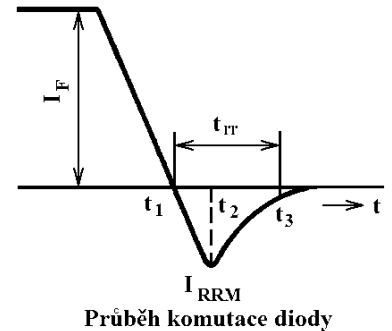


**Komutace**

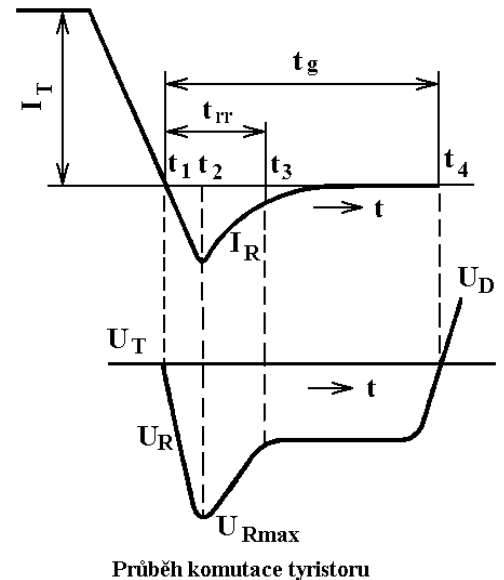
- je děj, při němž polovodičová součástka (dioda, tyristor) přechází z propustného do závěrného stavu a dochází k tzv. zotavení závěrných vlastností součástky,

**a) komutace diod**

- při poklesu proudu  $I_F$  na nulu je v prostoru P-N přechodu značné množství volných nosičů náboje (děr a elektronů),
- dioda začne v závěrném směru plnit svou funkci, tj. blokovat závěrné napětí, až po odvedení volných nosičů náboje,
- při odvádění volných nosičů náboje vede dioda po určitou dobu v závěrném směru – dobu zpětného zotavování  $t_{rr}$ ,
- špičková hodnota proudu v průběhu komutace se nazývá opakovatelný závěrný proud  $I_{RRM}$ ,
- rychlý pokles závěrného proudu vyvolá na indukčnostech obvodu přepětí, které zvyšuje napěťové namáhání diody na hodnotu komutačního přepětí  $U_{Rmax}$ .

**b) komutace tyristorů**

- komutace probíhá obdobným způsobem jako u diod,
- k obnovení blokovacích vlastností tyristoru však dojde až po uplynutí vypínací doby  $t_q$  (10 až 100 $\mu$ s) jinak se tyristor při přivedení kladného napětí otevře i bez příchodu řídicího signálu,
- k vypnutí tyristoru dojde tehdy, když:
  - 1) průběh propustného proudu projde nulovou hodnotou až do oblasti zpětného směru,
  - 2) při průchodu napětí nulou bude na tyristoru závěrné napětí po vypínací dobu  $t_q$ ,
  - 3) blokovací napětí  $U_D$  bude vzrůstat předepsaným způsobem.
- k vypínání stejnosměrného proudu se používají pomocné komutační obvody, např. kondenzátory vybíjející se přes komutující tyristor,



**Měníč** elektrické energie obecně mění parametry elektrické energie, bez ohledu na fyzikální princip přeměny.

**Druhy polovodičových měničů**

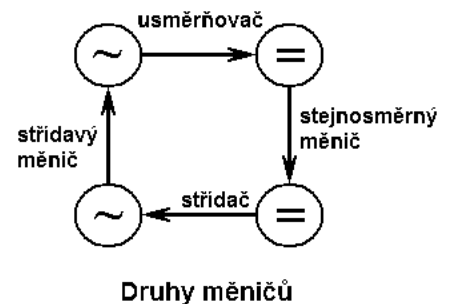
Usměrňovač přeměňuje střídavý proud (AC) na stejnosměrný (DC).

Střídač přeměňuje stejnosměrný (DC) proud na střídavý (AC).

Stejnoscímný měnič mění střední hodnotu stejnosměrného napětí (DC).

Střídavý měnič mění parametry střídavého proudu

- efektivní hodnotu napětí při stejném kmitočtu,
- kmitočet,
- počet fází,
- impedanci – kompenzují jalový výkon

**Usměrňovače**

- předpokládáme napájení napětím  $u = \sqrt{2}U \sin \omega t$
- napětí na diodě  $u_D$ ,
- napětí na zátěži  $u_d$ ,
- proud procházející zátěží  $i_d$ ,
- střední hodnota usměrňeného napětí  $u_{dav}$

**JEDNOFÁZOVÉ NEŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE**

**a) Jednopolnsní usměrňovač s odporovou zátěží**

- střední hodnota usměrněného napětí:

$$U_{dav} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cong 0,45U$$

- odporovou zátěží protéká proud se střední hodnotou:

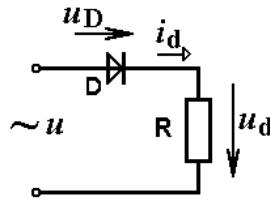
$$I_{dav} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,45 \frac{U}{R}$$

- střední hodnota usměrněného výkonu:

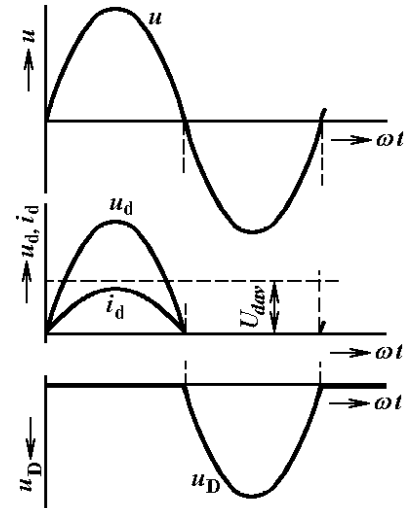
$$P_{dav} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,2 \frac{U^2}{R}$$

- v závěrné směru je dioda namáhána špičkovým závěrným napětím:

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot U$$



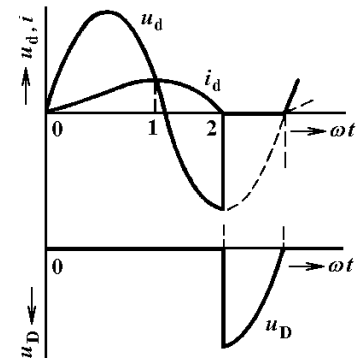
Jednopolnsní neřízený usměrňovač s odporovou zátěží



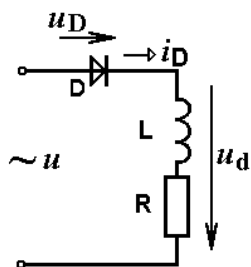
Průběhy napětí a proudu jednopolnsního usměrňovače s odporovou zátěží

**b) Jednopolnsní usměrňovač s RL zátěží**

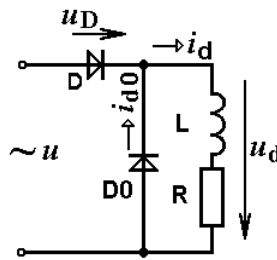
- RL zátěž je typická zátěž výkonových usměrňovačů,
- při průchodu proudu indukčnosti napájenou sinusovým napětím se proud zpožďuje za napětím o úhel fázového posuvu  $\phi$ , proto prochází diodou proud v propustném směru i v okamžiku, kdy napájecí napětí již má obrácenou polaritu a při čistě odporové zátěže se již dioda nachází v závěrném stavu,
- od bodu 0 bodu 1 přijímá indukčnost elektromagnetickou energii a od bodu 1 do bodu 2 pak tuto energii odevzdává rezistoru,
- dioda přejde do závěrného stavu až v okamžiku poklesu proud  $i_d$  na nulu (bod 2) a ukončení komutace diody,
- proud prochází diodou po delší dobu než u čistě odporové zátěže, ale současně je nižší střední hodnota usměrněného napětí  $u_{dav}$ ,
- tyto nedostatky se odstraní použitím tzv. **nulové diody DO** zapojené v obrácené polaritě paralelně k RL zátěži,
- při poklesu napájecího napětí na 0 dojde přestane protékat usměrňovací diodou proud a dioda přejde do závěrného stavu,
- při uzavření diody D začne indukčnost L předávat energii odporu R a diodou DO začne protékat proud  $i_{DO}$  měnící se v odporu na Joulovo teplo,
- při dostatečně velké indukčnosti dojde ke stavu, kdy proud  $i_d$  nepoklesne na nulu,
- **nulová dioda odstraňuje problémy s komutací.**



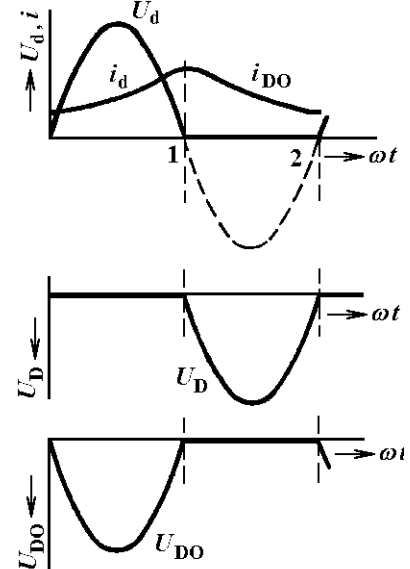
Průběhy napětí a proudu na jednopolnsním usměrňovači



R-L zátěž jednopolnsního usměrňovače



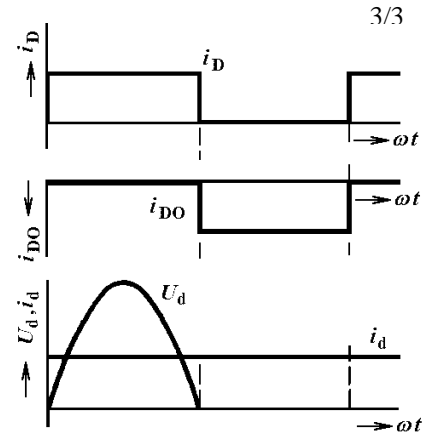
Zapojení nulové diody



Průběh napětí a proudu na obvodu jednopolnsního usměrňovače s nulovou diodou DO - průběh na nulové diodě

**Závěr: jednopulsní usměrňovače**

- jsou jednoduché,
- lze je přímo připojit k síti, ale zvlnění výstupního napětí je značné,
- při napájení z transformátoru prochází v důsledku jeho vlastní indukčnosti vinutím transformátoru stejnosměrná složka proudu způsobující jeho přehřívání.



Průběhy napětí a proudu na jednopulsním usměrňovači se zpětnou diodou při velké indukčnosti zátěže

**DVOJPULSNÍ USMĚRŇOVAČE**

- dvojpulsní usměrňovače jsou napájeny z dvojfázové soustavy střídavého napětí,

**a) Dvojpulsní uzlové zapojení usměrňovače**

- zdrojem napětí je jednofázový transformátor s vyvedeným středem sekundárního vinutí,
- střední hodnota usměrňeného napětí:

$$U_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cong 0,9U$$

- odporovou zátěží protéká proud se střední hodnotou:

$$I_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,9 \frac{U}{R}$$

- střední hodnota usměrňeného výkonu:

$$P_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cdot 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,8 \frac{U^2}{R}$$

- v porovnání s jednopulsním usměrňovačem jsou závěrné směru diody namáhány dvojnásobným špičkovým závěrným napětím:

$$U_{RWM} = 2\sqrt{2} \cdot U$$

**Závěr:**

- usměrňovač potřebuje pouze dvě diody,
- usměrňovač má dobrou účinnost,
- usměrňovač musí být napájen pouze transformátorem s vyvedeným středem vinutí,
- má-li na výstupu usměrňovač s odporovou zátěží v sérii zapojenou nárazovou tlumivku s dostatečnou indukčností (obvykle omezuje nabíjecí proud vyhlazovacího kondenzátoru) nahradí tato tlumivka k zátěži paralelně zapojený vyhlazovací kondenzátor a výstupní napětí je potom podstatně méně zvlněné.

**b) Dvojpulsní můstkové zapojení usměrňovače**

- činnost je stejná jako u uzlového zapojení,
- v porovnání s uzlovým zapojením je počet diod dvojnásobný,
- střední hodnota usměrňeného napětí:

$$U_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cong 0,9U$$

- odporovou zátěží protéká proud se střední hodnotou:

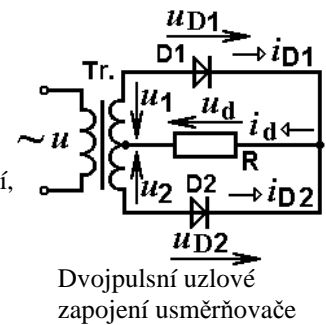
$$I_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,9 \frac{U}{R}$$

- střední hodnota usměrňeného výkonu:

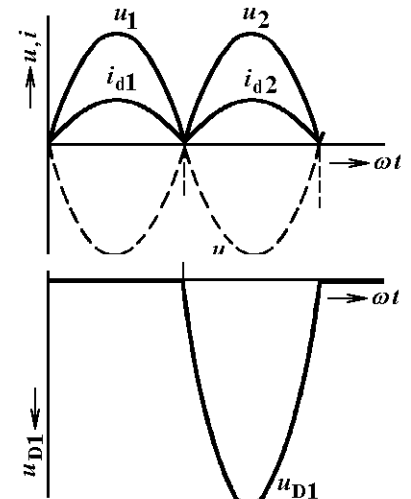
$$P_{dav} = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} U \cdot 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 0,8 \frac{U^2}{R}$$

- v porovnání s uzlovým usměrňovačem jsou závěrné směru diody namáhány polovičním špičkovým závěrným napětím:

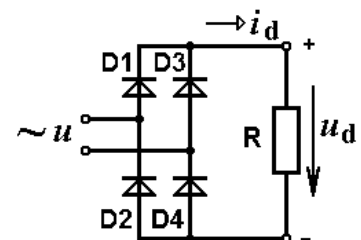
$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot U$$



Dvojpulsní uzlové zapojení usměrňovače



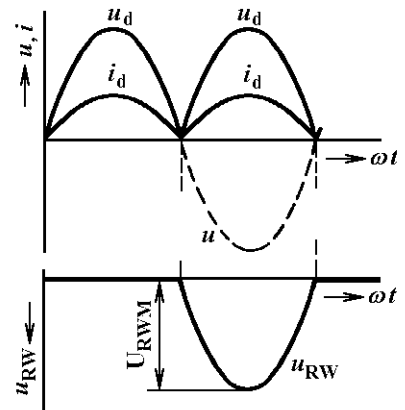
Průběhy napětí a proudů pro dvojpulsní uzlové zapojení usměrňovače



Dvojpulsní uzlové zapojení usměrňovače

**Závěr:**

- napájení usměrňovače lze provést přímo ze střídavé sítě bez speciálního transformátoru,
- diody jsou méně napětově namáhány,
- nevýhodou je nutnost použití 4 diod.



Průběhy napětí a proudů pro dvojpulsní můstkové zapojení směrňovače

**TOJFÁZOVÉ NEŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE**

- předpokládáme napájení napětím

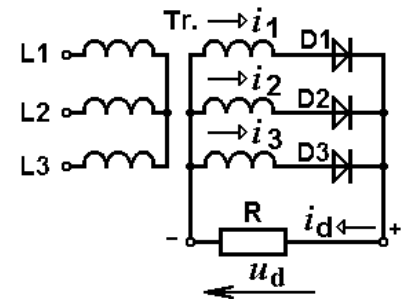
$$u_1 = \sqrt{2}U \sin \omega t$$

$$u_2 = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$u_3 = \sqrt{2}U \sin(\omega t - 240^\circ)$$

**a) Uzlové zapojení**

- sekundární vinutí transformátoru je zapojeno do hvězdy s vyvedeným uzlem vinutí,
- usměrňovač usměrňuje pouze kladné půlvlny napájecího napětí,
- jednotlivé diody vedou proud po dobu 1/3 periody a výstupní napětí je tvořeno obálkou kladných fázových napětí,
- ke komutaci diod dochází v okamžiku, kdy jednotlivá napětí jsou stejná a kladná,
- ke komutaci dochází okamžitě neboť komutující obvody nemají indukčnost, která by



Trojfázové uzlové zapojení usměrňovače

- bránila změně proudu diody,
- střední hodnota usměrněného napětí:

$$U_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U \cong 1,17U$$

- odporovou zátěží protéká proud se střední hodnotou:

$$I_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \frac{U}{R} \cong 1,17 \frac{U}{R}$$

- střední hodnota proudu protékajícího jednou diodou:

$$I_{DAV} = \frac{1}{3} I_{dav} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi} \frac{U}{R} = 0,39 I_{dav}$$

- střední hodnota usměrněného výkonu:

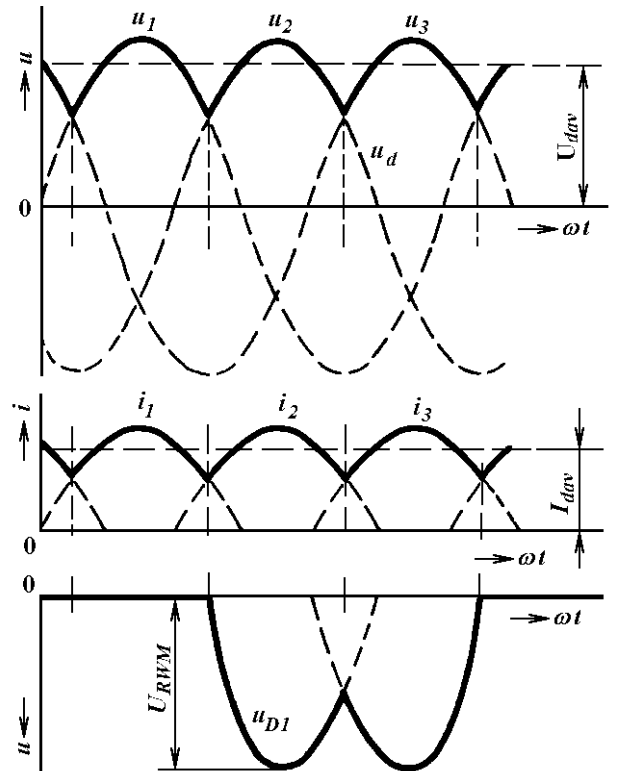
$$P_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U \cdot \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \frac{U}{R} \cong 1,37 \frac{U^2}{R}$$

- špičkové závěrné napětí se skládá ze dvou částí sinusoid sdruženého napětí:

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}U \cong 2,45U$$

**Závěr:**

- usměrňovač má dobrou účinnost,
- diody jsou značně namáhány závěrným napětím,
- usměrňovač má dobrou účinnost zejména pro nízká napětí



Průběhy napětí a proudu na trojfázovém uzlovém usměrňovači

**b) Můstkové zapojení**

- usměrňovač usměrňuje kladné i záporné půlvlny napájecího napětí,
- můžeme ho považovat jako dva do série zapojené uzlové usměrňovače  $\Rightarrow$  při stejném napájecím napětí je výstupní napětí v porovnání s uzlovým zapojením dvojnásobné,
- výsledné napětí je dáno součtem 6 pulsů obálek napájecích napětí  $u_1, u_2$  a  $u_3$  (kladných a invertovaných záporných) a je podstatně méně zvlněné než u uzlového zapojení,
- střední hodnota usměrněného napětí:

$$U_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cong 2,34U$$

- odporovou zátěží protéká proud se střední hodnotou:

$$I_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 2,34 \frac{U}{R}$$

- střední hodnota proudu protékajícího jednou diodou:

$$I_{DAV} = \frac{1}{3} I_{dav} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{U}{R} = 0,78 I_{dav}$$

- střední hodnota usměrněného výkonu:

$$P_{dav} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U \cdot \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{U}{R} \cong 5,48 \frac{U^2}{R}$$

- špičkové závěrné napětí se skládá ze dvou částí sinusoid sruženého napětí a je stejné jako u uzlového zapojení:

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} U \cong 2,45U$$

**Závěr:**

- výhodou je malé zvlnění výstupního napětí,
- nejvyšší hodnota usměrněného napětí při stejném fázovém napětí zdroje.

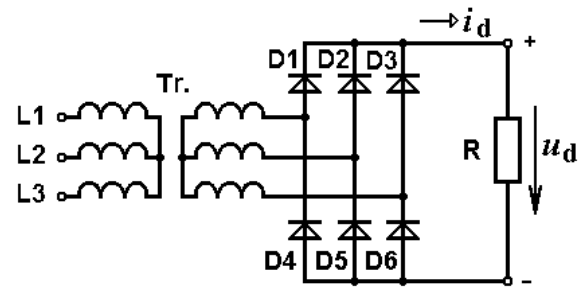
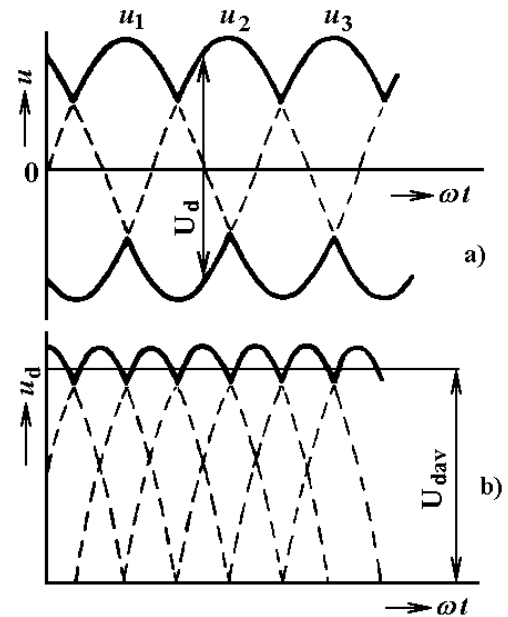


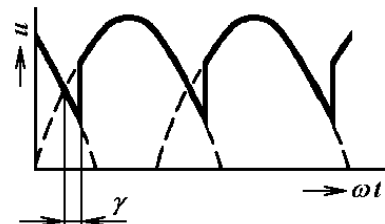
Schéma zapojení  
trojfázového můstkového usměrňovače



Průběhy napětí na trojfázovém  
můstkovém usměrňovači  
a) vstupní napětí, b) výstupní napětí

**Vliv impedance transformátoru na komutaci diod**

- rozptylová indukčnost transformátoru způsobí opožděnou komutaci diod o úhel  $\gamma$  a tím snížení výstupního napětí usměrňovače.



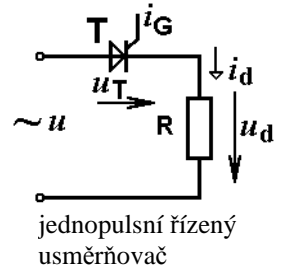
Vliv indukčnosti na komutaci diod

**ŘÍZENÉ USMĚRŇOVAČE**

- místo diod používají tyristory zajišťující plynulé řízení střední hodnoty usměrněného napětí,
- činnost je založena na tzv. **fázovém řízení** – míře zpoždění příchodu řídicího impulsu na hrdlo,
- k sepnutí tyristoru dochází s časovým zpožděním o úhel  $\alpha$  fázového posuvu mezi okamžikem přechodu tyristoru ze závěrného do blokovacího stavu a okamžikem otevření (sepnutí) tyristoru při příchodu proudového impulsu hradla, tj. přechodem tyristoru z blokovacího do propustného stavu,
- proudové impulsy generuje řídicí obvod, velmi často umístěný mimo vlastní výkonový obvod od něhož je současně galvanicky oddělen,

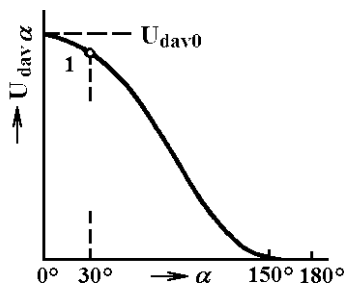
**a) Jednopolnsí řízený usměrňovač**

- princip činnosti plyne ze spínacích vlastností tyristoru,
- tyristor vede proud pouze při přivedení kladného napětí mezi anodu a katodu, tj. tyristor se nachází v blokovacím stavu, a současně je přiveden řídicí impuls (proud hradla) v jehož důsledku přejde tyristor z blokovacího do propustného stavu,
- k uzavření tyristoru dochází stejně jako u diody při poklesu proudu  $I_T$  na nulu,
- zvětšováním úhlu fázového řízení  $\alpha$  klesá střední hodnota usměrněného napětí  $U_{dav}$ ,



$$U_{dav\alpha} = U_{dav0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

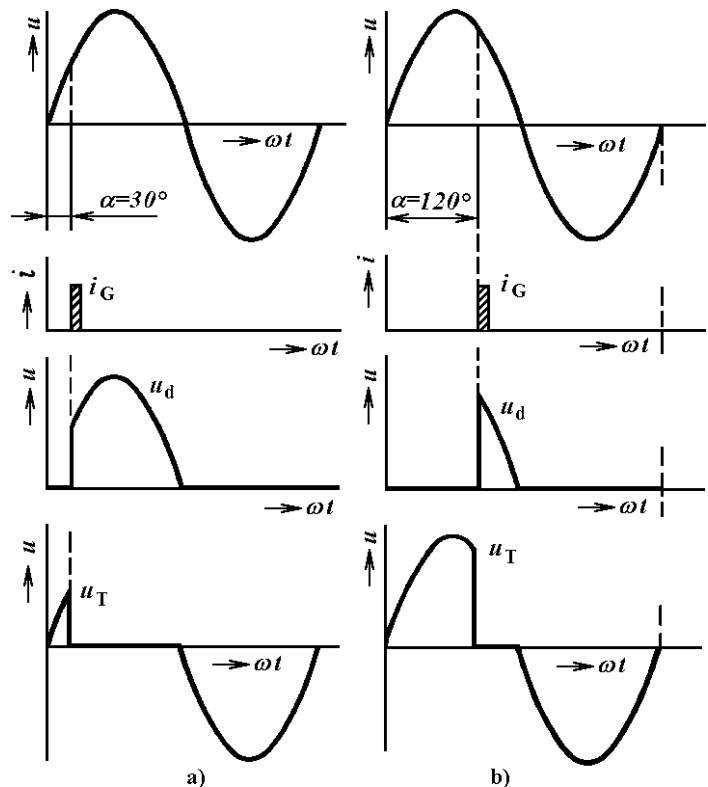
- vztah mezi úhlem fázového řízení  $\alpha$  a výstupním napětím udává **řídící charakteristika**:



Řídící charakteristika trojfázového řízeného usměrňovače v uzlové zapojení  
1 - přerušovaného proudu  $\alpha = 30^\circ$

- rozsah fázového řízení je 0 až  $180^\circ$ ,
- v závěrném směru jsou tyristory namáhány napětím  $U_{RWM}$

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot U$$



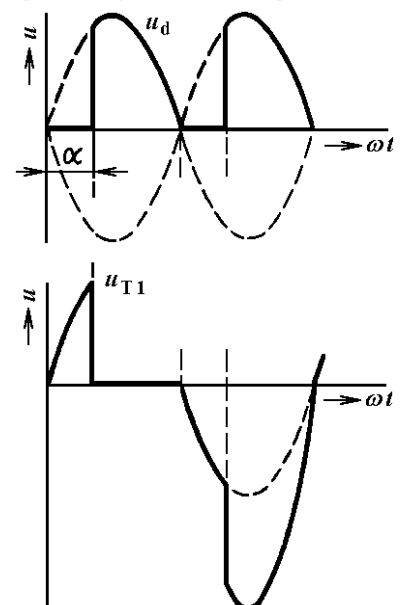
Průběhy napětí a proudu pro jednopolnsí řízený usměrňovač s odporovou zátěží

**b) Jednofázový řízený usměrňovač v uzlovém zapojení**

- napájení je provedeno ze sekundárního vinutí transformátoru s vyvedeným středem,
- pro řízení jsou nutné 2 soustavy galvanicky oddělených řídicích impulsů vzájemně posunutých o  $180^\circ$ ,
- řídicí charakteristika má stejný průběh jako pro jednopolnsí řízený usměrňovač,
- v závěrném směru jsou tyristory s porovnáním s jednopolnsím řízeným usměrňovačem namáhány dvojnásobným napětím  $U_{RWM}$  (součtem napájecích napětí na obou částech sekundárního vinutí transformátoru),

$$U_{RWM} = 2\sqrt{2} \cdot U$$

- rozsah fázového řízení je 0 až  $180^\circ$ ,



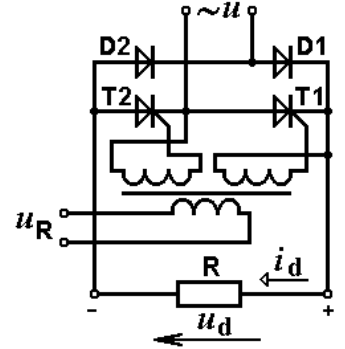
Průběhy napětí pro jednopolnsí řízený usměrňovač v uzlovém zapojení

c) **Jednofázový řízený usměrňovač v můstkovém zapojení**

- je jediným používaným typem řízených můstkových usměrňovačů, (řízený třífázový můstkový usměrňovač nepoužívá z důvodu malého rozsahu řízení výstupního napětí),
- na rozdíl od neřízeného usměrňovače jsou diody D3 a D4 nahrazeny tyristory,
- průběh výstupního napětí je stejný jako průběh pro uzlové zapojení jednofázového usměrňovače,
- napět'ové namáhání diod v závěrném směru je stejné jako u neřízeného můstkového usměrňovače, napět'ové namáhání tyristorů v závěrném směru se rovná jako u řízeného jednopulsního usměrňovače,
- řídicí charakteristika má stejný průběh jako u jednofázového uzlového usměrňovače,
- pro řízení jsou nutné 2 soustavy galvanicky oddělených řídicích impulsů vzájemně posunutých o 180°,
- v závěrném směru jsou tyristory namáhány pouze napětím  $U_{RWM}$

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot U$$

- rozsah fázového řízení je 0 až 180°.



Jednofázový řízený usměrňovač v můstkovém zapojení  
 $u_R$  – řídicí napět'ové impulsy

d) **Trojfázový řízený usměrňovač v uzlovém zapojení**

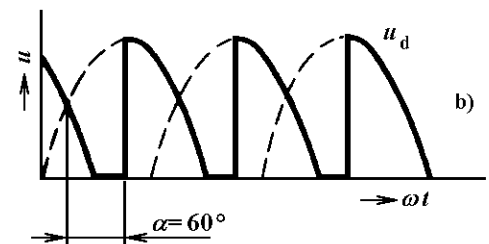
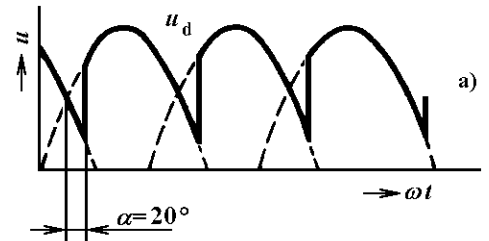
- zapojení je stejné jako u neřízeného usměrňovače, ale diody jsou nahrazeny tyristory,
- v závěrném směru jsou tyristory namáhány napětím  $U_{RWM}$ , stejně jako diody u neřízených trojfázových usměrňovačů

$$U_{RWM} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}U \cong 2,45U$$

- řídicí charakteristika je v porovnání s jednopulsními řízenými usměrňovači více nelineární, s malou účinností řízení střední hodnoty výstupního napětí  $U_{dav}$  pro malé a velké úhly fázového řízení,
- nejvyšší hodnoty  $U_{dav}$  je dosaženo tehdy jestliže přichází řídicí impuls v okamžiku příchodu když dosáhne napětí řízené fáze

$$u = \sqrt{2}U \cdot \sin 30^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}U$$

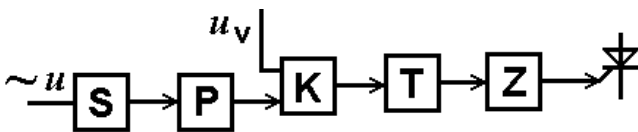
- při úhlu fázového řízení 0 až 30° (30° je **mez přerušovaného proudu**), nedochází k poklesu napájecího proudu odporovou zátěží na nulu, ale změna střední hodnoty výstupního napětí  $U_{dav}$  je malá,
- při úhlu fázového řízení 150° a větším přestanou tyristory spínat, protože řídicí impulsy přichází do tyristoru v okamžiku, kdy se již tyristor nachází v závěrném směru a výstupní napětí je nulové,
- pro úhel fázového řízení 30 až 120° má řídicí charakteristika téměř lineární závislost změny střední hodnoty výstupního napětí na změně řídicího úhlu,
- pro řízení jsou nutné 3 soustavy galvanicky oddělených řídicích impulsů vzájemně posunutých o 120°, je-li však požadováno dosažení velmi nízkých napětí úhel fázového řízení je větší 120°.



Průběhy napětí pro trojfázový řízený usměrňovač v uzlovém zapojení a) úhel fázového řízení  $\alpha=20^\circ$ , b) úhel fázového řízení  $\alpha=60^\circ$

**ŘÍDICÍ OBVODY USMĚRŇOVAČŮ**

- vytváří vhodné proudové impulsy pro hradlo tyristoru,



Obecné blokové schéma řídicího obvodu

**Synchronizační blok S** zajišťuje synchronizaci řídicích impulsů s průběhem napájecího napětí  $u$ , udává okamžik od něhož se určuje úhel fázového řízení.

**Generátor pilového napětí P** vytváří lineární časovou základnu synchronizovanou s napájecím napětím.

**Komparátor K** porovnává pilové napětí časové základny s hodnotou vztažného napětí  $u_v$ , udávajícím požadované výstupní napětí.

**Tvarovací blok T** upravuje řídicí impuls na požadovaný časový průběh.

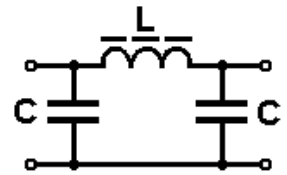
**Koncový zesilovač Z** zajišťuje požadovanou úroveň řídicího proudového (napět'ového) impulsu a galvanické oddělení řídicí části od výkonové, např. indukční vazbou - transformátorem.

**Vliv vlnitosti napájecího napětí na chod stejnosměrného motoru**

- velikost zvlnění napájecího napětí je dána zapojením usměrňovače a úhlem fázového řízení,
- nesinusový průběh výstupního napětí řízeného usměrňovače je tvořen součtem násobků harmonických průběhů (kmitočtu  $f$ ) napájecího napětí (s různou amplitudou), to se velmi nepříznivě projevuje hlavně u ztrát vzniklých vířivými proudy, které závisí na druhé mocnině kmitočtu změny magnetického toku,
- zvlnění napájecího napětí a tím také napájecího proudu má tyto negativní důsledky:
  - a) zvyšují se ztráty ve vinutí a hlavně pak v železe – v důsledku vzniku vířivých proudů způsobených změnou budícího toku v magnetickém obvodu budícího vinutí, protože magnetický obvod je vyroben z plného materiálu s malým činným odporem jsou ztráty v železe velké,
  - b) komutace je ovlivněna zhoršenou činností komutačních pólů, zvláště jsou-li z plného materiálu,
- zvlnění výstupního proudu se omezuje vyhlazovací tlumivkou,
- negativní důsledky fázového řízení lze potlačit speciální konstrukcí motoru s magnetickým obvodem statoru a komutačních pólů složených z plechů,
- nespornou výhodou tyristorového řízení je velká rychlost změny napájecího napětí  $u_a$  a tím i změny střední hodnoty napájecího napětí  $U_{dav}$ ,
- nevýhodou řízeného usměrňovače je nesnadné dosažení změny polaroty výstupního napájecího napětí a tím i provedení rychlé reverzace a brždění motoru, to se řeší antiparalelním zapojením např. dvou usměrňovačů.

**Vliv usměrňovačů na napájecí síť**

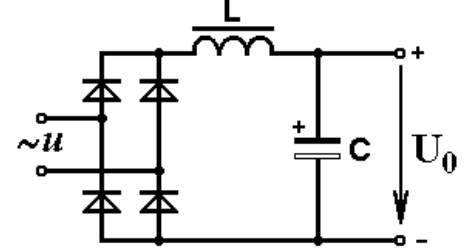
- nesinusové průběhy výstupních proudů se uzavírají přes vinutí napájecího transformátoru, napájených z rozvodné sítě,
- v důsledku úbytku napětí na impedancích napájecích vedení se deformují tyto nesinusové průběhy původní průběh napájecího napětí a vznikají tzv. vyšší harmonické,
- vyšší harmonické se šíří po vedeních k dalším spotřebičům v podobě rušivého napětí a na malé vzdálenosti dokonce šíří v podobě rušivého elektromagnetického vlnění vzduchem,
- vysokofrekvenční rušení je způsobeno rychlými (skokovými) změnami vodivosti polovodičových součástek,
- kmitočtové spektrum dosahuje až jednotek MHz,
- nejnebezpečnější je rušení řídicích signálů regulačních obvodů, např. zarušením řídicích obvodů usměrňovače může dojít k jeho havárii,
- vysokofrekvenční rušení se omezuje:
  - a) odrušovacími kondenzátory na vstupech spotřebičů,
  - b) reaktory a tlumivkami zapojenými v sérii se spotřebičem,
  - c) filtry složenými z kondenzátorů a tlumivek.



Odrušovací L-C filtr

**Usměrňovače pro napájení elektronických zařízení**

- na výstupu je požadováno minimální zvlnění usměrněného napětí,
- minimálního zvlnění se dosahuje zapojením vyhlazovacího elektrolytického kondenzátoru  $C$  s velkou kapacitou (až desítky  $\mu F$ ) na výstup nejčastěji můstkového usměrňovače,
- v okamžiku poklesu napětí na výstupu usměrňovače pod hodnotu napětí na kondenzátoru dodává do spotřebiče proud vybíjející se kondenzátor,
- při velké kapacitě vyhlazovacího kondenzátoru dosahuje napájecí napětí  $U_0$  téměř hodnoty  $\sqrt{2} \cdot U$
- omezení velkého nabíjecího proudu kondenzátoru při zapnutí usměrňovače se dosahuje zapojením omezovací tlumivky  $L$ .



Zapojení vyhlazovacího kondenzátoru a omezovací tlumivky

**Transformátory pro usměrňovače**

- při nesinusovém zatížení musí být transformátor dimenzován na větší výkon,
- pro **jednopolnsní usměrňovač** se střední hodnotou napětí  $U_{dav}$  je požadované napětí transformátoru  $U$ :

$$U = \frac{1}{0,45} U_{dav} = 2,22 U_{dav}$$

pro efektivní hodnotu proudu platí:

$$I_{ef} = 1,75 I_{dav}$$

pro výkon transformátoru pak platí:

$$S = U I_{ef} = 1,22 U_{dav} \cdot 1,75 I_{dav} = 3,49 P_{dav}$$

**Typový výkon pro nejpoužívanější zapojení usměrňovačů:**

- uzlové jednofázové  $S=1,34 P_{dav}$
- uzlové trojfázové  $S=1,35 P_{dav}$
- můstkové jednofázové  $S=1,23 P_{dav}$
- uzlové trojfázové  $S=1,05 P_{dav}$

Z uvedených údajů vychází nejméně výhodněji můstková zapojení usměrňovačů, vykazující současně nejmenší zvlnění výstupního napětí, jejich jedinou nevýhodou je dvojnásobný úbytek napětí na diodách (tyristorech).

**Poznámka: Při vyšších napětích (asi od 30 V) dochází při zatížení vlivem komutace a hlavně kapacity P-N přechodu uzavřených diod u můstkových zapojení k nárůstu úbytku napětí na usměrňovači až na hodnotu 10% usměrněného napětí!**