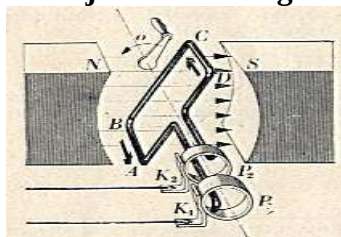


Střídavý proud

Doteď jsme se zabývali pouze proudem, který obvodem prochází stále stejným směrem (stejnosměrný proud). V praxi se ukázalo, že tento proud je značně nevýhodný.

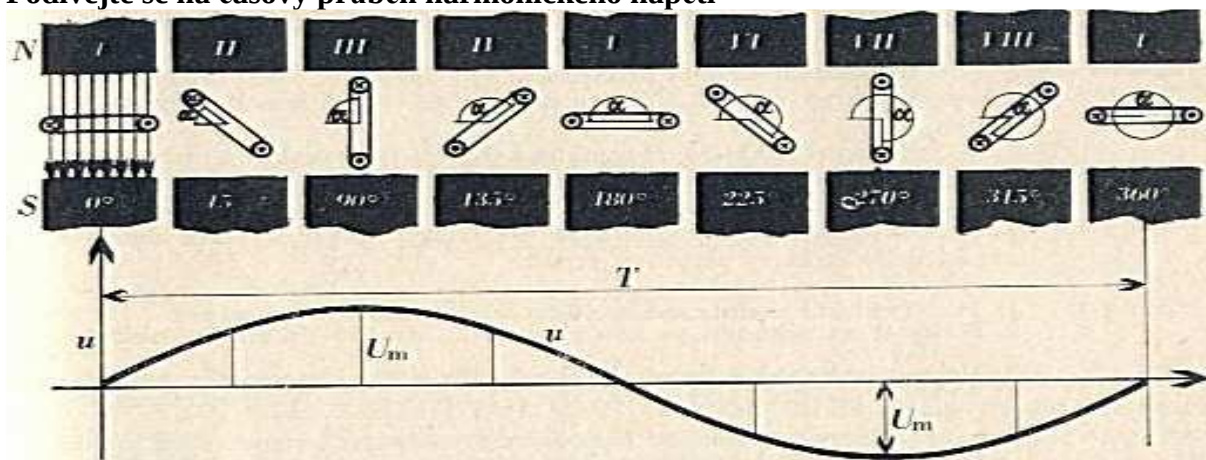
Ukázalo se, že zdrojem napětí může být také závit nebo častěji cívka otáčející se v magnetickém poli.

Otáčející závit v magnetickém poli



Otáčí-li se závit rovnoměrně s úhlovou rychlostí ω kolem osy, kolmé k vektoru magnetické indukce. Díky tomu se mění periodicky indukční tok závitem, a proto se v závitě indukují elektromotorické napětí, které v uzavřeném obvodu vyvolává indukovaný proud. Ukazuje se, že indukované napětí mění během otáčení pravidelně svou polaritu i velikost.

Podívejte se na časový průběh harmonického napětí



Okamžitá hodnota napětí u je určena vztahem: $u = U_m \sin \omega \cdot t$, kde U_m - je amplituda (největší hodnota) indukovaného napětí, ω - je úhlová rychlost, u - okamžitá hodnota indukovaného napětí.

Mění se polarita napětí a díky tomu se periodicky mění i proud v připojeném obvodu. Vše má harmonický průběh.

Co je T?

Doba za kterou proběhne střídavé napětí všechny možné hodnoty jedenkrát.

Co je kmitočet (frekvence)?

Je to počet period za jednu sekundu a vypočítáme ji takto:

V energetice se využívá střídavé napětí nízké frekvence 50 Hz. V dalších technických oborech, např. ve sdělovací technice, slouží pro přenos signálů zařízení s oscilátory, které kmitají s různými frekvencemi, od nízkých frekvencí v akustickém oboru (do 16 KHz) až po frekvence řádově 10 GHz, kterými se přenášejí televizní signály z družic nebo hovory v síti mobilních telefonů.

Co je ω a jak se vypočítá?

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f ; \text{Omega je úhlová rychlost}$$

Jaký pohyb nám konají elektrony?

Volné elektrony ve vedení konají harmonický pohyb.

Co je střídavá veličina?

Střídavou veličinou rozumíme takovou periodicky se měnící veličinu, při jejímž grafickém znázornění mají plochy ohraničené časovou osou a grafem veličiny nad časovou osou a pod ní stejný obsah.

Obvody střídavého proudu

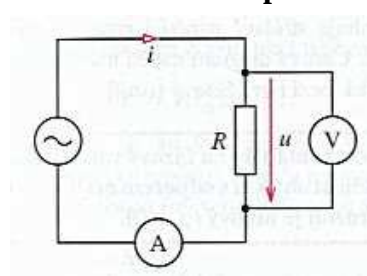
Děje v elektrických obvodech se střídavými proudy ovlivňuje jak frekvence proudu, tak fyzikální vlastnosti obvodu. Proto se dále budeme zabývat základními střídavými obvody.

Jak se označuje střídavý proud?



Do obvodu můžeme zařadit tyto prvky: rezistor, cívka nebo kondenzátor s parametry: odpor R , indukčnost L a kapacita C .

Obvod střídavého proudu s odporem



Nejjednodušší střídavý obvod je tvořen rezistorem, který má jen odpor. Obvod připojíme ke střídavému napětí, prochází obvodem střídavý proud.

Jaká hodnota okamžitého proudu i ?

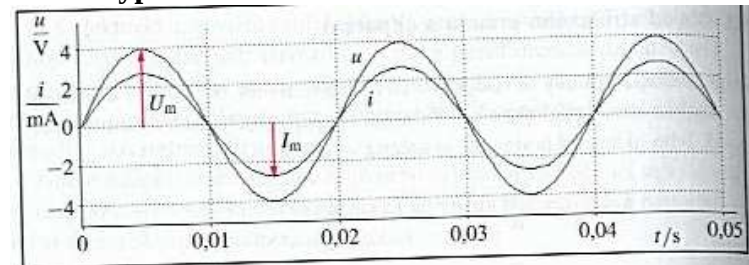
$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$$

Z čehož plyne $I_m = \frac{U_m}{R}$ - amplituda střídavého proudu.

Ukazuje se, že pro střídavý proud s odporem platí Ohmův zákon stejně jako pro obvod se stejnosměrným proudem. Amplituda střídavého proudu nezávisí na jeho frekvenci.

Odpor R rezistoru v obvodu střídavého proudu je stejný jako v obvodu stejnosměrného proudu. **Nazývá se rezistence.**

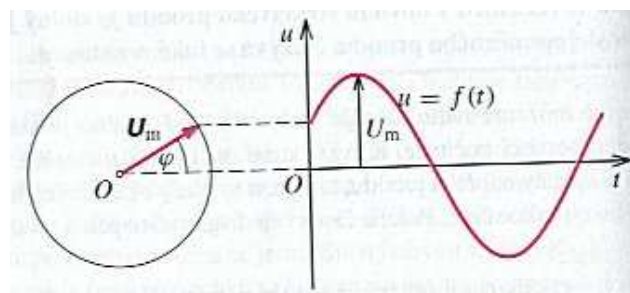
Jak to vypadá reálně?



V praxi se děje v obvodech střídavého proudu sledují na osciloskopu nebo pomocí počítače. Křivky, které při tom pozorujeme, jsou to grafy okamžitých hodnot těchto veličin jako funkce času.

Z časových diagramů napětí a proudu se určuje fázový rozdíl φ , kterému též říkáme fázový posun.

V obvodu s rezistancí dosahuje střídavé napětí i proud hodnoty rovné amplitudě ve stejném okamžiku. **Nevzniká tedy fázový rozdíl.**

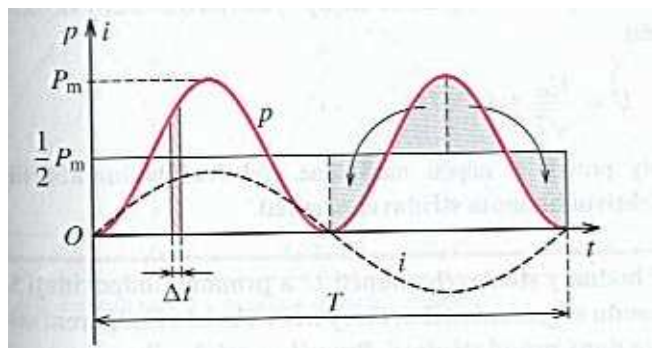


Kromě časového diagramu se ke grafickému znázornění veličin ve střídavých obvodech používá názorový diagram. Veličina je symbolicky znázorněna orientovanou úsečkou umístěnou v souřadnicové soustavě, tzv. fázorem. Fázor má délku rovnou amplitudě veličiny a s osou x svírá patrně, úhel rovný počáteční fázi ($t = 0$).

Pomocí fázorového diagramu, v němž jsou zakresleny fázory střídavého napětí i proudu, lze snadno posoudit jejich fázový rozdíl.

Výkon střídavého proudu v obvodu s odporem

V obvodu střídavého proudu se proud a napětí neustále mění, bude se měnit i výkon a jeho okamžitá hodnota: $p = u \cdot i$, p – okamžitý výkon, i – okamžitý proud, u – okamžité napětí.



Pro obvod, který má jen odpor, platí též rovnice: $p = R \cdot i^2 = R \cdot I_m^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)$

V grafu je čárkovaně naznačena okamžitá hodnota proudu. Z grafu je patrné, že okamžitá hodnota výkonu se mění s dvojnásobnou frekvencí než proud a jeho amplituda je: $P_m = R \cdot I_m^2$

Z grafu určíme též střední hodnotu výkonu. K tomu musíme znát celkovou práci střídavého proudu za periodu T

(neboli energii, která se v rezistoru za periodu změní v teplo). Za Δt (velmi krátkou dobu) se vykoná elementární „prácička“ $\Delta W = p \cdot \Delta t$, jejíž velikost je úměrná obsahu barevně vyznačené plochy. Celková práce je součet „práciček“ a je to obdelník na obrázku. Výsledná práce je tedy:

$$W = \frac{P_m}{2} \cdot T = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R \cdot T$$

$$\text{Střední hodnota výkonu: } \bar{P} = \frac{W}{T} = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R$$

Fyzikální rozbor:

Fyzikálně můžeme tento výsledek vyložit tak, že harmonický střídavý proud o amplitudě I_m má stejný střední výkon jako ustálený stejnosměrný proud takové velikosti.

Odvození:

$$I^2 \cdot R = \frac{1}{2} I_m^2 \cdot R$$

Z toho vyplývá:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m$$

Pro napětí je odvození analogické a výsledek odvození je tento:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_m$$

Tyto hodnoty proudu a napětí nazýváme efektivní hodnota střídavého proudu a efektivní hodnota střídavého napětí.

Co je efektivní hodnota střídavého napětí (proudu)?

Efektivní hodnoty střídavého napětí U a proudu I odpovídají hodnotám stejnosměrného proudu, který má v obvodu s odporem stejný výkon jako daný proud střídavý.

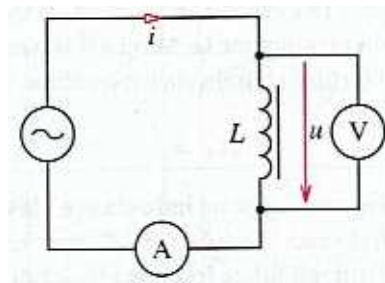
Jak je to v našich domácnostech?

Efektivní hodnoty proudu a v naší síti tudíž musíme vždy dosáhnout. Zkusíme si proto vypočítat maximální hodnotu napětí v naší síti:

Jak měří měřicí přístroje střídavý proud a střídavé napětí?

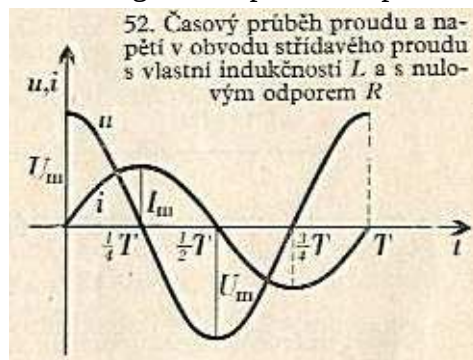
Pro měření střídavého proudu a napětí je nutné použít takový měřič, jehož výchylka na směr proudu nezávisí. Efektivní hodnota střídavého proudu a napětí nám umožňuje v podstatě naměřit takové hodnoty stejnosměrného proudu a napětí, které v obvodu jen s odporem způsobí stejné tepelné účinky jako proud střídavý.

Obvod střídavé proudu s indukčností



Dalším jednoduchým střídavým obvodem je obvod s cívkou, která má jen indukčnost L . Střídavý proud procházející vinutím cívky vytváří měnící se magnetické pole. To způsobí, že se v cívce indukuje napětí, které podle Lenzova zákona má opačnou polaritu než zdroj napětí. Následkem toho proud v obvodu

nabývá největší hodnoty později než napětí. Výsledkem toho je, že napětí předbíhá proud. Proud dosáhne své amplitudy teprve tehdy, když indukované napětí klesne na nulu.



Odpor cívky v obvodu se střídavým proudem je větší než v obvodu se stejnosměrným proudem. Odpor je tím větší, čím větší je vlastní indukčnost L cívky a čím větší je kmitočet střídavého proudu. To odpovídá fázovému rozdílu $\varphi = \frac{1}{2}\pi$. Jestliže pro okamžitou hodnotu střídavého proudu platí vztah $i = I_m \sin(\omega t)$, pak pro okamžitou hodnotu střídavého napětí platí: $u = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_m \cos(\omega t)$

Posunutí fázoru:

Fázor napětí je vzhledem k fázoru proudu posunut o úhel $\frac{1}{2}\pi$ v kladném směru, tzn. proti směru pohybu hodinových ručiček.

Všimněte si, že cívka střídavého proudu zmenšuje jeho amplitudu (proudu) a působí tedy obdobně jako odpor R . Poněvadž tento účinek má původ ve vlastní indukci, nazývá se veličina, která ho vyjadřuje se nazývá induktance a označujeme ji X_L .

Vyjádříme ji takto: $X_L = \frac{U}{I}$, případně $X_L = \omega \cdot L$

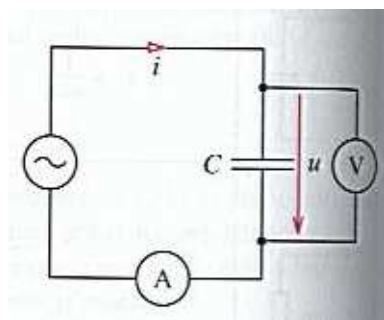
Uvědomte si, že cívka s v obvodu se střídavým proudem chová jako odpor, ale nedochází k přeměně energie střídavého proudu v teplo (jako u rezistoru), nýbrž jen vzniká a zaniká magnetické pole. Avšak jednotkou bude jeden ohm.

Využití v praxi

V technické praxi se k dosažení velkých induktancí používají tlumivky. Tlumivky pro střídavé proudy nízké frekvence mají mnoho závitů izolovaného drátu navinutého na ocelovém uzavřeném jádře. Tlumivky pro vysokofrekvenční střídavé proudy mají feritové jádro v obvodech pro velmi vysoké frekvence postačuje několik volně navinutých závitů drátu.

POZOR: Skutečné cívky mají kromě indukčnosti také odpor. Je-li odpor malý můžeme ho zanedbat a cívka má přibližně zanedbat. Jestliže odpor ve srovnání s induktancí zanedba nemůžeme má obvod s cívkou vlastnosti RL obvodu v sérii.

Obvod střídavého proudu s kapacitou



Opačné účinky než cívka má kondenzátor. Ten se při připojení ke zdroji střídavého napětí, periodicky nabíjí a vybíjí. Mezi deskami kondenzátoru neprochází proud. Mění se jen intenzita elektrického pole a dielektrikum se střídavě polarizuje.

Jak je to s nabíjením a vybíjením?

Nabíjecí proud kondenzátoru je největší v okamžiku, když je kondenzátor nenabitý, tj. když napětí mezi deskami kondenzátoru je nulové.

Naopak v okamžiku, kdy je kondenzátor nabit na max. napětí

je proud v obvodu nulový.



Experimentálně bylo dokázáno, že křivka napětí je v tomto případě časově posunuta o čtvrtinu T za křivkou proudu. Tzn. Napětí se za proudem zpožďuje a tvoří to fázový rozdíl $\varphi = -\frac{1}{2}\pi$.

Výpočet proudu a napětí:

$$i = I_m \sin(\omega t)$$

$$u = U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = -U_m \cos(\omega t)$$

Zavedeme pojem **kapacitance**, která se zmenšuje s rostoucí frekvencí střídavého proudu. Jednotkou je ohm. Při větší kapacitě C kondenzátoru je kapacitance menší a platí to i obráceně. Ukazuje se, že kondenzátor má jen zdánlivě vlastnosti odporu, protože se v něm elektrická energie nemění v teplo jako u rezistoru. V kondenzátoru dochází pouze k periodickému vzniku a zániku elektrického pole mezi jeho deskami (kondenzátor se neustále nabíjí a vybíjí).

Výpočet kapacitance:

$$X_c = \frac{U}{I}$$

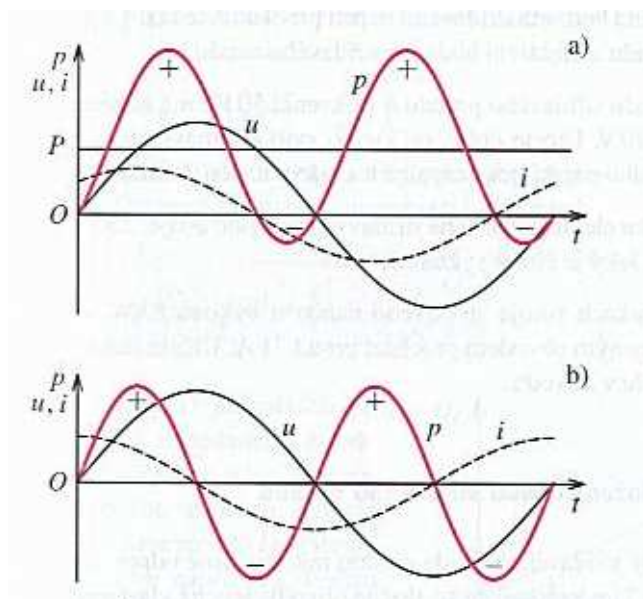
$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

Činný výkon střídavého proudu

V obvodech se střídavým proudem, kde se vyskytují prvky (R,L,C) se ukazuje, že vzniklé doprovodné jevy nám snižují výkon střídavého proudu. Můžeme říci, že čím menší je fázový rozdíl mezi napětím a proudem v obvodu, tím větší je užitečný neboli činný výkon střídavého proudu.

Činný výkon - odpovídá té části elektrické energie dodané zdrojem, která se v obvodu za jednotku času mění v teplo nebo v užitečnou práci (u elektromotoru). Pro činný výkon P platí: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, U , I – efektivní hodnoty střídavého napětí a proudu

$\cos \varphi$ - je účinník a určuje účinnost přenosu energie ze zdroje střídavého proudu do spotřebiče
účinník nabývá hodnot 0 ($\varphi = \pm \frac{1}{2}\pi$) do 1 ($\varphi = 0$).



Vliv fázového rozdílu φ na výkon střídavého proudu vidíme na následujících grafech:

Činný výkon je úměrný rozdílu obsahů ploch omezených kladnými a zápornými hodnotami okamžitého výkonu $p = u \cdot i$. Na obr. a je zachycen případ, kdy $\varphi = +\frac{1}{4}\pi$.

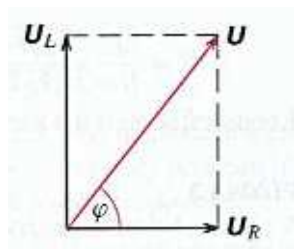
Porovnejme tento graf s grafem b, kde $\varphi = +\frac{1}{2}\pi$. Z grafu b je patrné, že plochy

odpovídající kladným a záporným hodnotám p jsou stejné a to znamená, že celková práce vykonaná střídavým proudem za periodu je nulová. Čtvrtinu periody je výkon kladný a v této době

energie postupuje ze zdroje ke spotřebiči. V následující čtvrtině periody je výkon záporný. Energie přenesená ke spotřebiči v předcházející čtvrtině periody se beze změny vrací zpět do zdroje. Nekona se tedy užitečná práce a část energie se jen mění v přírodních vodičích v teplo. To je ztrátová energie.

Skutečná cívka aneb RL obvod

Reálná cívka má vedle indukčnosti L také určitý odpor R . To způsobuje, že fázové posunutí střídavého proudu a napětí v obvodu s cívkou není $\frac{\pi}{2}$, ale je vždy menší.

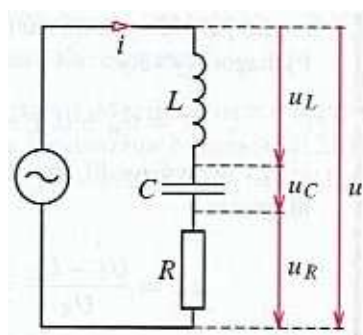


Reálnou cívku považujeme za obvod RL v sérii, jehož názorový diagram vidíte na obrázku. Z obrázku plyne, že

$$\tan \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{I \cdot X_L}{I \cdot R} = \frac{\omega \cdot L}{R}. \text{ Z čehož dostaneme vztah pro odpor}$$

$$\text{cívkou: } R = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{\tan \varphi}$$

Složený obvod střídavého proudu (RLC)



Obvody střídavého proudu mohou mít současně odpor, indukčnost i kapacitu. Tím vznikají často složité obvody, jejichž vlastnosti se určují výpočtem nebo graficky. Jak na to si přiblížíme na příkladu obvodu tvořeného sériovým spojením rezistoru, cívky a kondenzátoru, tedy obvodu s rezistencí, induktancí a kapacitancí. Toto se označuje jako RLC obvod v sérii. Při sériovém spojení prochází všemi prvky obvodu stejný proud i , napětí na jednotlivých prvcích se liší velikostí i vzájemnou fází.

Jak to vypadá u jednotlivých prvků?

rezistor - napětí u_R má stejnou fázi jako proud (u odporu),

cívka - napětí u_L proud předbíhá,

kondenzátor - napětí u_C se za proudem zpožďuje.



Matematicky určení fázových rozdílů je velmi komplikované, proto použijeme fázový diagram. Vzhledem k fázovým rozdílům nemůžeme získat hodnotu výsledného efektivního napětí U na celém obvodu jako aritmetický součet jednotlivých efektivních napětí. Pro výsledné napětí U platí vztah: $U^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2$, kde U_R, U_L, U_C jsou efektivní hodnoty napětí na prvcích obvodu. Ty vypočteme takto: $U_R = I \cdot R$, $U_L = I \cdot \omega \cdot L$,

$$U_C = \frac{I}{\omega \cdot C}.$$

Výsledné napětí bude: $U = I \cdot \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$.

Obvod charakterizuje jediný parametr, který se nazývá impedance Z . Z Ohmova zákona pro

impedanci plyne: $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$. Impedance je měřena v ohmech.

Určení celkové impedance

Nejlépe se to určuje s fázového diagramu.



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: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ a $\tan \varphi = \frac{X}{R}$.

Speciální případ

Speciální případ nastane pokud u obvodu v RLC v sérii, je-li při dané frekvenci indukance obvodu stejně velká jako jeho kapacitance. Pak ze vztahu pro impedanci vyplývá, že $Z=R$. Fázový rozdíl napětí a proudu je v tomto případě nulový a obvod má vlastnosti rezistence. Proud v obvodu dosahuje největší hodnoty. Tento případ označujeme jako rezonanci střídavého obvodu a příslušnou rezonanční frekvenci f_0 určíme z podmínky:

$$\omega_0 \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C}, \text{ odtud}$$

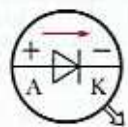
$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}.$$

Thompsonův vztah

Usměrňovač

Slouží k přeměnění střídavého napětí na napětí stejnosměrné.

Jak usměrňování funguje?

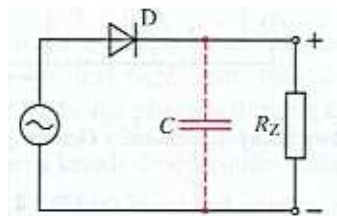


Usměrňování se provádí pomocí polovodičové diody. **Diodou prochází proud, jen když je anoda diody připojena ke kladnému pólu zdroje napětí** (v propustném směru). Při opačné polaritě má dioda velký odpor a prochází jí jen nepatrný proud.

Připojíme-li diodu do obvodu střídavého proudu, pracuje jako elektrický ventil. Prochází jí proud jen v kladných půlperiodách vstupního střídavého napětí. V záporných půlperiodách napětí obvodem neprochází. **Výstupní napětí na pracovním rezistoru R_Z je stejnosměrné a pulzující.**

pulzující.

Nastalo usměrňování střídavého proudu, přičemž se využívá jen jedna polovina periody střídavého napětí. Dioda pracuje jako jednocestný usměrňovač a obvodem prochází stejnosměrný proud.

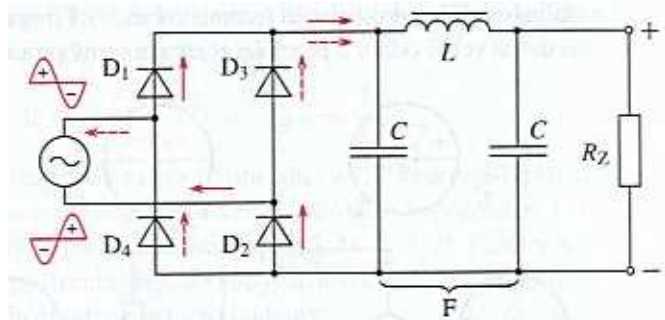


Jak omezit pulzaci?

Pro praktické užití usměrňovače je důležité omezit pulzaci výstupního napětí. Toho docílíme pomocí kondenzátoru o kapacitě C připojeného paralelně k výstupu usměrňovače. V kladných půlperiodách se kondenzátor nabíjí a v záporných půlperiodách se přes rezistor R_Z vybíjí. Kondenzátorem se pulzace usměrněného napětí zčásti vyhladí. Vyhlazení pulzace je

tím účinnější, čím větší je kapacita C kondenzátoru a odpor R_Z rezistoru. Když $R_Z \rightarrow \infty$ (usměrňovač naprázdno), má usměrňované napětí hodnotu odpovídající amplitudě střídavého napětí.

U jednocestného usměrňovače není využita jedna polovina usměrňovaného střídavého napětí.



Dvoucestný usměrňovač

V technické praxi používá usměrňovač se čtyřmi diodami. K dokonalému usměrňování pulzujícího napětí se používají složitější filtry a s kondenzátory o velké kapacitě a s rezistory.

Kde se v praxi používají?

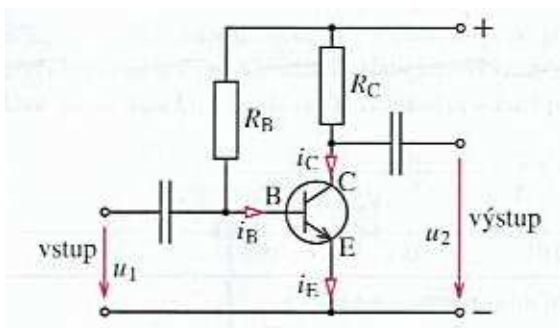
UPS a její praktické využití

Zesilovač

používá se k zvětšení amplitudy střídavého napětí. Tzn. k zesílení napětí.

Princip:

Nejpoužívanější je tranzistorový zesilovač. Tranzistor je v obvodu zapojen způsobem, který označujeme jako zapojení se společným emitorem (zapojení SE).

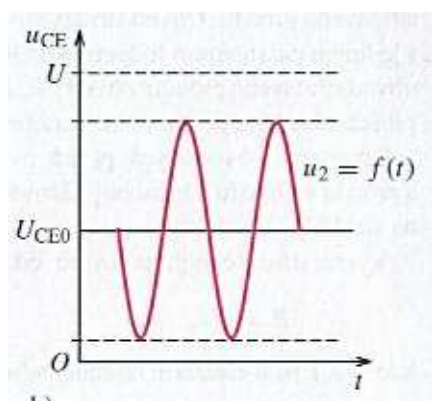


Na vstup zesilovače je připojeno zesilované napětí u_1 , které v obvodu báze vyvolá změny proudu. S kolektorem tranzistoru je spojen výstup zesilovače a měřením se snadno přesvědčíme, že výstupní napětí u_2 má mnohem větší amplitudu. Nastalo zesílení napětí, které vyjádříme veličinou

$$A = U_2 / U_1$$

Vstup a výstup zesilovače oddělují od dalších obvodů kondenzátory. Pro zesilované střídavé napětí mají tyto kondenzátory malou impedanci,

avšak pro stejnosměrný proud je obvod kondenzátorem přerušen. Vstup a výstup zesilovače je pomocí kondenzátorů oddělen od zdroje stejnosměrného napětí. Pro správnou funkci zesilovače je nutné vhodně zvolit pracovní podmínky činnosti tranzistoru. Určuje je klidový proud I_{BO} určuje odpor rezistoru R_B , který je spojen s kladným pólem napájecího zdroje. Kolektor C tranzistoru je připojen ke zdroji přes pracovní rezistor R_C . Samotný tranzistor můžeme považovat za obvodový prvek, jehož odpor se mění podle proudu báze. Rezistor R_C a tranzistor tak tvoří dvojici obvodových prvků spojených sériově. Jestliže se proud báze zvětší, zmenší se odpor tranzistoru a na jeho kolektoru je menší napětí.



Při zesilování střídavého napětí se proud báze mění periodicky kolem hodnoty I_{BO} . Těmto změnám odpovídají periodické změny výstupního napětí. Jestliže se vstupní napětí zvětšuje, výstupní napětí se zmenšuje a naopak. Vstupní a výstupní napětí mají opačnou fázi.

Činnost zesilovače jsme si vysvětlili na jednom zesilovacím stupni. V praxi jsou tyto zesilovací stupně spojovány do složitých soustav, jimiž se dosahuje značného zesílení vstupních signálů, popř. se zvyšuje jejich výkon tak, aby bylo možné uvést do chodu další zařízení (např. reproduktory elektroakustické aparatury).