **spojení za sebou (sériově)**, kdy spojujeme vždy kladný pól jednoho zdroje se záporným pólem zdroje následujícího (obr. R2-6). **Výsledné napětí celé baterie se pak rovná součtu napětí jednotlivých zdrojů**, tedy

$$U_e = U_{e1} + U_{e2} + U_{e3}.$$

Při tomto spojení prochází všemi zdroji stejný proud.

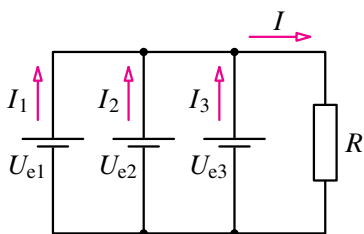
Při **spojení vedle sebe (paralelně)**, spojujeme jedním vodičem všechny



R2-6 Sériové spojení zdrojů elektrického napětí

kladné póly a druhým vodičem všechny záporné póly zdrojů (obr. R2-7). Paralelně můžeme spojovat jen zdroje o stejném napětí. Výsledné napětí baterie se rovná napětí jednoho zdroje, ale **z baterie můžeme odebírat proud, který se rovná součtu proudů z jednotlivých zdrojů**, tedy

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$



R2-7 Paralelní spojení zdrojů elektrického napětí

Spojením zdrojů za sebou získáváme větší napětí, spojením zdrojů vedle sebe větší proud.

Úlohy

- 1 Vytvořte jednoduchý galvanický článek tak, že dva plíšky – měděný a zinkový – zabodnete do citronu nebo jablka. Změřte napětí článku a určete polaritu plíšků.
- 2 V MFChT nebo na internetu najděte termoelektrické napětí pro dvojici kovů termočláнку použitého k demonstraci na obr. R2-5 a určete přibližnou hodnotu teplotního rozdílu mezi zahřátým a chladným koncem termočláнку pro napětí odečtené na stupnici voltmetru.
- 3 Na příkladu ovladače televizoru, popř. jiného elektronického přístroje si ověřte, jak jsou monočláanky v ovladači spojeny. Zjistěte napětí jednoho monočláanky a určete napájecí napětí ovladače.

- 4 Rozeberte starou plochou baterii 4,5 V a prohlédněte si, jak jsou jednotlivé články spojeny.

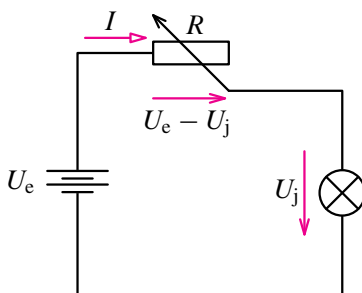
R2.3 Příklady sériově a paralelně spojených obvodů

Regulace proudu reostatem

K regulaci proudu v elektrickém obvodu se používají rezistory s měnitelným odporem. Pro měřicí účely se používají větší rezistory označované jako **reostaty** (obr. R2-8). Tvoří je keramický válec, na němž je navinut odporový drát, a konce drátu jsou připojeny ke svorkám. Rovnoběžně s osou válce je vodivá tyč, která nese *sběrač* s izolačním držadlem (někdy se mu říká *jezdec*). Tyč je rovněž spojena s výstupní svorkou reostatu. Pohybem sběrače měníme délku odporového drátu zařazeného do elektrického obvodu, a tím měníme i celkový odpor obvodu. U každého reostatu je výrobcem stanoven největší proud, který může vinutím reostatu trvale procházet, aniž by došlo k jeho poškození.



R2-8 Laboratorní reostat



R2-9 Regulace proudu a napětí reostatem

Při regulaci proudu spojujeme reostat se spotřebičem sériově podle obr. R2-9 (z obrázku je také patrná schematická značka reostatu).

Příklad 1

Žárovku s jmenovitými (tzn. výrobcem určenými) hodnotami napětí a proudu 6,3 V, 0,30 A máme připojit k baterii o elektromotorickém napětí 12,0 V (vnitřní odpor baterie je zanedbatelný). Jak nastavíme odpor reostatu, aby byly jmenovité hodnoty dodrženy?

Řešení

$$U_j = 6,3 \text{ V}, I_j = 0,30 \text{ A}, U_e = 12,0 \text{ V}; R = ?$$

Aby na žárovce bylo napětí U_j , musí být při jmenovitém proudu I_j na odporovém vinutí napětí $U_e - U_j$. Pro odpor reostatu pak vychází

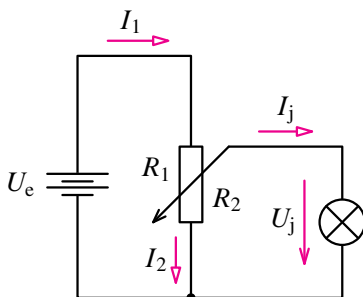
$$R = \frac{U_e - U_j}{I_j} = \frac{12,0 \text{ V} - 6,3 \text{ V}}{0,30 \text{ A}} = \frac{5,7 \text{ V}}{0,3 \text{ A}} = 19 \, \Omega.$$

Změnou odporu reostatu můžeme proud procházející obvodem a napětí na spotřebiči regulovat. Nejmenší hodnoty proudu dosáhneme při plném odporu reostatu.

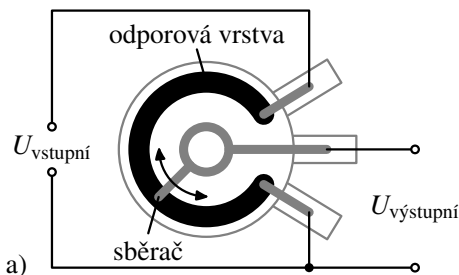
Regulace napětí potenciometrem

Pro regulaci napětí využijeme všechny tři vývody reostatu a vytvoříme obvod, který je kombinací sériového a paralelního spojení rezistorů (obr. R2-10). Označujeme ho jako **potenciometrické zapojení rezistorů**, nebo krátce **potenciometr**. V tomto zapojení můžeme spojitě měnit výstupní napětí od nuly až do hodnoty svorkového napětí zdroje.

Termínem potenciometr označujeme také součástku široce využívanou v konstrukci elektrických a elektronických zařízení. Technické potenciometry mají různou konstrukci, celkový odpor i jmenovitý výkon, který může mít proud procházející potenciometrem. Nejčastěji tvoří potenciometr kruhová odporová vrstva, po níž se pohybuje sběrač (obr. R2-11 a). Konce odporové vrstvy a přívod ke sběrači tvoří tři charakteristické body, jimiž se potenciometr připojuje do elektrického obvodu. Příklad potenciometru je na obr. R2-11b.



R2-10 Regulace napětí potenciometrem



R2-11 Potenciometr

Příklad 2

Pro stejnou žárovku a baterii jako v příkladu 1 máme zvolit nastavení sběrače potenciometru o celkovém odporu $100\ \Omega$ tak, aby na žárovce opět bylo jmenovité napětí $6,3\ \text{V}$ a procházel jí proud $0,30\ \text{A}$.

Řešení

$$U_j = 6,3\ \text{V}, I_j = 0,30\ \text{A}, U_e = 12,0\ \text{V}; R_p = 100\ \Omega; R_1 = ?, R_2 = ?$$

Jak je patrné z obr. R2-10, sběrač potenciometru je v poloze, která rozděljuje celkový odpor R potenciometru na dvě části: $R = R_1 + R_2 = 100\ \Omega$. Při uvedené poloze sběrače platí

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{U_j}{R_2}, & I_1 &= I_j + \frac{U_j}{R_2}, \\ U_e - U_j &= (R_p - R_2)I_1 = (R_p - R_2) \left(I_j + \frac{U_j}{R_2} \right), \\ (U_e - U_j)R_2 &= (R_p - R_2)(R_2 I_j + U_j). \end{aligned}$$

Po dosazení číselných hodnot (pro zjednodušení je zapisujeme bez jednotek) dostáváme

$$\begin{aligned} 5,7(R_2) &= (100 - R_2)(0,3R_2 + 6,3), \\ 0,3R_2^2 - 18R_2 - 630 &= 0, \\ R_2 &= 84,5 \approx 85. \end{aligned}$$

(Záporný kořen rovnice $-24,8$ úloze nevyhovuje.)

Potenciometr rozdělíme sběračem na úseky o odporech $R_1 = 15\ \Omega$, $R_2 = 85\ \Omega$.

Úlohy

- 1** Porovnejte regulaci proudu reostatem a potenciometrem. Jaké jsou přednosti a nedostatky obou způsobů?
- 2** Ze zdroje o elektromotorickém napětí $24\ \text{V}$ a vnitřním odporu $2,4\ \Omega$ napájíme spotřebič o odporu $37\ \Omega$. Regulaci proudu provádíme reostatem o odporu $100\ \Omega$. Nakreslete schéma obvodu. V jakých mezích můžeme nastavit proud procházející spotřebičem?
- 3** Reostat o odporu $1\ 100\ \Omega$ je vyroben z konstantanového drátu o průměru $0,30\ \text{mm}$. Určete délku vodiče. Maximální proudové zatížení je $0,50\ \text{A}$. Jaká je při tomto proudu intenzita elektrického pole ve vodiči?

R2.4 Kirchhoffovy zákony

Složitější elektrické obvody nazýváme **elektrické sítě**. Místo, v němž se stýkají nejméně tři vodiče, nazýváme **uzel**. Vodivé spojení sousedních uzlů je **větev**. Příkladem může být obr. 2-14 v čl. 2.6, který představuje paralelní spojení tří rezistorů. Obvod má dva uzly a tři větve. Do uzlu vlevo vstupuje proud I a z uzlu vystupují proudy I_1 , I_2 , I_3 . Poněvadž v uzlu se náboje nemohou hromadit, bude celkový proud do uzlu vstupující stejný jako součet proudů, které z uzlu vystupují: $I = I_1 + I_2 + I_3$.

Při řešení elektrických sítí využíváme dva zákony, které objevil G. R. KIRCHHOFF . První Kirchhoffův zákon se týká uzlů a proudů, které do uzlu vstupují, popř. z něho vystupují. Druhý Kirchhoffův zákon vyjadřuje poznatek, že v uzavřeném obvodu, čili v tzv. **smyčce** elektrické sítě, kterou v rozvětveném obvodu vyčleníme, je celkový součet změn elektrického potenciálu nulový.

1. Kirchhoffův zákon

Algebraický součet proudů v uzlu je nulový. Jestliže se v uzlu stýká n větví, platí

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

2. Kirchhoffův zákon (pro jednoduchou smyčku elektrické sítě)

V uzavřené smyčce je součet napětí na rezistorech stejný jako součet elektromotorických napětí zdrojů. Jestliže se ve smyčce nachází n rezistorů a m zdrojů, platí

$$\sum_{k=1}^n R_k I_k = \sum_{j=1}^m U_{ej}.$$

V následujících příkladech a úlohách se omezíme na sítě, v nichž jsou jen zdroje napětí a rezistory. Proudů a napětí v těchto obvodech mají ustálenou hodnotu. Řešení sítí spočívá v tom, že obvykle známe napětí zdrojů a odpory rezistorů. Úkolem je určit proudy v jednotlivých větvích a napětí na rezistorech. Můžeme také při známých hodnotách napětí a proudů určovat hodnoty neznámých odporů. Při řešení úloh je třeba dodržovat postup, který je vloženo v příkladu 1.

Příklad 1

Postup při praktickém použití Kirchhoffových zákonů si ukážeme na příkladu elektrické sítě se dvěma uzly a třemi větvemi (obr. R2-12). Známe elektromotorická napětí zdrojů a odpory rezistorů, hledáme proudy ve větvích a napětí mezi uzly.

a) Nejprve zvolíme označení a kladnou orientaci proudů v jednotlivých větvích (bez ohledu na to, že skutečnou orientaci zatím neznáme).

b) Při sestavování rovnice na základě 1. Kirchhoffova zákona bereme proudy, jejichž vyznačený směr je orientován do uzlu, s kladným znaménkem, ostatní se znaménkem záporným. Například pro uzel *B* můžeme psát

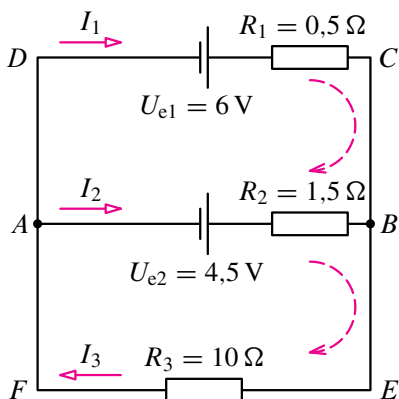
$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (2,1)$$

c) Při sestavování rovnice na základě 2. Kirchhoffova zákona vybereme v síti uzavřenou smyčku a zvolíme v ní směr obíhání (čárkované šipky na obr. R2-12). Elektromotorická napětí orientovaná souhlasně se směrem obíhání a napětí na rezistorech, kde zvolená orientace proudu souhlasí se směrem obíhání, píšeme s kladným znaménkem, ostatní se znaménkem záporným. Například pro smyčku *ADCB*A platí

$$R_1 I_1 - R_2 I_2 = U_{e1} - U_{e2} \quad (2,2)$$

a pro smyčku *ABEFA*

$$R_2 I_2 + R_3 I_3 = U_{e2}. \quad (2,3)$$



R2-12 Příklad jednoduché sítě

d) Dále pracujeme jen s číselnými hodnotami veličin. Dosazením známých číselných hodnot do veličinových rovnic (2,1), (2,2) a (2,3) dostáváme soustavu číselných rovnic*

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 - I_3 &= 0, \\ 0,5I_1 - 1,5I_2 &= 1,5, \\ 1,5I_2 + 10I_3 &= 4,5. \end{aligned}$$

Soustava má číselné řešení

$$I_1 = \frac{96}{83} \doteq 1,16, \quad I_2 = -\frac{51}{83} \doteq -0,61, \quad I_3 = \frac{45}{83} \doteq 0,54.$$

e) Získané číselné hodnoty doplníme příslušnými jednotkami. Hledané proudy jsou

$$I_1 = 1,16 \text{ A}, \quad I_2 = -0,61 \text{ A}, \quad I_3 = 0,54 \text{ A}.$$

Záporný výsledek u proudu I_2 znamená, že skutečný směr proudu I_2 je opačný než původně vyznačený ve schématu. Napětí mezi uzly B , A je orientováno stejně jako proud I_3 a má hodnotu $U_{BA} = R_3 I_3 = 5,4 \text{ V}$.

Příklad 2

K obr. R2-12 se váže i příklad 2:

Jak bychom museli změnit odpor rezistoru R_3 , aby jím procházel proud 5 A? Jaké proudy by pak procházely rezistory R_1 , R_2 ? Hodnoty U_{e1} , U_{e2} , R_1 , R_2 zůstávají beze změny.

Při řešení úlohy opět použijeme soustavu rovnic (2,1), (2,2), (2,3). Dosazením číselných hodnot dostáváme soustavu číselných rovnic

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= 5, \\ 0,5I_1 - 1,5I_2 &= 1,5, \\ 1,5I_2 + 5R_3 &= 4,5. \end{aligned}$$

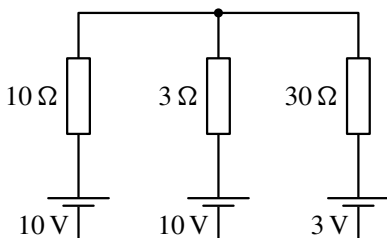
Řešením dostaneme číselné hodnoty $I_1 = 4,5$, $I_2 = 0,5$, $R_3 = 0,75$.

Odpor rezistoru musíme zmenšit na $R_3 = 0,75 \Omega$. Hledané proudy mají hodnoty $I_1 = 4,5 \text{ A}$, $I_2 = 0,5 \text{ A}$ a jejich směr souhlasí se směrem vyznačeným ve schématu.

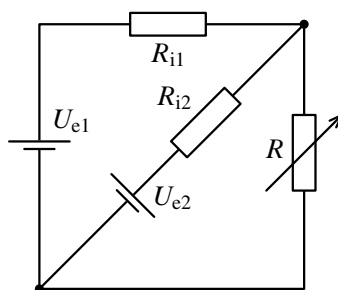
* Pro zjednodušení použijeme symboly I_1 , I_2 a I_3 ve významu číselných hodnot $\{I_1\}$, $\{I_2\}$ a $\{I_3\}$.

Úlohy

- 1 Zopakujte Kirchhoffovy zákony a vysvětlete pravidla pro jejich použití při řešení elektrické sítě.
- 2 Řešte síť na obr. R2-13, ve které jsou tři rezistory a tři ideální zdroje napětí. Jaké proudy procházejí větvemi? Jaké napětí je na jednotlivých rezistorech a mezi uzly?
- 3 V síti na obr. R2-14 platí $U_{e1} = 4,50 \text{ V}$, $R_{i1} = 1,50 \Omega$, $U_{e2} = 3,00 \text{ V}$, $R_{i2} = 0,30 \Omega$. Jaký musí být odpor R , aby oba zdroje dodávaly stejný proud?



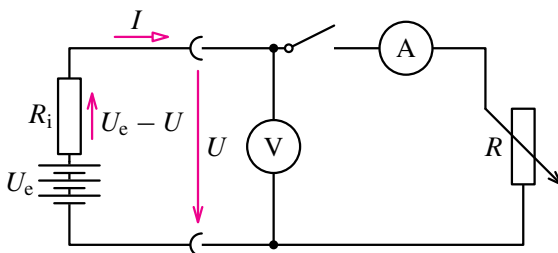
R2-13 K úloze 2



R2-14 K úloze 3

R2.5 Zatěžovací charakteristika zdroje a jeho účinnost

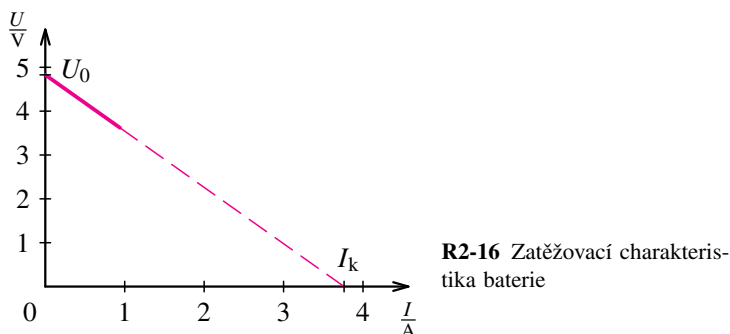
Vyjdeme z pokusu, jehož schéma je na obr. R2-15. K pólům ploché baterie připojíme nejprve voltmetr a změříme napětí nezatíženého zdroje U_0 , které nazýváme **napětí naprázdno**. (Nepatrný proud procházející voltmetrem zanedbáváme.) Z čl. 2.2 víme, že napětí naprázdno je stejné jako elektromotorické napětí zdroje $U_0 = U_e$.

R2-15 Měření
zatěžovací cha-
rakteristiky zdroje

Pak pomocí spínače spojíme svorky zdroje přes ampérmetr a reostat o odporu $100\ \Omega$ a zmenšováním odporu reostatu zvětšujeme proud I v obvodu až do $1\ \text{A}$. Současně měříme svorkové napětí U a výsledky měření zapíšeme do tabulky R2-1. Ze získaných hodnot sestrojíme graf závislosti svorkového napětí na odebíraném proudu – **zatěžovací charakteristiku zdroje** (obr. R2-16).

Tabulka R2-1

$\frac{I}{\text{A}}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\frac{U}{\text{V}}$	4,80	4,67	4,55	4,42	4,30	4,17	4,04	3,92	3,80	3,67	3,55



Zatěžovací charakteristika baterie použité k experimentu má lineární průběh. S rostoucím proudem se svorkové napětí zmenšuje a rozdíl $U_e - U$ je přímo úměrný proudu ve spotřebiči. Reálnou baterii jsme nahradili sériovým spojením ideálního zdroje s konstantním napětím U_e a vnitřního odporu zdroje R_i . Lineární průběh zatěžovací charakteristiky odpovídá lineárnímu vztahu

$$U = U_e - R_i I.$$

Čím větší proud obvodem prochází, tím větší je napětí na vnitřním odporu a svorkové napětí zdroje se zmenšuje. Při zkratku je svorkové napětí $U = 0$ a zatěžovací charakteristika protíná osu proudu v bodě, který odpovídá zkratovému proudu I_k (viz čl. 2.4).

Zmenšujeme-li odpor R spotřebiče připojeného ke zdroji, zvětšuje se proud a elektrický výkon ve spotřebiči

$$P = UI = (U_e - R_i I)I = U_e I - R_i I^2.$$

Tato závislost výkonu na velikosti proudu je kvadratická a jejím grafem je parabola (obr. R2-17). Výkon elektrického proudu tedy neroste pro všechny hodnoty proudu ve spotřebiči, ale po dosažení určité hodnoty se výkon zmenšuje. Z grafu vidíme, že výkon elektrického proudu je maximální, když

$$I = \frac{I_k}{2} = \frac{U_e}{2R_i}.$$

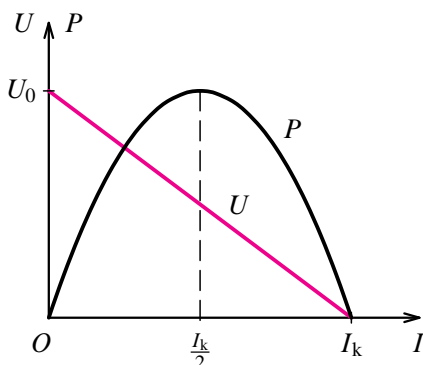
Tomu odpovídá případ, kdy odpor spotřebiče je roven vnitřnímu odporu zdroje ($R = R_i$). Účinnost přeměny elektrické energie v obvodu (viz čl. 2.7)

$$\eta = \frac{P}{P_0}.$$

Dosadíme výkon ve spotřebiči $P = UI = R_i I^2$ a výkon elektrického proudu v celém obvodu $P_0 = U_e I = 2R_i I^2$ a určíme účinnost při maximálním výkonu:

$$\eta = \frac{R_i I^2}{2R_i I^2} = 0,5 = 50\%.$$

Jednoduché elektrické obvody, např. v kapesní svítilně, v automobilu apod., jsou navrženy tak, aby se dosáhlo rozumného kompromisu mezi maximální účinností a maximálním výkonem.



R2-17 Zatěžovací charakteristika zdroje a graf závislosti elektrického výkonu ve spotřebiči na proudu v obvodu

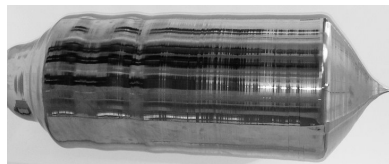
Úlohy

- 1** Nakreslete zatěžovací charakteristiku zdroje s elektromotorickým napětím 20 V a vnitřním odporem 2,5 Ω .
- 2** Vnitřní odpor ploché baterie se stářím zvětšuje. Jak se to projevuje na zatěžovací charakteristice?
- 3** V praxi se používají elektronické zdroje stejnosměrného napětí vybavené stabilizací svorkového napětí, které se do nastavitelné hodnoty odebíraného proudu napětí prakticky nemění a po překročení této hodnoty se svorkové napětí skokem změní na nulovou hodnotu. Jak by vypadala zatěžovací charakteristika takového zdroje?

R3 ELEKTRICKÝ PROUD V POLOVODIČÍCH

R3.1 Základy technologie výroby polovodičových součástek

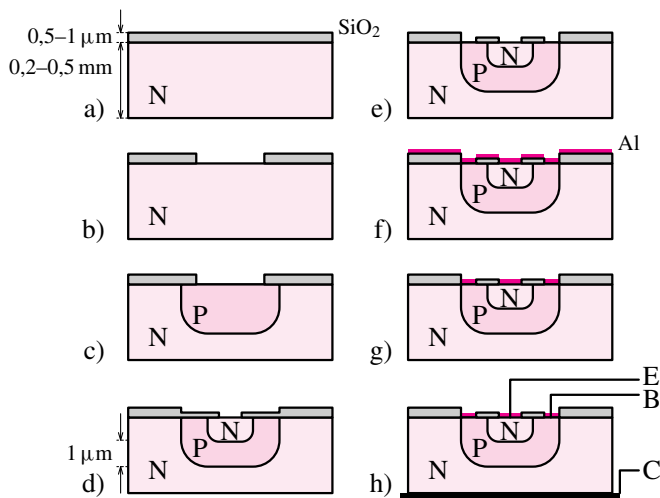
V současnosti se jako základní materiál pro výrobu polovodičových součástek používá křemík. Chemický prvek křemík je sice hlavní složkou zemské kůry, ale jeho příprava pro potřeby elektroniky není snadná. Vyskytuje se totiž ve sloučeninách a čistý křemík se vyrábí náročným technologickým postupem. Při něm jsou jednak odstraněny příměsi všech ostatních prvků, jednak je třeba získat monokrystal s dokonalou vnitřní



R3-1 Monokrystal křemíku

strukturou. Monokrystalů velkých rozměrů (obr. R3-1) se řezou na tenké destičky, a ty jsou základem pro výrobu polovodičových součástek.

Jako příklad technologie, která se používá k výrobě např. tranzistorů, popíšeme tzv. *planární technologii*. Její název plyne z toho, že všechny postupy, jimiž se vytvářejí v křemíku oblasti s různým typem vodivosti, umožňují připojení k vnitřní struktuře součástky na její horní ploše. Přehledně je postup výroby tranzistoru znázorněn na obr. R3-2.

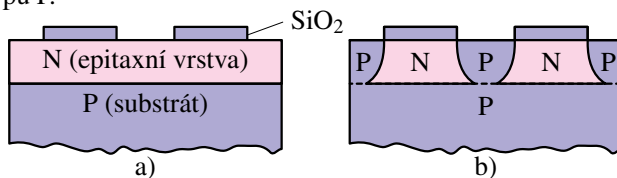


R3-2 Postup výroby tranzistoru

Základ tranzistoru tvoří destička s vodivostí typu N. Na ní se oxidací vytvoří tenká vrstva SiO_2 (a), která má vlastnosti izolantu. Pak se v oxidové vrstvě vyleptá okénko (b) a jako další operace probíhá tzv. *dopování*, čili řízená difuze příměsového prvku, kterým je bor. Tak se vytvoří báze tranzistoru s vodivostí typu P (c). Povrch destičky se znovu zoxiduje, leptáním se vytvoří další okénko a difuzí par fosforu se vytvoří emitor s vodivostí typu N (d). Následuje nová oxidace a v oxidové vrstvě se vytvoří okénka pro přívody k emitoru a bázi (e). Na destičku se ve vakuu nanese vrstva hliníku (f), která se zčásti odleptá. Vzniknou vodivé ostrůvky pro připojení přírodních vodičů (g). Základní destičku tvoří kolektor tranzistoru (h).

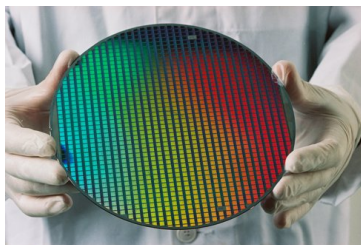
K přesnému vytváření okének pro difuzi příměsových prvků se používá technika *fotolitografie*. Její princip spočívá v tom, že se na vrstvu SiO_2 na povrchu křemíkové destičky nanese fotolak citlivý na ultrafialové záření. Na vzniklou vrstvu se promítne maska vymezující okénka pro difuzi. V osvětlených místech se lak při dalším chemickém zpracování odstraní a leptáním se obnaží povrch destičky pro následující difuzi příměsí.

Novější technologie, která se používá k výrobě integrovaných obvodů, je tzv. *epitaxně planární technologie* (obr. R3-3). Podstata *epitaxe* spočívá v tom, že se na základní destičce zvané *substrát* nechá při vysoké teplotě vyrůst vrstvička s opačným typem vodivosti. Takto upravená destička se pak fotolitograficky opatří obrazcem pro dopování borem, čímž se vytvoří ostrůvky s vodivostí typu P.



R3-3 K výkladu epitaxně planární technologie

Naznačeným postupem se v křemíkové destičce, tzv. *waferu* (z angl. *wafer* oplatek) o průměru až 300 mm a tloušťce 0,8 mm vytvoří stovky stejných integrovaných obvodů se složitou strukturou (obr. R3-4). Po kontrolách a testování se jednotlivé obvody oddělí jako tzv. *čipy*, opatří se přívody a ochranným pouzdrem.



R3-4 Wafer

R3.2 Polovodičové diody

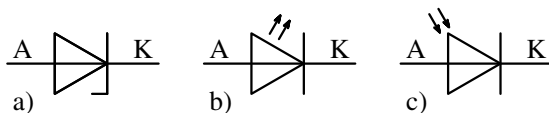
Pro praktické využití polovodičové diody jsou důležité vlastnosti přechodu PN, tenké vrstvy oddělující část krystalu polovodiče s vodivostí typu P od části, která má vodivost typu N. Vlivem difuze elektronů do oblasti s vodivostí typu P a děr do oblasti s vodivostí typu N se oblast přechodu PN ochuzuje o nosiče náboje a její odpor roste. V čl. 3.3 jsou popsány děje na přechodu při zapojení diody v propustném a závěrném (nepropustném) směru.

Při zapojení v závěrném směru, kdy je oblast P připojena k zápornému pólu zdroje, mohou procházet přechodem PN jen menšinové nosiče proudu, tzn. elektrony z oblasti P do oblasti N. Jestliže bude napětí v nepropustném směru dostatečně velké, mohou elektrony v oblasti přechodu PN získat takovou energii, že při srážkách s atomy krystalové mříže polovodiče z ní vyraží další elektrony. Současně vznikají také díry, které se pohybují opačným směrem. Počet nosičů náboje prudce narůstá a tomu odpovídá narůstající proud v nepropustném směru. Tento děj se nazývá **lavinový jev**. Současně se přechod značně zahřívá, takže může dojít i k tepelné ionizaci atomů a dochází k nevratným změnám ve struktuře polovodiče. Po překročení mezního, tzv. *průrazného napětí* U_{BR} (viz čl. 3.3, obr. 3-17) dochází k *destruktivnímu průrazu* přechodu PN, což vede ke zničení diody.

Polovodičová dioda popsaná v čl. 3.3 se používá především k usměrňování střídavého proudu (*usměrňovací dioda*, čl. 7.8). Vlastnosti přechodu PN jsou využívány i v dalších typech diod. Jsou to např.:

1. Zenerova dioda,
2. světelná dioda (LED),
3. fotodioda, fotovoltaiický článek.

Schematické značky těchto diod jsou na obr. R3-5.



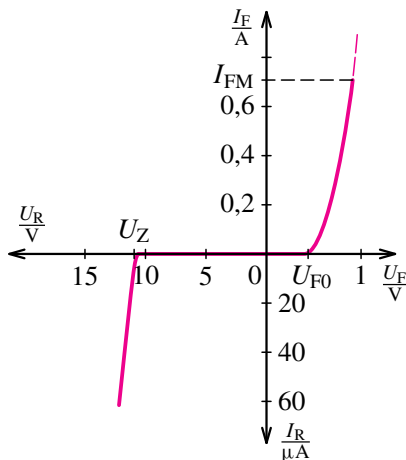
R3-5 Polovodičové diody: a) Zenerova dioda, b) světelná dioda, c) fotodioda

Zenerova dioda

Praktické využití má **Zenerův jev**, který vzniká zejména v diodách s úzkým přechodem PN ($< 0,3 \mu\text{m}$). V tomto případě má elektrické pole v oblasti

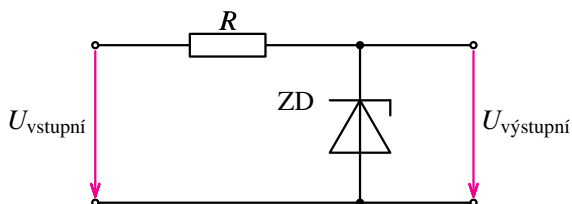
přechodu PN značnou intenzitu již při malém napětí v nepropustném směru. Vlivem elektrostatických sil dochází k ionizaci atomů v oblasti přechodu PN a ke vzniku dalších nosičů náboje.

Vodivost přechodu PN opět prudce roste, avšak dochází k *nedestruktivnímu průrazu* a po snížení napětí se činnost přechodu PN obnoví. K Zenerovu jevu dochází při překročení tzv. *Zenerova napětí* U_Z , které má např. u křemíkové diody hodnotu $U_Z > 5 \text{ V}$. Z voltampérové charakteristiky Zenerovy diody (obr. R3-6) je patrné, že po překročení tohoto napětí se proud prudce zvětšuje.



R3-6 Voltampérová charakteristika Zenerovy diody

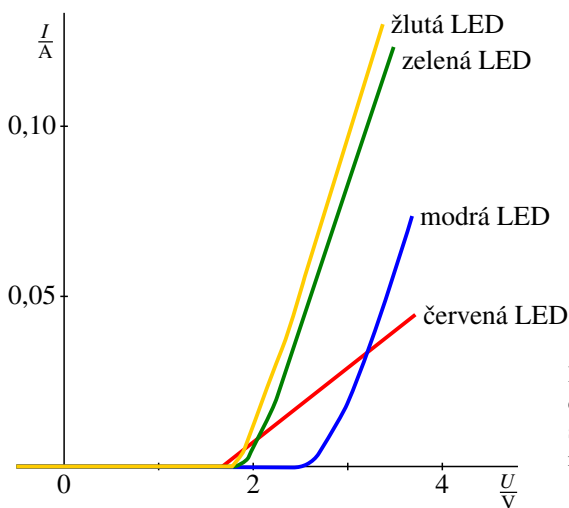
Zenerův jev se uplatňuje u speciálních tzv. Zenerových diod, které se v praxi používají v obvodech pro stabilizaci napětí. V této funkci se Zenerova dioda zapojuje do obvodu vždy v nepropustném směru (obr. R3-7), sériově s rezistorem R . Při větší změně vstupního napětí začne po překročení Zenerova napětí diodou procházet narůstající proud, vzroste napětí na rezistoru R , ale výstupní napětí se prakticky nezmění.



R3-7 Zapojení Zenerovy diody ke stabilizaci napětí

Světelná dioda – LED

Označení světelné diody LED odpovídá anglickému názvu *Light Emitting Diode*, čili světlo emitující dioda a odtud má i hovorové označení *ledka*. K výrobě světelných diod se používají různé sloučeniny gallia, např. GaP (fosfid gallitý), GaAs (arsenid gallitý) aj. Dioda se do elektrického obvodu zapojuje v propustném směru a v oblasti přechodu dochází k intenzivní rekombinaci nosičů náboje. Každá taková rekombinace je spojena s uvolněním energie, která je vyzařena v podobě světla. Barvu světla určuje materiál, z něhož je světelná dioda vyrobena. Charakteristické je, že diodou začíná procházet elektrický proud při prahovém napětí, které je tím větší, čím kratší je vlnová délka vyzařovaného světla (červené světlo má nejdelší a modré světlo nejkratší vlnovou délku, obr. R3-8). Měření charakteristiky světelné diody je obsahem videoexperimentu na CD **AV2** a laboratorního cvičení **LC5**.

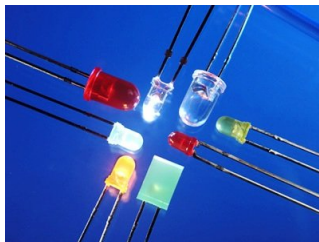


R3-8 Voltampérové charakteristiky světelných diod různých barev

Světelné diody vyzařují světlo jen určité barvy, a nelze tedy vytvořit diodu, která by vyzařovala bílé světlo, složené ze světél různých barev. Výrazným krokem ve vývoji světelných diod byla konstrukce diody vyzařující modré, popř. ultrafialové světlo s ještě kratší vlnovou délkou. S využitím těchto diod byly zkonstruovány **elektroluminiscenční diody**, v nichž se bílé světlo získává na základě elektroluminiscence vhodných látek, tzv. *luminoforů*. Dioda ozařuje modrým, popř. ultrafialovým světlem o krátké vlnové délce luminofor a ten

intenzivně září světlem o delší vlnové délce. Použitím luminoforů různého chemického složení lze získat složené světlo, které vnímáme jako bílé.

Barevné diody (obr. R3-9) se využívají především pro signalizační účely a prochází jimi malý proud (řádově mA). Poněvadž jsou zapojeny v propustném směru, musejí být vždy sériově spojeny s předřadným rezistorem takové hodnoty, aby nebyla překročena největší dovolená hodnota proudu, která bývá obvykle 5 mA až 20 mA.



R3-9 Světelné diody

Konstrukce elektroluminiscenčních diod s bílým světlem znamená zásadní zvrat ve vývoji osvětlovací techniky. V současnosti mají široké využití intenzivně zářící tzv. supersvítivé diody, které představují úsporný zdroj světla s velkou životností. Diody se obvykle sdružují do jednoho celku s různým konstrukčním uspořádáním. Příkladem může být osvětlovací zdroj označovaný jako „LED žárovka“, která ve svítidlech nahrazuje klasickou žárovku (obr. R3-10a). Perspektivní jsou pásy supersvítivých diod, které nahrazují zářivky (obr. R3-10b).



a)



b)

R3-10 Supersvítivé diody pro osvětlovací účely

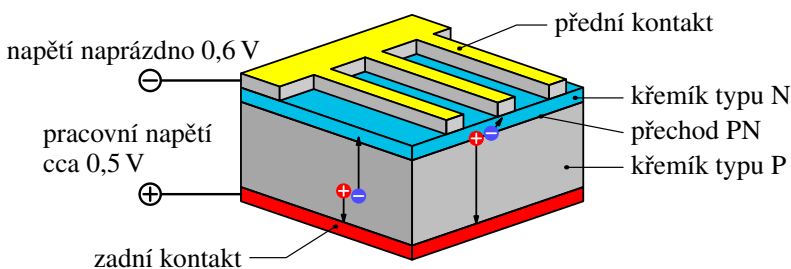
Poznámka: Za vývoj modrých světelných diod umožňujících vytvoření supersvítivých diod jako nového ekologického světelného zdroje obdrželi v roce 2014 japoňští vědci ISAMU AKASAKI, HIROŠI AMANO a SHUJI NAKAMURA Nobelovu cenu za fyziku.

Fotodioda, fotovoltaický článek

Fotodioda je polovodičová dioda konstruovaná tak, aby na přechod PN mohlo dopadat světlo. Při osvětlení se v oblasti přechodu generují elektrony a díry a zvětšuje se potenciálový rozdíl na přechodu. Fotodioda je zdrojem elektrického

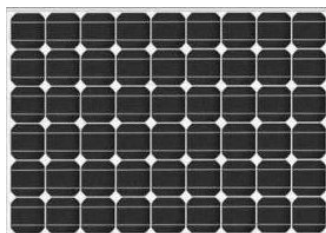
napětí, jehož velikost závisí na osvětlení diody. Jednotlivé fotodiody se uplatňují např. v měřicí a automatizační technice jako světelná čidla.

Fotovoltaický článek, nebo také *solární článek* je v podstatě velkoplošná polovodičová dioda. Aby účinnost přeměny energie světla na elektrickou energii byla dostatečná, musí být plocha přechodu PN ozařovaná světlem co největší. Struktura fotovoltaického článku je zjednodušeně znázorněna na obr. R3-11. Základem článku je vrstva polovodiče typu P vyříznutá z monokrystalu křemíku. V ní je speciální technologií vytvořena vrstva s vodivostí typu N, takže mezi oběma vrstvami vznikne přechod PN. Zadní plocha článku je spojena s kontaktní plochou, kdežto přední kontaktní vrstva má podobu mřížky. Její tvar je volen tak, aby zastiňovala jen asi 4 % až 8 % plochy a světlo mohlo pronikat k co největší ploše přechodu.



R3-11 Fotovoltaický článek

Pokud přechod PN není osvětlen, existuje v oblasti přechodu, podobně jako u polovodičové diody, elektrické pole. Oblast s vodivostí typu P má záporný potenciál a oblast s vodivostí typu N má kladný potenciál. Při osvětlení přechodu se generují páry elektron-díra a kladné díry směřují působením elektrického pole do oblasti P a elektrony do oblasti N. Dochází k rozdělení nosičů náboje tak, že zadní kontaktní plocha solárního článku má kladný potenciál, přední plocha záporný potenciál a rozdílu potenciálů odpovídá vnější napětí článku. Toto napětí je poměrně malé a u křemíku má hodnotu přibližně 0,5 V. Proto se v praxi jednotlivé články spojují sériově a paralelně do větších celků označovaných jako *fotovoltaické* nebo *solární panely* (obr. R3-12). Napětí těchto panelů bývá 12 V nebo 24 V.



R3-12 Fotovoltaický panel

Fotovoltaický článek je zdrojem stejnosměrného napětí a v této podobě se využívá např. v kalkulačkách. Pro využití v energetice je však nutné přeměnit stejnosměrné napětí solárního článku na napětí střídavé. K tomu slouží zvláštní elektronické zařízení, tzv. *střídač*, které převádí stejnosměrné napětí na střídavé napětí 230 V o frekvenci 50 Hz. To umožňuje vytvářet velké *fotovoltaické solární systémy* (obr. R3-13), které jsou připojeny do veřejné elektrické sítě. Jejich elektrický výkon je řádově 10 kW až 1 MW. Při optimálních podmínkách slunečního svitu je možné získat maximální výkon 1 kW ze solárních panelů o ploše 8 m² až 10 m².



R3-13 Fotovoltaická elektrárna

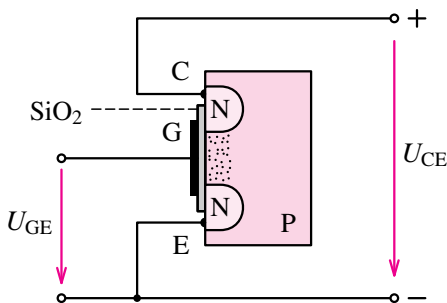
R3.3 Polem řízený tranzistor. Integrovaný obvod

Podstata tranzistoru je v čl. 3.4 vyložena na tzv. **bipolárním tranzistoru**, při jehož činnosti se uplatňují oba typy nosičů náboje – elektrony i díry. Zejména v integrovaných obvodech má uplatnění další typ – **unipolární tranzistor**. Na jeho činnosti se podílí vždy jen jeden typ nosičů náboje. Od bipolárního tranzistoru se liší především tím, že kolektorový proud není řízen vstupním proudem I_B , ale napětím. Poněvadž vstupní odpor těchto tranzistorů je veliký ($R_{vst} \rightarrow \infty$), je vstupní proud zanedbatelný a mluvíme o tranzistoru řízeném elektrickým polem. Tomu odpovídá označení unipolárního tranzistoru jako typ FET (z angl. *Field Effect Transistor*).

Existuje řada typů unipolárních tranzistorů, které se liší konstrukcí i technologií výroby. Jedním z nich je **unipolární tranzistor s indukovaným kanálem N**, jehož schéma je na obr. R3-14. V křemíkové destičce s vodivostí typu P jsou planární technologií vytvořeny dvě oblasti s vodivostí typu N. Ty tvoří kolektor C a emitor E tranzistoru. Povrch destičky je pokryt izolační

vrstvou oxidu (SiO_2) a na ní je nanesena tenká vrstva kovu, která plní funkci řídicí elektrody G (z angl. *gate* – hradlo).

Poznámka: Tento typ unipolárního tranzistoru se také označuje jako typ MOS FET (z angl. *Metal-Oxid-Semiconductor*, čili kov-oxid-polovodič).



R3-14 Tranzistor řízený polem

Když je k elektrodám C a E připojeno napětí U_{CE} a vstupní napětí U_{GE} je nulové, prochází kolektorovým obvodem tranzistoru jen nepatrný proud, protože mu stojí v cestě dva přechody PN, z nichž jeden je zapojen v závěrném směru. Připojíme-li k řídicí elektrodě kladné napětí U_{GE} , vznikne na řídicí elektrodě kladný náboj. Působením jeho elektrického pole jsou k řídicí elektrodě přitahovány menšinové elektrony a od ní jsou odpuzovány většinové díry. Tím se v blízkosti řídicí elektrody indukuje vodivý kanál, který spojuje kolektor s emitorem a kolektorovým obvodem prochází proud. Napětí U_{GE} ovlivňuje šířku kanálu, a tím i velikost proudu I_C .

Integrovaný obvod

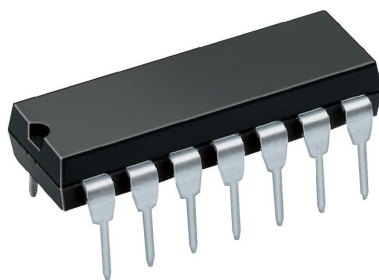
Objev tranzistoru znamenal počátek vzniku nové generace elektronických součástek, která nastoupila po éře vakuových elektronek, jejichž vývoj začal na počátku 20. století. Další kvalitativní změnu přineslo sestrojení integrovaného obvodu, s nímž je spojena první etapa rozvoje jednoho z nejprogresivnějších oborů – **mikroelektroniky**.

Poznámka: První integrovaný obvod vytvořil v roce 1958 americký inženýr JACK KILBY (1923–2005) ve firmě Texas Instruments. Kilby také v roce 1966 zkonstruoval první kalkulačku se základními početními operacemi. Za tento přínos k rozvoji mikroelektroniky obdržel v roce 2000 Nobelovu cenu za fyziku.

Integrované obvody můžeme rozdělit do dvou skupin podle charakteru signálů, k jejichž zpracování jsou určeny.

- První skupinu tvoří integrované obvody analogové techniky, používané pro zpracování spojitých (analogových) signálů. Jsou to signály, které se s časem mění spojitě (např. zvukový signál nebo signál nesoucí informaci o okamžité hodnotě fyzikální veličiny, např. teploty).
- Druhou, rozsáhlejší skupinu integrovaných obvodů tvoří obvody pro zpracování číslicového signálu. Takový signál je tvořen sledem impulzů napětí, které se mění skokem mezi dvěma hodnotami. Nižší hodnota představuje tzv. logickou nulu a vyšší hodnota logickou jedničku. V integrovaných obvodech se číslicový signál zpracovává logickými operacemi, které se řídí zvláštní algebrou pro funkce, v nichž proměnná veličina nabývá jen dvou hodnot.

Pro zpracování číslicových signálů byly vytvořeny integrované obvody, které plní funkci *logických členů*, tzn. vykonávají logické operace. Např. na obr. R3-15 je jeden z nejjednodušších integrovaných obvodů, obsahující čtyři logické členy, z nichž každý má dva vstupy a jeden výstup. Obvod má charakteristickou konstrukci pouzdra se 14 vývody (12 vývodů logických členů a vývody pro připojení napájecího napětí (5 V) a uzemnění). Několik integrovaných obvodů na desce s tzv. plošnými spoji tvoří funkční soustavu např. v automatizovaném zařízení.



R3-15 Integrovaný obvod

Poznámka: Na obr. R3-15 je typická součástka pro obvody číslicové techniky. Obsahuje čtyři obvody pro negaci logického součinu – hradlo NAND 7400. Kombinacemi tohoto logického členu lze vytvořit obvody i pro další logické funkce.

K nejdokonalejším integrovaným obvodům číslicové techniky patří mikroprocesor, který je také základní funkční součástkou počítače jako tzv. centrální procesorová jednotka (*Central Processing Unit* – CPU, obr. R3-16). Mikroprocesor je integrovaný obvod s vysokým stupněm integrace, jehož logické operace lze programovat. V počítači provádí instrukce ve strojovém kódu v posloupnosti určené počítačovým pro-



R3-16 Mikroprocesory

gramem, který je uložen v operační paměti počítače. Byl vyvinut počátkem 70. let a na jeho základě vznikl samostatný obor elektroniky, označovaný jako *mikroprocesorová technika*. Uplatňuje se nejen v počítačích, ale i v konstrukci různých strojů a automatizovaných výrobních zařízení.

R4 ELEKTRICKÝ PROUD V KAPALINÁCH A PLYNECH

R4.1 Faradayovy zákony pro elektrolýzu

V čl. 4.2 jsou uvedeny základní poznatky o elektrolýze. Nyní si děje na elektrodách vyložíme podrobněji. Každý iont, který při elektrolýze dospěje k elektrodě, přijme nebo odevzdá elektrodě několik elektronů a přemění se v elektricky neutrální molekulu. Počet elementárních nábojů e potřebných pro vyloučení jedné molekuly označíme z . Projde-li povrchem elektrody celkový náboj $Q = It$, je počet vyloučených molekul

$$N = \frac{Q}{ze}.$$

Toto číslo vynásobíme hmotností m_m jedné molekuly

$$m_m = \frac{M_m}{N_A}$$

(M_m je molární hmotnost vyloučené látky, N_A je Avogadrova konstanta) a dostaneme celkovou hmotnost vyloučené látky

$$m = m_m N = \frac{M_m}{N_A e z} Q = \frac{M_m}{F z} Q.$$

Veličina F je významná fyzikální konstanta a na počest anglického fyzika M. FARADAYE  ji nazýváme **Faradayova konstanta**.

V jednom molu libovolné látky je stejný počet molekul, popř. atomů, a vyjadřuje ho Avogadrova konstanta N_A ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$). Faradayova konstanta představuje elektrický náboj, kterým se při elektrolýze vyloučí 1 mol látky:

$$\begin{aligned} F &= N_A e = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} = \\ &= 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}, \end{aligned}$$

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Zákonitosti dějů při elektrolýze

1. Faradayův zákon (viz čl. 4.2)

Hmotnost m vyloučené látky je přímo úměrná náboji Q , který prošel

elektrolytem,

$$m = AQ = AIt.$$

Konstanta úměrnosti A , která je pro danou látku charakteristická, se nazývá **elektrochemický ekvivalent látky**. Je definován jako podíl molární hmotnosti látky a náboje potřebného k vyloučení jedné molekuly dané látky:

$$A = \frac{M_m}{Fz}.$$

Jednotka elektrochemického ekvivalentu $[A] = \text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$. Vzhledem k malým hmotnostem látek vyloučených při elektrolýze se častěji používá jednotka $\text{mg} \cdot \text{C}^{-1} = 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{C}^{-1}$.

Příklad

Určete elektrochemický ekvivalent mědi, která se při elektrolýze vylučuje z roztoku CuSO_4 .

Řešení

Relativní atomová hmotnost mědi $A_r(\text{Cu}) = 63,546$. Molární hmotnost mědi:

$$M_m \doteq A_r \cdot 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1} = 63,546 \cdot 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

Poznámka: Molární hmotnost je určena vztahem

$$\begin{aligned} M_m &= A_r m_u N_A = A_r \cdot 1,660 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{mol}^{-1} \doteq \\ &\doteq A_r \cdot 10^{-3} \text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}, \end{aligned}$$

kde m_u je atomová hmotnostní konstanta.

Elektrolytem je roztok CuSO_4 , na katodě se vylučují kationty Cu^{2+} , a tedy $z = 2$. Elektrochemický ekvivalent mědi:

$$\begin{aligned} A &= \frac{M_m}{Fz} = \frac{63,546}{9,648 \cdot 10^4 \cdot 2} \text{kg} \cdot \text{C}^{-1} = \\ &= 0,329 \cdot 10^{-6} \text{kg} \cdot \text{C}^{-1} = 0,329 \text{mg} \cdot \text{C}^{-1}. \end{aligned}$$

Z výsledku vyplývá, že při stálém proudu 1 A se na katodě z roztoku CuSO_4 za 1 s vyloučí 0,329 mg mědi.

Elektrochemické ekvivalenty některých látek jsou v MFChT.

2. Faradayův zákon

Látková množství různých látek vyloučených při elektrolýze týmž nábojem jsou chemicky ekvivalentní. (Mohou se v chemické sloučenině navzájem nahradit, nebo se mohou beze zbytku sloučit.)

Úlohy

- 1 Jaký je fyzikální význam Faradayovy konstanty?
- 2 Určete elektrochemický ekvivalent niklu v roztoku síranu nikelnatého NiSO_4 . Relativní atomová hmotnost niklu je 58,71.
- 3 Jak dlouho musí roztokem síranu nikelnatého procházet proud 5,0 A, aby se na katodě o povrchu $2,1 \text{ dm}^2$ vyloučila vrstva niklu silná 0,020 mm? Hustota niklu je $8\,900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jaká elektrická práce se při tom spotřebuje, jestliže napětí mezi katodou a anodou je 3,5 V?
- 4 Jaké je látkové množství vodíku, který se vyloučí na katodě Hofmannova přístroje proudem 0,50 A za 30 minut? (Na vyloučení jedné molekuly H_2 potřebujeme 2 elementární náboje.) Jaký objem bude mít vyloučený vodík za normálních podmínek?
- 5 Nakreslete schéma obvodu, ve kterém jsou sériově zapojeny tři elektrolytické nádoby s vodnými roztoky AgNO_3 , CuCl a CuSO_4 . Jaké množství mědi se vyloučí na katodě v druhé a třetí nádobě za dobu, za kterou se v první nádobě vyloučí 108 g stříbra?
- 6 Jak velký povrch musí mít anoda elektrolytického kondenzátoru o kapacitě $100 \mu\text{F}$, je-li tloušťka dielektrika 10^{-4} mm a relativní permitivita 10?

R4.2 Voltampérová charakteristika elektrolytického vodiče

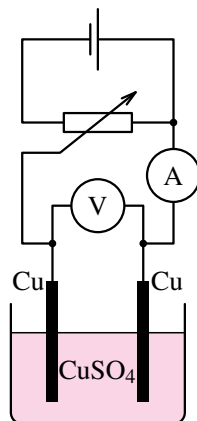
Vedení elektrického proudu v elektrolytu zprostředkují kladné a záporné ionty. Pokud by tyto částice nereagovaly s kovovými elektrodami ponořenými do elektrolytu, probíhalo by vedení elektrického proudu obdobně jako u kovových vodičů. Tak je tomu při pokusu podle obr. R4-1. Na něm je znázorněna elektrolýza roztoku CuSO_4 v nádobě s měděnými elektrodami. Na katodě se z elektrolytu vylučuje měď a na anodě stejné množství mědi přechází do roztoku. Charakter elektrod, koncentrace elektrolytu, a tedy ani jeho vodivost se nemění.

Pomocí potenciometru budeme zvětšovat napětí na elektrodách a měřit proud procházející elektrolytem. Zjistíme, že proud je přímo úměrný napětí. Platí tedy Ohmův zákon

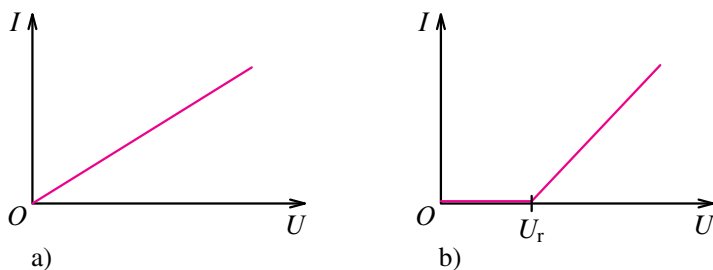
$$I = \frac{U}{R}.$$

Graf na obr. R4-2a představuje voltampérovou charakteristiku elektrolytického vodiče.

Obdobný průběh bychom očekávali i při dalším experimentu, kdy k elektrolýze použijeme rovněž elektrody ze stejného kovu. Může to být např. Hofmannův přístroj s platinovými elektrodami, který jsme použili k elektrolýze zředěné kyseliny sírové (viz čl. 4.2). Při elektrolýze se na katodě uvolňuje vodík a na anodě kyslík a oba plyny v podobě bublinek obalují elektrody. Pak už nemůžeme elektrody považovat za stejné, a to se projevuje tím, že každá elektroda má vzhledem k elektrolytu jiný potenciál. Dochází k **polarizaci elektrod** a vzniká sekundární elektrochemický článok, jehož **polarizační napětí** je orientováno opačně než napětí připojeného zdroje.



R4-1 Elektrolýza síranu měďnatého



R4-2 Voltampérové charakteristiky elektrolytického vodiče

Pokud při elektrolýze nastavíme malé napětí, vznikne jen nepatrný proud, který za krátkou dobu vlivem polarizace elektrod opět zanikne. Aby v elektrolytu vznikl trvalý proud, je třeba vnějším napětím překonat polarizační napětí. Toto nejmenší napětí zdroje je tzv. **rozkladné napětí** U_r . Potom proud s napětím lineárně roste a voltampérová charakteristika odpovídá grafu na obr. 4-2b.

Závislost proudu na napětí je popsána vztahem

$$I = \frac{U - U_r}{R}.$$

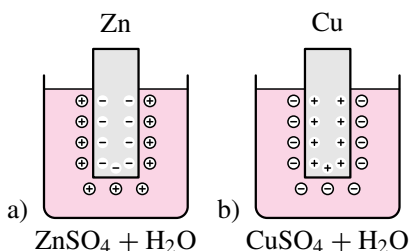
Při elektrolýze zředěné kyseliny sírové v Hofmannově přístroji je rozkladné napětí $U_r = 1,68 \text{ V}$.

Elektrolýza nastává při každém napětí jen v případě, když na povrchu elektrod, popř. v jejich okolí nevznikají žádné chemické změny. Pokud k takovým změnám dochází, vede elektrolyt proud až při napětí větším, než je rozkladné napětí.

Velikost rozkladného napětí určují děje probíhající na elektrodách. Ponoříme-li do elektrolytu kovovou elektrodu, dojde k reakci, při které část iontů kovu přechází do elektrolytu a na elektrodě převládne záporný náboj elektronů. Na rozhraní kovu a elektrolytu vzniká **elektrická dvojvrstva** s určitým rozdílem potenciálů. Ten zabrání dalšímu přechodu iontů do elektrolytu a potenciál se ustálí na určité hodnotě, která je pro daný kov ve styku s elektrolytem obsahujícím ionty kovu charakteristická. Hodnoty těchto tzv. **elektrodoových potenciálů** jsou pro různé kovy uvedeny v MFChT.

Při pokusu s měděnými elektrodami v roztoku CuSO_4 zůstávají elektrody i během elektrolýzy stejné a potenciály obou dvojvrstev se navenek ruší. Naopak při elektrolýze zředěné kyseliny sírové se stejné elektrody pokrývaly vodíkem a kyslíkem, takže vznikly dvě různé dvojvrstvy s odlišnými potenciály. Jejich rozdíl se navenek projevuje jako rozkladné napětí U_r .

Vznikem elektrických dvojvrstev také vysvětlujeme podstatu elektrochemických článků. Jejich elektrody jsou z různých kovů a každá má jiný elektrodový potenciál. Např. ze zinkové elektrody ponořené do roztoku síranu zinečnatého se uvolňují kladné ionty zinku. Ty jsou současně přitahovány k elektrodě, která uvolněním kladných iontů získá záporný náboj. Ionty ob-



R4-3 Vznik elektrické dvojvrstvy

klopují elektrodu a nastává rovnovážný stav, kterému odpovídá elektrodový potenciál zinku $-0,76 \text{ V}$ (obr. R4-3a). Poněkud odlišně probíhá tento děj v případě měděné elektrody v roztoku CuSO_4 . Měď má menší rozpouštěcí schopnost a kationty Cu^{2+} se v tomto případě vylučují na povrchu elektrody.

Elektroda tím získá kladný náboj a v elektrolytu zbývají záporné ionty SO_4^{2-} , které elektrodu obklopují (obr. R4-3b). Rovnovážnému stavu odpovídá kladný elektrodový potenciál $+0,34 \text{ V}$ (obr. R4-3b). V elektrochemickém článku určuje rozdíl potenciálů obou elektrod elektromotorické napětí zdroje.

Poznámka: Přímé měření elektrodových potenciálů není možné. Proto se zjišťuje jen relativní hodnota potenciálu elektrody z určitého kovu vzhledem k vhodně zvolené elektrodě, jejíž potenciál je považován za nulový. Používá se tzv. *standardní vodíková elektroda*, což je platinová elektroda pokrytá bublinkami vodíku.

R4.3 Elektrochemické články

Elektrochemické články se dělí do dvou skupin – primární články a sekundární články.

Primární elektrochemické články tvoří elektrody v prostředí vhodného elektrolytu a jejich napětí je určeno elektrochemickými potenciály materiálu elektrod v daném prostředí. Děje probíhající na elektrodách jsou nevratné, tzn. že články tohoto typu jsou určeny pro jednorázové použití a jejich napětí není možné po vybití obnovit.

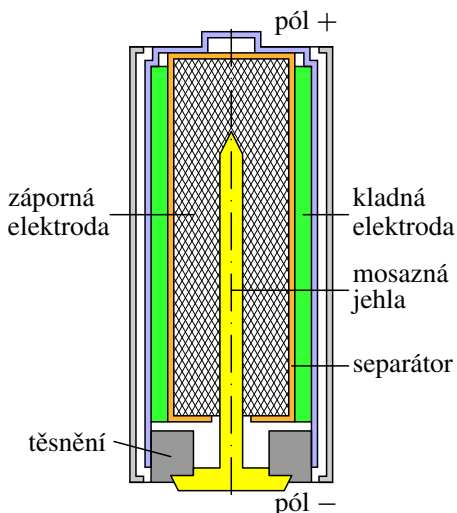
Sekundární elektrochemické články neboli **akumulátory** mají podstatně větší praktický význam. Po jejich vybití je možné při nabíjení vyvolat takové elektrochemické děje na elektrodách, při kterých se napětí článku obnoví, a ten se opakovaně stává zdrojem elektrické energie.

Primární elektrochemické články

Jako příklad primárního článku jsme v čl. 4.3 uvedli **zinko-chloridový článek**, který patří k nejstarším elektrochemickým zdrojům napětí. Jeho praktický význam je však v současnosti již poměrně malý.

Nejvíce je využíván **alkalický článek**. Jeho konstrukce je patrná z obr. R4-4. Vnější obalem článku je ocelový váleček vyplněný několika vrstvami složek článku. Vnější vrstvu tvoří kladná elektroda, kterou je směs burelu (MnO_2) a uhlíku (sazí). Vnitřní plocha kladné elektrody je pokryta separátorem, což je papír nasycený elektrolytem – hydroxidem draselným (KOH). Vnitřní prostor článku je vyplněn gelem s rozptýleným práškovým zinkem, který tvoří zápornou elektrodu. Do válečku anody je zasunuta mosazná jehla spojená s vodivým dnem článku, které je záporným pólem článku. Použití zinkového prášku značně zvětšuje povrch, na němž probíhají elektrochemické reakce. Proto mají

alkalické články větší *kapacitu*, čili celkový náboj, který lze při vybíjení odebrat. Článek je také možné zatěžovat větším proudem než klasický zinko-chloridový článek a jeho životnost je 5–6krát větší. Napětí článku je 1,5 V.



R4-4 Alkalický článek

K nejmodernějším primárním článkům patří **lithiový článek**, který se vyrábí v různém provedení. Kladná elektroda článku je ze speciálního grafitu s oxidem manganitým MnO_2 a s příměsí fluoru. Zápornou elektrodu tvoří lithium, což je alkalický kov, který s vodou bouřlivě reaguje. Proto se jako elektrolyt používají organická rozpouštědla obsahující lithiové soli. Elektrody jsou navzájem odděleny separátorem a článek jako celek je hermeticky uzavřen. Jmenovité napětí lithiového článku je poměrně velké, 3,5 V.

Sekundární elektrochemické články

Příkladem klasického sekundárního článku je tzv. **olověný akumulátor**, jehož význam je i v současné době dán zejména použitím v automobilech. Elektrody článků akumulátoru jsou zhotoveny z olova a elektrolytem je roztok kyseliny sírové. Akumulátor se stává zdrojem napětí teprve po nabití, kdy jím po určitou dobu procházel elektrický proud. Při nabíjení probíhají na elektrodách chemické reakce a povrch kladné elektrody se pokrývá vrstvou oxidu olovičitého (PbO_2), kdežto záporná elektroda zůstává olověná. Vzniklý článek má po nabití napětí asi 2,1 V.

Při provozu probíhá v akumulátoru opačný děj, jehož výsledkem je vznik síranu olovnatého (PbSO_4) na obou elektrodách. To má za následek postupné snižování napětí akumulátoru a je třeba ho znovu nabít. Poněvadž kyselina sírová při vybíjení akumulátoru reaguje s elektrodami, snižuje se současně hustota elektrolytu. Měřením hustoty elektrolytu lze tedy orientačně zjistit, do jaké míry je akumulátor vybit.

Nikl-kadmiový akumulátor (Ni-Cd) představuje první typ sekundárního článku, který se začal vyrábět ve válcové podobě známé pod názvem *tužkové baterie*. Kladná elektroda obsahuje sloučeninu niklu a záporná elektroda je z kadmia. Elektrody odděluje separátor ze syntetických vláken nasycený alkalickým elektrolytem (KOH). Nabíjením se mění kvalita elektrod a tomu odpovídá elektromotorické napětí 1,31 V, které se při vybíjení ustálí na jmenovité hodnotě 1,25 V.

Akumulátor Ni-Cd obsahuje škodlivé kadmium, které zamožuje životní prostředí. Proto byla vyvinuta jeho náhrada v podobě slitiny řady kovů a byl vytvořen **nikl-metalhydridový akumulátor** (Ni-MH). Jeho název je odvozen od toho, že při nabíjení kov záporné elektrody absorbuje vodík a mění se na hydrid kovu (*metalhydrid* MH). Akumulátor má obdobnou konstrukci i jmenovitou hodnotu napětí jako akumulátor Ni-Cd, ale jeho kapacita je asi o 40 % větší.

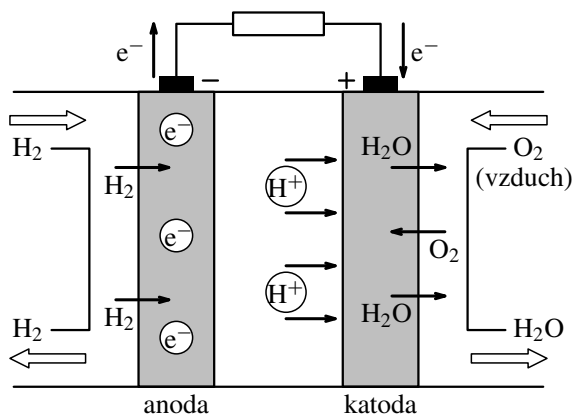
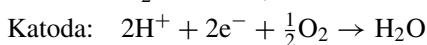
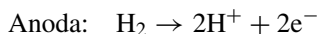
Akumulátory Li-ion a Li-pol představují současný největší pokrok v konstrukci a praktickém využití sekundárních elektrochemických zdrojů. Setkáváme se s nimi zejména v mobilních telefonech a dalších elektronických zařízeních. Základním problémem článků s lithiovými elektrodami je nestabilita lithia, u něhož dokonce hrozí nebezpečí exploze. Tento problém byl vyřešen náhradou kovového lithia oxidem kobaltnatolithným (LiCoO_2), který je základem kladné elektrody. Zápornou elektrodu tvoří uhlík (grafit), v němž jsou rozptýleny atomy lithia. Jako elektrolyt je použita lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Kladnou a zápornou elektrodu o malé tloušťce ($\approx 200 \mu\text{m}$) odděluje separátor v podobě tenké mikroporézní fólie. Jmenovité napětí těchto akumulátorů je 3,7 V. Jejich předností je velká kapacita a malá hmotnost, výroba je však nákladnější než u ostatních typů akumulátorů.

Palivový článek

Zvláštním typem elektrochemického článku je palivový článek, který představuje perspektivní zdroj energie např. pro pohon motorových vozidel. Je to zařízení, v němž dochází k přímé přeměně chemické energie vodíku a kyslíku

na elektrickou energii, přičemž výsledným produktem elektrochemického děje je teplá voda, popř. pára. Děje v palivovém článku lze charakterizovat jako elektrolyzu vody probíhající obráceným směrem. Vznik tohoto děje je podmíněn přítomností katalyzátoru, což je látka, která chemický děj urychluje, ale sama se s reagujícími látkami neslučuje.

Existuje několik typů palivových článků a jejich princip ukážeme na příkladu palivového článku s tzv. protonovou membránou – PEM (*Proton Exchange Membrane*). Schematicky je celé zařízení znázorněno na obr. R4-5. Anodový i katodový elektrodový prostor je ohraničen jemnými kovovými sítěmi z materiálů, které působí jako katalyzátory (palladium a platina). Působením katalyzátoru dochází na anodě k rozkladu vodíku na protony a elektrony, protony pak přecházejí na katodu a elektrony vytvářejí ve vnějším obvodu elektrický proud. Mezi oblastmi anody a katody je membrána PEM, která propouští ke katodě kladné ionty vodíku (protony), přičemž elektrony zadrží. Na katodě probíhá působením katalyzátoru reakce vodíkových iontů s oksyličovadlem za vzniku vody. Reakce na elektrodách vodíkového článku popisují následující rovnice:



R4-5 Princip palivového článku

Palivové články jsou zdrojem poměrně velkého proudu (20 A až 100 A na dm² plochy elektrod), avšak při malém napětí 0,5 V až 0,7 V. Proto se články spojují sériově do ucelených modulů podle účinnosti (20 %) a při

zajištění trvalého přívodu paliva a okysličovačla mohou pracovat prakticky nepřetržitě.

Palivové články jsou dosud ve vývoji, což se odráží v jejich ceně, malé životnosti a poklesu účinnosti při delším provozu. Při použití v dopravních prostředcích může být problémem bezpečnost zařízení, poněvadž jeho součástí je zásobník s explozivním vodíkem. Lze však očekávat, že dalším vývojem budou tyto problémy vyřešeny a palivový článek využívající nevyčerpatelné zásoby vodíku a kyslíku najde svoje praktické uplatnění.

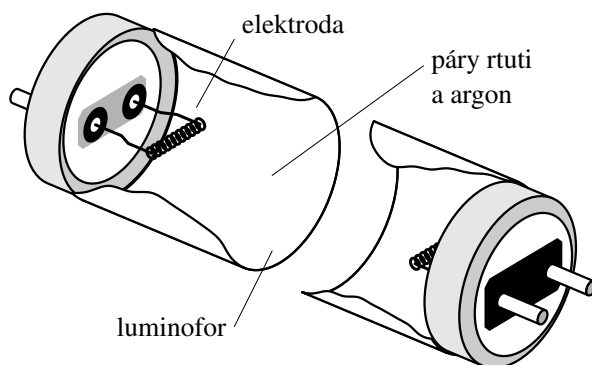
R4.4 Výboj v plynu za sníženého tlaku

Elektrický výboj v plynu za sníženého tlaku se využívá v **zářivkách** (obrázek R4-6). Základní část zářivky tvoří skleněná trubice naplněná směsí rtuťových par a plynu argonu o tlaku přibližně 400 Pa. Na obou koncích trubice jsou zatavené kovové elektrody, které lze průchodem elektrického proudu rozžhavit, a tím se usnadní vznik výboje (obr. R4-7).

Na elektrody zářivky se přivádí napětí, při němž vznikne elektrický výboj. Pro vznik výboje je nutné připojit k elektrodám vyšší, tzv. *zápalné napětí*. Jakmile výboj vznikne, udrží se i při

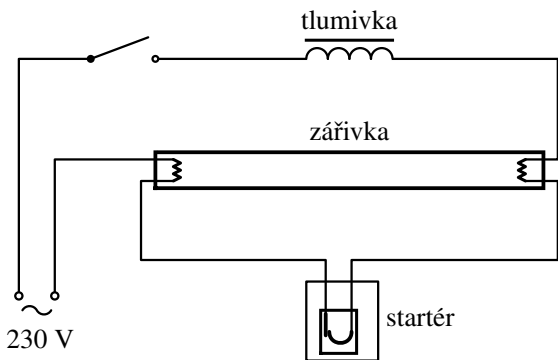


R4-6 Trubicové zářivky



R4-7 Konstrukce zářivky

nižším *provozním napětí*. Zápalné napětí se získá pomocným elektrickým obvodem, který je zjednodušeně zobrazen na obr. R4-8. V obvodu je cívka s velkým počtem závitů a železným jádrem, tzv. *tlumivka* (viz čl. 6.4) a součástka zvaná *startér*. Je to v podstatě malá výbojka, v níž při zapnutí obvodu vznikne výboj, ten zahřeje bimetalový kontakt a obvod se uzavře. Proud prochází elektrodami, které se rozžhaví a poněvadž výboj ve startéru po sepnutí bimetalového kontaktu zhasne, kontakt se ochladí a obvod se rozpojí. V okamžiku přerušení proudu se na tlumivce vytvoří vlivem elektromagnetické indukce (viz čl. 6.1) značné napětí a v zářivce vznikne výboj, který se již dále udrží při nižším napětí elektrické sítě.



R4-8 Elektrický obvod zářivky

Výboj ve rtuťových parách je však zdrojem převážně tzv. ultrafialového záření pro oko neviditelného. Proto je vnitřní povrch trubice zářivky pokryt vrstvou tzv. *luminoforu*, který u vypnuté zářivky vidíme jako vrstvu bílé barvy. Při chodu zářivky dochází k pohlcování neviditelného záření luminoforem a jeho přeměně na světlo. Chemickým složením luminoforu lze ovlivnit také barvu světla zářivky.

Významný pokrok v osvětlovací technice znamená konstrukce tzv. **kom-
paktní zářivky**, která ve stále větší míře nahrazuje klasické žárovky se žhavaným vláknem. Jejich předností je podstatně menší spotřeba elektrické energie při srovnatelném světelném výkonu a dlouhá životnost. Např. výrobce kompaktní zářivky, která odpovídá žárovce s příkonem 100 W, uvádí potřebný příkon jen 20 W a životnost 6 000 h, tedy 6krát delší než u žárovky. Tím je kompenzována vyšší cena kompaktních zářivek ve srovnání se žárovkou. Zářivky se vyrábějí v různých tvarech a jsou opatřeny patičí, která umožňuje jejich použití v běžných svítidlech (obr. R4-9).



R4-9 Kompaktní zářivky

Funkce kompaktní zářivky je v podstatě stejná jako u klasické trubicové zářivky. Odlišnost spočívá v použití tzv. **elektronického předřadníku**, který je zabudován přímo v patici kompaktní zářivky. Nahrazuje jak tlumivku, tak startér a jeho předností je, že zářivku napájí střídavým proudem o větší frekvenci (přibližně 30 kHz), než je frekvence střídavého proudu v síti (50 Hz). Proto nepozorujeme charakteristické blikání světla zářivky, start výboje v zářivce je rychlý a prodlužuje se životnost kompaktní zářivky.

V osvětlovací technice se uplatňují také **vysokotlaké výbojky**, pro něž je charakteristický velký světelný výkon. Zdrojem záření je hořák v podobě křemenné trubičky délky 5 cm až 10 cm a průměru 1,5 cm až 2 cm, naplněný opět parami rtuti a argonem, avšak o podstatně vyšším tlaku než u zářivky (přibližně 2,5 kPa). Po zapálení výboje dosahuje tlak v hořáku téměř desetinásobku atmosférického tlaku a povrchová teplota křemenné trubičky se blíží k 10^3 K. Hořák je umístěn uprostřed baňky uvnitř pokryté luminoforem, v němž se ultrafialové záření výbojky mění na světlo (obr. R4-10). Prostor mezi hořákem a baňkou je vyplněn směsí argonu a dusíku.

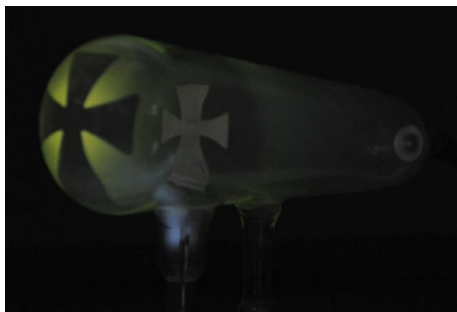


R4-10 Vysokotlaké výbojky

V osvětlovací technice se využívají další typy vysokotlakých výbojek, v nichž volba náplně hořáku směřuje k dosažení větší intenzity světla výbojky nebo

barevných vlastností světla. Jsou to např. halogenidové výbojky s náplní halogenidů různých kovů používané v automobilových reflektorech, žlutě svítící sodíkové výbojky s vysokou intenzitou světla pro pouliční osvětlení nebo xenonové výbojky. V nich je argon nahrazen xenonem a světlo výbojky se vlastnostmi blíží dennímu světlu. Tyto výbojky se používají např. ve výkonných projektorech.

Ve vývoji fyziky sehrál významnou roli objev **katodového záření**, které pozorujeme při výboji ve velmi zředěném plynu, tzn. při tlaku menším než 1 Pa a vysokém napětí mezi elektrodami (řádově 10^4 V). Projevem katodového záření je zelenkavé světélkování skleněné stěny výbojové trubice proti záporné elektrodě (katodě). Na obr. R4-11 je vyobrazen pokus s tzv. *Crookesovou trubicí*, v níž je do cesty katodovým paprskům vložena překážka v podobě plechu ve tvaru kříže. Na skle trubice pak vzniká stín překážky, což svědčí o tom, že neviditelné záření uvnitř trubice je tvořeno částicemi, které dopadají na sklo a způsobují jeho světélkování. To potvrdily i další pokusy s různě konstruovanými výbojovými trubicemi. Videoexperiment s Crookesovou trubicí je na CD **AV3**.



R4-11 Crookesova trubice

Studiem katodového záření se zabývala na konci 19. století řada fyziků a výsledkem jejich bádání byl poznatek, že světélkování způsobují záporné částice uvolňované z povrchu katody a urychlené elektrickým polem. Těmito experimenty byla objevena nejen nejdůležitější částice mikrosvěta – **elektron**, ale také jev *emise elektronů*, tzn. uvolňování elektronů z kovů, který se později stal východiskem ke konstrukci prvních elektronických součástek – elektronek. Na základě studia katodového záření bylo rovněž objeveno rentgenové záření.

R5 STACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE

R5.1 Částice s nábojem v magnetickém poli

Proud ve vodiči je tvořen nabitými částicemi (elektrony), na které rovněž působí magnetické pole. Magnetickou sílu, jak jsme o ní dosud uvažovali v kap. 5, můžeme vlastně považovat za výslednici sil, které působí na jednotlivé nosiče proudu.

Vyjdeme ze zjednodušeného modelu vodiče délky l , v němž je N volných elektronů. Celkový náboj těchto elektronů je $Q = -eN$. Předpokládejme dále, že se tyto elektrony ve vodiči pohybují rychlostí v ve směru vodiče a vzdálenost l urazí za dobu $t = l/v$. Za tuto dobu tedy projde průřezem vodiče náboj Q , tomu odpovídá proud

$$I = \frac{|Q|}{t} = \frac{Nev}{l}.$$

Dosadíme získaný výsledek do vztahu (5,1) (viz čl. 5.3; předpokládáme, že vodič je kolmý k indukčním čarám) a pro velikost magnetické síly působící na jeden elektron dostaneme

$$F_m = BIl = Bev.$$

Tento vztah ovšem platí nejen pro elektrony ve vodiči, ale i pro částice s nábojem mimo vodiče (elektrony, protony, kladné a záporné ionty atd.).

Směr magnetické síly závisí na náboji částice. V případě, že částice má kladný náboj, použijeme k určení směru magnetické síly Flemingovo pravidlo levé ruky (viz čl. 5.3 – směr proudu nahradíme směrem rychlosti částice). Když má částice záporný náboj (např. elektron), je směr magnetické síly opačný.

Na obr. R5-1 je pokusné zařízení (Wehneltova trubice), které umožňuje pozorovat pohyb volných elektronů v magnetickém poli. Videoexperiment s Wehneltovou trubicí je na CD  **V6**. Do skleněné baňky naplněné vodíkem o nízkém tlaku ($p < 1$ Pa) je zataven zdroj elektronů. Celá trubice je v homogenním magnetickém poli, které vytváří dvojice cívek o velkém průměru (tzv. *Helmholtzovy cívky*).

Schéma experimentálního zařízení je na obr. R5-2. Vektor magnetické indukce míří za nákretnu, což je na obr. R5-2 vyznačeno ležatými křížky. Elektrony ze zdroje vyletují rychlostí v , kolmo k indukčním čarám ($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$). Na elektrony působí magnetická síla $\mathbf{F}_m$, která zakřivuje trajektorii, po níž se



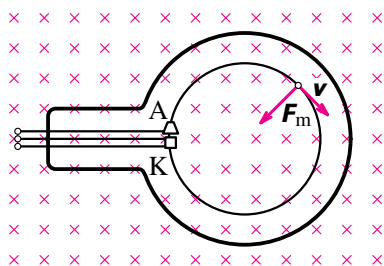
R5-1 Wehneltova trubice

elektron pohybuje, a směr vektoru $\mathbf{v}$ se mění. Výsledkem je pohyb elektronu po kružnicové trajektorii a magnetická síla je silou dostředivou. Platí

$$F_m = Bev = m \frac{v^2}{r}.$$

Odtud pro poloměr trajektorie elektronu dostaneme:

$$r = \frac{m}{e} \frac{v}{B}.$$



R5-2 Demonstrace pohybu elektronu v magnetickém poli

Poněvadž síla $\mathbf{F}_m$ je vždy kolmá na směr pohybu částice, nekoná magnetická síla práci. Velikost rychlosti částice a tedy ani kinetická energie částice se v magnetickém poli nemění. Mění se jen směr pohybu částice. Tím se působení magnetického pole na částici s nábojem liší od pole elektrického, kterým lze pohyb částic urychlovat, a tím zvětšovat jejich energii.

Volná částice s nábojem, jejíž rychlost v homogenním magnetickém poli je kolmá k magnetickým indukčním čarám, se pohybuje po kružnicové trajektorii. Poloměr trajektorie je tolikrát větší, kolikrát rychleji se částice pohybuje.

Příklad

Ve vztahné soustavě O, x, y, z existuje homogenní magnetické pole, jehož magnetická indukce $\mathbf{B}$ má souřadnice $B_x = 0, B_y = 0, B_z = 6 \cdot 10^{-4} \text{ T}$. V bodě O do magnetického pole vlétne elektron rychlostí $\mathbf{v}$, která má souřadnice $v_x = 4 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v_y = 0, v_z = 0$ (obr. R5-3a). Určete souřadnice středu trajektorie elektronu.

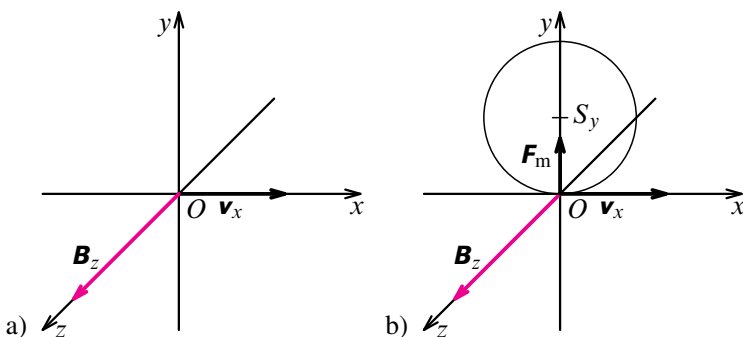
Řešení

$$B_z = 6 \cdot 10^{-4} \text{ T}, v_x = 4 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}; r = ?$$

Na elektron působí magnetická síla, jejíž směr určíme vzhledem k zápornému náboji elektronu pomocí pravidla pravé ruky. Magnetická síla má směr kladné osy y (obr. R5-3b). Elektron se pohybuje po kružnicové trajektorii o poloměru

$$r = \frac{m_e v_x}{Be} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 4 \cdot 10^6}{6 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ m} = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

Střed trajektorie má souřadnici $S_y = 3,8 \text{ cm}$.



R5-3 Pohyb elektronu ve vztahné soustavě

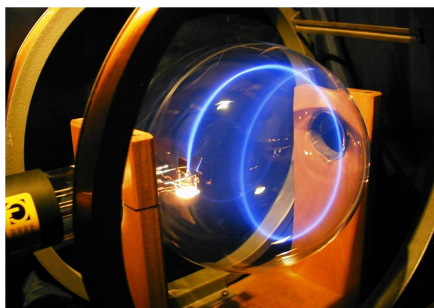
Popsaný jev se využívá např. v urychlovačích částic s nábojem (elektronů nebo iontů), používaných ke studiu dějů v mikrosvětě a při zkoumání vzá-

jemného působení částic. Např. na obr. R5-4 jsou zachyceny trajektorie částic s nábojem, které vznikají v tzv. mlžné komoře umístěné v magnetickém poli. V komoře je sytá pára a nabitá částice při pohybu způsobuje vznik mikroskopických kapek, podobně jako vznikají známé mlžné čáry za letadly letícími ve velké výšce.



R5-4 Trajektorie částic v mlžné komoře

Podobně jako u přímého vodiče závisí velikost magnetické síly na úhlu α mezi vektorem magnetické indukce a vektorem rychlosti. Jestliže pro $\alpha = 90^\circ$ označíme magnetickou sílu $F_{m\perp}$, bude při menším úhlu $F_m = F_{m\perp} \sin \alpha$ a trajektorie elektronu má tvar spirály (obr. R5-5). Když se částice pohybuje ve směru magnetické indukční čáry ($\alpha = 0$), magnetické pole na částici nepůsobí ($F_m = 0$) a směr rychlosti částice se nemění.



R5-5 Trajektorie elektronu ve Wehneltově trubici (vektory F_m a v nejsou navzájem kolmé)

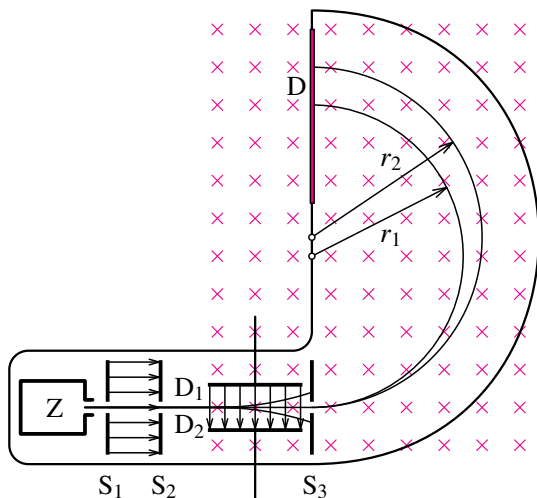
Jestliže se částice s nábojem pohybuje současně v elektrickém a magnetickém poli, působí na ni jak síla elektrická F_e , tak síla magnetická F_m . Výslednicí obou těchto sil je **Lorentzova síla**

$$F_L = F_e + F_m.$$

V nepřítomnosti elektrického pole je Lorentzova síla totožná s magnetickou silou $\mathbf{F}_m$.

Hmotnostní spektrograf

Příkladem zařízení, v němž se využívá Lorentzova síla, je *hmotnostní spektrograf*, kterým se zjišťují nepatrné rozdíly v hmotnostech iontů. Kladné ionty vystupující ze zdroje Z (obr. R5-6) jsou mezi štěrbinami S_1 , S_2 urychlovány elektrickým polem. Vzhledem k odlišným hmotnostem vlétají s poněkud rozdílnými rychlostmi mezi póly mohutného elektromagnetu kolmo k indukčním čarám jeho homogenního magnetického pole o indukci $\mathbf{B}$. Předpokládejme, že ionty mají náboj $+e$. Při vstupu do magnetického pole procházejí ionty rychlostním filtrem tvořeným deskami D_1 , D_2 a štěrbinou S_3 . Zde na ně působí kromě magnetického pole i homogenní elektrické pole o intenzitě $\mathbf{E}$ orientované tak, že magnetická síla $\mathbf{F}_m$ a elektrická síla $\mathbf{F}_e$ jsou namířeny proti sobě. Štěrbinou S_3 projdou jen ionty, pro které platí $F_e = F_m$.



R5-6 Hmotnostní spektrograf

Po průchodu rychlostním filtrem působí na ionty jen magnetická síla $\mathbf{F}_m$, která zakřivuje jejich trajektorii do tvaru půlkružnice, na jejímž konci dopadají na detektor D. Poloměr trajektorie závisí na hmotnosti iontu. Jsou-li v iontovém paprsku obsaženy ionty s různou hmotností, registruje se detektorem tzv. *hmotnostní spektrum*.

Příklad

Elektrické pole hmotnostního spektrografu má intenzitu o velikosti $E = 1,2 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ a magnetická indukce magnetického pole má velikost $B = 1,5 \text{ T}$. Jakou rychlost mají ionty, které prolétly rychlostním filtrem? Určete hmotnosti iontů, jejichž trajektorie mají poloměry $r_1 = 177 \text{ mm}$ a $r_2 = 183 \text{ mm}$, a vyjádřete je jako násobek atomové hmotnostní konstanty m_u .

Řešení

$$E = 1,2 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}, B = 1,5 \text{ T}, r_1 = 177 \text{ mm}, r_2 = 183 \text{ mm}; v = ?, m_1 = ?, m_2 = ?$$

Rychlostním filtrem proletí jen ty ionty, u kterých se účinek elektrické a magnetické síly ruší. Platí tedy

$$F_e = Ee = F_m = Bev,$$

$$v = \frac{E}{B} = \frac{1,2 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}}{1,5 \text{ T}} = 8,0 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Po průletu rychlostním filtrem už na ionty působí jen síla magnetická jako síla dostředivá. Platí:

$$F_m = Bev = F_d = \frac{mv^2}{r}, \quad m = \frac{Ber}{v} = \frac{B^2 er}{E},$$

$$m_1 = \frac{1,5^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,177}{1,2 \cdot 10^6} \text{ kg} =$$

$$= 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 32m_u,$$

$$m_2 = \frac{1,5^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,183}{1,2 \cdot 10^6} \text{ kg} =$$

$$= 5,5 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 33m_u.$$

Filtrem prolétly ionty, které mají rychlost $8,0 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a jejich hmotnosti jsou $32m_u$ a $33m_u$.

Úlohy

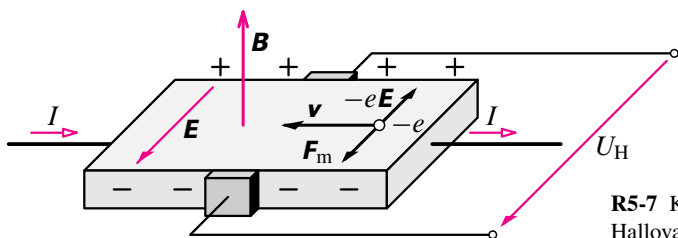
- 1** Do homogenního pole o magnetické indukci $5 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ vlétné elektron rychlostí $10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ kolmo k indukčním čarám. Určete poloměr jeho trajektorie.

- 2 Jak se změní poloměr trajektorie částice, jestliže do stejného magnetického pole jako v úloze 1 vlétne stejnou rychlostí částice α ($m = 6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $Q = 2e$).
- 3 Určete velikost magnetické indukce homogenního pole, v němž se pohybuje elektron s kinetickou energií 10^4 eV po kružnici o poloměru 1 m .

R5.2 Hallův jev

V roce 1879 se americký fyzik EDWIN HERBERT HALL (hól, 1855–1938) začal hlouběji zabývat myšlenkou, že magnetická síla nepůsobí vlastně na samotný vodič, ale na pohybující se elektrony. To by však současně znamenalo, že působením magnetické síly, která je kolmá k vodiči, se elektrony ve vodiči přesunou k jednomu jeho okraji. Mezi oběma okraji by pak mělo vzniknout malé příčné napětí. To se také Hallovi podařilo prokázat změřením nepatrného napětí na protilehlých stranách tenké zlaté fólie.

Schematicky je experiment prokazující tzv. **Hallův jev** naznačen na obr. R5-7. Proud prochází vodičem v podobě pásku umístěného v magnetickém poli tak, že vektor $\mathbf{B}$ magnetické indukce je kolmý k ploše pásku. Magnetická síla působí na volné nosiče náboje v pásku, a tím vzniká nerovnoměrné rozdělení nábojů napříč vodičem, které se projevuje jako příčné elektrického pole o intenzitě $\mathbf{E}$. Tomu odpovídá *Hallovo napětí* U_H , které je při stálém proudu I přímo úměrné velikosti magnetické indukce: $U_H = k B$.



R5-7 K výkladu Hallova jevu

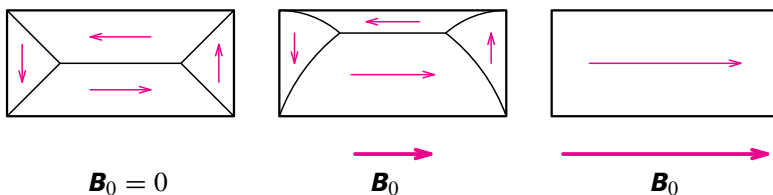
Konstanta k v tomto vztahu závisí na hustotě nosičů náboje ve vodivém pásku a u kovových vodičů je malá. Podstatně větší hodnotu má u polovodičů a záleží také na tom, jestli mají částice vytvářející proud náboj kladný nebo záporný. To umožňuje měřením Hallova napětí určit, zda má polovodič vodivost typu P nebo N.

Hallův jev v polovodičích našel také řadu praktických aplikací, např. v konstrukci čidla (*Hallova sonda*) pro měření velikosti magnetické indukce pomocí přístroje, který se jmenuje *teslametr*, nebo v konstrukčních prvcích automatiizační techniky (bezkontaktní tlačítka, snímače polohy, otáček, zrychlení apod.). Např. v současných automobilech je využit ve snímači, který určuje okamžik zapálení směsi v pracovním válci motoru.

Poznámka: Studium Hallova jevu při teplotách blízkých se termodynamické teplotě 0 K má značný význam pro poznání struktury pevných látek a nitra hmoty. Důkazem významu tohoto jevu jsou i dvě Nobelovy ceny (v letech 1985 a 1998), jimiž bylo studium Hallova jevu oceněno.

R5.3 Magnetizace látek

Působením magnetického pole cívky na jádro cívky z magnetického materiálu dochází k takové změně vnitřní struktury magnetické látky, že získává vlastnosti trvalého nebo dočasného magnetu. Příčinou magnetizace látky je působení tzv. výměnných sil mezi sousedními atomy. Vlivem těchto sil nastává i bez vnějšího působení souhlasné uspořádání magnetických polí atomů v malé oblasti látky. Při této **spontánní (samovolné) magnetizaci** vznikají v látce zmagetované mikroskopické oblasti o objemu 10^{-3} mm^3 až 10 mm^3 zvané **magnetické domény**. Jednotlivé domény jsou však orientovány nahodile. Působením vnějšího magnetického pole se v krystalu feromagnetika domény orientují souhlasně, objem domén se postupně zvětšuje, až při jejich souhlasném uspořádání doménová struktura vymizí (obr. R5-8). Říkáme, že *látka je magneticky nasycena*.



R5-8 Doménová struktura magnetika

Magnetická hysterese

Popíšeme průběh magnetizace jádra cívky, kterou prochází proud I , podrobněji. Magnetickou indukci magnetického pole velmi dlouhé cívky (viz čl. 5.4)

označíme $\mathbf{B}_0$ a pro velikost magnetické indukce platí

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{l}.$$

Do cívky vložíme jádro z magnetické látky o relativní permeabilitě μ_r a magnetická indukce magnetického pole v látce bude

$$\mathbf{B} = \mu_r \mathbf{B}_0.$$

Výsledná magnetická indukce bude záviset nejen na proudu I , ale i na hustotě závitů cívky N/l . Obě tyto veličiny zahrneme do nové fyzikální veličiny, kterou nazveme **intenzita magnetického pole $\mathbf{H}$** a její velikost

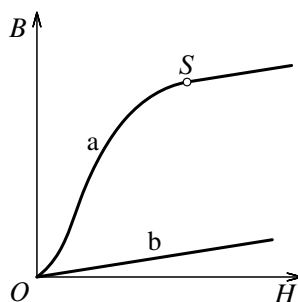
$$H = \frac{NI}{l}.$$

Jednotka intenzity magnetického pole je $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Magnetická indukce v materiálu jádra dlouhé cívky tedy bude

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

Obě vektorové veličiny mají stejný směr a liší se jen velikostí. Bude nás zajímat, jak se obě veličiny budou měnit, když budeme zvětšovat proud v cívce z nulové hodnoty. Na obr. R5-9 je znázorněna tato závislost jednak pro samotnou cívku bez jádra (křivka b), jednak pro jádro (křivka a). Vidíme, že u samotné cívky jde o lineární závislost. To znamená, že magnetická indukce B_0 se zvětšuje jen málo vzhledem k hodnotě permeability vzduchu.

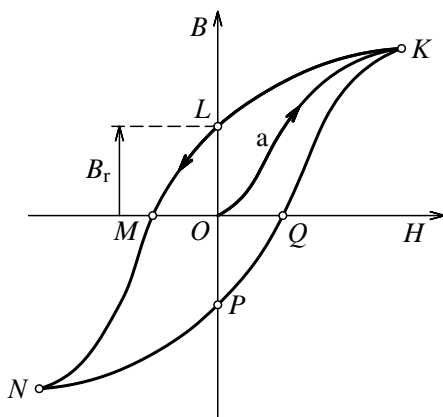


R5-9 Křivka prvotní magnetizace feromagnetika

Odlišný průběh má tato závislost v případě materiálu jádra cívky. Zpočátku se magnetická indukce zvětšuje, až je dosažen bod S . Tomuto bodu odpovídá magnetické nasycení jádra, kdy jsou všechny domény uspořádány rovnoběžně ve směru vektoru $\mathbf{H}$. Po dosažení tohoto bodu se magnetická indukce zvětšuje

jen zvolna, obdobně jako u cívky bez jádra. Křivka (a) se nazývá *křivka prvotní magnetizace*.

Zajímavý je průběh magnetizace, když se proud v cívce začne zmenšovat. Magnetická indukce jádra se zmenšuje po jiné křivce (*KLM* na obr. R5-10), a když $I = 0$, a tedy i $H = 0$, má magnetická indukce jádra hodnotu odpovídající bodu *L*. Jádro tedy zůstává zmagnetováno a magnetická indukce má hodnotu B_r , kterou nazýváme **remanentní magnetická indukce**. Změnou směru proudu v cívce můžeme zmenšit magnetickou indukci až na nulu (bod *M*) a dalším zvětšováním proudu dosáhneme znovu magnetického nasycení, ale při opačném směru vektorů $\mathbf{H}$ i $\mathbf{B}$.

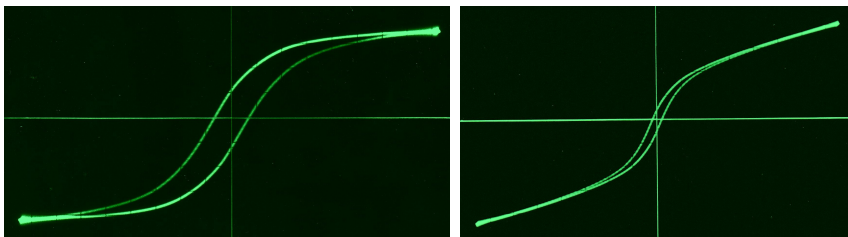


R5-10 Hysterezní smyčka feromagnetické látky

Dalšími změnami proudu můžeme dosáhnout opět magnetického nasycení v bodě *K*, čímž je celý cyklus magnetizace jádra cívky uzavřen. Děj nestejného průběhu magnetizace při změnách proudu v cívce se nazývá **magnetická hystereze** a křivka na obr. R5-10 je **hysterezní smyčka**.

Hysterezní smyčka je důležitou charakteristikou feromagnetických látek. Podle jejího průběhu lze určit ztráty energie při opakovaném magnetování látky, což vede např. k zahřívání jádra. Čím širší je hysterezní smyčka, tím větší ztráty vznikají v magnetické látce, např. když cívku prochází střídavý proud. Materiály se širokou hysterezní smyčkou jsou magneticky tvrdé a naopak úzkou hysterezní smyčku mají látky magneticky měkké. Tyto materiály se používají jako jádra cívek, kterými prochází střídavý proud s větší frekvencí. Např. ke konstrukci záznamové hlavy pevného disku počítače (viz čl. R5.4) se používá materiál *permalloy* (slitina niklu a železa) s velkou relativní permeabilitou ($\mu_r > 5 \cdot 10^4$) s velmi úzkou hysterezní smyčkou, tzn. s malou hodnotou rema-

rentní indukce B_r . Příklady experimentálně získaných hysterezních smyček magneticky tvrdého a magneticky měkkého materiálu jsou na obr. R5-11.

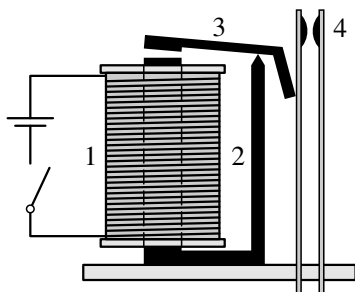


R5-11 Příklady hysterezních smyček feromagnetik

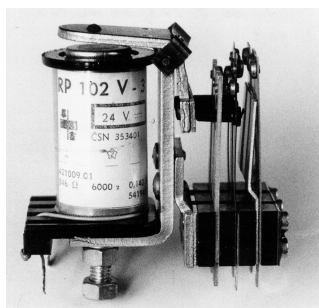
R5.4 Magnetické materiály v praxi

Z mnoha příkladů využití magnetických materiálů v technické praxi uvedeme pouze dva (s některými dalšími se ještě setkáme v učivu o střídavých proudech):

1. **Elektromagnetické relé** je důležitým funkčním prvkem mnoha zařízení, především v soustavách automatizace. Schéma elektromagnetického relé je na obr. R5-12a a jedno z možných provedení zachycuje obr. R5-12b. V blízkosti elektromagnetu tvořeného cívkou (1) a jádrem (2) z magneticky měkké oceli je pohyblivá kotva (3), rovněž z magneticky měkké oceli. Kotva se dotýká pružných kontaktů (4), k nimž je připojen obvod ovládaného zařízení.



a)



b)

R5-12 Elektromagnetické relé

Jakmile elektromagnetem začne procházet ovládací proud, kotva relé se přitáhne k jádru cívky a sepne pružné kontakty. Tím je uvedeno ovládané

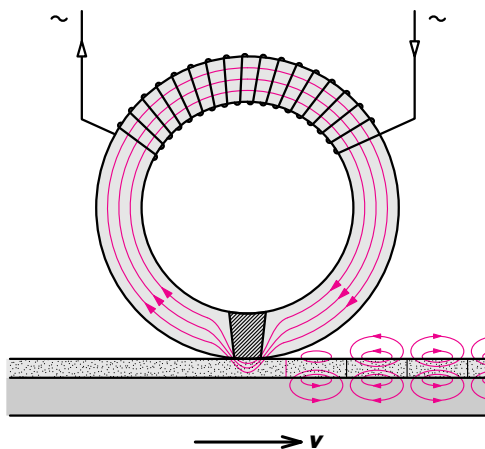
zařízení do chodu. Přitom k přitažení kotvy postačuje mnohem menší ovládací proud, než je proud, který prochází obvodem ovládaného zařízení. Může jím být např. výkonný elektromotor, signalizační návěstí apod.

2. **Magnetický záznam** se využívá v konstrukci pevného disku (HDD – *hard disk drive*), na který se v počítači ukládají data. Záznam je založen na trvalém zmagnetování vrstvy feromagnetické látky (např. oxidu železa), nanesené na ploše disku tvořeného kovovým nemagnetickým kotoučem (obr. R5-13). Pevné disky počítačů jsou uzavřené jednotky obsahující obvykle větší počet kotoučů, které se při chodu trvale otáčejí. Na povrchu disku tvoří záznam soustředné kružnice označované jako *stopy*, které jsou rozděleny do *sektorů*.



R5-13 Pevný disk počítače

Záznam na pevný disk se uskutečňuje miniaturní *záznamovou hlavou* umístěnou na pohyblivém raménku, které se při záznamu nastaví nad určitý sektor. Princip záznamu je znázorněn na obr. R5-14. Základem záznamové hlavy



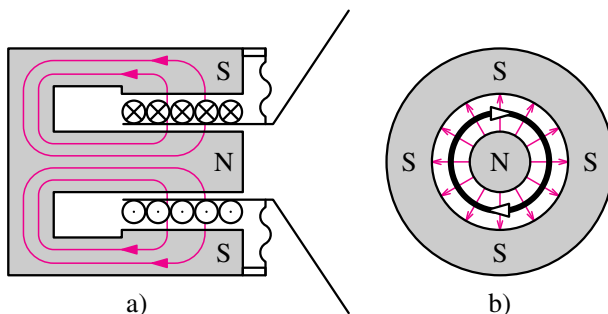
R5-14 Magnetický záznam signálu

je miniaturní cívka na jádře ve tvaru prstence přerušného úzkou štěrbinou. Tím vzniká v jádře cívky proměnné magnetické pole a jeho indukční čáry vystupují v místě štěrbin nad povrch jádra záznamové hlavy. Magnetické pole záznamové hlavy zasahuje do magnetické vrstvy rotujícího disku, v němž vzniká

trvalý záznam v podobě souvislé řady mikroskopických, opačně orientovaných magnetických polí, která odpovídají digitálnímu průběhu ukládaných dat.

Čtení záznamu probíhá obráceným postupem. Těsně nad povrchem disku je umístěna čtecí hlava a změny magnetického pole podél stopy na disku budí v čtecí hlavě proměnný proud odpovídající zaznamenané informaci. Ke konstrukci čtecích hlav se používají materiály, jejichž elektrická vodivost je ovlivněna magnetickým polem.

3. **Elektrodynamický reproduktor.** K přeměně elektroakustických signálů (hudby, řeči) na zvuk se používají reproduktory. V současnosti existuje několik principů konstrukce reproduktorů. Nejstarším z nich je princip elektrodynamického reproduktoru, v němž je využit pohyb cívky v magnetickém poli. Reproduktor je tvořen trvalým magnetem, jehož tvar je patrný z obr. R5-15: (na obr. a) je řez reproduktorem a b) je čelní pohled). V magnetickém poli je umístěna cívka pevně spojená s membránou reproduktoru. Cívka, kterou prochází proud elektroakustického signálu, se působením magnetické síly rozkmitá, kmitání se přenáší na membránu a vzniká zvuk. Příklad elektrodynamického reproduktoru je na obr. R5-16.



R5-15 Řez elektrodynamickým reproduktorem



R5-16 Elektrodynamický reproduktor

R6 NESTACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ POLE

R6.1 Odvození zákona elektromagnetické indukce

Vyjdeme z modelového pokusu na obr. R6-1. V homogenním magnetickém poli o magnetické indukci $\mathbf{B}$ se kolmo k indukčním čarám pohybuje vodič délky l . Vodič se při pohybu dotýká dvou rovnoběžných vodičů spojených s citlivým voltmetrem. Při pohybu vodiče vpravo se ručka voltmetru vychýlí na jednu stranu a při pohybu vlevo na opačnou stranu.

Při pohybu vodiče působí na elektrony ve vodiči magnetická síla o velikosti $F_m = Bev$ (viz čl. R5.1). Působením této síly se elektrony pohybují směrem k dolní části vodiče, kde vzniká záporný náboj. Horní část vodiče je nabitá kladně, takže ve vodiči vzniká indukované elektrické pole o intenzitě $\mathbf{E}_i = \mathbf{F}_m / (-e)$.

Indukované elektrické pole způsobuje, že mezi konci vodiče (body M , N) je indukované napětí U_i . Platí

$$U_i = E_i l = Bvl.$$

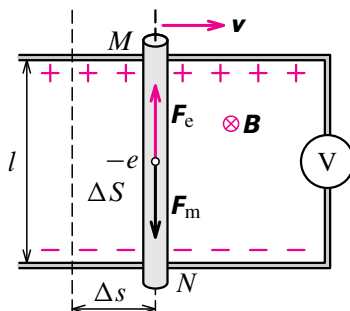
Tento vztah napíšeme ve tvaru

$$|U_i| = B \frac{\Delta s l}{\Delta t},$$

kde Δs je dráha, kterou vodič urazí za dobu Δt , a $\Delta S = \Delta s l$ je změna obsahu plochy opsané vodičem za tuto dobu. Součin $B \Delta S$ je změna magnetického indukčního toku $\Delta \Phi$, takže

$$|U_i| = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

V obvodu na obr. R6-1 plní pohybující se vodič funkci zdroje napětí a voltmetr ukazuje hodnotu svorkového napětí. Pokud můžeme zanedbat proud procházející voltmetrem, má toto svorkové napětí U stejnou hodnotu jako



R6-1 K odvození Faradayova zákona elektromagnetické indukce

indukované napětí U_i . To nám umožňuje měřit napětí U_i , které má význam elektromotorického napětí a jehož přímé měření není možné. Obě napětí však mají opačnou polaritu (vysvětlení viz čl. 2.2). To je ve vztahu

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

vyjádřeno znaménkem minus.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce v uvedeném tvaru udává *střední hodnotu* indukovaného elektromotorického napětí za velmi malou dobu Δt . Je to vyjádření zákona v *diferenčním tvaru*. Má-li výraz $\Delta \Phi / \Delta t$ pro neomezeně se zmenšující dobu Δt určitou mezní hodnotu

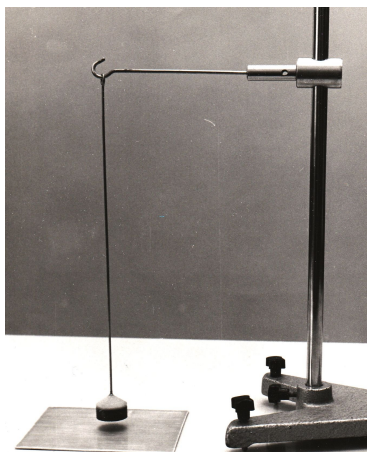
$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{d\Phi}{dt},$$

pak je okamžitá hodnota indukovaného elektromotorického napětí U_i dána derivací magnetického indukčního toku podle času, tedy v *diferenciálním tvaru*

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

R6.2 Indukované proudy ve vodičích

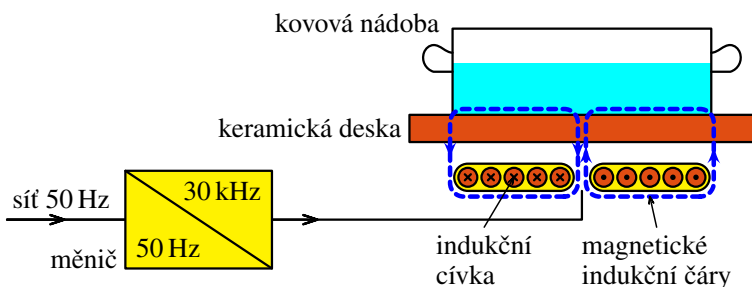
V čl. 6.3 jsme se zabývali vznikem indukovaného proudu v uzavřeném obvodu tvořeném jedním závitem vodiče, popř. cívkou. Indukovaný proud vzniká také ve vodičích, které mají tvar desky, hranolu apod. Přesvědčíme se o tom jednoduchým pokusem, jehož uspořádání je patrné z obr. R6-2. Tyčinka opatřená na konci feritovým magnetem tvoří kyvadlo, které kmitá s poměrně malým tlumením. Když na stůl pod kyvadlo položíme hliníkovou desku, kmitání velmi rychle ustane. Energie kmitavého pohybu kyvadla se přeměnila v energii indukovaných proudů v hliníkové desce.



R6-2 Demonstrace vzniku indukovaných proudů ve vodivé desce

Indukované proudy v plošných vodičích si můžeme představit v podobě miniaturních vírů, které svými účinky působí proti magnetickému poli vytvářenému kyvadlem a brzdí jeho pohyb. Tyto proudy označujeme jako **vířivé proudy**. Jejich objevitelem je francouzský fyzik LÉON FOUCAULT (čti fukó; 1819–1868) a říkáme jim také *Foucaultovy* [fukótovy] *proudy*.

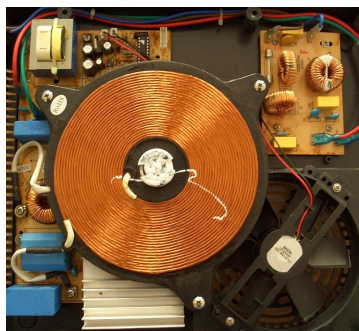
Vířivé proudy se využívají v technické praxi. Příkladem může být *indukční vařič*, který představuje energeticky úsporný spotřebič pro tepelnou úpravu potravin. Schematický náčrt vařiče je na obr. R6-3. Základní součástí je plochá cívka z měděného drátu, umístěná pod keramickou deskou. Nádoba k vaření



R6-3 Princip indukčního vařiče

musí být z vodivého materiálu a je postavena na desce. Cívkou prochází časově proměnný proud a jeho magnetické pole budí v materiálu dna nádoby vířivé proudy, kterými se nádoba zahřívá. Kdyby cívka byla napájena střídavým proudem z elektrické sítě, který má frekvenci 50 Hz, ohřev by byl nedostatečný. Zvětšení intenzity vířivých proudů se dosáhne tak, že v tzv. měniči je pomocí elektronických obvodů proud o frekvenci 50 Hz periodicky přerušován. Přerušování proudu probíhá s podstatně vyšší frekvencí (30 kHz), což vede ke zvětšení indukovaných proudů. K vaření na indukčním vařiči se používají nádoby z feromagnetického materiálu s větší plochou hysterezní smyčky. Tak se získá další teplo jako důsledek magnetizace materiálu nádoby. Na obr. R6-4 je pohled na cívku indukčního vařiče.

Indukční ohřev je příkladem praktického využití Lenzova zákona (čl. 6.3) a Jouleova zákona (čl. 2.8). Od ohřevu



R6-4 Vnitřní část indukčního vařiče

topnou spirálou u běžných vaříčů se indukční ohřev liší tím, že probíhá jen v materiálu nádoby, zatímco jak cívka vaříče, tak keramická deska se přímo nezahřívají. Keramická deska se však postupně zahřeje dotykem s nádobou. U indukčního vaříče se dosahuje až dvojnásobné účinnosti přeměny elektrické energie na teplo (až 90 %), než u vaříče s topnou spirálou.

Významné je využití indukčního ohřevu v technické praxi např. k tavení kovů, kalení ocelových výrobků nebo lisování za tepla. K indukčnímu ohřevu se používají vysokofrekvenční generátory o výkonu řádově 10^2 kW a frekvenci proudu 50 kHz až 500 kHz. Indukční cívka má jen několik závitů a je vyrobena z měděné trubky, kterou protéká chladicí voda. V dutině cívky se vytváří rychle se měnící magnetické pole a výrobek se indukčními proudy zahřeje na vysokou teplotu (obr. R6-5).



R6-5 Indukční ohřev

Indukční vířivé proudy se uplatňují i v jiných souvislostech, např. v konstrukci *indukční brzdy*, která se používá zejména v elektrických dopravních prostředcích (tramvaje, elektrické lokomotivy aj.). Brzdu tvoří kovový kotouč rotující v magnetickém poli elektromagnetu. V kotouči brzdy se indukují vířivé proudy, kterými se kotouč zahřívá na úkor mechanické energie jeho rotačního pohybu. Brzdný účinek lze regulovat velikostí proudu v elektromagnetu. Teplo je z kotouče odváděno do okolního vzduchu, popř. je kotouč chlazen nuceným oběhem vzduchu. Pokud se kotouč otáčí malou rychlostí, je brzdný účinek malý. Roste však s druhou mocninou rychlosti, takže při velké rychlosti je brzdný účinek velmi výrazný.

Úlohy

- 1 Jaký je rozdíl mezi indukčním ohřevem a ohřevem v mikrovlnné troubě?
- 2 Materiál nádob pro vaření na indukčním vařiči nesmí mít příliš malou rezistivitu (např. měď). Vysvětlete.
- 3 Proč k indukčnímu ohřevu přispívá také jev hystereze feromagnetického materiálu, ze kterého je vyrobena nádoba na vaření?
- 4 Oblíbeným prostředkem pro udržení tělesné kondice je rotoped. Zátěž při cvičení na rotopedu se řídí pomocí magnetického brzdného systému nebo indukční brzdou. Na internetu najdete popis principu těchto systémů. Vyložte z fyzikálního hlediska rozdíl mezi nimi a způsob regulace zátěže.

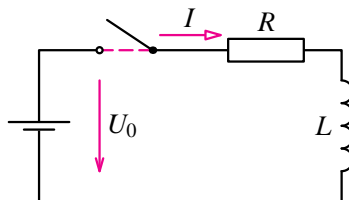
R6.3 Elektrický obvod s cívkou a kondenzátorem

Jestliže elektrický obvod s cívkou nebo kondenzátorem připojíme ke zdroji elektrického napětí, jehož hodnota je konstantní, nezačne obvodem procházet ihned ustálený elektrický proud jako v případě obvodu s rezistorem. Ustálený stav nastane až po určité době, během níž probíhá tzv. *přechodný děj*. V obvodu s cívkou proud narůstá postupně, až se ustálí na hodnotě, která odpovídá odporu cívky, popř. celého obvodu. Naopak v obvodu s kondenzátorem se kondenzátor v průběhu přechodného děje postupně nabíjí, přičemž se nabíjecí proud zmenšuje a klesne na nulu v okamžiku, kdy je kondenzátor nabit na hodnotu připojeného zdroje napětí.

Popíšeme si děje v obvodu s cívkou a s kondenzátorem podrobněji.

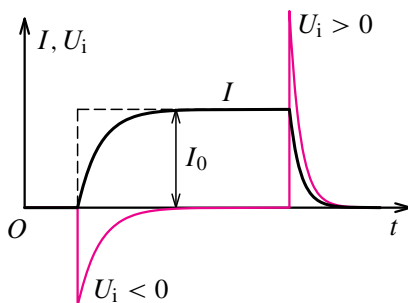
Přechodný děj v obvodu s cívkou

Přechodný děj v obvodu s cívkou ukážeme pokusem podle obr. R6-6. Obvod tvoří cívka s indukčností L , s níž je sériově spojen rezistor o odporu R (může to být odpor vinutí cívky). V okamžiku, kdy je obvod připojen ke zdroji napětí U_0 , začíná cívkou procházet proud a v okolí závitů cívky vzniká magnetické pole. To podle Lenzova zákona



R6-6 Demonstrace přechodného děje v cívkě

svými účinky působí proti příčině, která ho vyvolala, tzn. proti vzniku proudu v obvodu. V cívce se indukuje napětí U_i opačné polarity, než je napětí zdroje. Proud tedy nemůže dosáhnout ustálené hodnoty $I_0 = U_0/R$ okamžitě, ale narůstá postupně (obr. R6-7).



R6-7 Časový diagram přechodného děje

Průběh děje je tedy ovlivněn elektromagnetickou indukcí. Na koncích cívky vzniká indukované napětí

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

a cívku prochází proud

$$I = \frac{U_0 + U_i}{R} = \frac{U_0 - L \frac{\Delta I}{\Delta t}}{R}.$$

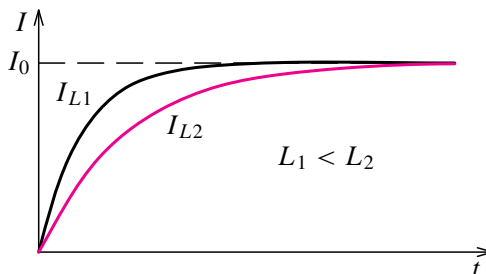
V okamžiku připojení zdroje napětí je $I = 0$ a indukované napětí má stejnou hodnotu, ale opačnou polaritu než zdroj ($U_i = -U_0$). Poněvadž indukované napětí existuje jen při změnách proudu, začíná se proud zvětšovat, ale postupně se přírůstky proudu zmenšují, až nastane ustálený stav, kterému odpovídá proud I_0 .

Obdobný přechodný děj nastane i při odpojení obvodu zdroje napětí a spojení cívky jen s rezistorem. V obvodu s cívku vzniká indukované napětí, které se snaží proud v obvodu udržet. Napětí má tedy stejnou polaritu, jakou má zdroj napětí. Proto proud v obvodu nezaniká okamžitě, ale postupně (viz opět graf časové závislosti na obr. R6-7).

Poznámka: V praxi často dochází k rozpojení obvodu s cívku. Protože rozpojením obvodu se jeho odpor skokem změnil na velkou hodnotu ($R \rightarrow \infty$), poklesne proud v obvodu rychle k nule. Tomu odpovídá velká hodnota indukovaného napětí, která několikanásobně překračuje hodnotu napětí zdroje ($U_i \gg U_0$). Velké indukované napětí při přerušení obvodu je příčinou vzniku jiskrového výboje v místě přerušení (např. mezi kontakty vypínače). To je nežádoucí,

poněvadž se kontakty opalují, jiskření ruší příjem rozhlasu a ve výbušném prostředí může dojít k explozi. Tomu lze zabránit např. připojením kondenzátoru paralelně ke kontaktům vypínače. V některých zařízeních se naopak velké indukované napětí využívá. Příkladem je startér zářivky (viz čl. R4.4).

Čím větší je indukčnost cívky, tím delší dobu se bude magnetické pole vytvářet a proud narůstá pomaleji. To je patrné z grafu na obr. R6-8, na němž je zobrazen časový průběh přechodného děje pro dvě cívky s různou indukčností ($L_1 < L_2$).

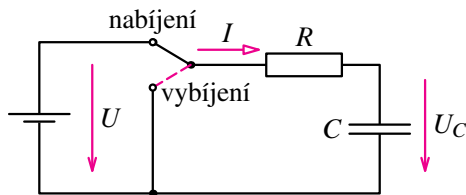


R6-8 Časové diagramy přechodného děje pro dvě cívky s různou indukčností

Podrobněji je přechodný děj v obvodu s cívkou popsán ve Slovníčku pojmů na CD **AS6**.

Přechodný děj v obvodu s kondenzátorem

Obdobný pokus jako s cívkou můžeme provést podle obr. R6-9 také s kondenzátorem, který je spojen v sérii s rezistorem (bez rezistoru by nabití kondenzátoru



R6-9 Demonstrace nabíjení a vybíjení kondenzátoru

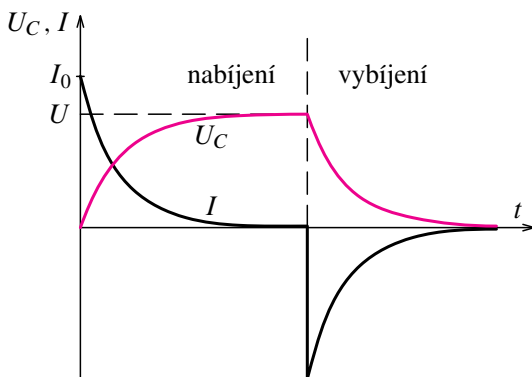
proběhlo prakticky okamžitě). Po připojení ke zdroji napětí U začne obvodem procházet proud I , kondenzátor se začíná nabíjet a napětí U_C se postupně zvětšuje. Rozdíl potenciálů mezi kladným pólem zdroje a kladně nabitou deskou kondenzátoru se zmenšuje. To má za následek postupné zmenšování nabíjecího proudu a když $U_C = U$, je kondenzátor nabit a obvodem proud přestane procházet. Mezi deskami kondenzátoru je elektrické pole, které má

energii (viz čl. 1.6)

$$E_e = \frac{1}{2} C U^2.$$

Při vybíjení kondenzátoru přes rezistor R se napětí postupně zmenšuje, elektrická energie se v rezistoru mění v jeho vnitřní energii (rezistor se zahřívá) a elektrické pole kondenzátoru zaniká. Časový průběh nabíjení a vybíjení kondenzátoru je na obr. R6-10.

Podrobněji je přechodný děj v obvodu s kondenzátorem popsán ve Slovníčku pojmů **↗S1**.



R6-10 Časové diagramy proudu a napětí při nabíjení a vybíjení kondenzátoru

R6.4 Energie magnetického pole cívky

V čl. 6.4 je uveden vztah pro energii magnetického pole

$$E_m = \frac{1}{2} L I^2.$$

K tomuto vztahu dospějeme následující úvahou. Sériový obvod s rezistorem a cívkou (obvod RL ; obr. 6-6) připojíme ke zdroji napětí a obvodem prochází proud, který se postupně zvětšuje. Za velmi krátkou dobu Δt se proud zvětší o ΔI a energie magnetického pole se zvětší o ΔE_m . Tuto energii získalo magnetické pole cívky přeměnou stejně velké části elektrické energie zdroje. Elektrické síly působící na volné elektrony ve vodiči cívky vykonaly při této přeměně práci, jejíž velikost je právě rovna ΔE_m . Velikost této práce je dána součinem velikosti elektromotorického napětí $|U_i|$ indukovaného v cívce,

proudu I a doby Δt . Platí

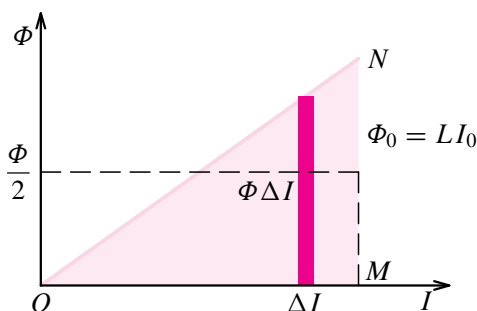
$$\Delta E_m = |U_i| I \Delta t,$$

nebo po úpravě

$$\Delta E_m = L \frac{\Delta I}{\Delta t} I \Delta t = L I \Delta I = \Phi \Delta I.$$

Abychom dostali vztah pro energii E_m magnetického pole cívky, kterou prochází stálý proud I_0 , vyjdeme z grafu funkce $\Phi = LI$. Na obr. R6-11 odpovídá elektrické práci $\Phi \Delta I$, a tím i změně energie ΔE_m barevně vyznačená ploška. energii E_m magnetického pole cívky s proudem I_0 odpovídá obsah trojúhelníku OMN , čili

$$E_m = \frac{1}{2} \Phi_0 I_0 = \frac{1}{2} L I_0^2.$$



R6-11 Grafické určení energie magnetického pole cívky s proudem

Energie magnetického pole cívky je přímo úměrná druhé mocnině proudu v cívce. Protože budeme obvykle označovat proud jen I , setkáme se nejčastěji se vztahem pro energii magnetického pole ve tvaru, který je v úvodu čl. R6.4.

Poznámka: Pro cívku s feromagnetickým jádrem tento vztah neplatí, protože indukčnost cívky závisí na proudu v cívce a vztah pro magnetický indukční tok $\Phi = LI$ není lineární. Za přibližně lineární můžeme tento vztah považovat u cívek s otevřeným jádrem nebo s jádrem přerušným vzduchovou mezerou.

Po vypnutí vypínače v obvodu RL proud nezanikne okamžitě, ale ve velmi krátké době. V této době probíhá přeměna energie magnetického pole na jinou formu energie, převážně na vnitřní energii obvodu (Jouleovo teplo).

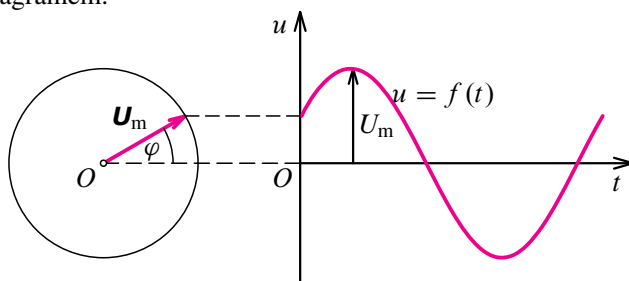
R7 STŘÍDAVÝ PROUD

R7.1 Složené obvody střídavého proudu

V kapitole 7 jsme se zabývali převážně jednoduchými obvody střídavého proudu s jedním parametrem, tzn. s odporem R , s indukčností L , popř. kapacitou C . Jako příklad složeného obvodu byl popsán obvod s RLC v sérii. Časový průběh střídavého napětí a proudu jsme vyjadřovali graficky pomocí časového diagramu. U složených obvodů je výhodnější použít k popisu dějů v obvodech tzv. fázorový diagram.

Fázorový diagram

Ve fázorovém diagramu se střídavý proud nebo napětí znázorňuje orientovanou úsečkou umístěnou v soustavě souřadnic, tzv. *fázorem*. Fázor má délku rovnou amplitudě veličiny a s osou x svírá úhel rovný počáteční fázi (tzn. fázi v okamžiku $t = 0$). Na obr. R7-1 je patrné, jak fázorový diagram souvisí s časovým diagramem.



R7-1 Souvislost fázorového a časového diagramu

Pomocí fázorového diagramu, v němž jsou zakresleny fázory střídavého napětí i proudu, lze snadno posoudit jejich fázový rozdíl. V praktických situacích známe častěji efektivní hodnoty střídavých napětí, než jejich amplitudy. Proto i ve fázorových diagramech střídavých obvodů budeme dále místo fázorů $\mathbf{U}_m$, $\mathbf{I}_m$ používat fázory $\mathbf{U}$, $\mathbf{I}$ o velikostech rovných efektivním hodnotám U , I .

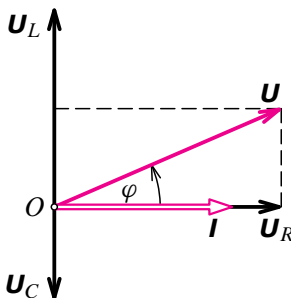
V přehledu střídavých obvodů (viz Shrnutí kap. 7) jsou fázové posuny střídavého napětí a proudu znázorněny časovým diagramem i fázorovým diagramem. Např. v případě jednoduchého obvodu s L je fázor napětí posunut vzhledem k fázoru proudu o úhel $\frac{1}{2}\pi$ v kladném směru, tzn. proti směru pohybu

hodinových ručiček. Naopak v případě jednoduchého obvodu s C je fázor napětí posunut o úhel $-\frac{1}{2}\pi$ v záporném směru.

Obvod s RLC v sérii

Použití fázorového diagramu pro řešení složených obvodů střídavého proudu ukážeme na příkladu **obvodu s RLC v sérii**. Jeho fázorový diagram je na obr. R7-2.

Fázor proudu I má stejný směr jako fázor napětí U_R , kdežto fázor napětí U_L svírá s fázorem proudu úhel $\frac{1}{2}\pi$ a fázor napětí U_C je vzhledem k fázoru proudu posunut o úhel $-\frac{1}{2}\pi$. Fázor výsledného napětí U najdeme jako geometrický součet jednotlivých fázorů napětí. Velikost fázoru U vypočítáme pomocí Pythagorovy věty:



R7-2 Fázorový diagram obvodu s RLC v sérii

$$U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2.$$

Poněvadž

$$U^2 = Z^2 I^2 = I^2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right],$$

platí pro impedanci vztah

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Z fázorového diagramu najdeme také vztah pro fázový posun φ napětí a proudu

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

přičemž φ leží v intervalu $-\frac{1}{2}\pi \leq \varphi \leq +\frac{1}{2}\pi$.

Poznámka: Kromě pojmu impedance se zavádí také pojem **reaktance** $X = X_L - X_C$. Tato veličina charakterizuje vlastnost té části obvodu střídavého proudu, v níž se elektromagnetická energie nemění v teplo, ale jen v energii elektrického a magnetického pole. Zavedením reaktance se zjednoduší odvozené vztahy na tvar

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{a} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}.$$

Z fázorového diagramu je patrné, že pro $U_L > U_C$ je fázový posun napětí vzhledem k proudu kladný ($0 < \varphi < \frac{1}{2}\pi$) a obvod má takové vlastnosti, jako by obsahoval jen rezistanci a induktanci. Naopak, když $U_L < U_C$, je fázový posun záporný ($-\frac{1}{2}\pi < \varphi < 0$) a obvod má takové vlastnosti, jako by obsahoval jen rezistanci a kapacitanci.

Rezonance obvodu s RLC v sérii

Zvláštní případ nastává u obvodu s RLC v sérii, je-li při dané frekvenci indukance obvodu stejně velká jako jeho kapacitance ($X_L = X_C$). Ze vztahu pro impedanci pak vyplývá, že $Z = R$. Fázový rozdíl napětí a proudu je v tomto případě nulový a obvod má vlastnosti rezistance. Proud v obvodu dosahuje nejvyšší hodnoty.

Tento případ označujeme jako **rezonanci** střídavého obvodu a příslušnou **rezonanční frekvenci** f_0 určíme z podmínky

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Odtud

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Při rezonanci je fázový posun napětí a proudu nulový ($\varphi = 0$).

Reálná cívka v obvodu střídavého proudu

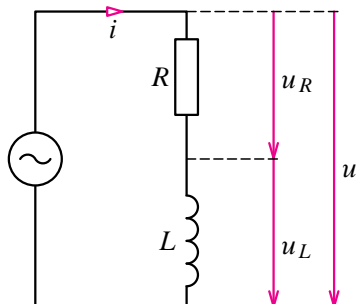
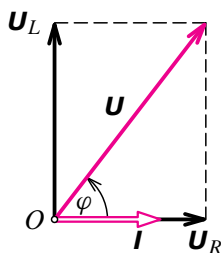
Vztah pro impedanci obvodu s RLC v sérii platí obecně pro libovolný obvod střídavého proudu s obvodovými prvky spojenými do série. Ukážeme to na příkladu reálné cívky, která má prakticky vždy nejen indukčnost, ale také odpor. Můžeme pro ni vytvořit náhradní obvod v podobě sériového spojení ideální cívky s indukčností L a odporu R – **obvod s RL v sérii** (obr. R7-3). Fázorový diagram tohoto obvodu je na obr. R7-4.

Fázor $\mathbf{U}_R$ má podle Ohmova zákona velikost $U_R = RI$ a fázor $\mathbf{U}_L$ má velikost $U_L = X_L I = \omega L I$. Platí

$$U^2 = U_R^2 + U_L^2 = I^2 (R^2 + \omega^2 L^2)$$

a impedance obvodu

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

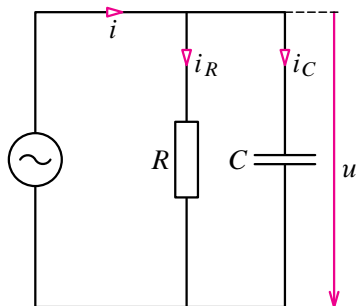
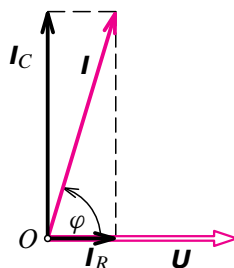
R7-3 Obvod s RL v sériiR7-4 Fázorový diagram obvodu s RL v sérii

Pro fázový posun napětí a proudu najdeme z fázorového diagramu

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega L}{R}.$$

Reálný kondenzátor v obvodu střídavého proudu

V obvodu střídavého proudu s kondenzátorem dochází k periodické polarizaci dielektrika mezi deskami kondenzátoru. Molekuly dielektrika kmitají a vznikají ztráty energie přeměnou na teplo. Tyto ztráty můžeme vyjádřit odporem R připojeným paralelně ke kondenzátoru s kapacitou C . Náhradním obvodem reálného kondenzátoru je **obvod s RC paralelně** (obr. R7-5). Jeho fázorový diagram je na obr. R7-6.

R7-5 Obvod s RC paralelněR7-6 Fázorový diagram obvodu s RC paralelně

Při paralelním spojení je řídicí veličinou napětí U , které je stejné na obou

obvodových prvcích. Kondenzátorem prochází proud $I_C = U/X_C = \omega CU$, který je vzhledem k proudu $I_R = U/R$ fázově posunut v kladném směru o $\frac{1}{2}\pi$. Pro celkový proud obvodem platí

$$I^2 = I_R^2 + I_C^2 = U^2 \left(\frac{1}{R^2} + \omega^2 C^2 \right)$$

a impedance obvodu

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}.$$

Fázový posun proudu vzhledem k napětí

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega CR.$$

Poznámka: U technických kondenzátorů je odpor dielektrika velký, takže fázový posun fázorů $\mathbf{U}$ a $\mathbf{I}$ se jen málo liší od $\frac{1}{2}\pi$. Proto se obvykle vyjadřuje *ztrátový úhel*

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$$

a charakteristickou veličinou reálného kondenzátoru je *ztrátový činitel kondenzátoru* $\operatorname{tg} \delta$. Z fázorového diagramu vyplývá, že

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} = \frac{1}{\omega CR}.$$

To znamená, že čím větší je odpor dielektrika, tím menší jsou ztráty energie v kondenzátoru. Tak je tomu zejména u kondenzátorů, jejichž dielektrikem je vzduch.

Indukčnost cívky a kapacitu kondenzátoru můžeme měřit pomocí střídavého proudu. To je námětem laboratorních cvičení **LC6** a **LC7**.

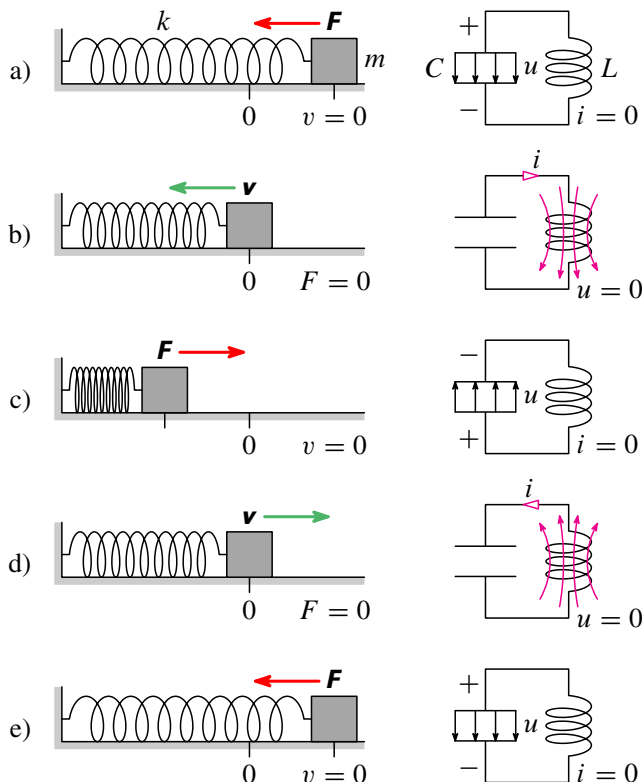
Úlohy

- 1** Sestavte fázorový diagram obvodu s RLC v sérii při $X_L = R$ a $X_C = 2R$ a určete fázový posun napětí a proudu v obvodu.
- 2** Nakreslete fázorový diagram obvodu s RLC v sérii, jestliže $X_L = 0,5X_C = R = 1,0\ \Omega$ a obvodem prochází proud o amplitudě $1,0\ \text{A}$. Určete impedanci a fázové posunutí napětí a proudu v obvodu.
- 3** Obvod s RLC v sérii je tvořen rezistorem o odporu $200\ \Omega$, cívkou o indukčnosti $0,5\ \text{H}$ a kondenzátorem o kapacitě $4\ \mu\text{F}$. Obvodem prochází proud $0,5\ \text{A}$ o frekvenci $100\ \text{Hz}$. Nakreslete fázorový diagram obvodu, určete celkové napětí na obvodu a fázový posun napětí a proudu v obvodu.

- 4 V obvodu s RLC v sérii platí, že při frekvenci 50 Hz je $X_L = 2X_C$. Jak se musí změnit frekvence, aby nastala rezonance?

R7.2 Mechanický a elektromagnetický oscilátor

V čl. 7.7 je popsáno elektromagnetické kmitání oscilačního obvodu jako důsledek periodické přeměny energie elektrického pole kondenzátoru na energii magnetického pole cívky a naopak. Obdobné přeměny energie probíhají i v mechanickém oscilátoru, v němž se u pružinového oscilátoru mění potenciální energie pružiny na kinetickou energii kmitajícího tělesa. Mezi ději v obou typech oscilátorů existuje **podobnost** čili **analogie**, která je znázorněna srovnáním obou oscilátorů na obr. R7-7.



R7-7 Analogie mechanického a elektromagnetického oscilátoru

Nabití kondenzátoru v pokusu podle obr. 7-13 (kap. 7) je analogické počátečnímu prodloužení pružiny u pružinového oscilátoru. Oscilátory tak získají v počátečním okamžiku potenciální energii, která je u oscilačního obvodu vyjádřena jako energie elektrického pole kondenzátoru (viz kap. 1, čl. 1.6)

$$E_e = \frac{1}{2}Uq = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}.$$

Mechanický oscilátor prodloužením pružiny získá potenciální energii pružnosti

$$E_p = \frac{1}{2}Fy = \frac{1}{2}ky^2,$$

kde F je síla působící na oscilátor, y je výchylka oscilátoru a k je tuhost pružiny.

V průběhu jedné čtvrtiny periody kmitání oscilačního obvodu se elektrická energie přemění na energii magnetického pole cívky (viz kap. 6, čl. 6.4)

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

a potenciální energie mechanického oscilátoru se přemění na kinetickou energii

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2.$$

Z analogických vztahů pro energie sestavíme tabulku analogických veličin obou oscilátorů a děje v obou oscilátorech popíšeme analogickými pojmy a rovnicemi.

Tabulka R7-1

Mechanický oscilátor	Elektromagnetický oscilátor
okamžitá výchylka y	okamžitý náboj q
rychlost $v = \frac{\Delta y}{\Delta t}$	proud $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$
energie potenciální $E_p = \frac{1}{2}ky^2$	energie elektrická $E_e = \frac{1}{2}\frac{q^2}{C}$
energie kinetická $E_k = \frac{1}{2}mv^2$	energie magnetická $E_m = \frac{1}{2}Li^2$
síla F	elektrické napětí u
hmotnost m	indukčnost L
tuhost pružiny $k = \frac{F}{y}$	reciproká hodnota kapacity $\frac{1}{C} = \frac{u}{q}$

Pomocí těchto analogických veličin můžeme přepsat kteroukoliv rovnici mechanického oscilátoru na odpovídající rovnici pro elektromagnetický oscilátor. Pro mechanický oscilátor z 2. Newtonova pohybového zákona vyplývá

$$ma = -ky \quad \text{čili} \quad a + \frac{k}{m}y = 0.$$

Analogická rovnice elektromagnetického oscilátoru odpovídá 2. Kirchhoffovu zákonu (viz čl. R2-4) pro oscilační obvod bez tlumení

$$\frac{q}{C} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad \text{čili} \quad \frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{1}{LC}q = 0.$$

Poněvadž $k/m = \omega_0^2$ a podobně $1/LC = \omega_0^2$, můžeme psát

$$a + \omega_0^2 y = 0, \\ \frac{\Delta i}{\Delta t} + \omega_0^2 q = 0.$$

Analogické vztahy pro periodu vlastního kmitání obou oscilátorů jsou

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{a} \quad T_0 = 2\pi\sqrt{LC}.$$

R7.3 Tlumené kmitání oscilačního obvodu

Při výkladu kmitání oscilačního obvodu (čl. 7.7) bylo uvedeno, že vlastní kmitání reálného oscilačního obvodu je vždy tlumené. To znamená, že amplituda kmitů se postupně zmenšuje, až kmitání zanikne. Hlavní příčinou tlumení je odpor R oscilačního obvodu, ve kterém se energie elektromagnetického kmitání mění na teplo. Na tomto odporu je napětí $u_R = Ri$, takže 2. Kirchhoffův zákon pro oscilační obvod můžeme zapsat ve tvaru

$$Ri + \frac{q}{C} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Po úpravě dostaneme rovnici tlumeného kmitání oscilačního obvodu

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{R}{L}i + \frac{q}{LC} = 0. \quad (1)$$

Model kmitání tlumeného oscilačního obvodu

Na základě rovnice tlumeného kmitání oscilačního obvodu vytvoříme model, který nám umožní zobrazit časový diagram kmitání obvodu pomocí počítače.

Z rovnice (1) určíme zvětšení proudu Δi za malý časový interval Δt (nazýváme ho *časový krok*)

$$\Delta i = -\frac{Ri + \frac{q}{C}}{L} \Delta t.$$

V počátečním okamžiku $t_0 = 0$ je na kondenzátoru napětí $u_{C0} = q_0/C$ a proud v obvodu $i_0 = 0$. O časový krok později, tzn. v čase

$$t_1 = t_0 + \Delta t$$

bude náboj kondenzátoru

$$q_1 = q + i \Delta t$$

a proud v obvodu

$$i_1 = i + \Delta i.$$

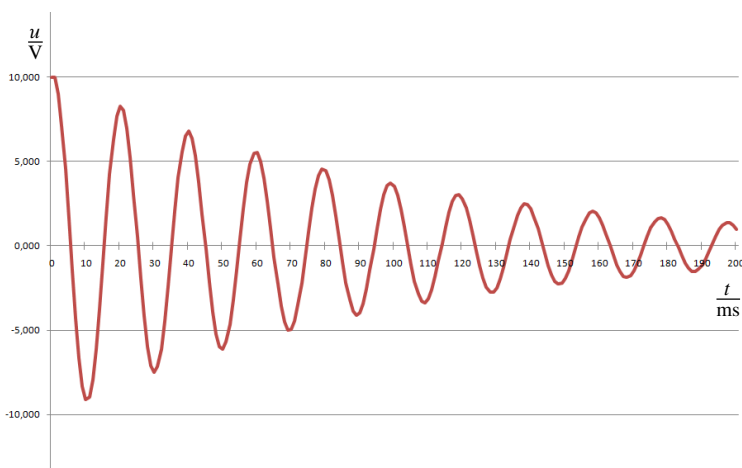
Když budeme tento výpočet opakovat s hodnotami získanými v předcházejícím kroku, tak získáme řadu dat a pro každý časový krok určíme napětí kondenzátoru $u_C = q/C$. Napětí zobrazíme jako časový diagram kmitání oscilačního obvodu.

Poznámka: Pro uvedený postup výpočtu existují počítačové programy, do nichž se vloží počáteční hodnoty sledovaných veličin, v našem případě napětí (popř. náboje) a proudu, hodnoty parametrů R , L a C a zvolí se časový krok. Čím menší bude jeho velikost, tím přesnější bude výpočet. Model si ověříme na příkladu oscilačního obvodu s parametry $R = 20 \Omega$, $L = 1 \text{ H}$ a $C = 10 \mu\text{F}$. Kondenzátor má v počátečním okamžiku napětí $u_{C0} = 10 \text{ V}$ a proud v obvodu $i_0 = 0$. V nejjednodušším případě můžeme k výpočtu použít tabulkový procesor (např. Excel), jehož buňky vyplníme podle tabulky R7-2. Výpočet s časovým krokem $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ je proveden pro celkovou dobu $0,2 \text{ s}$ (obr. R7-8).

Tabulka R7-2

	t	u_C	Δi	i	R	L	C	Δt
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0	10	0		20	1	0,00001	0,001
2	=A1+\$H\$1	=B1+(D1*\$H\$1/\$G\$1)	=-((B2+\$E\$1*D1)/\$F\$1)*\$H\$1	=D1+C2				
3	=A2+\$H\$1	=B2+(D2*\$H\$1/\$G\$1)	=-((B3+\$E\$1*D2)/\$F\$1)*\$H\$1	=D2+C3				
4	...	...	...	...				

Tlumení kmitů oscilačního obvodu ovlivňuje také úhlovou frekvenci ω vlastního kmitání tlumeného oscilátoru, která je menší než úhlová frekvence



R7-8 Časový diagram kmitání tlumeného oscilačního obvodu

ω_0 netlumeného oscilátoru ($\omega < \omega_0$). Z teorie kmitání vyplývá obecně platný vztah (platí i pro mechanický oscilátor)

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2},$$

kde δ je *součinitel tlumení*

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{R}{L}.$$

Podle velikosti součinitele tlumení mohou nastat tři typické případy:

1. $\omega_0^2 > \delta^2$ – *periodický děj*; oscilační obvod kmitá s frekvencí

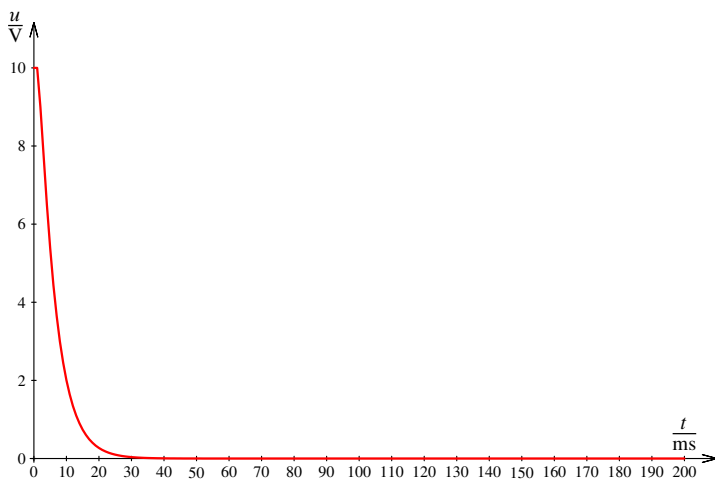
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

2. $\omega_0^2 < \delta^2$ – *aperiodický děj*; kmitání vůbec nevznikne, kondenzátor se vybije a jeho nové nabití již nenastane.

3. $\omega_0^2 = \delta^2$ – *kritické tlumení*; mezní stav oscilátoru, při němž aperiodický děj proběhne v nejkratší době. V našem modelu tento případ nastane při odporu

$$R = \sqrt{\frac{4L}{C}} \doteq 632 \, \Omega.$$

Časový diagram kritického tlumení oscilačního obvodu je na obr. R7-9.



R7-9 Časový diagram kritického tlumení oscilačního obvodu

Poznámka: Zavedením součinitele tlumení můžeme upravit rovnici (1) do obecně platného tvaru

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} + 2\delta i + \omega_0^2 q = 0.$$

Tato rovnice má pro případ $\Delta t \rightarrow 0$ řešení, z něhož vyplývá, že amplituda kmitů se zmenšuje podle exponenciální funkce a pro okamžité napětí kondenzátoru platí vztah

$$u = U_0 e^{-\delta t} \cos \omega t, \quad (2)$$

kde U_0 je napětí kondenzátoru v počátečním okamžiku.

Úlohy

- 1** Určete periodu vlastního kmitání netlumeného a tlumeného kmitání v oscilačním obvodu v popsaném modelu.
- 2** Zobrazte pomocí modelu netlumené kmitání oscilačního obvodu ($R = 0$).
- 3** V tabulce kmitání oscilačního obvodu při kritickém tlumení najděte okamžik, kdy kmitání v obvodu zaniklo.
- 4** Ověřte si výpočtem pomocí počítačového programu, že rovnice (2) vede ke stejnému výsledku jako rovnice (1).

R7.4 Nucené kmitání oscilačního obvodu

Vlastní kmitání oscilačního obvodu bylo podmíněno tím, že mu v počátečním okamžiku byla dodána určitá energie. Ztráty energie způsobené tlumením však nahrazovány nebyly, takže kmitání postupně zaniklo. Aby se kmitání udrželo, mohli bychom např. na začátku každé periody připojit oscilační obvod na krátký okamžik ke zdroji stejnosměrného napětí. Kondenzátor by se znovu nabil na počáteční hodnotu a oscilátor by kmital neustále. Jeho napětí by však nebylo harmonické.

Netlumené harmonické kmitání elektromagnetického oscilátoru vznikne tehdy, když jsou ztráty energie nahrazovány v průběhu celé periody. Toho se dosáhne připojením oscilátoru ke zdroji harmonického napětí $u = U_m \sin \omega t$, jak jsme to poznali v učivu o obvodech střídavého proudu. Oscilační obvod pak kmitá harmonicky s úhlovou frekvencí ω , která se může lišit od úhlové frekvence vlastního kmitání ω_0 ($\omega \neq \omega_0$).

Připojením elektromagnetického oscilátoru ke zdroji harmonického napětí vzniká v oscilátoru nucené kmitání. Oscilátor kmitá s frekvencí připojeného zdroje, nikoliv s frekvencí vlastního kmitání. Nucené kmitání je netlumené.

Frekvence nuceného kmitání tedy nezávisí na parametrech oscilačního obvodu. Mění se však impedance obvodu, a tedy i amplituda elektromagnetického kmitání obvodu. Budeme uvažovat reálný oscilační obvod, v němž cívku nahradíme paralelním spojením indukčnosti L_p a rezistoru R_p . Kondenzátor s kapacitou C můžeme považovat za ideální, tzn. s velmi velkým odporem (obr. R7-10). Fázorový diagram tohoto obvodu je na obr. R7-11. Z něho je patrné, že

$$I^2 = I_R^2 + (I_C - I_R)^2 = U^2 \left[\frac{1}{R_p^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_p} \right)^2 \right].$$

Impedance Z obvodu

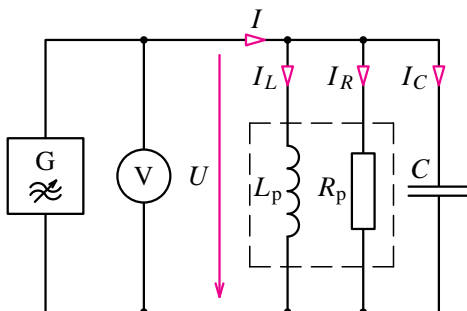
$$Z = \frac{U}{I} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_p^2} + \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_p} \right)^2}}$$

závisí na frekvenci a je největší při frekvenci, při níž

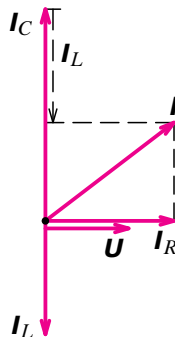
$$\omega C = \frac{1}{\omega L_p} \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{L_p C}}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C}}.$$

Při této frekvenci nastává **rezonance oscilačního obvodu** a jeho celková impedance je největší

$$Z = R_p.$$



R7-10 Reálný oscilační obvod



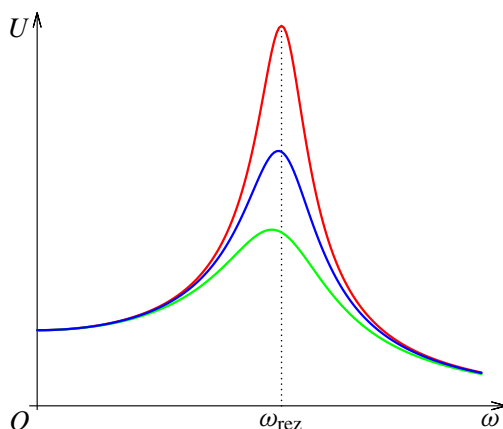
R7-11 Fázorový diagram reálného oscilačního obvodu

Rezonanční křivka reálného oscilačního obvodu

Závislost impedance oscilačního obvodu na frekvenci nuceného kmitání je dobře patrná z frekvenční charakteristiky obvodu, kterou nazýváme **rezonanční křivka** (obr R7-12). Zobrazeny jsou rezonanční křivky pro tři různé hodnoty odporu obvodu. Čím větší je odpor R_p obvodu, tím dosahuje impedance, a tedy i napětí na obvodu větší hodnoty. Přívodními vodiči k obvodu naopak prochází nejmenší proud, který nahrazuje ztráty vzniklé tlumením kmitů.

V ideálním případě oscilačního obvodu, který by měl jen indukčnost a kapacitu ($R_p \rightarrow \infty$) by amplituda kmitů $U_m \rightarrow \infty$. Čím je odpor obvodu menší, tím menší je také impedance, a tedy i napětí na obvodu. Rezonance nastává při poněkud nižší frekvenci (podrobněji viz Slovníček pojmů **AS7**).

Rezonance oscilačního obvodu má významné uplatnění zejména v komunikační technice. Oscilační obvod je např. součástí rozhlasového přijímače, kde je spojen s anténou, která zachycuje elektromagnetické signály z vysílače. Napětí vznikající v anténě je však malé, ale při ladění se mění parametry oscilačního obvodu (obvykle změnou kapacity kondenzátoru) tak, aby byl v rezonanci

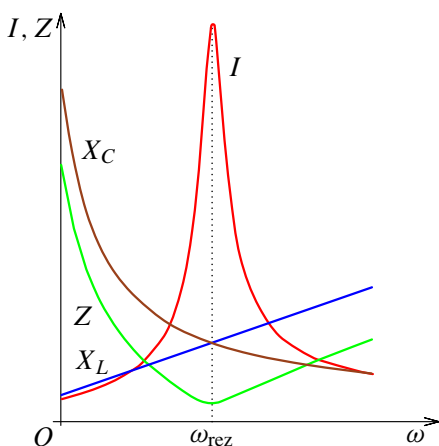


R7-12 Rezonanční křivka oscilačního obvodu

s frekvencí přijímaných signálů. Oscilační obvod se s touto frekvencí rozkmitá, vzniká na něm podstatně větší napětí, než je napětí z antény (nastává rezonanční zesílení přijatého signálu) a v dalších částech přijímače je signál dále zpracován.

Rezonanční křivka obvodu s RLC v sérii

Obdobným způsobem jako u oscilačního obvodu jsme dospěli k pojmu rezonance u obvodu střídavého proudu s RLC v sérii (čl. R7.1). Na rozdíl od obvodu s RLC paralelně je při rezonanci impedance obvodu nejmenší, napětí na obvodu je tedy nejmenší, ale obvodem prochází největší proud. Na obr. R7-13 je frekvenční charakteristika obvodu s RLC v sérii. Je na ní současně



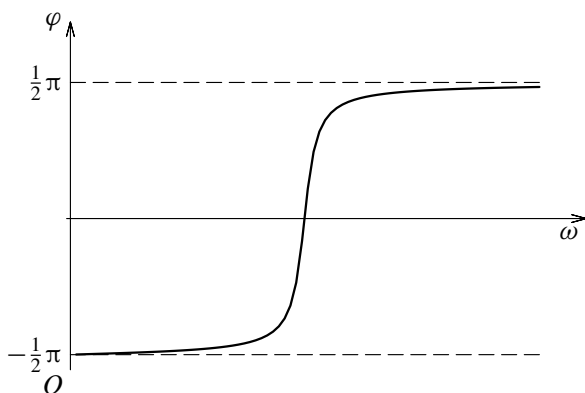
R7-13 Rezonanční křivka obvodu s RLC v sérii

rezonanční křivka proudu I a frekvenční charakteristiky indukčnosti X_L cívky, kapacity X_C kondenzátoru a impedance Z celého obvodu.

Měření rezonanční křivky obvodu s RLC v sérii je obsahem laboratorního cvičení **LC8**.

Při nuceném kmitání se také mění fázový posun napětí a proudu v obvodu. To je patrné z **fázové charakteristiky obvodu**, což je závislost fázového posunu φ na úhlové frekvenci nuceného kmitání (obr. R7-14). Při nižších frekvencích je fázový posun záporný a obvod má vlastnosti kapacity. Naopak při vyšších frekvencích je fázový posun kladný a obvod má vlastnosti indukčnosti.

Ověření poznatků o fázových posunech napětí a proudu v obvodech střídavého proudu je obsahem laboratorního cvičení **LC9**.



R7-14 Fázová charakteristika obvodu s RLC v sérii

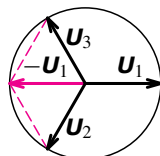
Úlohy

- 1** Měření napětí na oscilačním obvodu při postupně se zvětšující frekvenci střídavého napětí v obvodu na obr. R7-10 představuje princip měření indukčnosti nebo kapacity rezonanční metodou. Vysvětlete podstatu metody a navrhnete postup měření.
- 2** Na obr. R7-14 je fázová charakteristika obvodu s RLC v sérii. Uvažte, jaký průběh bude mít tato charakteristika v případě obvodu s RLC paralelně.
- 3** Oscilační obvod, jehož cívka má indukčnost L a kondenzátor kapacitu C (rezistanci obvodu neuvažujeme), kmitá netlumeně s amplitudou napětí U_m na kondenzátoru. Určete proud v obvodu v okamžiku, kdy napětí na kondenzátoru bude poloviční.

R8 STŘÍDAVÝ PROUD V ENERGETICE

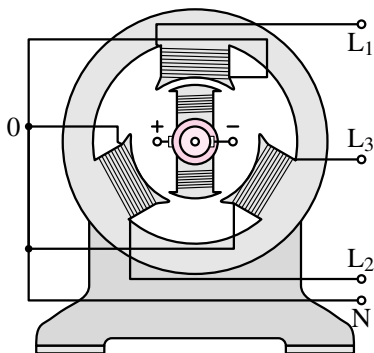
R8.1 Trojfázová soustava střídavých napětí

V čl. 8.1 je popsán princip alternátoru, který je zdrojem tří střídavých napětí fázově navzájem posunutých o úhel 120° . Na obr. R8-1 je fázorový diagram těchto napětí. Je z něho patrné, že fázor napětí U_1 má stejnou velikost jako součet fázorů napětí $U_2 + U_3$, jeho směr je však opačný. To znamená, že součet všech tří napětí je v každém okamžiku nulový.



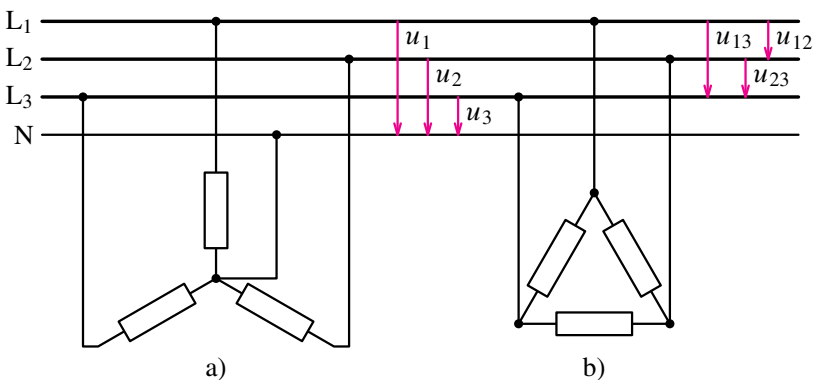
R8-1 Fázorový diagram trojfázových napětí

Na základě tohoto poznatku můžeme v trojfázovém alternátoru spojit jeden konec každé z cívek satoru do společného bodu – **uzlu** (0 na obr. R8-2). Ke druhému konci cívek jsou připojeny **fázové vodiče** (L_1, L_2, L_3) a s uzlem je spojen **nulovací vodič** (N). Mezi fázovými vodiči a nulovacím vodičem jsou **fázová napětí** u_1, u_2, u_3 . Napětí u_{12}, u_{13}, u_{23} mezi libovolnými fázovými vodiči označujeme jako **sdužené napětí** (obráz. R8-3).



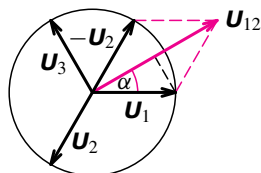
R8-2 Spojení cívek satoru třífázového alternátoru

Řada spotřebičů o větším elektrickém výkonu (např. elektromotory) se připojuje současně ke všem fázovým vodičům. Jejich elektrický obvod (např. vinutí elektromotoru) má tři stejné části zapojené buď podle obr. R8-3a (*spojení do hvězdy*), nebo podle obr. R8-3b (*spojení do trojúhelníku*). Při spojení do hvězdy jsou jednotlivé části spotřebiče připojeny k napětí fázovému a při spojení do trojúhelníku jsou připojeny k napětí sduženému, které je větší. Proto je také výkon spotřebiče při tomto spojení větší.



R8-3 Spojení třífázových napětí a) do hvězdy, b) do trojúhelníku

Z obr. R8-3 je také zřejmé, že sdružené napětí $u_{12} = u_1 - u_2$, což můžeme znázornit fázorovým diagramem (obr. R8-4). Fázory tvoří trojúhelník, v němž fázor $\mathbf{U}_1$ svírá s fázorem $\mathbf{U}_{12}$ úhel $\alpha = 30^\circ = \frac{1}{6}\pi$. Poloviční hodnota napětí



R8-4 K určení vztahu mezi fázovým a sdruženým napětím

$$\frac{U_{12}}{2} = U_1 \cos \frac{\pi}{6} = U_1 \frac{\sqrt{3}}{2},$$

takže sdružené napětí má velikost

$$U_{12} = U_1 \sqrt{3}.$$

V elektrickém rozvodu spotřebitelské sítě (tzn. sítě, k níž připojujeme spotřebiče např. v domácnosti) je fázové napětí 230 V a sdružené napětí $230\sqrt{3} \text{ V} = 400 \text{ V}$ (používáme označení spotřebitelské sítě $3 \times 400 \text{ V}/230 \text{ V}$). V běžné síťové zásuvce je tedy fázové napětí, takže jedna její zdířka je spojena s nulovacím a druhá s fázovým vodičem. O tom se můžeme přesvědčit např. zkoušečkou (*testerem*), kterým lze fázový a nulovací vodič indikovat.

Dotyk fázového vodiče rukou nebo vodivým předmětem je však životu nebezpečný!

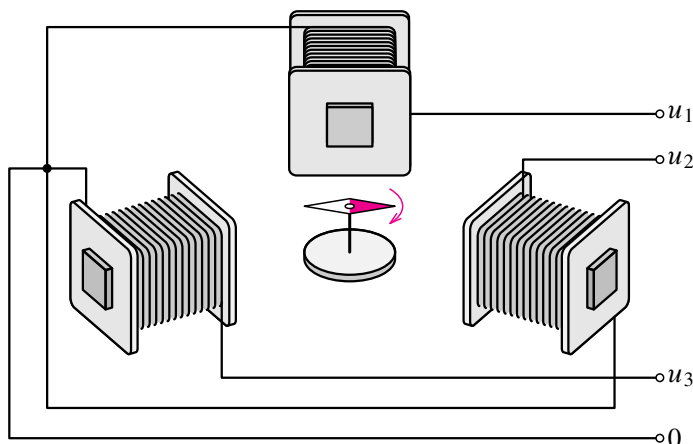
Úlohy

- 1 Proč je jádro statoru alternátoru složeno z plechů navzájem oddělených izolační vrstvou, kdežto jádro rotoru je vykováno z jednoho kusu oceli?
- 2 V některých státech se používá též spotřebitelská síť s fázovým napětím 127 V. Jakou hodnotu má v této síti sdružené napětí?

R8.2 Elektromotor na trojfázový proud

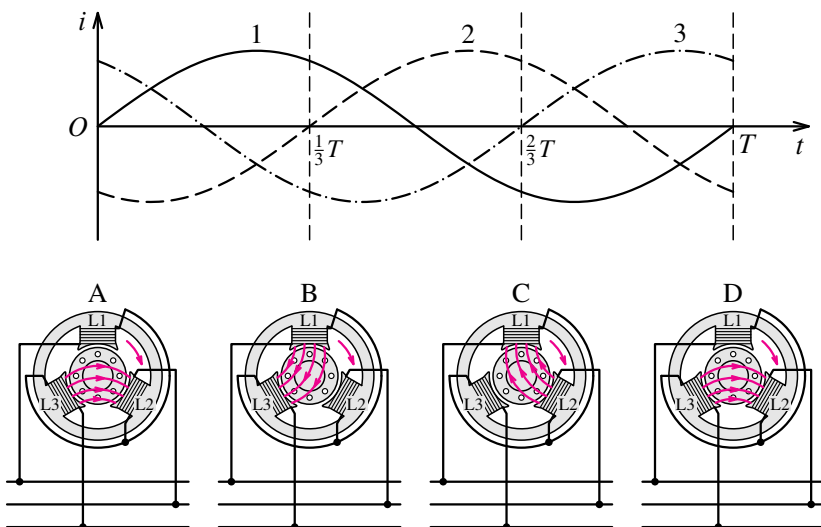
Velký praktický význam trojfázových proudů je dán možností konstrukce jednoduchých a výkonných elektromotorů, kterými se elektrická energie mění na energii mechanickou. Elektromotory jsou založeny na pohybu vodičů s proudem v magnetickém poli, které vytváří proud ve vinutí statoru.

Princip elektromotoru objasňuje pokus se třemi cívkami, jejichž vinutí jsou spojena do hvězdy (obr. R8-5). Cívky jsou připojeny k trojfázovému napětí. Proud procházející cívkami vytváří v prostoru mezi nimi magnetické pole. O tom se můžeme přesvědčit upravenou magnetkou, která se v magnetickém poli cívek začne otáčet. Frekvence otáčení je rovna frekvenci střídavého proudu. Říkáme, že se magnetka otáčí *synchronně* s magnetickým polem. Příčinou otáčení magnetky je působení magnetického pole, jehož vektor magnetické indukce periodicky mění směr. Vzniká **točivé magnetické pole**.



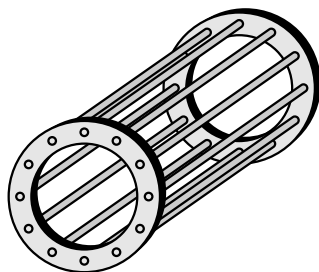
R8-5 Demonstrace točivého magnetického pole

Podrobněji je vznik točivého magnetického pole vyložen na obr. R8-6. V horní části obrázku je časový diagram proudu v cívkách a v dolní části je naznačen tvar indukčních čar výsledného magnetického pole v časech $t_A = 0$, $t_B = \frac{1}{3}T$, $t_C = \frac{2}{3}T$, $t_D = T$. V okamžiku t_A je proud ve vinutí fáze L_1 nulový, vinutím fází L_2 a L_3 prochází stejně velký proud opačného směru, indukční čáry směřují od vinutí fáze L_2 k vinutí fáze L_3 . Podobnou úvahou najdeme směr indukčních čar v okamžicích t_B , t_C , t_D a zjistíme, že indukční čáry výsledného magnetického pole se budou otáčet s periodou T ve směru šipky.



R8-6 Vznik točivého magnetického pole

Trojfázový elektromotor má dvě základní části: 1. Stator má obdobnou konstrukci jako stator alternátoru. 2. Rotor neboli kotva je válec zhotovený z ocelových plechů s drážkami, v nichž je uloženo vinutí. Používá se zvláštní druh tzv. *klecového vinutí* (obr. R8-7), které je vytvořeno např. tak, že se do drážek naleje roztavený hliník. Jeho ztuhnutím vznikne vodivá klec ze silných hliníkových tyčí, které jsou v čelech rotoru



R8-7 Klecové vinutí rotoru trojfázového elektromotoru

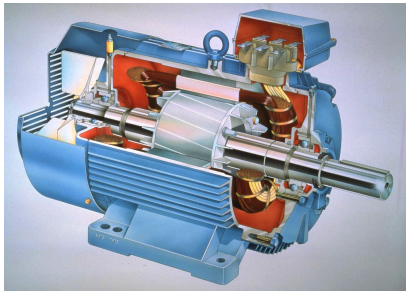
vodivě spojeny hliníkovými prstenci. Vinutí kotvy má zanedbatelný odpor a motor s tímto typem rotoru se označuje jako *motor s kotvou nakrátko*. Charakteristické je, že k rotoru nevedou žádné přívodní vodiče.

Vzhledem k malému odporu kotvy indukuje točivé magnetické pole ve vinutí velké proudy. To má za následek vznik magnetické síly, která uvede rotor do otáčivého pohybu. Kotva se však neroztočí s frekvencí točivého pole. Kdyby tomu tak bylo, nedocházelo by ke změnám magnetického indukčního toku vinutím, zanikl by indukovaný proud, a tím i příčina otáčení.

Na rozdíl od synchronního otáčení magnetky při pokusu na obr. R8-5, otáčí se kotva trojfázového elektromotoru vždy s menší frekvencí otáčení, čili *asynchronně*. Elektromotory tohoto druhu nazýváme **trojfázové asynchronní elektromotory** (obr. R8-8). Veličina, která charakterizuje chod asynchronního elektromotoru, se nazývá **skluz** s . Je definována vztahem

$$s = \frac{f_p - f_r}{f_p},$$

v němž f_p je frekvence otáčení točivého pole a f_r je frekvence otáčení rotoru. Skluz se vyjadřuje v procentech.



R8-8 Trojfázový asynchronní elektromotor

Když kotva při otáčení nepřekonává žádný odpor, tzn. když jde zařízení motorem poháněné (např. okružní pila) naprázdno, je skluz nepatrný a vinutím kotvy prochází jen malý proud. Při zatížení motoru (např. když okružní pilou řežeme dřevo) skluz roste, ve vinutí se indukuje větší proud a otáčení rotoru je udrženo větší magnetickou silou. V praxi bývá skluz při plném zatížení elektromotoru 2 % až 5 %.

Asynchronní elektromotory mají ve srovnání s jinými druhy elektromotorů řadu předností. Mají jednoduchou konstrukci i obsluhu, dlouhou životnost

a neznečišťují pracovní prostředí. Proto mají rozsáhlé uplatnění zejména tam, kde není třeba měnit frekvenci otáčení, např. při pohonu strojů, čerpadel apod.

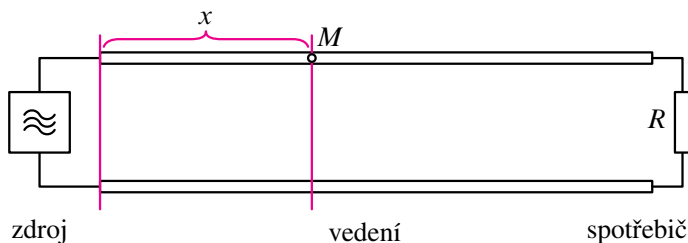
Úlohy

- 1** Čím větší je skluz, tím větší je příkon motoru. Vysvětlete.
- 2** Proč vzniká v síti při spouštění elektromotoru proudový náraz?
- 3** Jakou hodnotu má skluz v okamžiku spuštění elektromotoru?
- 4** Jakým způsobem dosáhneme změny směru otáčení kotvy elektromotoru?
- 5** Při poruše jedné fáze se elektromotor neroztočí a hrozí nebezpečí, že „shoří“ zbývající fázová vinutí. Vysvětlete.
- 6** Elektromotory mají vyvedeny konce vinutí všech fází na společnou svorkovnici, kde je můžeme spojit do hvězdy nebo do trojúhelníku, popř. jsou vybaveny přepínačem „hvězda-trojúhelník“. Jaký to má význam z hlediska výkonu elektromotoru?

R9 ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ

R9.1 Vznik elektromagnetického vlnění

V učivu o mechanickém vlnění jsme poznali, že rozkmitáním jednoho konce pružného vlákna vznikne vlnění, které se vláknem šíří k opačnému konci vlákna. Obdobným způsobem vzniká i elektromagnetické vlnění, jehož vznik ukážeme na příkladu dvouvodičového vedení, které je připojeno ke zdroji vysokofrekvenčního střídavého napětí o frekvenci $f > 10$ MHz (obr. R9-1).



R9-1 Dvouvodičové vedení

Vzhledem k tomu, že elektromagnetický rozruch se vedením šíří konečnou rychlostí c (viz čl. 9.2), dospívají změny napětí na začátku vedení na jeho konec s určitým zpožděním. Mezi vodiči vedení bude napětí, jehož okamžitá hodnota závisí nejen na čase, ale i na vzdálenosti od zdroje. Jestliže pro okamžité napětí zdroje platí vztah $u = U_m \sin \omega t$, pak v bodě M ve vzdálenosti x od zdroje bude určité okamžité napětí později o dobu $\tau = x/c$. Pro napětí mezi vodiči v bodě M tedy platí

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau).$$

Tento vztah upravíme na rovnici

$$u = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{cT} \right).$$

Za periodu T , se kterou oscilátor kmitá, dospěje elektromagnetické vlnění do vzdálenosti, kterou nazýváme **vlnová délka elektromagnetického vlnění**

$$\lambda = cT = \frac{c}{f},$$

kde f je frekvence kmitání oscilátoru.

Dvou vodičovým vedením se šíří **postupné elektromagnetické vlnění** popsané rovnicí

$$u = U_m \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (1)$$

Obdobnou rovnici jsme odvodili pro mechanické vlnění (např. v pružném vlákně) a označili jsme ji jako *rovnici postupného mechanického vlnění*. Obdobně je rovnice (1) **rovnici postupného elektromagnetického vlnění** v dvou vodičovém vedení.

Vzhledem k velké rychlosti elektromagnetického vlnění je při frekvenci 50 Hz mezi vodiči vedení všude stejné napětí. Uvažovanému ději totiž odpovídá vlnová délka $\lambda = c/f = (3 \cdot 10^8/50) \text{ m} = 6 \cdot 10^6 \text{ m} = 6\,000 \text{ km}$. Rozměry celého obvodu tedy můžeme vzhledem k vlnové délce zanedbat a děje ve vedení mají ráz kmitání.

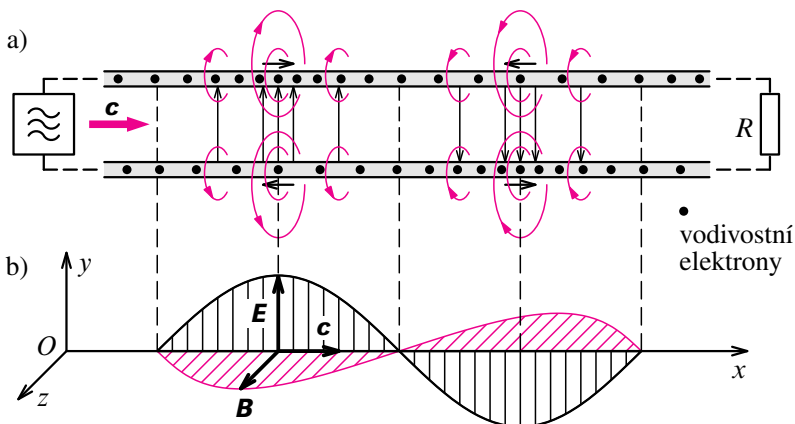
Tak je tomu vždy, když v rovnici postupné vlny $t/T \gg x/\lambda$. Za těchto podmínek přechází rovnice ve vztah pro kmitání ($u = U_m \sin \omega t$) a vlnový ráz uvažovaného děje se neprojevuje. Jako vlnění tedy chápeme děj v soustavách, jejichž rozměry jsou srovnatelné nebo větší, než je vlnová délka elektromagnetického vlnění.

R9.2 Elektromagnetická vlna

Jestliže je dvou vodičové vedení připojeno ke zdroji harmonického napětí vysoké frekvence, je mezi vodiči napětí odpovídající rovnici (1). To současně znamená, že také náboj vodičů není rozložen rovnoměrně a mezi vodiči je různá intenzita **E** elektrického pole. Mezi vodiči vedení vzniká elektrické pole s nerovnoměrným rozložením siločar. Pro určitý okamžik je elektrické pole znázorněno na obr. R9-2a. Hodnoty intenzity elektrického pole podél vedení můžeme vyjádřit pomocí sinusoidy (obr. R9-2b).

Pokud je ke konci vedení připojen rezistor, ve kterém se veškerá přiváděná elektromagnetická energie spotřebuje (rezistor se např. zahřeje), bude proud ve vedení ve stejné fázi jako napětí. V místech největšího napětí bude ve vedení také největší proud a činný výkon vysokofrekvenčního střídavého proudu bude maximální. Energie se elektromagnetickým vlněním přenáší od zdroje ke spotřebiči.

Současně s elektrickým polem je kolem vedení také magnetické pole, které je na obr. R9-2a znázorněno kruhovými indukčními čarami. Vektor magnetické indukce **B** je kolmý na vektor **E**. Na obr. R9-2b je průběh hodnot magnetické



R9-2 Elektromagnetické pole vedení

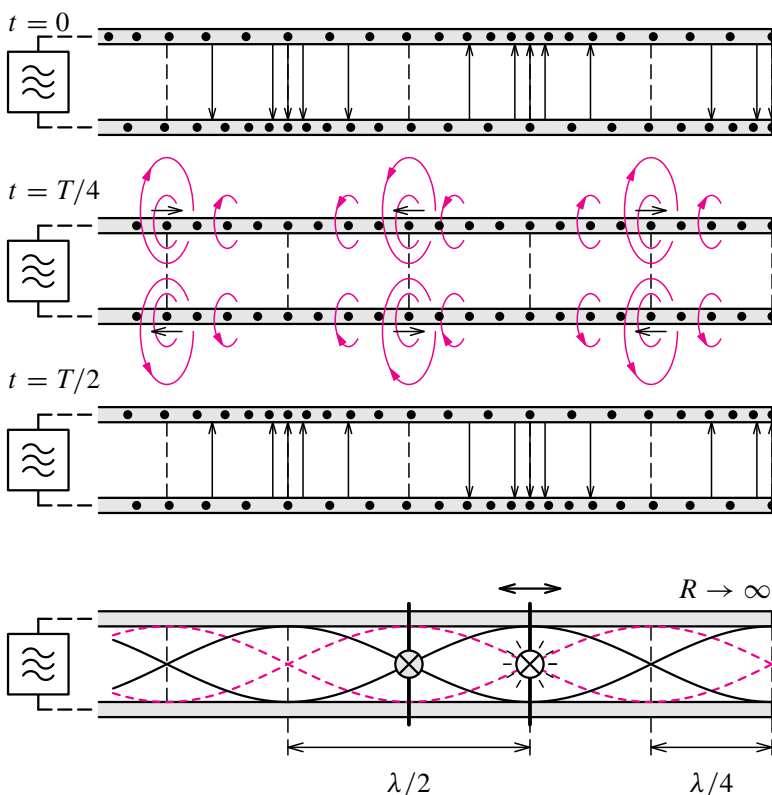
indukce podél vedení opět znázorněn sinusoidou, která však leží v rovině kolmé k nákresně. Graf na obr. R9-2b znázorňuje **postupnou elektromagnetickou vlnu**.

Při přenosu elektromagnetické energie dvou vodičovým vedením vzniká v prostoru mezi vodiči časově proměnné silové pole, které má jednak složku elektrickou, jednak složku magnetickou a nazývá se elektromagnetické pole. Energie není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Tento děj má ráz vlnění.

K pojmu postupné elektromagnetické vlny jsme dospěli úvahou, že se veškerá elektromagnetická energie na konci vedení pohltí. Pokud tomu tak není, nastává na konci vedení odraz vlnění a odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím. V učivu o mechanickém vlnění jsme poznali, že v takovém případě vzniká stojaté vlnění, charakterizované kmitnami a uzly vlnění.

V případě dvou vodičového vedení taková situace nastane, když k vedení není připojen spotřebič (vedení naprázdno – obr. R9-3). Poněvadž konec vedení má velmi značný odpor ($R \rightarrow \infty$), je na konci vedení největší napětí. Naopak proud má na konci stále nulovou hodnotu (vedení je rozpojeno). Ve vedení je fázový posun napětí a proudu $\pi/2$ a vzniká **stojaté elektromagnetické vlnění**. Na konci vedení je kmitna napětí, ale uzel proudu. Ve vzdálenosti $\lambda/4$ od konce vedení je situace opačná. Je zde uzel napětí a kmitna proudu.

Experimentálně se o rozložení kmiten a uzlů napětí přesvědčíme např. tak,



R9-3 Napětí a proud ve vedení naprázdno

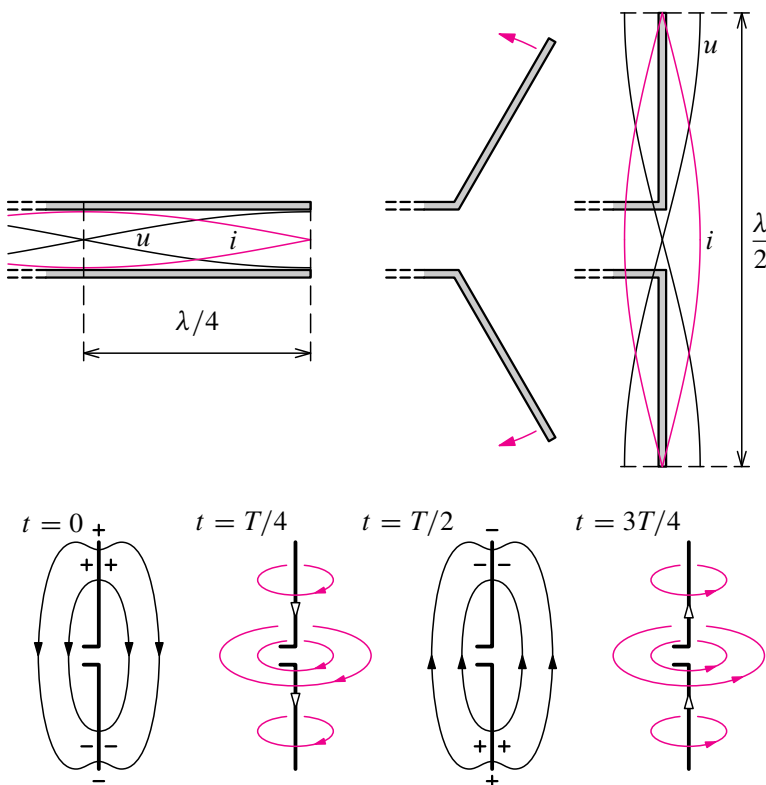
že vedení připojíme k výkonnému zdroji napětí o vysoké frekvenci (řádově 10^2 MHz). Po vedení smýkáme vodivým můstkem se žárovkou. V místech kmiten žárovka svítí nejvíce, kdežto v místech uzlů se nerozsvítí vůbec.

Vedení se stojatou elektromagnetickou vlnou můžeme přirovnat k oscilačnímu obvodu. Periodicky dochází k přeměně energie elektrického pole mezi vodiči na energii magnetického pole. Ve stojaté elektromagnetické vlně je mezi časově proměnnými vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ fázový rozdíl $\pi/2$.

R9.3 Elektromagnetický dipól

Elektromagnetické vlnění, které se šíří dvouvodičovým vedením, je s vedením těsně spjato a jeho energie je převážně soustředěna mezi vodiči (takto je např. přenášén speciálním, tzv. koaxiálním kabelem signál kabelové televize). Televizní signál z pozemních vysílačů i z družic v kosmickém prostoru musí být přenášén volným prostorem. Je tedy třeba do tohoto prostoru vyzářit energii v podobě postupného elektromagnetického vlnění. Tuto funkci plní ve vysílači anténa, což je v podstatě **elektromagnetický dipól**.

K pojmu elektromagnetický dipól dospějeme následující úvahou: rozevřeme konce dvouvodičového vedení o délce $\lambda/4$ do směru kolmého k vedení (obr. R9-4). V odchýlených částech vedení vznikají proudy, které mají v každém okamžiku souhlasný směr. Magnetické pole těchto proudů pak zasahuje do



R9-4 Vznik elektromagnetického dipólu

celého prostoru v okolí dipólu. Napětí na koncích vodičů dosahuje periodicky největší hodnoty a vzniká elektrické pole, které rovněž zasahuje do okolí.

U tohoto jednoduchého elektromagnetického dipólu odpovídá délka dipólu polovině vlnové délky vyzařovaného elektromagnetického vlnění. Proto použijeme také označení **půlvlnný dipól**. Vlastnosti elektromagnetického vlnění jsou popsány v čl. 9.2.

Úlohy

- 1** Elektromagnetická energie se k dipólu přivádí dvouvodičovým vedením. Jaké vlnění vzniká ve vedení, jestliže víme, že část energie se dipólem vyzáří do prostoru?
- 2** Za jakých podmínek vzniká v přivodním vedení k dipólu vlnění postupné?
- 3** Vyhledejte na internetu frekvence elektromagnetického vlnění různých komunikačních prostředků (rozhlasové a televizní vysílání, rádiové sítě mobilních telefonů apod.) a určete odpovídající vlnové délky elektromagnetického vlnění.

R9.4 Elektromagnetická interakce

Elektromagnetické kmitání v oscilačním obvodu je spojeno s pohybem náboje, jehož velikost na deskách kondenzátoru se periodicky mění. Mezi deskami kondenzátoru vzniká časově proměnné elektrické pole. Jeho siločáry začínají na kladně nabitě desce a končí na desce se záporným nábojem. Toto pole je tedy zřídlové.

Elektromagnetické pole, které tvoří elektromagnetické vlnění, však není vázáno na existenci nabitých těles a vlnění se šíří i v prostoru bez elektrických nábojů, např. ve vakuu. Příčinu tohoto jevu jsme již zčásti poznali při výkladu elektromagnetické indukce: **každá změna magnetického pole je provázena vznikem elektrického pole**.

Z tohoto poznatku také vyšel anglický fyzik J. C. MAXWELL  a vyslovil předpoklad, že existuje i opačný jev: **mění se elektrické pole vytváří pole magnetické**. To znamená, že jevy, které vznikají při změnách pole elektrického nebo magnetického, jsou symetrické. Tento poznatek je nejdůležitějším Maxwellovým objevem a je základem **teorie elektromagnetického pole**, která jednoduchým způsobem vysvětluje všechny elektromagnetické jevy.

Z teorie elektromagnetického pole vyplývá, že nejen magnetické, ale ani elektrické pole není nutně vázáno na přítomnost nosičů náboje. Elektrické pole se indukuje změnami pole magnetického i ve vakuu nebo dielektriku bez volných nosičů náboje. Avšak na rozdíl od elektrického pole tvořeného náboji, v němž siločáry začínají na náboji kladném a končí na náboji záporném, siločáry indukovaného elektrického pole jsou křivky uzavřené. Indukční čáry magnetického pole jsou na rozdíl od siločar elektrického pole vždy uzavřené.

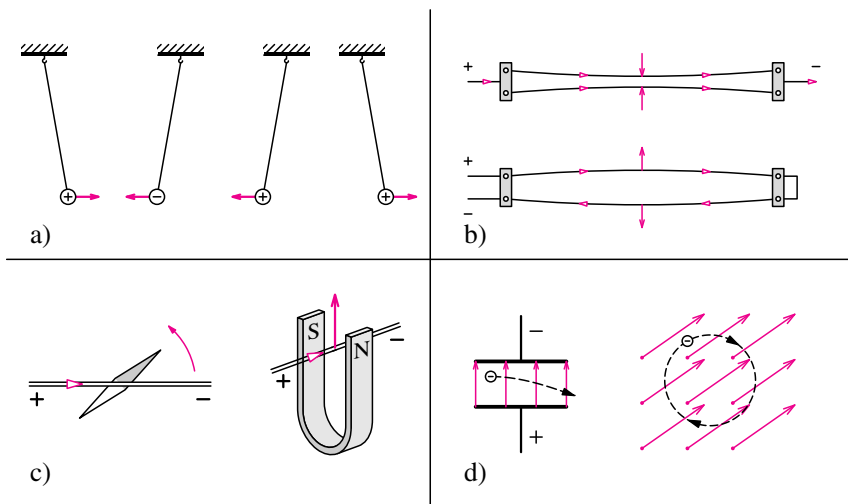
V prostředí bez nábojů může tedy elektrické a magnetické pole existovat jen tak, že změny jednoho pole způsobují vznik pole druhého a vzájemná indukce probíhá nepřetržitě. Přitom vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$, kterými tato pole charakterizujeme, jsou navzájem kolmé. Obě pole jsou neoddelitelně spjata a vytvářejí jediné elektromagnetické pole.

V době, kdy Maxwell tuto teorii propracoval také matematicky, nebyl pro jeho tvrzení žádný přímý důkaz. Celá teorie je velkolepým příkladem vědecké dedukce: na základě určitých předpokladů (indukce magnetického pole měnicím se polem elektrickým) je matematickým postupem formulován závěr s obecnou platností, který je třeba experimentálně ověřit. K tomu však došlo až 10 let po Maxwellově smrti.

Důkazem správnosti Maxwellovy teorie elektromagnetického pole je právě objev elektromagnetického vlnění. Jeho autorem je německý fyzik HEINRICH HERTZ , který pomocí pokusů s elektromagnetickými vlnami buzenými jiskrovým výbojem ověřil většinu Maxwellových závěrů.

Maxwellova teorie elektromagnetického pole je základem **elektrodynamiky**, která vysvětluje děje, při nichž vzniká elektrická nebo magnetická síla. Na obr. R9-5 jsou některé příklady tohoto silového působení, které jsme v předcházejícím učivu poznali: dvě nabitá tělesa se přitahují nebo odpuzují (a), podobně se přitahují a odpuzují vodiče, jimiž prochází proud (b), magnetka v blízkosti vodiče s proudem se vychyluje a vodič s proudem je působením magnetického pole uváděn do pohybu (c), trajektorie částice s nábojem v elektrickém a magnetickém poli se zakřivuje (d) apod.

Všechny tyto poznatky svědčí o existenci elektromagnetického vzájemného působení neboli o **elektromagnetické interakci** (z lat. *inter* – mezi, *actio* [akció] – uvedení v pohyb). Tento druh interakce je jednou ze základních forem vzájemného působení hmotných objektů. Síly, které vznikají při elektromagnetické interakci, jsou poměrně značné. Proto můžeme elektromagnetickou interakci snadno zkoumat experimentálně. Elektromagnetická interakce se projevuje např. i při chemické vazbě a je příčinou vzniku molekul.



R9-5 Elektromagnetické interakce

Mnohem slabší silové působení vzniká při **gravitační interakci**, která vzniká při vzájemném působení těles. Poznali jsme ji v učivu o gravitaci a síly srovnatelné s elektromagnetickou interakcí vznikají jen působením těles o velké hmotnosti, např. naší Země. Další, tzv. **slabá interakce** a **silná interakce**, se týkají silového působení mezi elementárními částicemi. Jejich existenci vysvětlujeme např. děje v jádrech atomů.

Uvedené čtyři typy interakcí představují elementární formy silového působení, s nimiž se při výkladu fyzikálních jevů setkáme a každé známé silové působení lze pomocí těchto interakcí vyložit.

VÝSLEDKY ÚLOH

R1 Elektrické pole bodových nábojů

R1.1 **2.** $9 \cdot 10^2 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. **3.** $2,8 \cdot 10^4 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. **4.** $5,8 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot \text{C}^{-1}$. **5.** 2 cm.

R1.2 **1.** $3 \cdot 10^{-3} \text{ J}$. **2.** $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ J}$.

R1.3 **3.** $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ C} \cdot \text{m}^{-2}$.

R1.4 **1.** 56 nC; 5,6 pF. **2.** $3 \mu\text{F}$, $1,3 \mu\text{F}$. **3.** nC_1 ; C_1/n . **4.** 10 V; zmenší se z 1,25 mJ na 0,25 mJ.

R2 Elektrický proud

R2.3 **2.** $I_{\min} = 0,17 \text{ A}$; $I_{\max} = 0,61 \text{ A}$. **3.** 156 m; $3,5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$.

R2.4 **2.** 0,05 A; 0,17 A; 0,22 A; 0,5 V; 6,5 V; 9,5 V. **3.** 1,05 Ω .

R4 Elektrický proud v kapalinách a plynech

R4.1 **2.** $3,04 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{C}^{-1}$. **3.** 41 min; 43 kJ. **4.** 0,004 7 mol; 105 cm^3 .
5. 64 g; 32 g. **6.** 11 dm^2 .

R5 Stacionární magnetické pole

R5.1 **1.** 1,1 mm. **2.** 3,8 m. **3.** $3 \cdot 10^{-4} \text{ T}$.

R7 Střídavý proud

R7.1 **1.** $-\frac{1}{4}\pi$. **2.** $1,4 \Omega$; $-\frac{1}{4}\pi$. **3.** 108 V; -23° . **4.** 35 Hz.

R7.4 **3.** $\frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}CU_m^2 - \frac{1}{2}C(\frac{1}{2}U_m)^2 \Rightarrow I = U_m\sqrt{\frac{3C}{4L}}$.

REJSTŘÍK

A

AKASAKI, I., 39
akumulátor, 50
– Li-ion a Li-pol, 52
– nikl-kadmiový, 52
– nikl-metalhydridový, 52
– olověný, 51
AMANO, H., 39

B

baterie, 22
brzda indukční, 74

C

cívky Helmholtzovy, 58

Č

činitel ztrátový kondenzátoru, 84
čip, 35
článek alkalický, 50
– elektrochemický, 21, 50
– – primární, 50
– – sekundární, 50
– fotovoltaiický, 36, 39
– lithiový, 51
– palivový, 52
– solární, 40
– zinko-chloridový, 50
člen logický, 43

D

děj aperiodický, 89
– periodický, 89
– přechodný v obvodu s cívkou, 75
– – – s kondenzátorem, 77
délka vlnová elektromagnetického
vlnění, 101
diagram fázorový, 80
dioda elektroluminiscenční, 38
– polovodičová, 36
– supersvítivá, 39
– světelná (LED), 38

– usměrňovací, 36
– Zenerova, 36
dipól elektromagnetický, 105
– půlvlnný, 106
doména magnetická, 65
dopování, 35
dvojvrstva elektrická, 49

E

ekvivalent elektrochemický, 46
elektrodynamika, 107
elektromotor asynchronní, 99
– na trojfázový proud, 97
elektron, 57
– vodivostní, 18
emise elektronů, 57
energie magnetického pole cívky, 78

F

FARADAY, M., 11, 45
fázor, 80
filtr elektrostatický, 10
fotočlánek, 21
fotodioda, 36
fotolitografie, 35
FOUCAULT, L., 73

G

generátor střídavého proudu, 22

H

HALL, E. H., 64
HERTZ, H. R., 107
hromosvod, 10
hustota náboje plošná, 8
hystereze magnetická, 67

Ch

charakteristika obvodu fázová, 94
– voltampérová elektrolytického
vodiče, 47
– – Zenerovy diody, 37

– zdroje zatěžovací, 31

I

indukce magnetická remanentní, 67
intenzita magnetického pole, 66
interakce elektromagnetická, 107
– gravitační, 108
– silná, 108
– slabá, 108

J

jev Hallův, 64
– lavinový, 36
– termoelektrický, 21
– Zenerův, 36

K

KAMERLINGH-ONNES, H., 19
kapacita deskového kondenzátoru, 12
– izolované vodivé koule, 12
KILBY, J., 42
KIRCHHOFF, G. R., 27
klec Faradayova, 11
kmitání oscilačního obvodu nucené, 91
– – – tlumené, 87
kondenzátor elektrolytický, 13
– keramický, 14
– svitkový, 13
konstanta Faradayova, 45
křivka prvotní magnetizace, 67

L

ledka, 38
levitace magnetická, 20
luminofor, 38, 55

M

magnetizace látek, 65
– spontánní (samovolná), 65
MAXWELL, J. C., 106
mikroelektronika, 42
mikroprocesor, 43
monočlánek, 22
monokrystal křemíku, 34
motor s kotvou nakrátko, 99

N

NAKAMURA, S., 39
napětí fázové, 95
– Hallovo, 64
– naprázdno, 30
– polarizační, 48
– provozní, 55
– průrazné, 36
– rozkladné, 48
– sdružené, 95
– zápalné, 54
– Zenerovo, 37

O

obvod integrovaný, 42
– s RC paralelně, 83
– s RL v sérii, 82
– s RLC v sérii, 81
– střídavého proudu složený, 80
ohřev indukční, 74

P

panel fotovoltaický (solární), 21
permalloy, 67
plyn elektronový, 18
pohyb unášivý, 18
polarizace elektrod, 48
pole elektrické bodových nábojů, 1
– magnetické točivé, 97
potenciál elektrodový, 49
– radiálního elektrického pole, 6
potenciometr, 25
proud elektrický, 18
– indukovaný ve vodiči, 72
proudy Foucaultovy, 73
– vířivé, 73
průraz destruktivní, 36
– nedestruktivní, 37
předřadník elektronický, 56
přístroj Hofmannův, 48

R

reaktance, 81
rekuperace energie, 15
relé elektromagnetické, 68
reostat, 24

reproduktor elektrodynamický, 70
rezonance obvodu s RLC v sérii, 82
– oscilačního obvodu, 92
rezonanční frekvence, 82
– křivka, 92
rovnice postupného elektromagnetického
vlnění, 102

S

síla Lorentzova, 61
sít elektrická, 27
skluz, 99
smyčka hysterezní, 67
sonda Hallova, 65
součinitel tlumení, 89
soustava trojfázová střídavých napětí, 95
spektrograf hmotnostní, 62
spektrum hmotnostní, 62
spojení do hvězdy, 95
– do trojúhelníku, 95
spojování kondenzátorů, 15
startér, 55
substrát, 35
superkapacitor, 15
supravodivost, 19
systém fotovoltaický (solární), 41

T

technologie epitaxně planární, 35
– planární, 34
teorie elektromagnetického pole, 106
termočlánek, 21
teslametr, 65
tlumení kritické, 89
tlumivka, 55
tranzistor bipolární, 41

– unipolární, 41
trubice Crookesova, 57
– Wehneltova, 59

U

úhel ztrátový, 84
uzel, 95
– síť, 27

V

vaříč indukční, 73
větev sítě, 27
vinutí klecové, 98
vlna elektromagnetická, 102
– – postupná, 103
vlnění elektromagnetické, 102
– – stojaté, 103
vodič fázový, 95
– nulovací, 95
výboj v plynu za sníženého tlaku, 54
výbojka vysokotlaká, 56

Z

zákon elektromagnetické indukce, 71
– Faradayův I, 45
– Faradayův II, 47
zákony Faradayovy pro elektrolýzu, 45
– Kirchhoffovy, 27
zařízení katodové, 57
zářivka, 54
– kompaktní, 55
záznam magnetický, 69
zdroj napětí elektrodynamický, 22
– – fotoelektrický, 21
– – termoelektrický, 21