

Fyzika – elektrotechnika 2.část

Ing. Jiří Vlček

Tento soubor je doplňkem mojí publikace Středoškolská fyzika. Je určen studentům středních škol neelektrických oborů pro velmi stručné seznámení s tímto oborem.

STŘÍDAVÝ PROUD

Pod tímto pojmem rozumíme elektrický proud, jehož velikost i směr se s časem mění. Pokud má tato změna periodický charakter, označujeme tento průběh **periodický**, periodu značíme T .

Dále určujeme **frekvenci**, která udává **počet kmitů za jednu sekundu**. Jednotkou frekvence je **herz** ($\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)

Platí vztah **$f = 1/T$**

Příklad: Kmitočet sítě má frekvenci 50 Hz. Určete jeho periodu $T = 1/50 \text{ s} = 20 \text{ ms}$.

Periodické průběhy graficky znázorníme tak, že na osu nanášíme čas t a na osu y okamžité hodnoty proudu nebo napětí.

Příkladem **periodického** průběhu je průběh **obdélníkový, pilovitý, trojúhelníkový**, apod. Nejdůležitější ze všech je průběh **sinusový**, kterým se budeme v této publikaci dále zabývat. Vzniká např. v generátorech v elektrárnách. Příčinou jeho vzniku je otáčivý pohyb vodiče v magnetickém poli (viz elektromagnetická indukce).

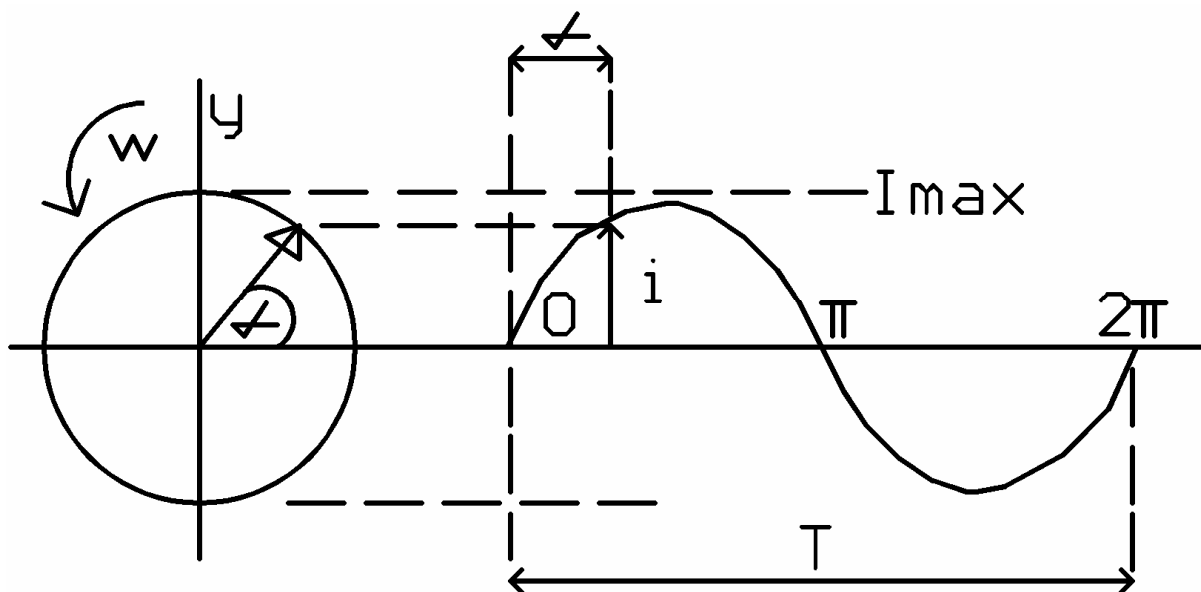
Funkci $y = \sin \alpha$ nebo také $i = I_{\max} \sin \alpha$ nebo $u = U_{\max} \sin \alpha$ vytvoříme **časovým rozvojem kruhového pohybu**. Představte si bod, který obíhá po kružnici. Sinusový průběh získáme, znázorníme-li graficky hodnotu jeho ypsilonové souřadnice v závislosti na čase.

Tato y souřadnice je **okamžitá hodnota napětí** (proudu), kterou značíme **u (i)**. Poloměr kružnice neboli maximální hodnota napětí (proudu) – **amplituda** se značí U_{\max} , I_{\max} (nebo také U_m , I_m).

Argument funkce sinus, úhel α se mění v závislosti na čase. Doba jednoho oběhu perioda T odpovídá úhlu 2π rad.

Zavedeme pojem **úhlová frekvence ω** , jejichž jednotkou je **radián**. Radián je úhel, jehož ramena vytínají na jednotkové kružnici opsané z vrcholu úhlu oblouk délky rovnající se jedné. Úhel $360^\circ = 2\pi$ (**rad**), $180^\circ = \pi$ (rad), $90^\circ = \pi/2$ rad. $1 \text{ rad} = 360/2\pi = 57^\circ$

Platí **$\omega = 2\pi/T$** úhel α odpovídá ωt



Obrázek: Vznik sinusového průběhu ($\omega = \omega$)

Původní rovnici $i = I_{\max} \sin \alpha$ upravíme na tvar **$i = I_{\max} \omega t$** ($u = U_{\max} \omega t$), kde ωt je úhel v radiánech.

V případě, že je počátek sinusového kmitu posunut o úhel φ před časovým počátkem, bude mít výše uvedená rovnice tvar $i(u) = I_{\max}(U_{\max}) \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, kde φ je **fázový posuv**. Okamžitá hodnota střídavého proudu nebo napětí není příliš důležitý údaj. Nejvíce nás zajímají **celkové účinky střídavého proudu a napětí v porovnání se stejnosměrným proudem a napětím**. Pokud po dobu jedné půlperrody měříme v dostatečně krátkých intervalech okamžité hodnoty proudu (napětí) a vypočítáme z nich aritmetický průměr, dostaneme **střední hodnotu** střídavého proudu (napětí).

STŘEDNÍ HODNOTA střídavého proudu se rovná hodnotě stejnosměrného proudu, který za stejný čas přenesl stejný náboj (má stejné elektrochemické účinky, vyloučí z elektrolytu stejné množství kovu).

Výpočet aritmetického průměru okamžitých hodnot provádíme pomocí integrálů. Ke každému průběhu zadanému matematickou funkcí můžeme vypočítat jeho střední hodnotu. Pro sinusový průběh platí

$$\underline{I_{\text{střední}}} = I_{\max} \cdot 2/\pi = 0,637 I_{\max} \qquad \underline{U_{\text{střední}}} = U_{\max} \cdot 2/\pi$$

Nejdůležitějším údajem u střídavého proudu a napětí je jeho **EFEKTIVNÍ HODNOTA**. Jedná se o **velikost ekvivalentního stejnosměrného proudu (napětí), který dodává do stejné odporové zátěže stejný tepelný výkon**. Z předcházejících kapitol již víme, že výkon je úměrný druhé mocnině proudu a napětí $P = U^2/R$, $P = RI^2$

Dosadíme-li do těchto rovnic vzorec pro okamžitou hodnotu střídavého napětí (proudu), zjistíme, že okamžitá hodnota výkonu je úměrná funkci $\sin^2 \omega t$ $p = (U_{\max}^2/R) \cdot \sin^2 \omega t$

Zprůměrnováním (integrací) okamžitých hodnot výkonu získáme jeho průměrnou hodnotu, ze které vypočítáme efektivní hodnotu napětí (proudu). K získání efektivní hodnoty musíme zprůměrnovat funkci $\sin^2 \omega t$ a výsledek odmocnit.

Pro sinusový průběh takto dostaneme velmi důležitý vztah

$$\underline{U_{\max}} = \sqrt{2} U_{\text{efektivní}} = 1,41 U_{\text{efektivní}} \qquad \underline{I_{\max}} = \sqrt{2} I_{\text{ef}} \\ \underline{U_{\text{efektivní}}} = 0,707 U_{\max}$$

Efektivní hodnota střídavého proudu a napětí je hodnotou nejdůležitější a základní. Ukazují ji téměř všechny měřicí přístroje. Označujeme ji obvykle velkým písmenem bez indexu (U, I). Hovoříme-li o střídavém napětí a proudu, máme automaticky na mysli jeho efektivní hodnotu. (Napětí $U = 230$ V v síti udává efektivní hodnotu tohoto napětí).

VZNIK STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ v cívice nastává změnou magnetického toku Φ , který prochází jádrem cívky. $u = N \cdot d\Phi/dt$, kde **N je počet závitů cívky**.

Indukované napětí je přímo úměrné změně magnetického toku za jednotku času.

Bude-li mít tento magnetický tok sinusový průběh $\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$, bude mít sinusový průběh i indukované napětí.

Největší změna magnetického toku nastává při průchodu nulou, tehdy je největší indukované napětí. Indukované napětí je kladné, pokud magnetický tok roste. Pokud je změna magnetického toku nulová, je i indukované napětí nulové.

Matematicky se dá dokázat (pomocí derivací, derivace $\sin x = \cos x$, derivace $\cos x = -\sin x$), že časovou **změnou střídavého magnetického toku** se v ideální cívice **indukuje střídavé napětí, které předbíhá magnetický tok o $\pi/2$** . Ideální cívka je zhotovena z dokonalého vodiče s nulovým elektrickým odporem, neuplatňují se u ní mezizávitové kapacity.

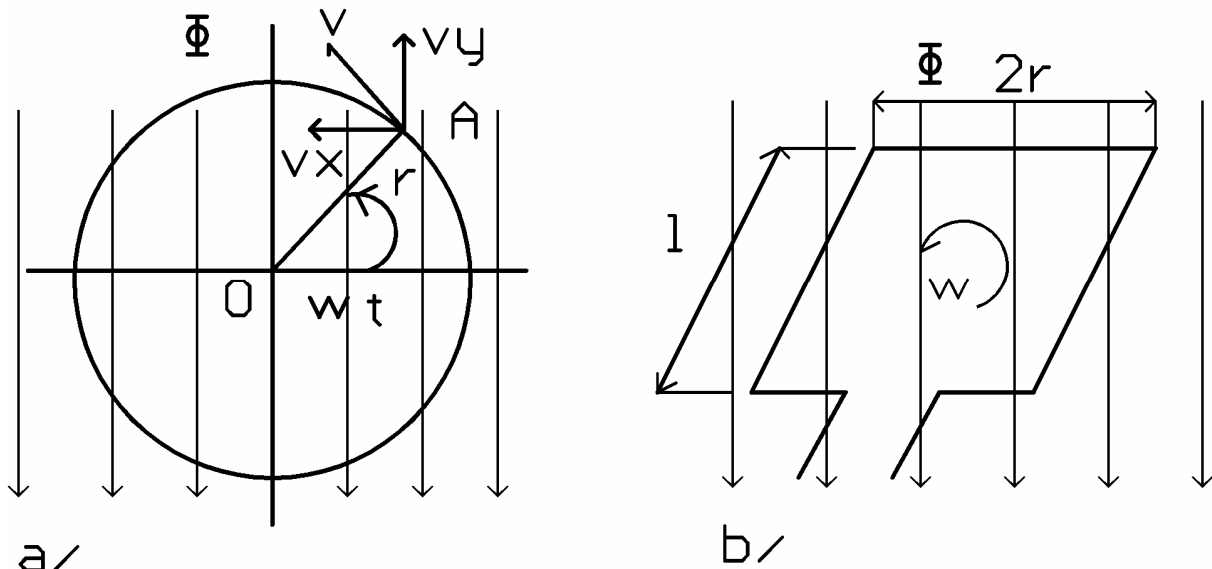
Dá se odvodit velikost tohoto indukovaného napětí **$U = 4,44 f N \Phi_{\max}$**

Střídavé napětí rovněž vzniká pohybem vodiče v magnetickém poli. Pokud se v homogenním magnetickém poli pohybuje vodič po obvodu kružnice obvodovou rychlostí $v = \omega r$, indukuje se v něm podle indukčního zákona napětí okamžité hodnoty **$u = B l v_x$** , kde v_x je složka rychlosti kolmá ke směru magnetického pole. Její velikost je

$$v_x = v \sin \omega t = \omega r \sin \omega t$$

$u = B l v_x \sin \omega t = B l \omega r \sin \omega t$, kde B je magnetická indukce pole, l délka vodiče.

Pokud se v homogenním magnetickém poli otáčí jeden závit obdélníkového tvaru, indukují se na obou stranách závitu stejně velké okamžité hodnoty napětí takového smyslu, že se jejich velikosti sčítají.



Obrázek a/. indukce elektrického napětí ve vodiči ($\omega = \omega$)

Obrázek b/. indukce elektrického napětí v závitu ($\omega = \omega$)

$$u = 2 B l \omega r \sin \omega t = B S \omega \sin \omega t, \text{ kde}$$

$S = 2 r l$ je plocha závitu

$B \cdot S = \Phi_{\max}$ je největší magnetický tok, který závitem prochází v poloze kolmé ke směru magnetického pole.

Okamžitou hodnotu indukovaného napětí vypočítáme ze vztahu $u = \omega \Phi_{\max} \sin \omega t$

Maximální indukce napětí nastává, je-li rovina závitu ve směru magnetického pole

$\omega t = \pi/2$ $\sin \omega t = 1$ a **vodič při svém pohybu protíná co nejvíc siločar**. Indukované napětí se rovná nule, je-li rovina závitu kolmá na směr magnetického pole $\omega t = 0, \sin \omega t = 0$ a vodič neprotíná žádné siločary.

TŘÍFÁZOVÉ NAPĚTÍ, VÝROBA A ROZVOD ELEKTRICKÉ ENERGIE

K výrobě a přenosu elektrické energie je výhodnější používat trojfázovou soustavu. Oproti jednofázové soustavě (fáze (L) a nulový vodič (N)) je zde sice více vodičů L1, L2, L3 a N ale zmenší se ztráty na vedení, protože nulovým vodičem protéká jen malý vyrovnávací proud.

K výrobě elektrické energie se používá třífázový alternátor. Jeho stator tvoří cívky L1, L2, L3, jejichž osy spolu svírají úhel 120° . Jeden konec vinutí cívek je uzemněn – a je spojen s nulovým vodičem. Rotor tvoří otáčivý elektromagnet buzený stejnosměrným proudem. Při jeho otáčení se v cívkách indukuje střídavé napětí, které je vzájemně posunuto o 120° . Součet okamžitých hodnot jednotlivých napětí je v každém okamžiku nulový $u_1 + u_2 + u_3 = 0$

To umožňuje zapojovat zátěž i bez nulového vodiče – zapojení do trojúhelníku. V síti je napětí mezi fázemi 400 V -sružené napětí, napětí fáze proti zemi je 230 V – fázové napětí (efektivní hodnoty).

Hodnota sruženého napětí je u třífázového napětí vždy $\sqrt{3}$ krát větší než napětí fázové.

Třífázové spotřebiče (nejčastěji motory) zapojujeme buď do hvězdy (menší výkon – pro rozběh) nebo do trojúhelníku. U tohoto zapojení musí být zátěž všech fází stejná.

Opakem generátoru je motor, který přeměňuje elektrickou energii na pohybovou. Konstrukce asynchronního třífázového motoru je podobná konstrukci alternátoru. Jeho stator rovněž tvoří 3 cívky, jejich osy svírají úhel 120° . Do nich přivádíme střídavé napětí, které vytváří točivé magnetické pole. Jeho silové účinky roztáčí kotvu – rotor. Tvoří jej cívka na ocelovém jádře se závity nakrátko.

Otáčky takového motoru jsou naprázdno shodné s kmitočtem sítě ($50 \text{ ot/s} = 3000 \text{ ot/min}$). Jeli motor zatížen, nastává skluz, velikost otáček klesne o 2 až 5 %. Při spuštění motoru je skluz největší, což se projeví velkým proudovým impulsem (rozběhový proud je několikanásobkem jmenovitého proudu naprázdno). Účinnost těchto motorů je vždy přes 90 %, odběr proudu rovnoměrně vzrůstá s mechanickou zátěží motoru. Pokud se vlivem velké zátěže motor zastaví, prudce vzroste jeho proudový odběr a brzy dojde k jeho zničení.

ZÁKLADNÍ ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY V OBVODU STŘÍDAVÉHO PROUDU.

Zavedeme pojmy: **ideální rezistor** – jeho jediným parametrem je elektrický odpor, **ideální cívka** – jediným parametrem je indukčnost a **ideální kondenzátor** – jediným parametrem je kapacita.

Ideální REZISTOR v obvodu střídavého proudu

Na ideálním rezistoru jsou napětí a proud ve fázi, platí Ohmův zákon

$$u = U_{\max} \sin \omega t \quad i = I_{\max} \sin \omega t = (U_{\max}/R) \sin \omega t \quad R = u/i = U_{\max}/I_{\max} = U/I$$

Ohmův zákon platí pro okamžité, maximální a efektivní hodnoty proudu a napětí.

CÍVKA v obvodu střídavého proudu.

Pokud připojíme zdroj střídavého napětí sinusového průběhu k ideální cívce, bude cívkou procházet sinusový proud. Ten **vybudí magnetický tok Φ , který je ve fázi s proudem i .**

Magnetický tok indukuje v cívce napětí, které je přímo úměrné změně proudu za jednotku času a indukčnosti cívky L .

$$u_L = L \, di/dt$$

Jedná se o velmi důležitý vztah mezi proudem a napětím na cívce. Matematicky (pomocí derivací) u něj můžeme odvodit všechny vlastnosti ideální cívky (vzorec pro indukční reaktanci, napětí předbíhá proud o 90° , přechodový děj při připojení do obvodu, apod)

Indukované napětí je tím větší, čím větší je změna proudu. Při průchodu proudu nulou bude proto napětí maximální. Roste-li proud, bude napětí kladné. Je-li proud maximální, bude napětí nulové. Klesá-li proud, bude napětí záporné.

To znamená, že **napětí předbíhá proud o $\pi/2$ (90°)**. (Nejprve na cívku přivedeme napětí, které vytvoří magnetické pole, potom začne procházet proud.) Platí zákon, že **indukované napětí působí svými účinky proti změně, která jej vyvolala** (Lencův zákon). To znamená, že ačkoliv ohmický odpor cívky je při stejnosměrném proudu nulový, střídavému proudu klade cívka „odpor“, kterým je proud omezen. Tento odpor je pouze zdánlivý a nazývá se **indukční reaktance X_L [Ω]**

$$\text{Platí } U_{\max} = I_{\max} \cdot X_L, \quad U = I \cdot X_L.$$

Tento vztah vyjadřuje Ohmův zákon pro obvod s ideální cívkou.

Indukční reaktanci vypočítáme ze vztahu **$X_L = \omega L = 2\pi fL$** . Dosazením jednotek si můžeme ověřit, že její jednotkou jsou ohmy. Jedná se o veličinu frekvenčně závislou. Indukční reaktance **X_L roste lineárně s frekvencí, proud tekoucí cívkou je nepřímo úměrný frekvencí.**

Převrácenou hodnotou indukční reaktance je indukční **susceptance**, značíme ji **B** , jednotkou je siemens.

Jalový výkon

Okamžitý výkon střídavého proudu v ideální cívce získáme vynásobením okamžitých hodnot napětí a proudu.

$$p = u \cdot i$$

Okamžité hodnoty výkonu jsou kladné nebo záporné, protože napětí a proud jsou fázově posunuté o 90° .

Kdybychom toto násobení provedli bod po bodu v celé periodě, zjistili bychom, že **výkon v cívce kmitá s dvojnásobnou frekvencí okolo nulové hodnoty**. Dochází k **výměně energie mezi zdrojem a cívkou**. Na cívce se **žádný výkon nespotebovává**. Jedná se o jalový indukční výkon, značí se **Q** . Jeho jednotkou je **var** (watt reaktanční). Proud, který je zpožděn o 90° za napětím, nazýváme jalový proud (magnetizační proud), který slouží k vytvoření magnetického pole cívky.

$$Q = U \cdot I$$

Příklad: Cívka o indukčnosti 0,8 H je připojena k napětí 230 V/50 Hz. Určete proud a jalový výkon

$$X_L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,8 = 251,2 \, \Omega$$

$$I = U/X_L = 0,916 \, A$$

$$Q = U \cdot I = 210,6 \, (\text{var})$$

Ideální KONDENZÁTOR v obvodu střídavého proudu.

V stejnosměrném obvodu platí $Q = C \cdot U$, ve střídavém obvodu $\nabla Q = C \cdot \nabla U$

$$i_C = C \cdot du/dt$$

Z této rovnice je možné matematicky (derivováním) odvodit všechny vlastnosti kondenzátoru.

Z této rovnice vyplývá, že **čím větší je změna napětí na kondenzátoru, tím větší bude proud kondenzátorem**. Při průchodu napětí nulou je maximální proud. Roste-li napětí, má proud

kladnou hodnotu. Je-li napětí maximální, je hodnota proudu nulová. Klesá-li napětí je hodnota proudu záporná. To znamená, že v obvodu ideálního kondenzátoru **proud předbíhá napětí o $\pi/2$** . (nejdříve se kondenzátor proudem nabíjí, potom je na něm napětí).

Proud tekoucí kondenzátorem je přímo úměrný jeho kapacitě a provozní kmitočtu „Odpor“ kondenzátoru se nazývá **kapacitní reaktance X_c** , která se udává v ohmech.

$$\underline{X_c} = 1/\omega C \quad \underline{U} = \underline{X_c} \underline{I}$$

Převrácená hodnota kapacitní reaktance je **kapacitní susceptance $B = 1/X_c = I/U = \omega C$**

Stejně jako u cívky je okamžitá hodnota výkonu $p = u \cdot i$, má střídavě kladnou nebo zápornou hodnotu a kmitá s dvojnásobnou frekvencí. **V obvodu s ideálním kondenzátorem se nepotřebovává žádná energie**, dochází pouze k výměně energie mezi zdrojem a kondenzátorem. Energie slouží pouze k vytvoření elektrického pole kondenzátoru. Vzniká **jalový kapacitní výkon $Q = U \cdot I$ (var)**, kondenzátorem prochází **jalový kapacitní proud**.

Příklad: Jaký proud teče kondenzátorem 100 nF, který je připojen na napětí 230V/50 Hz. Jaký bude jalový výkon?

$$X_c = 1/(6,28 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}) = 31,84 \text{ k}\Omega$$

$$I = 230/31,84 = 7,22 \text{ mA} = 0,00722 \text{ A}$$

$$Q = 230 \cdot 7,22 = 1,66 \cdot 10^{-3} \text{ var}$$

SÉRIOVÉ SPOJENÍ LC – IDEÁLNÍ SÉRIOVÝ REZONANČNÍ OBVOD.

Oběma prvky prochází stejný proud. Napětí na cívce předbíhá tento proud o 90° , napětí na kondenzátoru se za tímto proudem o 90° zpožďuje. **U_L a U_C jsou proto v protifázi, jejich hodnoty se odečítají.**

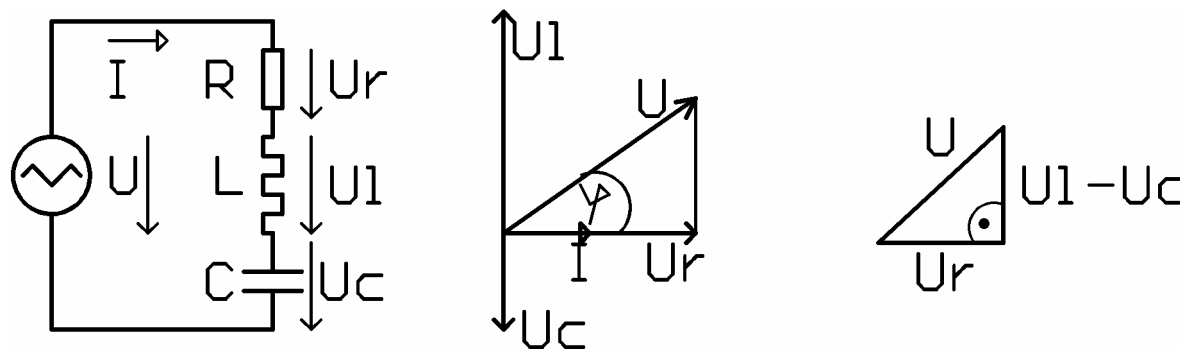
Impedance obvodu $Z = (X_L - X_C)$ má pro $X_C > X_L$ **kapacitní charakter** a pro $X_C < X_L$ **indukční charakter.**

Pro $X_L = X_C$ **dochází k rezonanci, impedance obvodu je nulová.** Nyní si odvodíme výpočet rezonančního kmitočtu

$$X_L = X_C \quad \omega L = 1/\omega C \quad \omega^2 = 1/LC \quad \underline{f = 1 / (2\pi\sqrt{LC})} \text{ Thomsonův vzorec}$$

SKUTEČNÝ REZONANČNÍ OBVOD

Jak jsme si již uvedli, ideální cívka neexistuje, každá indukčnost obsahuje i činný odpor.



Obrázek: Sériový obvod RLC

Proto žádný rezonanční obvod nemůže mít nulovou impedanci. $Z^2 = (X_L - X_C)^2 + R^2$

V rezonanci, kdy X_C a X_L se odečtou bude $Z = R$. Poměr X_L/R nebo X_C/R udává **jakost rezonančního obvodu, kterou označujeme písmenem Q.**

Výše uvedený obrázek znázorňuje vzájemný fázový posuv napětí U_l , U_c a U_r (fázorový diagram)

Příklad: Jaký je rezonanční kmitočet sériového spojení $L = 2,2 \text{ mH}$ a $C = 15 \text{ nF}$?

$$f = 1 / (6,28 \cdot \sqrt{(2,2 \cdot 10^{-3}) \cdot (15 \cdot 10^{-9})}) = 1 / (6,28 \cdot \sqrt{(33 \cdot 10^{-12})}) = 1 / (36 \cdot 10^{-6}) = 27,77 \text{ kHz}$$

PARALELNÍ OBVOD RLC (paralelní rezonanční obvod)

Všechny prvky jsou připojené na stejné napětí. Celkový proud je součtem dílčích proudů

Proud I_C a I_L jsou vzájemně posunuty o 180° . Jejich účinek se ruší, proudy se odečítají.

$$I_R = U/R \quad I_C = U/X_C = U \omega C \quad I_L = U/X_L = U/\omega L$$

Výsledný proud vypočítáme z trojúhelníku proudů $I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2$

Stejným způsobem vypočítáme i celkovou impedanci obvodu a fázový posun mezi proudem a napětím. $Z = U/I$

Příklad: Paralelní rezonanční obvod $R = 500 \Omega$, $L = 5 \text{ mH}$, $C = 220 \text{ nF}$ připojíme ke generátoru s výstupním napětím 2 V o kmitočtu $f = 2 \text{ kHz}$. Vypočítejte proud tekoucí obvodem a fázový posun mezi tímto proudem a napětím

$$X_L = \omega L = 6,28 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 62,8 \Omega$$

$$I_L = 2/62,8 = 0,0318 \text{ A} = 31,8 \text{ mA}$$

$$I_R = U/R = 2/0,5 = 4 \text{ mA}$$

$$X_C = 1/\omega C = 1/(6,28 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 0,22 \cdot 10^{-6}) = 5,52 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 5,52 \text{ mA}$$

$$I^2 = I_R^2 + (I_L - I_C)^2 = 4^2 + (31,8 - 5,52)^2 = 16 + 704 = 720$$

$$I = 26,8 \text{ mA}$$

$$\text{tg} \varphi = (I_L - I_C)/I_R = 31,8 - 5,52/4 = 6,57 \quad \varphi = 81,3^\circ$$

Výše uvedený obvod se při tomto kmitočtu chová jako obvod RL, říkáme, že má **indukční charakter**. Při vyšších kmitočtech poteče více proudu kondenzátorem, obvod bude mít **kapacitní charakter**. Můžete si to vyzkoušet, proveďte výše uvedený výpočet i pro jiné kmitočty.

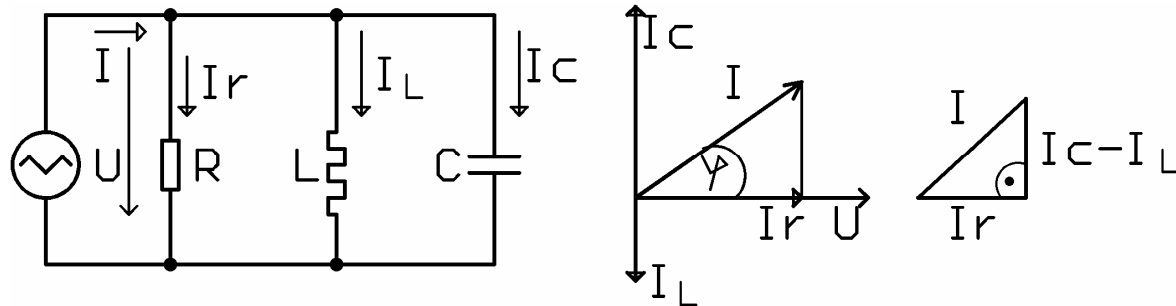
Obdobně jako u sériového RLC obvodu i u paralelního rezonančního obvodu dochází při určitém kmitočtu k **rezonanci**. Má-li indukčnost i kapacita stejnou impedanci, bude $X_C = X_L$ a $I_C = I_L$ a obvodem poteče pouze proud I_R . Impedance obvodu bude maximální a bude rovna R . **Vzorec pro rezonanční kmitočet odvodíme stejným způsobem jako u sériového rezonančního obvodu $f_{\text{rez}} = 1 / (2\pi\sqrt{LC})$.**

Tento obvod se používá v radiotechnice všude tam, kde potřebujeme z velkého množství signálů jeden vybrat a ostatní potlačit.

Příklad: U obvodu s předcházejícího příkladu vypočítejte rezonanční kmitočet a proud jednotlivými prvky při rezonanci.

$$f_{\text{rez}} = 1 / (2\pi\sqrt{LC}) = 1/(6,28\sqrt{5 \cdot 10^{-3} \cdot 220 \cdot 10^{-9}}) = 1/6,28\sqrt{1100 \cdot 10^{-12}} = 1/(208 \cdot 10^{-6}) = 4,8 \text{ kHz}$$

U paralelního rezonančního obvodu nastává tzv. **proudová rezonance**. Přes obvod teče pouze činný proud (kdyby byl R nekonečný, byl by proud nulový a impedance by byla nekonečně velká). Cívka a kondenzátor si navzájem vyměňují energii prostřednictvím proudů I_C a I_L . Tyto proudy jsou Q krát větší než celkový proud. Činitel jakosti Q můžeme vypočítat ze vztahu $Q = R/2\pi f_r L$ nebo $Q = R/2\pi f_r C$. Udává, kolikrát je při rezonanci impedance odporu větší než impedance cívky nebo kondenzátoru.



Obrázek: Paralelní rezonanční obvod a jeho fázový diagram.

ČINNÝ A JALOVÝ VÝKON

Připojíme obecný RLC obvod ke zdroji střídavého napětí U , kterým protéká proud I . φ je fázový posun mezi U a I . Potom můžeme určit

Činný výkon $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ [W]

Jalový výkon $P = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ [var]

Zdánlivý výkon $P = U \cdot I$ [VA]

Činný výkon vytváří práci a tepelné ztráty na rezistorech, světelný tok žárovky, pohyb motoru, apod. měříme jej **wattmetrem**. Výkon je **maximální, má-li zátěž čistě odporový charakter** a mezi

proudem a napětím je nulový fázový posuv. **cos φ** se nazývá **účinnost**. Tento údaj je často uveden na elektrospotřebičích.

Jalový výkon vzniká při připojení kapacitní nebo indukční zátěže. Tento výkon si **vyměňuje zdroj a zátěž**. Vytváří se jím elektrické pole kondenzátoru nebo magnetické pole cívky.

Jakový výkon nevykonává práci.

Zdánlivý výkon vypočítáme z naměřených hodnot proudu a napětí. Udává horní mez výkonu.

Vztah mezi těmito veličinami udává **trojúhelník výkonů**, řešíme jej pomocí Pythagorovy věty. $S^2 = P^2 + Q^2 = U^2 I^2 \cos^2 \varphi + U^2 I^2 \sin^2 \varphi = U \cdot I (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) = U \cdot I$

Příklad: Na štítku motoru jsou údaje: $U = 230 \text{ V}$, $I = 5 \text{ A}$, $\cos \varphi = 0,8$. Vypočítejte činný výkon.

$$P = U \cdot I \cos \varphi = 230 \cdot 5 \cdot 0,8 = 950 \text{ W}$$

Příklad: Na motoru jsme wattmetrem naměřili 500 W při napětí 230 V. Jaký proud teče obvodem, je-li účinnost 0,85? $I = P / (U \cdot \cos \varphi) = 500 / (230 \cdot 0,85) = 2,56 \text{ A}$

Jaký je činný odpor a indukčnost vinutí tohoto motoru, $f = 50 \text{ Hz}$

$$P = R I^2 \quad R = 76,3 \Omega$$

$$\varphi = \arccos 0,85 = 31,78^\circ$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 310 \text{ var} \quad Q = X_L I^2 \quad X_L = 47,32 \Omega \quad L = 0,15 \text{ H}$$

Příklad: Cívkou stykače teče proud 40 mA. Činný odpor cívky je 3 kΩ. Jaký je činný a jalový výkon cívky při napětí 230 V/50 Hz?

$$S = U \cdot I = 230 \cdot 0,04 = 9,2 \text{ VA}$$

$$P = R I^2 = 3 \cdot 10^3 \cdot 0,04^2 = 3 \cdot 10^3 \cdot 16 \cdot 10^{-4} = 4,8 \text{ W}$$

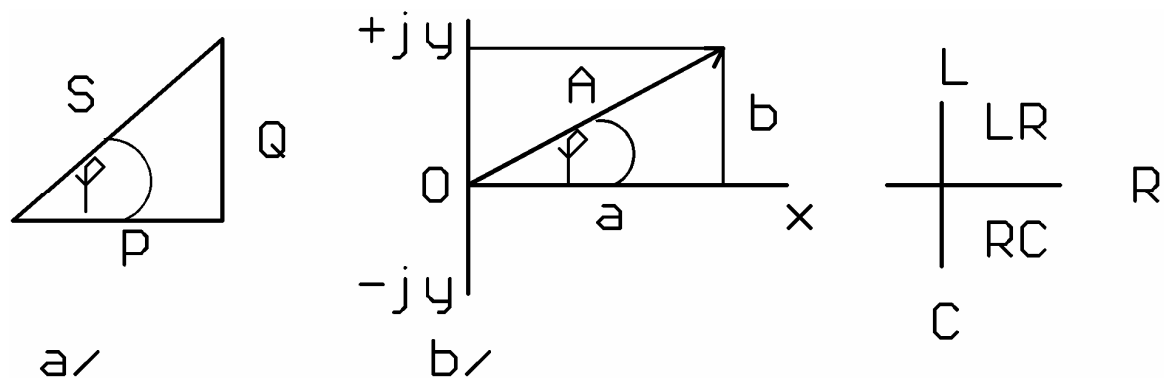
$$Q^2 = S^2 - P^2 = 84,64 - 23,04 = 61,6$$

$$Q = 7,85 \text{ Var}$$

$$X_L = Q / I^2 = 4 \text{ } 905 \Omega$$

$$L = X_L / 2\pi f = 15,62 \text{ H}$$

S jalovým výkonem se setkáváme hlavně u motorů, protože jejich vinutí má indukčnost. I když jalový výkon nevyvolává tepelné ztráty, musíme se jeho problematikou zabývat. Výměna energie mezi zdrojem (elektrárnou) a spotřebičem (např. motorem) probíhá po vedení, na kterém vznikají zbytečné ztráty. Velkooběratelé mají proto povinnost kompenzovat jalový výkon (indukční zátěž) přidáním paralelních kondenzátorů. Výměna energie potom probíhá mezi motorem a kompenzačním kondenzátorem.



Obrázek: a/ Trojúhelník výkonů

b/ komplexní rovina, obvody RLC v komplexní rovině

POLOVODIČE

Vlastnosti polovodičů

Polovodiče jsou materiály ze 4. skupiny Mendělejevovy tabulky. Nejznámější jsou germanium (Ge) a křemík (Si). Každý atom má 4 vazby, pomocí kterých se váže na sousední atomy. V čistém polovodiči nejsou volné elektrony, proto vodí špatně elektrický proud.

Polovodič N

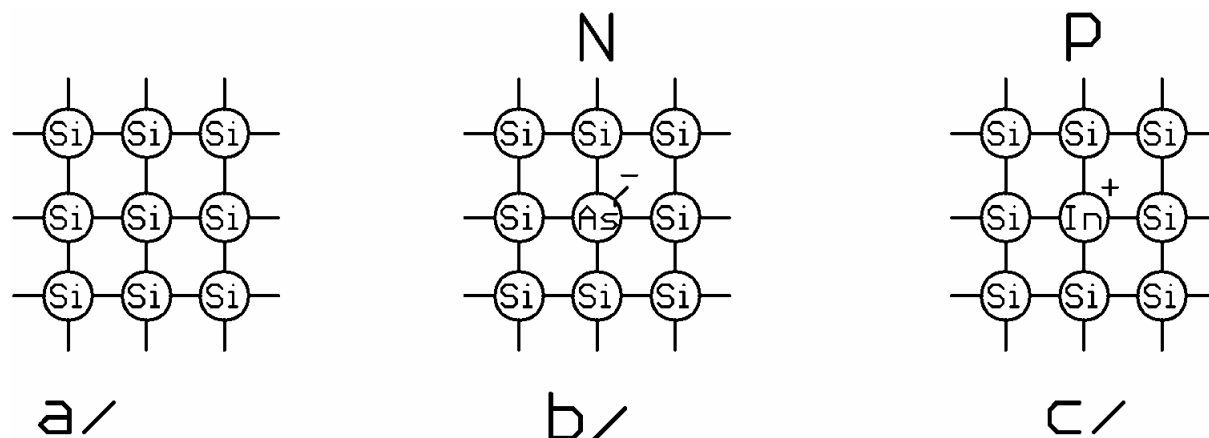
Přidáme-li k prvku 4. skupiny příměs prvku 5. skupiny (např. arsén – As), bude při vzájemných vazbách mezi atomy mít atom příměsi jednu vazbu navíc - **volný elektron**. Atom proto nazýváme **donorem**. Volný elektron je nositelem **elektronové vodivosti**.

Polovodič P

Přidáme-li k prvku 4. skupiny prvek 3. skupiny zvaný akceptor (např. Indium – In), bude jeden elektron chybět.

Vznikne kladný náboj - **díra**, polovodič má **děrovou vodivost**.

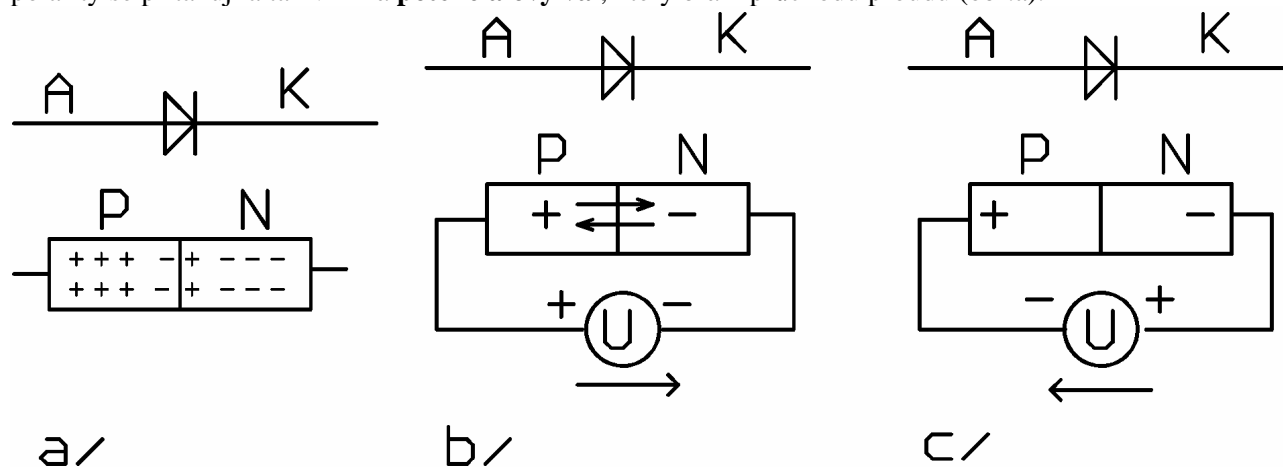
Vodivost polovodičů vzrůstá přidáním příměsí.



Obrázek a/Struktura atomů čistého polovodiče b/polovodič typu N c/ polovodič typu P

Dioda

je polovodičová součástka. Její základní vlastností je, že vede proud pouze v jednom směru. Je tvořena přechodem P - N. Má 2 vývody **anodu (A)** a **katodu (K)**. Je-li tento přechod bez vnějšího napětí, dochází na rozhraní oblasti P a N ke spojování - rekombinaci **volných** elektronů a děr. Náboje opačné polarity se přitahují a tak vzniká **potenciálový val**, který brání průchodu proudu (obr.a).



Obrázek a/Schematická značka diody, její vnitřní struktura, P-N přechod bez vnějšího napětí b/ Dioda v propustném směru c/ dioda v závěrném směru

Připojíme-li na diodu napětí v **propustném směru** (na anodu kladné, na katodu záporné), zruší se potenciálový val, proud začne procházet, kladné nosiče náboje jsou přitahovány záporným napětím, volné elektrony kladným napětím (obr.b).

Obrátíme-li polaritu napětí, vytvoří se v diodě vyprázdňená bez volných elektrických nábojů, proud nemůže procházet, dioda je v **závěrném směru**.

Protože polovodičový materiál nelze vyrobit úplně čistý, prochází diodou, která je zapojena v závěrném směru určitý **zbytkový proud**. Ten je ale u moderních součástek většinou zanedbatelný, u křemíkových diod je řádu nA.

Vlastnosti a VA charakteristika diody

Z VA charakteristiky vidíme, že se jedná o součástku, která **se chová odlišně při měnění se polaritě napájecího napětí** (při jejím zapojení nesmíme zaměnit anodu a katodu). Je-li napětí v propustném směru menší než **napětí prahové U_p** , potenciálový val brání průchodu proudu, který je potom velmi malý (mikroampéry). Vzniká tak charakteristické zakřivení VA charakteristiky.

Překročíme-li prahové napětí, roste proud velmi rychle. Nesmíme však překročit **mezní proud** v propustném směru I_F , aby nedošlo ke zničení diody. Při větších proudech (stovky mA, jednotky A) vzniká na diodě nezanedbatelný ztrátový výkon $P = U \cdot I$, dioda se zahřívá. Proud v závěrném směru je zpravidla zanedbatelný (mikroampéry). Nesmíme však překročit **mezní závěrné napětí U_R** , aby nedošlo k **průrazu**, kterým by se dioda zničila. Hlavně podle těchto parametrů si vybíráme typ diody pro konkrétní aplikaci.

Rozdělení diod podle materiálu

1) **germaniové** – $U_p = 0,22$ V, závislost jejich vlastností na teplotě je velmi vysoká, mají velký zbytkový proud v závěrném směru (mikroampéry), nyní se již téměř nepoužívají.

2) **křemíkové** - $U_p = 0,56$ V, napětí v propustném směru typicky **0,6 - 0,7 V** - (velmi důležité hodnoty), při velkých proudech maximálně 1,1 V. Závěrný proud je zanedbatelný - desítky nanoampér. Jedná se o nejvíce používaný typ diody.

3) **Schottkyho diody** - (využívá se rozhraní kov - polovodič N) - $U_p = 0,2$ V, používá se tam, kde je zapotřebí velká rychlost a velmi **krátká zotavovací doba**.

4) **LED** - elektroluminiscenční diody, materiál GaAs (galium arsenid), napětí v propustném směru 1,5 – 2 V (dle barvy)

Rozdělení diod podle užití

1) **usměrňovací diody** - slouží k usměrnění velkých proudů I_F jednotky až desítky ampér, U_R stovky voltů.

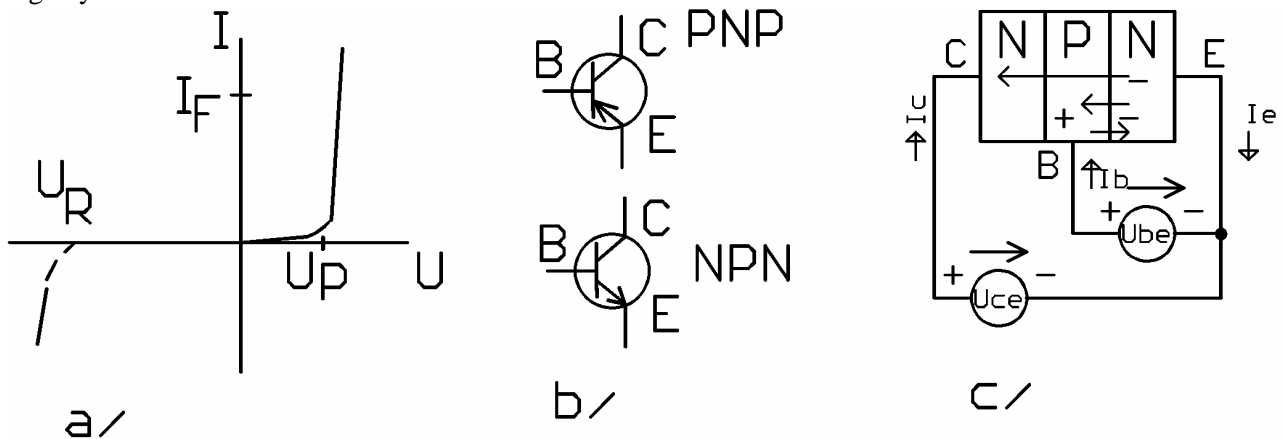
Tyto diody musí dobře odvádět teplo, proto mají silné vývody, někdy se montují na chladič. P-N přechod má velkou plochu, proto mají většinou dlouhou zotavovací dobu a můžeme je používat pouze pro zpracování nízkých frekvencí (nejčastěji 50 Hz).

Ze střídavého napětí vytváříme stejnosměrné napětí nejčastěji pomocí můstkového usměrňovače, který obsahuje 4 diody. Na jeho výstupu je pulzující napětí – stejnosměrné napětí, které obsahuje i střídavou složku. K jejímu potlačení používáme filtrační kondenzátor.

Obrázek: Zdroj stejnosměrného napětí

2) **diody detekční a spínací** mají krátkou zotavovací dobu, malou plochu P-N přechodu - I_F desítky miliampér, U_R desítky voltů

Slouží k zpracování signálů o vysokém kmitočtu (rozhlasový přijímač) nebo jako spínací součástka v logických obvodech.



Obrázek: a/ VA charakteristika diody (ve skutečnosti je zaoblená),
b/ Schematická značka NPN (šipka ven) a PNP tranzistoru

c/ Zapojení a princip činnosti tranzistoru

Tranzistor

Tranzistor je základním stavebním prvkem v elektronice. Má schopnost zesilovat napětí a proud, což je vlastnost velmi důležitá. Používá se nejen jako diskretní součástka (každý tranzistor v samostatném pouzdře), ale také v **integrováných obvodech**.

Princip činnosti

Tranzistor je **třívrstvá polovodičová součástka**, obsahuje dva PN přechody, jeho vývody se nazývají **báze (B)**, **kolektor (C)** a **emitor (E)**.

Podle vnitřní struktury dělíme tranzistory na **NPN a PNP**. Oba typy pracují na stejném principu činnosti, ale s opačnou polaritou napájecího napětí.

U typu NPN jsou nosiči proudu volné elektrony, u typu PNP díry, které se pohybují pomaleji. Proto má NPN tranzistor lepší vlastnosti při zpracování signálů s vyšší frekvencí a používá se častěji. Tranzistorový jev proto budeme vysvětlovat na NPN tranzistoru.

Na emitor je přivedeno záporné napětí, na kolektor kladné. U_{BE} je zpravidla menší než U_{CE} . Přechod báze-emitor je v podstatě dioda zapojená v propustném směru, přechod kolektor-báze je zapojen v závěrném směru.

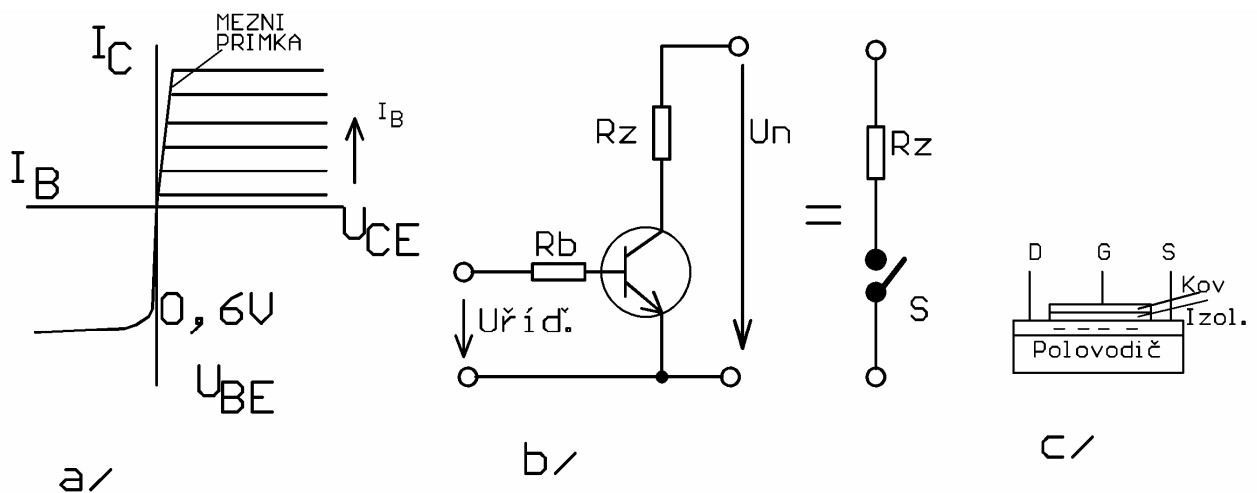
Teče-li proud obvodem báze-emitor, dostávají se elektrony z oblasti emitoru (polovodič N) do oblasti báze. Protože na kolektoru je větší napětí než na bázi a oblast báze (polovodič P) je velmi tenká, většina elektronů je stržena do oblasti kolektoru.

Z toho vyplývá, že **protéká-li proud obvodem báze-emitor (I_B), začne protékat proud i mezi kolektorem a emitorem (I_C)** přes přechod kolektor - báze, který je v závěrném směru. **Proud kolektoru je závislý na proudu báze.** U moderních tranzistorů, které mají velmi tenkou oblast báze, platí, že **I_C je mnohem větší než I_B** , protože většina elektronů se z emitoru nedostane do báze, ale do kolektoru.

Tranzistor působí jako **zesilovač proudu**. Malému řídicímu proudu (I_B) odpovídá velký proud řízený (I_C). **Poměr I_C/I_B se nazývá proudový zesilovací činitel tranzistoru.** Bývá v rozsahu 10 - 1000, nejčastěji 100 - 300. Označuje se β nebo h_{21E} . U výkonových tranzistorů bývá zesílení menší (10 - 100).

V každém tranzistoru musí platit:

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{Při dostatečně velkém zesílení přibližně platí } I_E = I_C$$



Obrázek a/ VA charakteristika tranzistoru (ve skutečnosti je zaoblená)

b/ Tranzistor jako spínač

c/ Princip tranzistoru MOS

Vlastnosti tranzistoru můžeme znázornit graficky v jednom obrázku. V prvním kvadrantu je **výstupní charakteristika $I_C = f(U_{CE})$** , ve třetím kvadrantu **vstupní charakteristika** - závislost I_B a U_{BE} .

Vstupní charakteristika tranzistoru je podobná VA charakteristice diody. **U křemíkového tranzistoru je typická hodnota napětí $U_{BE} = 0,6 \text{ V}$** , při saturaci max. $0,7 \text{ V}$. Je-li tranzistor otevřen, musíme na něm vždy tuto hodnotu naměřit. Při nižších hodnotách U_{BE} musí být uzavřen (obvodem kolektor - emitor neprotéká proud).

Výstupní charakteristika je popsána soustavou křivek, kde parametrem je proud báze (parametrická charakteristika). Je z ní vidět, že proud kolektoru je převážně závislý na proudu báze.

Všechny křivky se sbíhají na tzv. **mezní přímce**. Při úplném otevření tranzistoru (U_{CE} se blíží nule) tranzistor již nemůže zesilovat proud, chová se jako kdyby mezi kolektorem a emitorem byl velmi malý odpor. Říkáme, že tranzistor je ve stavu **saturace** - nasycení. Typická hodnota **saturačního napětí** je u moderních tranzistorů malého výkonu (do 1 W) asi **$0,2 \text{ V}$** . U výkonových tranzistorů bývá 1 až 2 V .

Při saturaci se tranzistor chová jako sepnutý spínač, na kterém je malý úbytek napětí. Dochází k ní při dostatečně velkém proudu báze, kdy již není možné aby platilo:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Proud kolektoru je totiž omezen hodnotami dalších součástek (kolektorový odpor R_Z).

Pokud je na **bázi tranzistoru napětí menší než $0,6 \text{ V}$** , potom $I_B = 0$. Obvodem kolektor-emitor teče pouze **zbytkový proud** (řádově $1 \mu\text{A}$), tranzistor se chová jako **rozepnutý spínač**.

Tento spínač řídíme proudem do báze tranzistoru. Řídící napětí $U_{\text{říd}}$ přivádíme na bázi tranzistoru přes ochranný odpor R_B . Jinak by byl proud báze příliš velký a tranzistor by se zničil.

Odpor R_Z (zátěž) v kolektoru tranzistoru omezuje jeho kolektorový proud.

Tranzistor umožňuje **bezkontaktní** spínání zátěže v kolektorovém obvodu proudem přivedeným do báze. Že bezkontaktní spínání je oproti relé rychlejší, spolehlivější a výhodnější z hlediska rozměrů i životnosti spínače pochopí jistě každý. Při sepnutí se tranzistor zpravidla dostane do saturace. Aby tomu tak skutečně bylo, musí platit, že **$I_B \cdot h_{21e} > I_C$**

INTEGROVANÉ OBVODY

Jsou základem moderní elektroniky. Výchozím materiálem pro jejich výrobu je křemík, který musí být velmi čistý, bez jakýchkoliv příměsí. Z něj se vyrobí monokrystal a rozřeže se na tenké destičky. Difúzí (působením par při teplotě několika set stupňů) se v ní vytvoří oblasti typu P a N, které tvoří jednotlivé tranzistory, diody nebo rezistory. K jejich vzájemnému propojení se používá hliníková vrstva vytvořená vakuovým napařením. Rozměry jednotlivých prvků uvnitř IO jsou v jednotkách až desítkách mikrometrů.

Integrované obvody se dělí na analogové a číslicové.

Analogové obvody zpracovávají **spojitý** signál (rozhlasový, televizní, řeč, hudba). **Číslicové** (logické) obvody pracují s **dvoustavovým signálem** (zapnuto – vypnuto, $\log 0$ – $\log 1$, nízká – vysoká úroveň napětí). Používají se v řídicích obvodech. Mezi ně patří **mikroprocesory**, které pracují podle **programu**, který si každý uživatel může sám vytvořit. Obsahují až milión tranzistorů.

PŘENOS INFORMACÍ

Pomocí **mikrofonu** (zvukové vlny vyvolají změnu odporu – uhlíkový mikrofon, kapacity – kondenzátorový mikrofon, nebo indukci napětí – elektrodynamický mikrofon) přeměňujeme akustický signál na elektrický. Dále jej můžeme zesílit **zesilovačem** a pomocí **reproduktoru** přeměnit zpátky na akustický.

K **záznamu** zvuku (a obrazu) využíváme magnetických vlastností feromagnetických materiálů nanesených na magnetofonový pásek (kazetu). K záznamu signálu na pásek a jeho snímání se používá **magnetofonová hlava**. Dalším způsobem záznamu zvuku je vypálení informace na **CD** a její snímání laserovým paprskem. Jedná se o signál, který byl předtím převeden na **digitální**.

Obrazový signál snímáme buď **kamerou** nebo **digitálním fotoaparátem**.

Přenos signálu na velké vzdálenosti se používá buď **vedení** (telefon, kabelová TV) nebo **bezdrátový přenos** pomocí rádiových vln (rozhlas, TV, mobilní telefon, vysílačka. V obou případech se užitečný signál (zvuk, obraz) **moduluje** na vyšší **nosný kmitočet**, který je vhodný pro přenos.

(Rozhlas $0,2$ až 100 MHz , TV 50 až 750 MHz , mobil 900 nebo 1800 MHz , satelitní TV 12 GHz).

Modulace může být buď **amplitudová AM** (v závislosti na užitečném signálu se mění amplituda nosného signálu) nebo **kmitočtová FM** (v závislosti na užitečném signálu se mění kmitočet nosného signálu).

Na přijímací straně musíme, vybrat jeden z velkého množství různých signálů (naladit přijímač), tento **signál zesílit, demodulovat** (odstranit nosný kmitočet, získat z něj zpátky užitečný signál) a dále zpracovat a použít.

Rádiové vlny patří mezi **elektromagnetické vlnění** a platí pro ně stejné zákonitosti jako pro šíření světla (viz kapitola kmitání a optika). Rychlost šíření je $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, $\lambda = c/f$, při setkání s překážkou nastává **ohyb** (je-li velikost překážky menší nebo srovnatelná s vlnovou délkou), **odraz** nebo **lom**. Rádiové vlny větších vlnových délek se šíří i přes velké překážky. U kratších vlnových délek je zapotřebí přímá viditelnost mezi přijímačem a vysílačem. V některých pásmech (KV) se uplatňuje i odraz od ionosféry.

K přeměně elektrického signálu na elektromagnetické vlnění a naopak se používají vysílací a přijímací **antény** různých tvarů. Každý vodič při průchodu elektrického proudu okolo sebe vytváří elektromagnetické pole, které se může prostorem dále šířit. Pro nižší kmitočty (DV, SV, KV) se jako přijímací anténa používá často kus drátu nebo cívka navinutá na feritové tyčce. Základem většiny typů TV antén je **půlvlnný dipól**, který je doplněn dalšími prvky (reflektory a direktory) pro zajištění většího zisku a směrovosti antény. Na kmitočtu jednotek GHz již začínají platit zákony geometrické optiky. Používají se zde **parabolické antény** s dipólem umístěným v ohnisku.

PRŮCHOD PROUDU KAPALINOU

V kapalinách je příčinou proudu **iontová vodivost**. Pokud elektrické **napětí**, které jsme do kapaliny přivedli pomocí 2 **elektrod, rozloží** jejich **molekuly na kladné a záporné ionty**, budou se kladní ionty pohybovat směrem k záporné elektrodě a záporné ionty směrem ke kladné elektrodě. Obvodem začne procházet **elektrický proud, který je spojen s pohybem hmoty**.

Kladné ionty nazýváme **kationty**, pohybují se směrem ke **katodě**, která je připojena na **záporné** napětí.

Záporné ionty nazýváme **anionty**, pohybují se směrem k **anodě**, která je připojena na **kladné napětí**. Příkladem vodivé kapaliny je vodný roztok kuchyňské soli. Působením vody dojde k oslabení přitažlivých sil mezi kationtem sodíku a aniontem chlóru. (Kuchyňská sůl se v tuhém stavu chová jako izolant). Obdobně se vodivost vody zvýší přidáním jakékoliv kyseliny, hydroxidu nebo soli. Tak vzniká **elektrolyt**.

Vedení elektrického proudu v elektrolytu je spojeno s vylučováním látek na elektrodách. Při elektrochemických reakcích se kationty (kovy) vylučují na katodě. Tohoto jevu se využívá při galvanickém pokovování předmětů.

Na katodě se rovněž vylučuje vodík, který ve formě bublinek z elektrolytu uniká. Na anodě rovněž vzniká plyn (při rozkladu vody kyslík).

Faradayův zákon pro elektrolýzu: **Hmotnost látky vyloučené při elektrolýze je přímo úměrná proudu I a době t, po kterou proud elektrolytem procházel.**

$M = A \cdot I \cdot t$, kde A je elektrochemický ekvivalent (závisí na složení látky)

Elektrolýza se využívá při **výrobě kovů** (výroba hliníku z Al_2O_3 elektrolýzou v uhlíkové vaně (katoda), při **elektrolytickém čištění kovů** (mědi, která se vylučuje na katodě, elektrolytem je roztok $Cu SO_4$), při **galvanickém pokovování** (výrobky z méně ušlechtilých kovů se pokrývají vrstvou ušlechtilých kovů).

Galvanický článek je zdroj elektrického napětí tvořený dvěma elektrodami z různých kovů ve styku s vhodným elektrolytem. Dochází v něm k přeměně chemické energie v elektrickou. Používáme články **primární - baterie**, které se po vybití zahazují (vyplatí se je používat pro malý odběr proudu, např. dálkové ovládání TV) a **sekundární - akumulátory**, které je možné opakovaně nabíjet. Vyplatí se je používat při velkém odběru proudu (v automobilu, ve walkmanu)

Jako primární články se nejčastěji používají **suché články**, jejichž zápornou elektrodu tvoří zinková nádoba, kladnou elektrodu tvoří uhlíková tyčinka uprostřed článku. Elektrolytem je suchý salmiak, MnO_2 (burel) slouží k depolarizaci článku. Napětí tohoto článku je 1,5 V, při provozu brzy klesá na 1,2 až 1,1 V. Článek s napětím pod 1 V je úplně vybitý. Tento typ článků v současnosti nahrazují **alkalické články** s delší životností a větší kapacitou. Záporná elektroda lisovaná z práškového zinku je

obklopena kladnou elektrodou, kterou tvoří směs burlu a grafitu. Elektrolytem je hydroxid draselný KOH rozpuštěný v gelu. Celý článek je chráněn ocelovým pláštěm proti úniku chemických látek do okolí.

Nejčastěji (v automobilech) se používají **olověné akumulátory** (elektrody z olova, elektrolytem je roztok kyseliny sírové. Při nabíjení se povrch anody pokrývá vrstvou PbO_2 , katoda zůstává olovená. Při vybíjení na obou elektrodách vzniká $PbSO_4$, snižuje se napětí článku a hustota elektrolytu. Napětí jednoho článku je typicky 1,2 V.

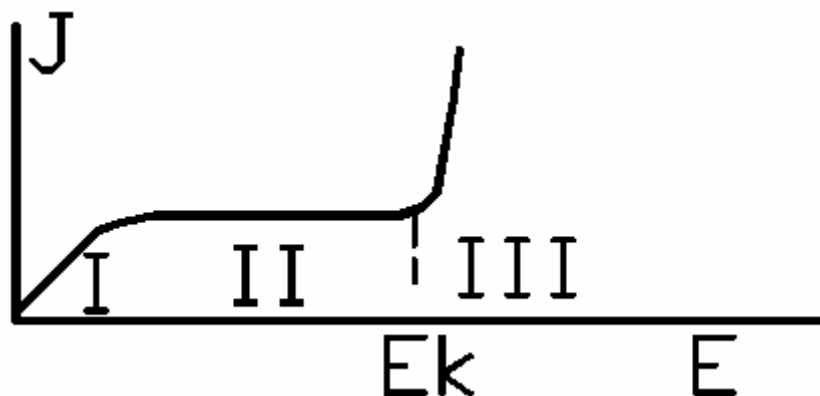
Jako menší akumulátory (akumulátorové články ve tvaru tužkových baterií) se používají **niklkadmiové články**.

Pro zvýšení napětí řadíme baterie a akumulátory **do série**. Jejich **kapacitu** (tento termín je ale nepřesný, jedná se ve skutečnosti o velikost náboje Q) udáváme v **ampérhodinách** (Ah). Kapacita autobaterie osobního automobilu (12 V) je řádově 40 Ah, kapacita tužkového článku 1 Ah. Při správném používání se akumulátory nemají vybíjet úplně ani nepřebíjet. Je vhodné nepřekročit maximální nabíjecí proud doporučený výrobcem (proud v ampérech odpovídá jedné desetíně kapacity baterie v ampérhodinách). Při rychlejším nabíjení je nutná opatrnost (kontrolovat vhodným obvodem teplotu, proud a napětí). Při dodržení těchto podmínek vydrží akumulátor několik set nabíjecích cyklů.

PRŮCHOD PROUDU PLYNEM

Plyny se vyznačují malou hustotou. Jejich **vodivost** je při malých intenzitách elektrického pole **malá**. Je **daná počtem iontů v plynu**. (Přidáním iontů, např. kouřem zvýšíme vodivost vzduchu). Na obrázku oblast II.

Počet volných elektronů a iontů se může zvýšit **ionizací neutrálních molekul plynu**, který se pak stane vodivým (oblast III). Příčinou ionizace bývá velká intenzita elektrického pole. Při kritické intenzitě elektrického pole nastává nárazová ionizace, kdy pohybující se ionty při nárazu na neutrální atomy způsobí jejich ionizaci.



Obrázek: Závislost proudové hustoty na intenzitě elektrického pole u plyných izolantů.

Při vysokém tlaku nemůže pohybující se iont díky častým srážkám získat potřebnou rychlost k ionizaci dalších atomů. Při nízkém tlaku zase získá velkou rychlost, ale je malá pravděpodobnost srážky a dalšími atomy.

Při **zmenšení koncentrace částic se zvětšuje střední volná dráha elektronů**, nedochází tak často k jejich srážkám s molekulami. Při velmi nízkých tlacích **probíhá pomaleji okysličování**.

V **zářivkách a výbojkách** ve zředěné atmosféře a při použití netečných plynů nastává i při nízkých teplotách ionizace plynů, takto vzniklé elektrony dopadají na elektroluminiscenční vrstvu a vytvářejí optické záření.

Výboje v plynech při velmi malém tlaku se využívají i při generování ultrafialového a rentgenového záření. V dříve používaných elektronkách bylo rovněž z výše uvedeného důvodu vakuum.

