

# POLOVODIČOVÉ USMĚRŇOVAČE

Určeno pro posluchače bakalářských studijních programů FS

Obsah:

## Úvod

**Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení**

**Jednofázové jednopulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače**

usměrňovač s odporovou zátěží

usměrňovač s RC zátěží.

usměrňovač s RL zátěží.

**Jednofázové dvoupulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače**

Třífázové trojpulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače.

Třífázové šestipulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače.

**Neřízené polovodičové usměrňovače v dvoucestném (můstkovém) zapojení**

**Jednofázové dvoupulsní dvoucestné (můstkové) usměrňovače**

Třífázové šestipulsní dvoucestné (můstkové) usměrňovače.

#### 4. Úvod

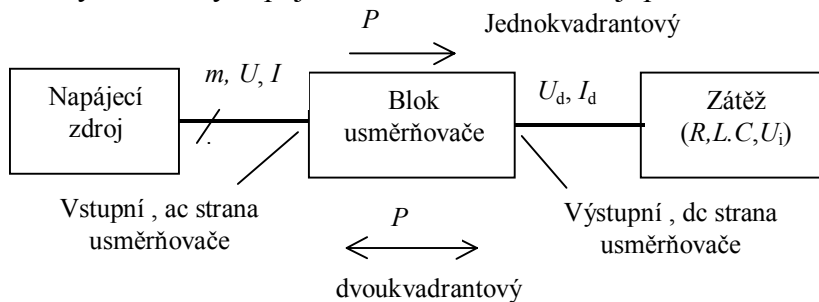
Jedná se o druh výkonového polovodičového měniče používaného k přeměně střídavého proudu na stejnosměrný (ac/dc). Tento druh provozní jednotky elektronické výkonové přeměny sestávající z následujících bloků:

Napájecí zdroj ( $m$ -fázová střídavá napájecí síť- popř. transformátor)

Vlastní blok usměrňovače obsahující výkonové polovodičové součástky (VPS)

Zátěž sestávající z kombinace zapojení prvků obvodu  $R, L, C$  popř i s protinapětím  $U_i$

Parametry a varianty zapojení těchto bloků ovlivňují provozní vlastnosti usměrňovačů.



Obr. 1 Sestava polovodičového usměrňovače

Výklad různých variant usměrňovačů bude dále prováděn za předpokladů:

- Idealizovaného napájecího zdroje
- Idealizovaných polovodičových ventilů (součástek), tj. neuvažování jejich vnitřní odporu
- Idealizovaných spojovacích vodičů a dalších částí, (neuvažování jejich parametrů).

Rozdělení usměrňovačů je možno provést na základě různých kritérií (hledisek)

*Podle druhu napájecího zdroje (počtu fází):*

- jednofázové, ( $m=1$ ),
- třífázové, ( $m=3$ )
- $m$ -fázové

*Podle charakteru výstupních (stejnoseměrných) veličin:*

- neřízené, osazené neřiditelnými polovodičovými spínacími součástkami - diodami;
- řízené, osazené říditelnými polovodičovými součástkami (tyristory, tranzistory); které podle způsobu provozu (směru toku energie-výkonu) dále dělíme na:
  - jednokvadrantové (energie je přenášena pouze ze zdroje do zátěže);
  - dvoukvadrantové (energie je přenášena ze zdroje do zátěže a naopak, schopnost reverzace výstupního napětí změnou řídicího úhlu)

*Podle počtu pulzů (počet komutací z jedné větve na jinou během jedné periody):*

- jednopulzní, dvoupulzní, trojpulzní, šestipulzní, dvanácti a vícepulzní ( $q=1, 2, \dots$ )

- *Podle zapojení měniče (uspořádání jeho výkonového obvodu) z hlediska tvaru proudu na vstupní straně (svorkách) bloku usměrňovače*

Jednocestné (proud na vstupních svorkách je jednosměrný)

Dvoucestné (proud na vstupních svorkách je obousměrný)

- *Podle zapojení zdroje a jednotlivých VPS*

Uzlové (všechny VPS a napěťové zdroje jsou jedním shodným pólem spojeny do uzlu)

Můstkové, (vnější svorky stejné polarity jsou společné a výstupní, středy skupiny jsou vstupní)

#### Usměrněné napětí

Průběh okamžité hodnoty usměrněného napětí  $u_d$  se vyznačuje střídavou složkou nasuperponovanou na jeho střední hodnotu. Při vlastním usměrnění střídavé vstupní veličiny vybírá usměrňovač jen určitou část jeho křivky tak, aby výstupní napětí přiváděné na zátěž bylo stejnosměrné. Z hlediska zvlnění výstupního dc napětí vychází

příznivě usměrnění vícefázového vstupního napětí, kdy jsou z jednotlivých fází vybírány ze sinusového průběhu jen části a to v oblasti maxima.

Střední hodnotu usměrněného napětí naprázdno  $U_{d0}$  je možno určit pro dvou a vícepulzní zapojení ( $q \geq 2$ ) dle vztahu

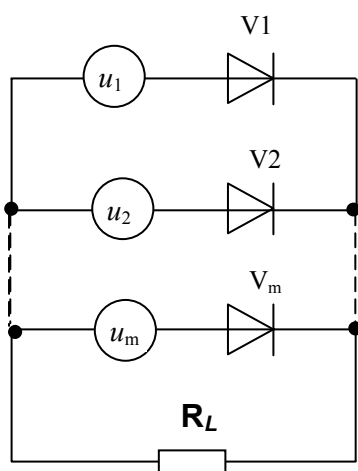
$$U_{d0} = \frac{q}{\pi} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \frac{\pi}{q}, \quad (1)$$

kde  $U$  .. efektivní hodnota napájecího napětí usměrňovače (na vstupních svorkách s výjimkou uzlových zapojení, kde se jedná o fázovou hodnotu napětí)

### Usměrněný proud

Okamžitá hodnota usměrněného proudu je označována  $i_d$ . Průběh  $i_d$  je dán průběhem usměrněného napětí  $u_d$  a zátěží. Obecná zátěž může obsahovat odpor  $R$ , indukčnost  $L$ , kapacitu  $C$  popř. protinapětí  $U_i$ . Usměrněný proud bude zvlněný a pokud v průběhu periody vstupního napětí nedosáhne nulové hodnoty nazývá se jako nepřerušovaný (spojitý).

## Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení

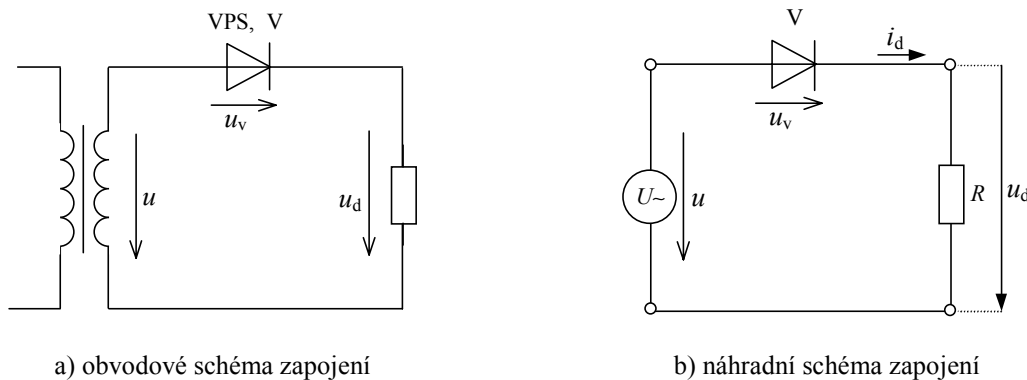


Obr.2  $q$ -pulsní usměrňovač v jednocestném (uzlovém)

Obecný  $q$ -pulsní usměrňovač v uzlovém zapojení je tvořen  $q$  větvemi s minimálně jednou polovodičovou součástí. V případě  $q > 1$  jsou všechny VPS shodným pólem spojeny a vzniká tak katodový nebo anodový uzel. Každá větev usměrňovače je napájena jednou fází  $m$ -fázového střídavého zdroje (viz obr.2). Pro tento druh spojení platí, že  $q=m$ , (počet pulzů je roven počtu fází zdroje)

Přídavné jméno „uzlová“ je odvozeno od toho, že u těchto zapojení je zátěž připojena mezi „uzel“ vícefázového zdroje a „uzel“ katod (anod) VPS. Zdroj je tedy tvořen  $m$ -fázovou soustavou střídavých napětí, vzájemně posunutých o úhel  $2\pi / m$ . Běžně se používá toto spojení pro  $m = 2$  a 3. Většího počtu fází lze dosáhnout vhodným spojením sekundárních vinutí napájecího transformátoru. Charakteristické pro toto zapojení je, že proud na střídavé straně usměrňovače prochází jen jedním směrem.

### Jednofázové jednopulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače



obr. 2. Jednopulsní usměrňovač s odporovou zátěží.

Je to nejjednodušší zapojení usměrňovače, kdy v sérii se zátěží je zapojena jedna výkonová polovodičová součástka VPS. V případě neřízeného provedení usměrňovače je jako VPS použito diody ozn. V (ventil), která je propustná (vodivá, sepnutá) v přímém směru a blokující (nevodivá, vypnutá) ve zpětném směru. Obvod je napájen z jednofázového střídavého zdroje (sít' nebo transformátor) s harmonickým napětím  $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Provozní vlastnosti usměrňovače jsou závislé na parametrech zátěže.

### Činná (čistě odporová) zátěž

Obvod jednopulsního usměrňovače můžeme popsat Kirchhoffovými rovnicemi:

$$\begin{aligned}
 i_d &= i_v & , \\
 u_d + u_v - u &= 0 & , \\
 u_d &= R \cdot i_d & .
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

VPS (dioda), pracuje ve dvou stavech

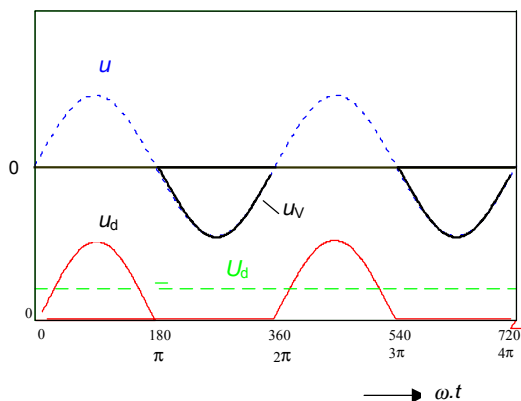
a) VPS v propustném stavu je sepnuta,  $u_v = 0$ ,  $i_v > 0$ , dosazením do rovnic (2) dostaneme

$$\begin{aligned}
 u_d &= u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t), \\
 i_d &= \frac{u}{R} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t) > 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

kde  $U$  je efektivní hodnota střídavého napětí napájecího zdroje,  
 při  $\omega \cdot t_1 = \pi$  bude proud diody roven nule  $i_v = i_d = 0$ ,

b) VPS v závěrném stavu je vypnuta,  $i_v = 0$ ,  $u_v < 0$ , dosazením do rovnice (1) dostaneme

$$\begin{aligned}
 u_d &= 0, \\
 u_v &= u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) < 0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Obr. 3. Průběhy veličin jednopulsního neříděného usměrňovače s odporovou zátěží.

Dioda v propustném stavu je sepnuta, má prakticky téměř nulový odpor, takže napětí zdroje se objeví na zátěži. Stejný průběh má také proud protékající diodou v přímém směru. Při poklesu proudu na nulu se dioda dostane do závěrného stavu, tedy vypíná, její odpor se stává nesrovnatelně větší než odpor zátěže. Napětí zdroje se objevuje na diodě, kterou polarizuje v závěrném směru.

Střední hodnotu stejnosměrného (usměrněného) napětí naprázdno (při ozn.  $\omega \cdot t = \theta$ )

$$U_d = U_{av} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} [-\cos(\theta)]_0^\pi = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,45 \cdot U
 \tag{4}$$

Potřebné střídavé napětí  $U$  (efektivní hodnota) nutné k dosažení  $U_d$  (střední hodnoty)

$$U = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d = 2,22 \cdot U_d
 \tag{6}$$

Obvodem bude protékat pulzující přerušovaný stejnosměrný proud  $i_d$  jehož střední hodnota

$$I_d = I_{av} = \frac{U_d}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot I_m = 0,318 \cdot I_m
 \tag{7}$$

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:

Efektivní hodnotu proudu -  $I_L$ :

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot I_d = 1,57 \cdot I_d \quad (8)$$

Zdánlivý výkon

$$S_2 = U \cdot I_L = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{2} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot P_d = 3,5 \cdot P_d \quad (9)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě (nutné pro její napěťové dimenzování):

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U = U_m = \pi \cdot U_d = 3,14 \cdot U_d \quad (10)$$

Vstupní proud (jenž je v tomto případě zátěže úměrný i výstupnímu dc napětí) jednopulsního neřízeného usměrňovače má neharmonický průběh, který lze rozložit ve Fourierovu řadu harmonických složek  $n$  (např. pro dané zapojení je  $n = 0, 1, 2, 4, \dots$ )

$$i_d = I_d + I_m \left[ \frac{1}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{2}{3\pi} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - \frac{2}{15\pi} \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t) \dots \right] \quad (11)$$

obsahujících:

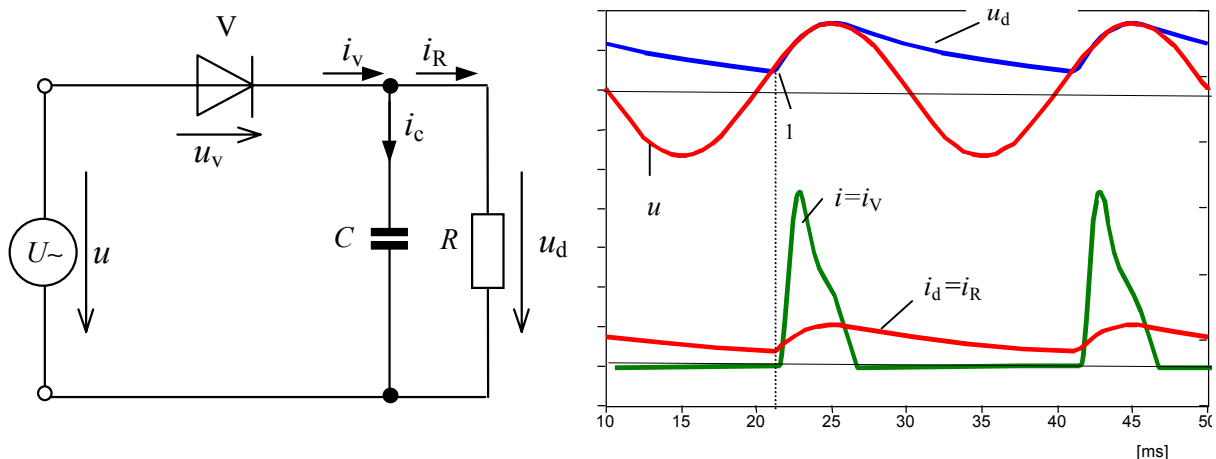
- stejnoseměrnou (nulovou) složku  $I_d$ , ( $n=0$ )
- základní (prvou) harmonickou o amplitudě  $0,5 I_m = 1,57 I_d$ , ( $n=1$ )
- druhou harmonickou o amplitudě  $0,21 I_m = 0,67 I_d$ , ( $n=2$ )
- čtvrtou harmonickou o amplitudě  $0,043 I_m = 0,15 I_d$ . ( $n=4$ )

Činitel zvlnění usměrňovaného dc proudu :

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{2} = 1,57 \quad (12)$$

### Činná zátěž s kondenzátorem na výstupní straně

K vyhlazení pulzujícího průběhu usměrňovaného napětí  $u_d$  se používá kondenzátor  $C$ , který je zapojen na výstupní straně usměrňovače tj. paralelně k odporové zátěži  $R$  (obr. 4).



a) Náhradní schéma zapojení

b) Časové průběhy veličin

Obr. 4. Jednopulsní usměrňovač s RC zátěží.

Ventil  $V$  je polarizován v propustném směru, je-li okamžitá hodnota napětí zdroje  $u > u_d$  dioda je polarizována v závěrném směru, tedy v okamžiku ozn bodem 1 začne téci ventilem proud  $i_v$ . Pokud je ventil sepnut, potud se na zátěži objeví napětí zdroje. Za vrcholem kladné půlvlny napětí zdroje je  $u < u_d$  a kondenzátor se začne vybíjet do odporu s průběhem podle exponenciály. Současně s poklesem napětí klesá i celkový proud tekoucí odporem. V okamžiku, kdy kondenzátor dodává celý proud do odporu  $|i_c| = |i_R|$ , proud ventilem  $i_v$

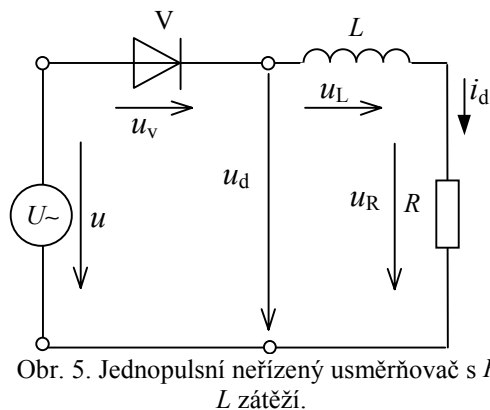
klesl k nule a ventil vypnul. Obvod  $RC$  je oddělen od napájecího zdroje. Rozdílem okamžitých hodnot napětí na kondenzátoru a napětí zdroje je polovodičová dioda polarizována ve zpětném (závěrném) směru. Při opětovném nárůstu napětí zdroje do kladných hodnot dojde k splnění podmínky  $u > u_d$  a ventil opět sepne.

Z obr.4 je zřejmé vyhlazení průběhu usměrněného napětí  $u_d$ , které bude tím lepší, čím větší bude časová konstanta zátěže  $\tau$ , která je rovna součinu  $R \cdot C$ . Dioda vede proud kratší interval než  $\pi$ , jak je tomu v případě odporové zátěže bez kondenzátoru.

Proud odebíraný z napájecí sítě je značně neharmonický (má tvar strmého impulsu), obsahuje velké množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí.

### Induktivní zátěž

Jednopulsní usměrňovač se zátěží tvořenou reálnou cívkou (v náhradním schématu sériové spojení odporu  $R$  a indukčnosti,  $L$ ) je znázorněn na obr. 5.



Při analýze obvodu lze opět vyjít ze základních rovnic (2) s tím, že v obvodu je indukčnost na které je napětí

$$u_L = L \cdot \frac{di_d}{dt} \quad (13)$$

Při sepnutém ventilu V lze obvod popsat diferenciální rovnicí

$$u_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \quad (14)$$

jejímž řešením obdržíme časový průběh proudu ve tvaru

Obr. 5. Jednopulsní neřízený usměrňovač s  $L$  zátěží.

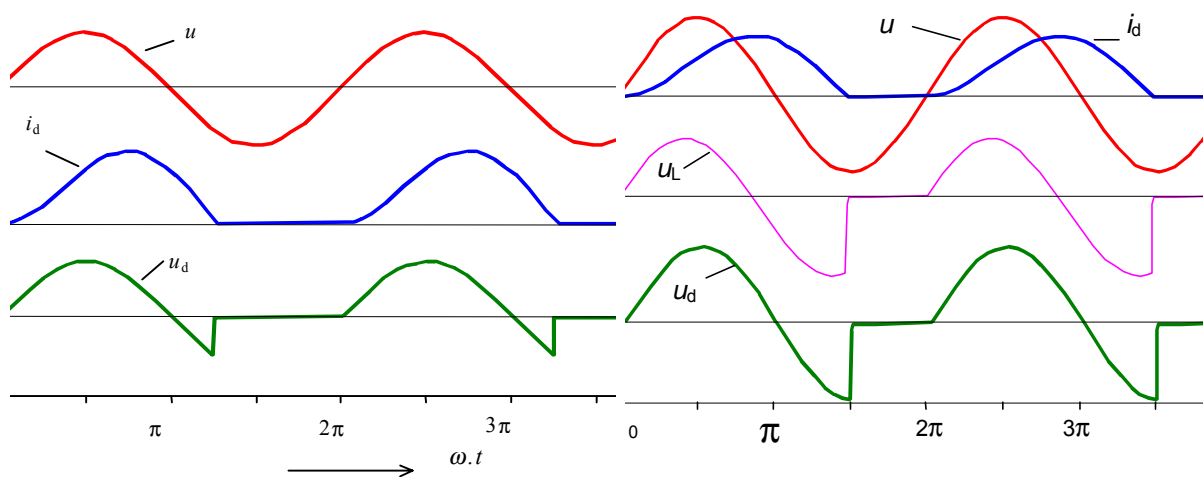
$$i_d = \frac{U_m}{Z} \cdot \left[ \sin(\omega \cdot t - \varphi) + e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \psi \right], \quad (15)$$

kde  $Z$  je výsledná impedance ze sériového zapojení odporu a indukčnosti,

$\tau$  časová konstanta obvodu,  $\tau = L/R$

$\psi = \arctg \omega \cdot \tau$ .

V intervalu od nuly po úhel  $\psi$  proud tekoucí obvodem roste, tlumivka se nabíjí ze zdroje elektromagnetickou energií, následně se tlumivka vybíjí do odporu  $R$  (získanou elektromagnetickou energií předá). Dioda vypíná vždy při poklesu proudu  $i_d$  k nule tj. v okamžicích  $t_1, t_2, \dots$



a) v případě menší indukčnosti

b) v případě velké indukčnosti

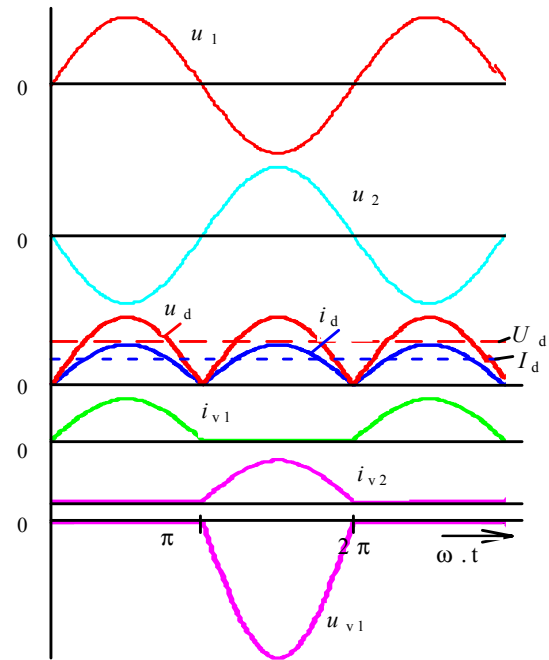
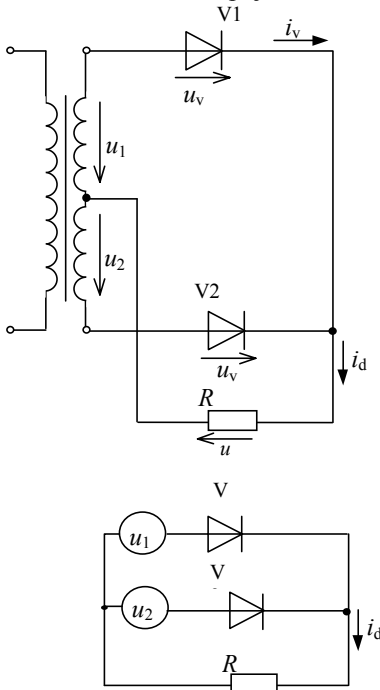
Obr. Časové průběhy veličin v případě  $R, L$  zátěže

Proud teče obvodem delší dobu než při čistě odporové zátěži a má charakter přerušovaného proudu. Průběhy obvodových veličin jsou závislé na časové konstantě obvodu  $\tau = L/R$ . Se vzrůstem indukčnosti a tím

i časové konstanty se zvětšují hodnoty úhlu  $\psi$  a proud se více vyhlazuje. Střední hodnota výstupního napětí je rovněž závislá na časové konstantě obvodu. Doba vedení proudu při záporných hodnotách napětí  $u_d$  snižuje jeho střední hodnotu.

### Jednofázové dvojpulsní jednocestné (uzlové) usměrňovače

Tento druh zapojení usměrňovače se často používá pro malé výkony a malá napětí.



Obr. 8. Obvodové a náhradní schéma dvojpulsního uzlového usměrňovače.

Obr. 9. Průběhy obvodových veličin dvojpulsního uzlového usměrňovače.

Dvojpulsní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z jednofázového transformátoru, jehož sekundární vinutí je opatřeno středním vývodem (odbočkou). Tento vývod je připojen k jednomu přívodu zátěže. Druhý přívod zátěže je připojen k uzlu polovodičových součástek (diody). Střední vývod výstupního vinutí transformátoru tvoří uzel dvou fázových napětí

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad u_2 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t - \pi) = -u_1 \quad (16)$$

kde  $U$  je efektivní hodnota výstupního napětí transformátoru, tj. napětí jedné poloviny výstupního vinutí.

Průběhy obvodových veličin pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na obr.8. Usměrněné napětí je obalovou křivkou kladných půlvln napětí  $u_1; u_2$ , a v průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří dva pulsy – odtud název dvojpulsní usměrňovač.

Střední hodnota usměrněného napětí

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U = 0,45 U_2 \quad (17)$$

kde  $U_2 = U_1 + U_2 = 2 \cdot U$

$$\text{Potřebné střídavé napětí } U \text{ jednoho sekundárního vinutí transformátoru } U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d = 1,11 \cdot U_d \quad (18)$$

$$\text{Špičkové závěrné napětí: } U_{RRM} = 2 \cdot U_m = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U = 2,82 \cdot U = 3,14 \cdot U_d, \quad (19)$$

$$\text{Střední hodnota usměrněného proudu: } I_d = \frac{2}{\pi} \cdot I_m, \quad (20)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu :

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot 2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{4} = 0,786 \quad (21)$$

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:



Ve dvoupulsním uzlovém usměrňovači prochází proud každou polovinou sekundárního vinutí transformátoru jen po dobu jedné poloviny periody. Potom efektivní hodnota uvedeného proudu při čistě odporové zátěži je

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot I_d = 0,78 \cdot I_d \quad (22)$$

Zdánlivý výkon sekundárního vinutí transformátoru

$$S = 2 \cdot U \cdot I_{ve} = 2 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} U_{dv} \cdot I_d = 1,75 \cdot U_d \cdot I_d \quad (23)$$

### Třífázový trojpulsní jednocestný (uzlový) usměrňovač.

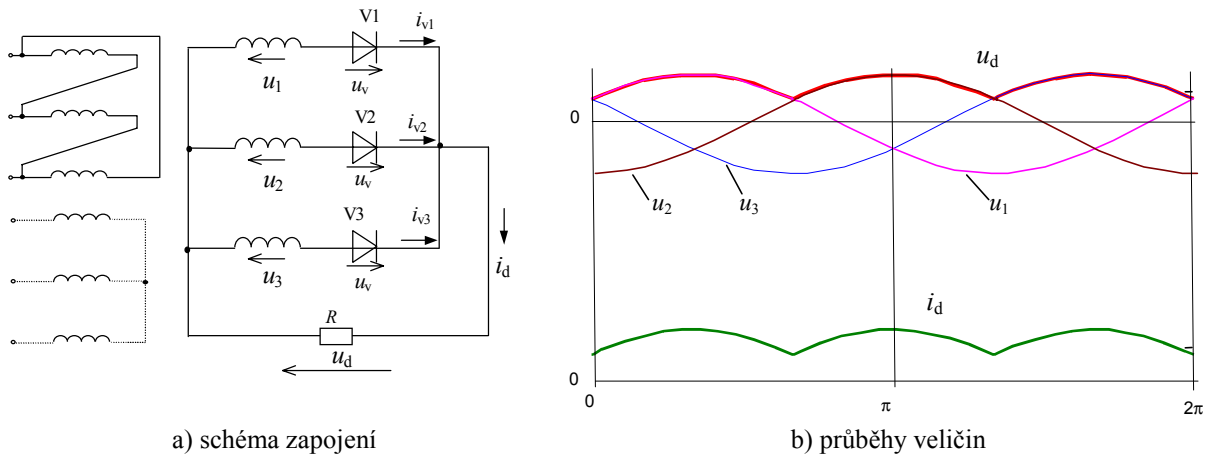
Schéma zapojení trojpulsního uzlového usměrňovače je znázorněno na obr. 10. Trojpulsní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z trojfázového transformátoru, jehož primární (vstupní) vinutí může být zapojeno buď do hvězdy nebo do trojúhelníka, kdežto sekundární (výstupní) vinutí je vždy zapojeno do hvězdy (se středním vývodem-uzlem). Potom napájecí napětí usměrňovače tvoří trojfázovou souměrnou soustavu s vzájemným fázovým posunem  $2\pi/3$ .

Obecně určuje napětí n-té fáze m-fázového napájecího zdroje výraz

$$u_n = U_m \cdot \sin \left[ \omega \cdot t - (n-1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right] \quad (24)$$

Kladné hodnoty napětí vytvářejí v příslušné větvi proud v přímém směru polovodičové součástky. Pro jednoduchost je následně proveden rozbor pro odporovou zátěž.

V sepnutém (vodivém) stavu je vždy ta dioda, která je připojena k fázovému napětí s největší okamžitou hodnotou.



a) schéma zapojení

b) průběhy veličin

Obr. 10 Trojpulsní usměrňovač

Průběh usměrněného napětí  $u_d$  je obalovou křivkou kladných půlvln fázových napětí  $u_1, u_2, u_3$ . V průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří tři pulsy, odtud název trojpulsní usměrňovač. Střední hodnota usměrněného napětí

$$U_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot U = 1,17 \cdot U \quad (25)$$

Střední hodnota usměrněného proudu  $I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{1,17 \cdot U_m}{R \cdot \sqrt{2}} = 0,827 \cdot I_{max} \quad (26)$

Proudy jednotlivých diod mají tvar sinusových úseků šířky  $120^\circ$ .

Střední hodnota proudu diody a tedy i fázového proudu napájecího transformátoru je

$$I_{Vav} = \frac{1}{3} I_d = \frac{\sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,39 \cdot \frac{U}{R} \quad (27)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu :

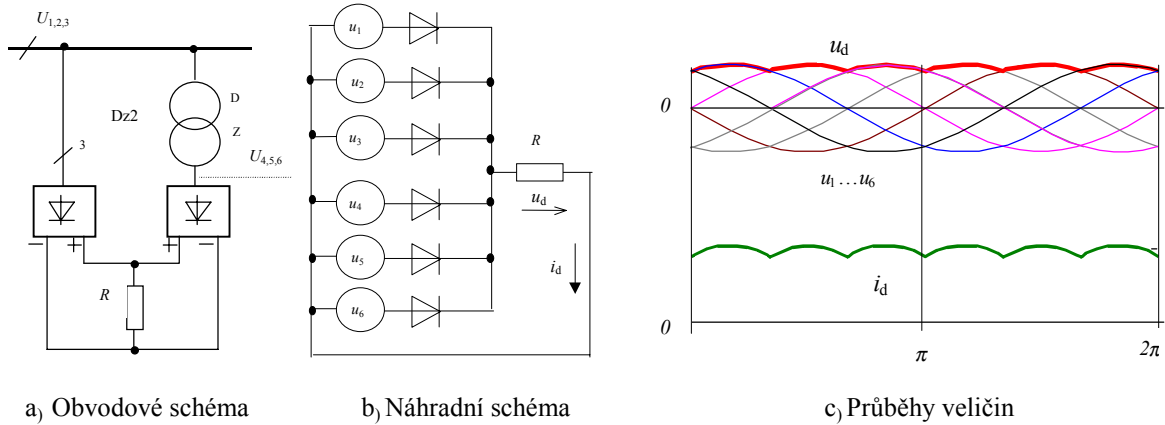
$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,5)}{0,827 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,3 \quad (28)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí

$$U_{RRM} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (29)$$

### Třífázový šestipulsní uzlový usměrňovač.

Tohoto druhu usměrňovače lze dosáhnout dvojicí trojpulzních usměrňovačů, z nichž jednotlivá napájecí napětí jsou vzájemně posunuta o třicet stupňů. Tohoto posunu lze dosáhnout např. pomocí transformátoru s hodinovým úhlem 60 stupňů, (2 hodiny), napájecího jeden usměrňovač. Hodinový úhel je závislý na zapojení primárního a sekundárního vinutí, např. Dz2. Napětí v každé fázi sekundárního vinutí je posunuto o daný úhel vůči napětí téže fáze primárního vinutí.



Obr. 11 Šestipulzní uzlové zapojení

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 1,35 \cdot U = 0,779 \cdot U_S \quad (30)$$

Střední hodnota proudu diody a tedy i fázového proudu napájecího transformátoru je

$$I_{Vav} = \frac{1}{6} \cdot I_d = \frac{\sqrt{6}}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,19 \cdot \frac{U}{R} \quad (31)$$

(27)

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu :

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,866)}{1,35 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,07 \quad (32)$$

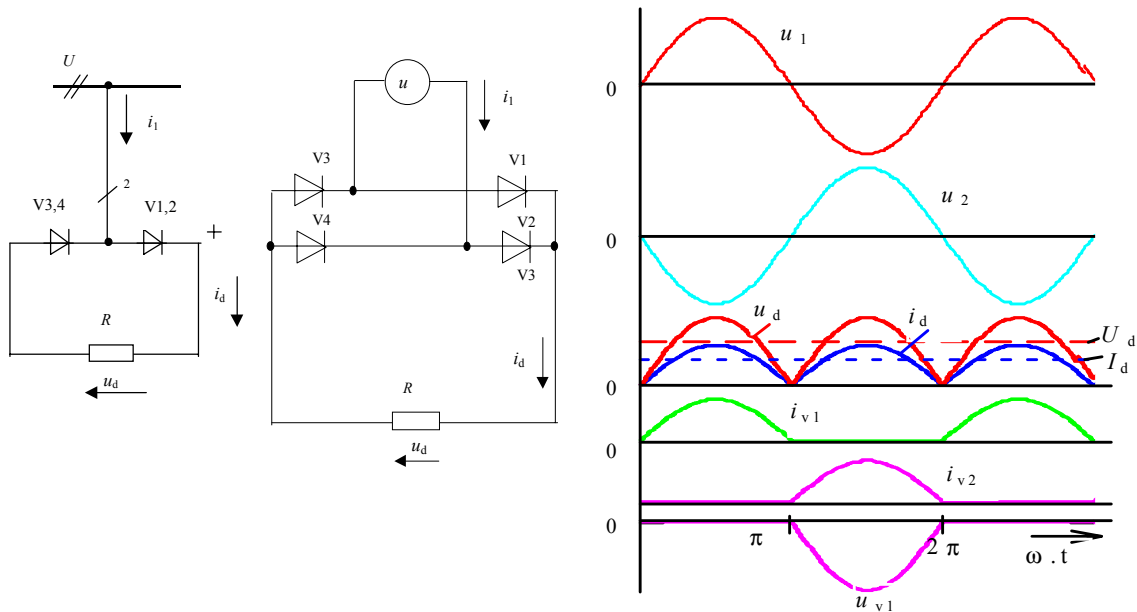
Špičkové závěrné napětí na diodě je větší než je amplituda sdruženého napětí

$$U_{RRM} \geq \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (33)$$

## Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení

Usměrňovač v můstkovém zapojení je v podstatě seriové spojení dvou uzlových usměrňovačů. Na vstupní svorky dvou uzlových usměrňovačů zapojených s opačnou polaritou ventilů, je přiváděno společné napájecí napětí. Prakticky se používají jen jednofázová a trojfázová provedení usměrňovačů.

### Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač



a, Obvodové schéma

b, Náhradní schéma

c, Průběhy veličin

Obr. 12 Šestipulzní uzlové zapojení

Vstupní proud  $i_1$  v jednotlivých vodičích bude procházet oběma směry a pro odporovou zátěž bude úměrný napájecímu napětí. Proud v obvodu usměrňovače bude procházet vždy tou dvojicí ventilů, na kterých je kladné napětí. Každá dvojice ventilů povede za dobu jedné periody proud v intervalu  $180^\circ$   
Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U \quad (34)$$

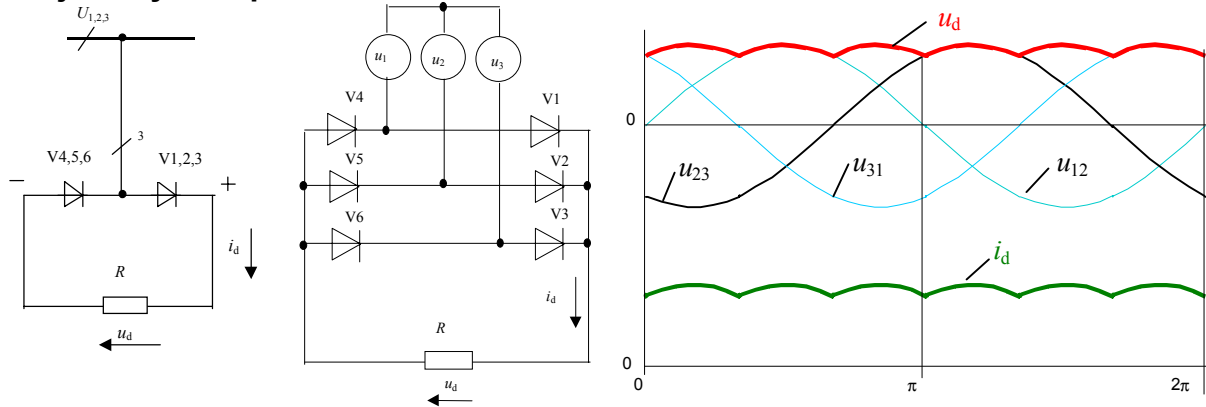
Průběhy výstupních veličin  $u_d$  a  $i_d$  jsou obdobné jako v případě uzlového provedení (obr.9).

Napětí na jednotlivých ventilech  $u_v$ , je ale poloviční.

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě napájecího napětí

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U \quad (35)$$

## Trojfázový šestipulzní usměrňovač



a) Obvodové schéma

b) Náhradní schéma

c) Průběhy veličin

Obr. Šestipulzní uzlové zapojení

Napětí v jednotlivých fázích působí vždy na dvojici polovodičových ventilů, tvořících jednu větev usměrňovače. Vstupní proud v jednotlivých fázích bude procházet oběma směry. Proud v obvodu usměrňovače bude procházet vždy tou dvojicí ventilů, na kterých je největší napětí. Každý ventil povede za dobu jedné periody proud v intervalu  $120^\circ$  a dvojice v intervalu  $60^\circ$ .

Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_s = 1,35 \cdot U_s = 2,34 \cdot U_f \quad (36)$$

kde  $U_s$  je efektivní hodnota sdruženého napětí napájecí sítě ( $U_s = U_{12} = U_{23} = U_{13}$ )

$U_f$  je efektivní hodnota fázového napětí napájecí sítě ( $U_f = U_1 = U_2 = U_3$ )

$$\text{Stejnoseměrný činitel zvlnění proudu } k' = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{2 \cdot \frac{3}{\pi}} = 0,07 \quad (37)$$

Proud odebíraný z napájecí sítě je neharmonický, obsahuje množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí. Skutečný tvar proudu je závislý na parametrech zátěže. Charakteristický průběh tohoto proudu je znázorněn na obr.

Konec neřízených usměrňovačů