

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ**



ELEKTROTECHNIKA - TEORIE

Polovodičové měniče

Ing. Jan Vaňuš Ph.D.

Ing. Roman Hrbáč Ph.D.

Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.

Ostrava 2013

© Ing. Jan Vaňuš Ph.D., Ing. Roman Hrbáč Ph.D., Ing. Tomáš Mlčák Ph.D.

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3049-0



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

8	POLOVODIČOVÉ MĚNIČE.....	3
8.1	Úvod	5
8.2	Usměrňovače	5
8.2.1	Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení.....	7
8.2.1.1	Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	7
8.2.1.2	Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	12
8.2.1.3	Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač	14
8.2.1.4	Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač	16
8.2.2	Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení	17
8.2.2.1	Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač	17
8.2.2.2	Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač.....	20
8.2.3	Řízené polovodičové usměrňovače.....	22
8.2.3.1	Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač	22
8.2.3.2	Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač	23
8.2.4	Střídače.....	24
8.2.4.1	Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)	25
8.2.4.2	Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím	25
8.2.4.3	Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím.....	26
8.2.5	Střídavé měniče napětí.....	27
8.3	Literatura	28



8 POLOVODIČOVÉ MĚNIČE



OBSAH KAPITOLY:

Úvod

Usměrňovače

Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení

Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač

Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení

Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač

Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač

Řízené polovodičové usměrňovače

Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač

Střídače

Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)

Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídavé měniče napětí

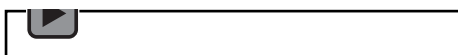


MOTIVACE:

Termínem měnič se dnes v praxi míní především polovodičové měniče napětí nebo frekvence. Měnič může pracovat podle jeho funkce jako usměrňovač, který převádí střídavou energii na stejnosměrnou nebo jako střídač, který naopak převádí stejnosměrnou energii na střídavou. Kaskádním zapojením usměrňovače a střídače se vytvoří tzv. měnič kmotočtu, který mění frekvenci střídavého napětí a proudu. Existuje zde taky možnost nastavování i jiných parametrů výstupu. V poslední době se začínají uplatňovat především tzv. aktivní usměrňovače, které umožňují i rekuperaci, pomocí níž jsou schopny vrátit energii zpět do střídavé napájecí



sítě. Polovodičové měniče dnes najdeme téměř v každém elektrickém zařízení, jako jsou nabíječky akumulátorů, v mikrovlnných troubách, ve sporácích s indukčním ohřevem, rovněž tvoří spínané zdroje pro počítače a jinou spotřební elektroniku, frekvenční měniče nebo v kompaktních zářivkách. Jednou z nejdůležitějších aplikací polovodičových měničů jsou aplikace v regulovaných elektrických pohonech, kde dovolují zásadní zvýšení účinnosti, dynamiky, stability, přesnosti a užité hodnoty pohonu. Význam použití měničů neustále roste, protože umožňují připojení alternativních zdrojů elektřiny, jako jsou například větrné elektrárny nebo fotovoltaické články do běžné elektrické sítě. Jako další významné uplatnění se jeví jejich použití v elektromobilech nebo v automobilech s hybridními pohonnými systémy.

**Audio8.1 Motivace****CÍL:**

Základní druhy polovodičových měničů.

Základní rozdělení usměrňovačů a jejich bloková struktura.

Princip neřízeného jednofázového jednopulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného jednofázového dvoupulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače.

Princip neřízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače.

Princip neřízeného třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače.

Princip řízeného jednofázového jednopulzního uzlového usměrňovače.

Princip řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače.

Princip střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení).

Princip střídavých měničů napětí

8.1 ÚVOD

Měnič elektrické energie mění energii určitých parametrů (u nn napájecí sítě je to např. $3 \times 400 \text{ V}$, 50 Hz) na takové parametry, aby výstupní parametry splňovaly požadavky kladené připojenou zátěží.

Polovodičový měnič je statické zařízení, které využívá ke své činnosti odporů, indukčností, kapacit a spínacích vlastností polovodičových prvků. Měnič je elektrický obvod s nelineárními součástkami, proto musí při jeho řešení docházet k určitým zjednodušením.

V měniči se přeměna energie na jiné parametry výstupního napětí, proudu, kmitočtu apod. děje s minimálními ztrátami a tím s poměrně vysokou účinností.

Základní druhy polovodičových měničů jsou:

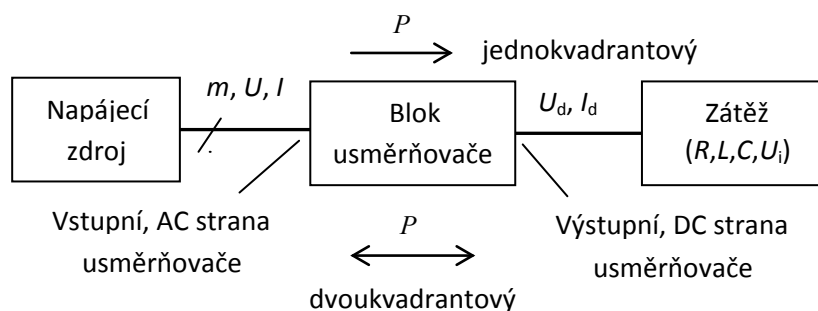
- usměrňovače,
- střídače,
- fázově řízené měniče střídavého napětí (softstartéry),
- pulzní měniče (spínané zdroje),
- střídavé měniče kmitočtu.

8.2 USMĚRŇOVAČE

Jedná se o druh výkonového polovodičového měniče používaného k přeměně střídavého elektrického proudu na proud stejnosměrný (AC/DC). Protože elektronické obvody ke své činnosti obvykle potřebují stejnosměrný proud a k distribuci elektrické energie se využívá proud střídavý, bývá usměrňovač součástí většiny elektrických přístrojů a zařízení spotřební elektroniky, napájených z elektrické sítě. Usměrňovače se také v hojné míře používají v napájecích soustavách elektrických trakčních vozidel (kupř. pro pohon lokomotiv, tramvají, trolejbusů či vozů metra). Tento druh provozní jednotky elektronické výkonové přeměny se skládá z následujících bloků, viz Obr. 2.1:

- Napájecí zdroj, který může tvořit 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 , popřípadě i s protinapětím U_i .

Parametry a varianty zapojení těchto bloků ovlivňují provozní vlastnosti usměrňovačů.



Obr. 2.1 Sestava polovodičového usměrňovače

V současnosti se používají téměř výhradně polovodičové usměrňovače na bázi křemíku, kterými byla ostatní zařízení prakticky vytlačena, i když není vyloučeno, že vzniknou nová zařízení založená na karbidu křemíku, jehož předpokládanou výhodou je možnost provozu při vyšší teplotě. Obecně mohou být realizovány usměrňovače polovodičové (křemíkové, germaniové, selenové, ...), elektronkové, rtuťové.

Pro průmyslové účely se na přeměnu střídavého proudu na proud stejnosměrný používalo dříve také spojení elektromotoru a dynama - motorgenerátor (neboli Ward-Leonardovo soustrojí).



Výklad různých variant usměrňovačů bude dále prováděn za předpokladů:

- idealizovaného napájecího zdroje,
- idealizovaných polovodičových ventilů (součástek), tj. neuvažování jejich vnitřního odporu,
- idealizovaných spojovacích vodičů a dalších částí, (neuvažování jejich parametrů).
- Rozdělení usměrňovačů je možno provést na základě různých kritérií (hledisek).

a) **Podle druhu napájecího zdroje - počtu fází:**

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

b) **Podle charakteru výstupních** (stejnoseměrných) **veličin:**

- neřízené, osazené neřiditelnými polovodičovými spínacími součástkami – diodami,
- polořízené, osazené kombinací řiditelných a neřiditelných polovodičových součástek (tyristory, tranzistory, diody),
- řízené, osazené řiditelnými 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).

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

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

d) **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.

e) **Podle zapojení zdroje a jednotlivých VPS**

- uzlové - všechny VPS a napět'ové zdroje jsou jedním shodným pólem spojeny do uzlu,
- můstkové - vnější svorky stejné polarity jsou společné a současně výstupní, středy skupiny jsou vstupní).

Usměrněné napětí:

Průběh okamžité hodnoty usměrněného napětí u_d se vyznačuje střídavou složkou nasuperponovanou na jeho střední hodnotu U_d . 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 napětí.

Střední hodnotu usměrněného napětí naprázdno U_{d0} je možno určit pro dvou a více pulzní 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 je efektivní hodnota napájecího napětí usměrňovače na vstupních svorkách s výjimkou uzlových zapojení, kde se jedná o fázovou hodnotu napětí.



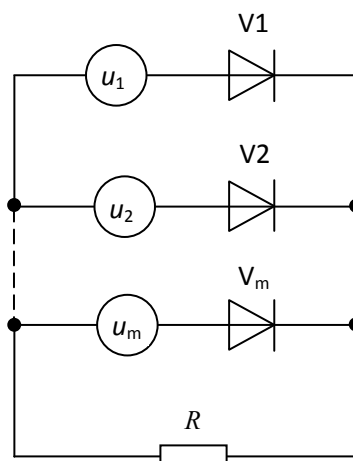
Usměrněný proud:

Okamžitá hodnota usměrněného proudu je označována i_d . Průběh i_d je dán průběhem usměrněného napětí u_d a zátěží. Obecná zátěž může obsahovat prvky R , L , C , popř. protinapětí U_i . Usměrněný proud bude zvlněný, a pokud v průběhu periody vstupního napětí nedosáhne nulové hodnoty, nazývá se nepřerušovaný neboli spojitý proud. Pokud v rámci dané periody klesne proud na nulovou hodnotu, a to pouze v jednom okamžiku, říká se, že je proud na mezi spojitosti. Pokud ovšem zůstane proud nulový po určitý delší časový okamžik, nazývá se přerušovaný proud.

8.2.1 Neřízené polovodičové usměrňovače v jednocestném (uzlovém) zapojení

Obecný q -pulzní usměrňovač v uzlovém zapojení je tvořen q větvemi s minimálně jednou polovodičovou součástkou. V případě $q > 1$ jsou všechny výkonové polovodičové součástky shodným pólem spojeny, a vzniká tak katodový nebo anodový uzel. Každá větev usměrňovače je napájena jednou fází m -fázového střídavého zdroje, viz Obr. 2.2. 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 $m = 3$. 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.



Obr. 2.2 q -pulzní usměrňovač v jednocestném (uzlovém) zapojení

8.2.1.1 Jednofázový jednopulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač**a) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporovou zátěží R**

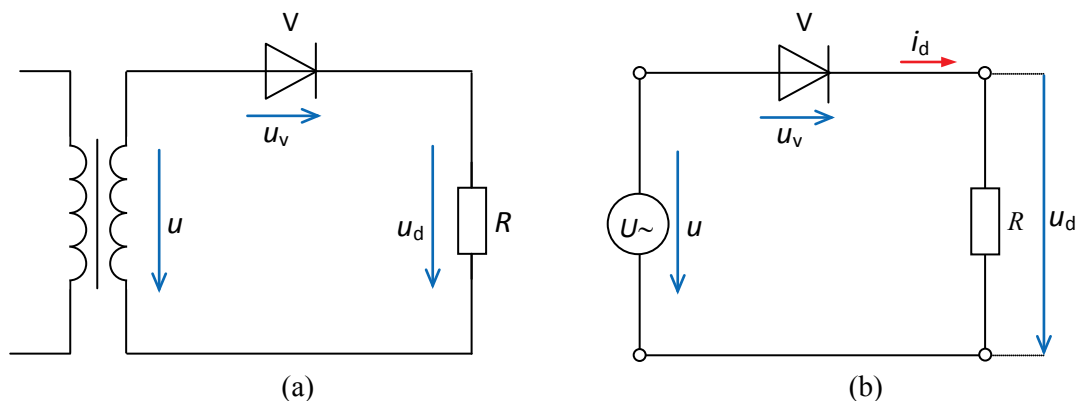
Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač propouští pouze jednu půlvlnu vstupního napětí. Má tudíž pouze poloviční účinnost a používá se především u zařízení s velmi nízkým odběrem proudu. Jde o nejjednodušší zapojení usměrňovače, které vyžaduje pouze jednu diodu.

Jako výkonová polovodičová součástka je zde použita usměrňovací dioda, značená jako V (ventil), viz Obr. 2.3 (a) a (b). Dioda je propustná (vodivá, sepnutá) v přímém směru a blokuje (nevodivá, vypnutá) ve zpětném směru. Obvod je napájen z jednofázového střídavého zdroje (sít' nebo transformátor) s harmonickým napětím:

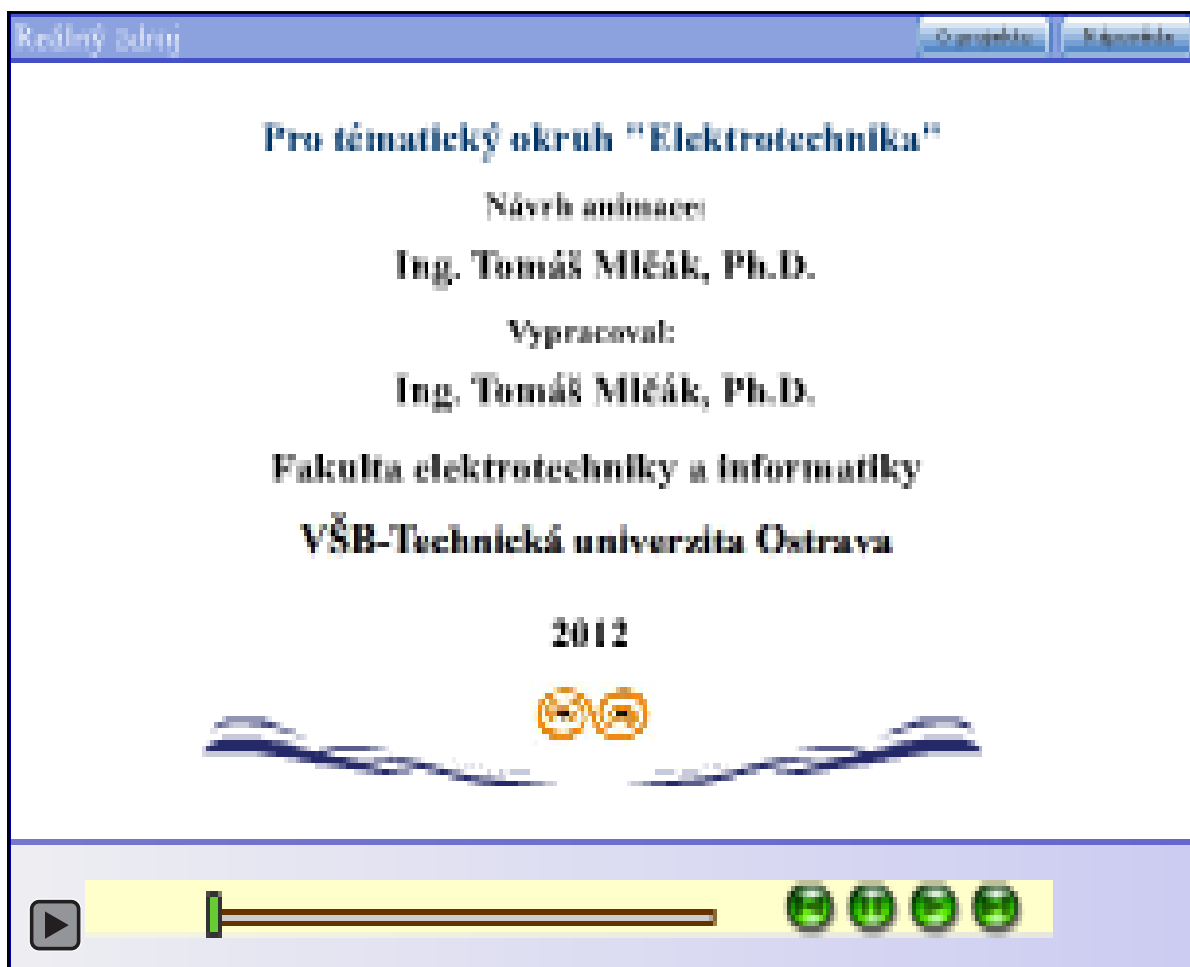
$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2)$$

Provozní vlastnosti usměrňovače jsou závislé na parametrech zátěže.





Obr. 2.3 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s odporovou zátěží: (a) obvodové schéma zapojení, (b) náhradní schéma zapojení



Pokud budeme mít v obvodu jednopulzního usměrňovače zapojenou pouze čistě odporovou zátěž, může obvod popsat Kirchhoffovými rovnicemi:

$$u_d + u_v - u = 0 \quad (3)$$

$$u_d = R \cdot i_d \quad (4)$$

kde $i_d = i_v$. Dioda pracuje ve dvou stavech:

- a) **Propustný stav**, kdy je dioda sepnuta, $u_v = 0$, $i_v > 0$, dosazením do rovnic (3) a (4) dostaneme

$$u_d = u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (5)$$



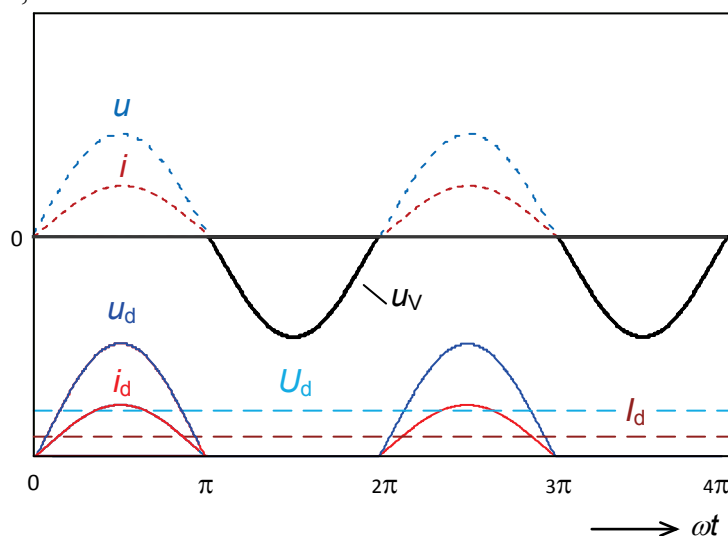
$$i_d = \frac{u_d}{R} = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) > 0 \quad (6)$$

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

b) **Závěrný stav**, kdy je dioda vypnuta, $u_v < 0$, $i_v = 0$, potom platí, že $u_d = 0$ a u_v vyjadřuje rovnice (7).

$$u_v = u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) < 0 \quad (7)$$

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, viz Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače s odporovou zátěží

Pokud označíme, že $\omega \cdot t = \theta$, potom střední hodnotu stejnosměrného (usměrněného) napětí naprázdno můžeme vyjádřit jako:

$$U_d = U_{av} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} [-\cos(\theta)]_0^\pi = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,45 \cdot U \quad (8)$$

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

$$U = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d = 2,221 \cdot U_d \quad (9)$$

Obvodem bude protékat pulzující přerušovaný stejnosměrný proud i_d , jehož střední hodnota je dána vztahem (10).

$$I_d = I_{av} = \frac{U_d}{R} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{U}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R} = \frac{1}{\pi} \cdot I_m \cong 0,318 \cdot I_m \quad (10)$$

Vstupní proud, jenž je v tomto případě odporové zátěže úměrný i výstupnímu dc napětí, jednopulzního neřízeného usměrňovače má neharmonický průběh.

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:

Efektivní hodnota proudu I je dána vztahem (11), kde $\omega \cdot t = \theta$.

$$I = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot I_d = 1,57 \cdot I_d \quad (11)$$

Zdánlivý výkon můžeme vyjádřit jako:



$$S = U \cdot I = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{2} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot P_d \cong 3,5 \cdot P_{dm} \quad (12)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě, jehož hodnotu je potřeba znát pro její napěťové dimenzování je dáno vztahem (13).

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U = U_m = \pi \cdot U_d \cong 3,14 \cdot U_{dm} \quad (13)$$

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

$$i_d = I_d + I_m \left[\frac{1}{2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{2}{3\pi} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - \frac{2}{15\pi} \cdot \cos(4 \cdot \omega \cdot t) \dots \right] \quad (14)$$

obsahujících:

stejnosemnnou (nulovou) složku I_d , kde $n = 0$,

základní (první) harmonickou o amplitudě $0,5 \cdot I_m = 1,571 \cdot I_d$, kde $n = 1$,

druhou harmonickou o amplitudě $0,212 \cdot I_m = 0,666 \cdot I_d$, kde $n = 2$,

čtvrtou harmonickou o amplitudě $0,0424 \cdot I_m = 0,133 \cdot I_d$, kde $n = 4$.

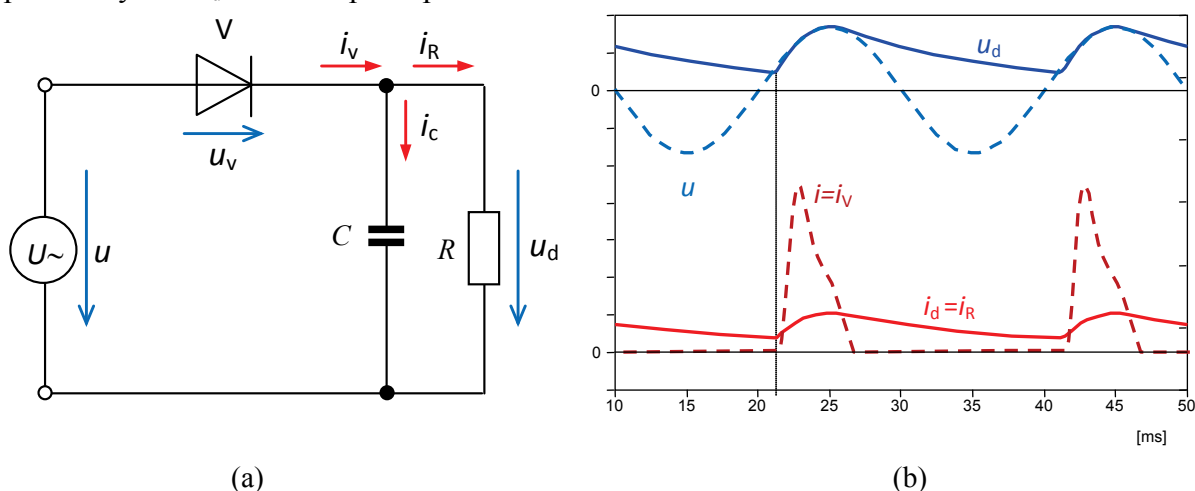
Činitel zvlnění usměrňovaného dc proudu:

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{2} = 1,57 \quad (15)$$

b) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporovou zátěží a kondenzátorem

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. 2.5 (a).

Ventilem V začne téci proud i_v , je-li $u > u_d$ (dioda je polarizována v propustném směru a v tomto okamžiku se na zátěži objeví napětí zdroje. Za vrcholem kladné půlvlny napětí zdroje je $u < u_d$ a kondenzátor se začne vybíjet do odporu. Vybíjecí napětí má exponenciální tvar. Současně s poklesem napětí klesá i celkový proud tekoucí odporem R . V okamžiku, kdy kondenzátor dodává celý proud do odporu $|i_c| = |i_R|$, proud ventilem i_v klesl k nule a ventil vypnul. V tomto okamžiku je obvod R - C oddělen od napájecího zdroje. Rozdílem okamžitých hodnot napětí na kondenzátoru a napětí zdroje ($u < u_d$) je polovodičová dioda polarizována v závěrném směru. Při opětovném nárůstu napětí zdroje do kladných hodnot dojde ke splnění podmínky $u > u_d$ a ventil opět sepne.



Obr. 2.5 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač se zapojenou odporovou zátěží a kondenzátorem:
(a) Náhradní schéma zapojení, (b) Časové průběhy veličin

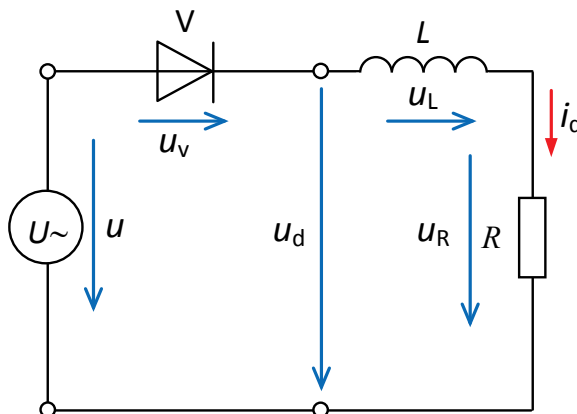


Z Obr. 2.5 (b) je zřejmé vyhlazení průběhu usměrněného napětí u_d , které bude tím lepší, čím větší bude časová konstanta zátěže τ , která je rovna součinu $R \cdot C$. Dioda vede proud kratší interval než π , jak je tomu v případě odporové zátěže bez kondenzátoru.

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

c) Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač s připojenou odporově-induktivní zátěží R-L

Jednopulzní usměrňovač se zátěží tvořenou reálnou cívkou (v náhradním schématu sériové spojení odporu R a indukčnosti L) je znázorněn na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Jednofázový jednopulzní neřízený usměrňovač se zapojenou reálnou cívkou (R-L zátěž)

Při analýze obvodu lze opět vyjít ze základních rovnic (3) a (4) s tím, že v obvodu je indukčnost, na které je napětí:

$$u_L = L \cdot \frac{di_d}{dt} \quad (16)$$

Při sepnutí diody V lze obvod popsat diferenciální rovnicí:

$$u_d = R \cdot i_d + L \frac{di_d}{dt} \quad (17)$$

jejímž řešením obdržíme časový průběh proudu ve tvaru:

$$i_d = \frac{U_m}{Z} \cdot \left[\sin(\omega \cdot t - \varphi) + e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \psi \right] \quad (18)$$

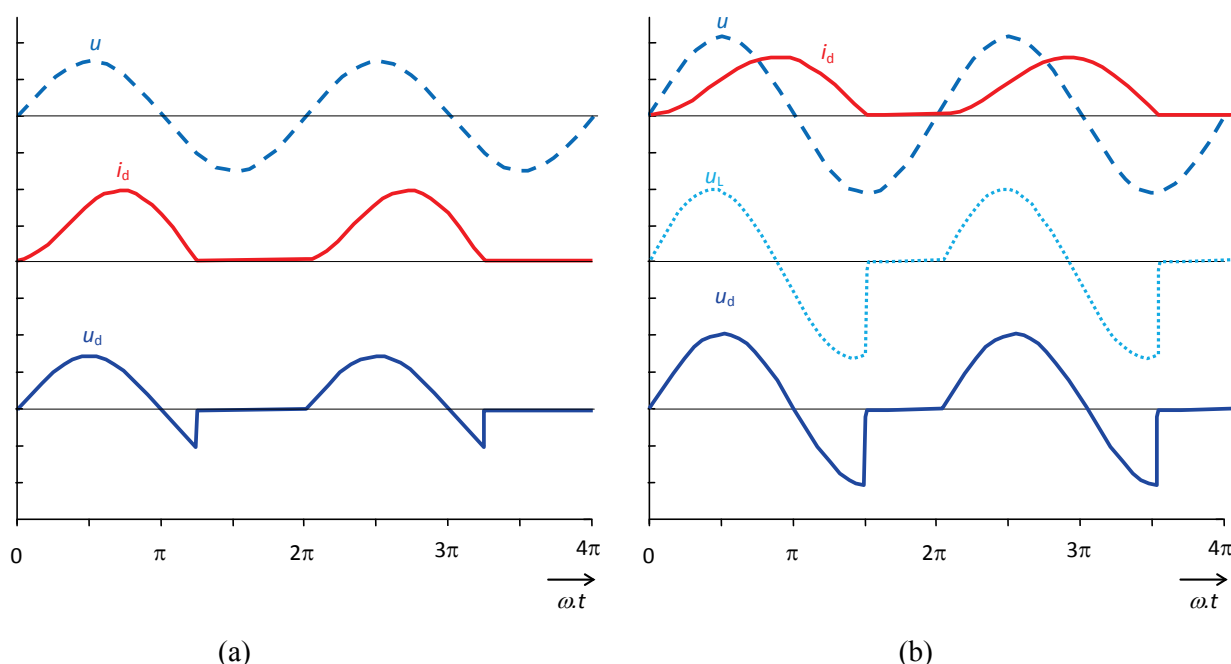
kde Z je výsledná impedance ze sériového zapojení odporu a indukčnosti, τ je časová konstanta obvodu, kde $\tau = L/R$ a $\Psi = \arctg \omega \cdot \tau$.

V intervalu od nuly po úhel Ψ proud tekoucí obvodem roste, tlumivka se nabíjí ze zdroje elektromagnetickou energií, následně se tlumivka vybíjí do odporu R (získanou elektromagnetickou energii předá). Dioda vypíná vždy při poklesu proudu i_d k nule.

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 vzrůstající indukčností rovněž narůstá i časová konstanta obvodu τ a zvětšuje se hodnota úhlu Ψ , 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.

Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou pro menší hodnoty L ($L > 0$) jsou zobrazeny na Obr. 2.7 (a).

Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou pro větší hodnoty L ($L \gg 0$) jsou zobrazeny na Obr. 2.7 (b).



Obr. 2.7 Časové průběhy veličin v případě použitého jednofázového jednopulzního neřízeného usměrňovače se zapojenou reálnou cívkou při: (a) $L > 0$, (b) $L \gg 0$

Použití:

Použití tohoto typu usměrňovače lze hledat spíše v historických aplikacích, kdy výkonová elektronika byla na samém počátku vzniku. Dnes je tento usměrňovač používán velmi zřídka, např. pro malé výkony (vysavače, regulace osvětlení) a díky své jednoduchosti je zde uváděn jen pro pochopení základních principů.

8.2.1.2 Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

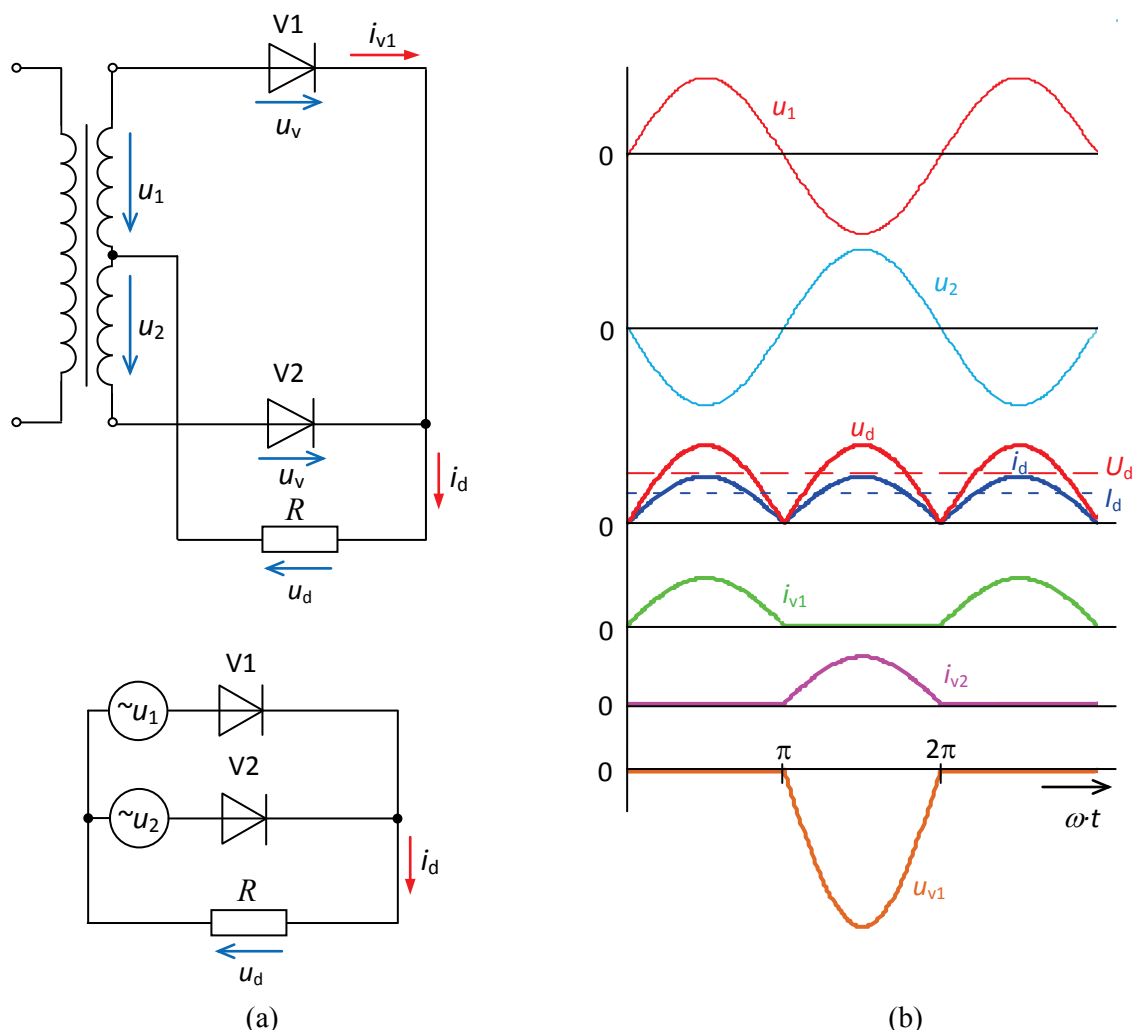
Dvoupulzní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z jednofázového transformátoru, jehož sekundární vinutí je opatřeno středním vývodem (odbočkou). Tento vývod je připojen k jednomu přívodu zátěže, jak je zobrazeno na Obr. 2.8 (a). Druhý přívod zátěže je připojen k uzlu polovodičových součástek (diod). Střední vývod výstupního vinutí transformátoru tvoří uzel dvou fázových napětí, která popisují rovnice (19) a (20),

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (19)$$

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t - \pi) = -u_1 \quad (20)$$

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





Obr. 2.8 Jednofázový dvoupulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač: (a) Obvodové a náhradní schéma zapojení, (b) Časové průběhy obvodových veličin

Průběhy obvodových veličin pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na Obr. 2.8 (b). Usměrněné napětí je obalovou křivkou kladných půlvln napětí u_1 a u_2 . Tato napětí v průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří dva pulsy – odtud název dvoupulzní usměrňovač.

Střední hodnotu usměrněného napětí vyjadřuje vztah:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U = 0,45 U_2 \quad (21)$$

kde $\theta = \omega \cdot t$ a $U_2 = U_1 + U_2 = 2 \cdot U$.

Potřebné střídavé napětí U jednoho sekundárního vinutí transformátoru popisuje vztah (22).

$$U = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d = 1,11 \cdot U_d \quad (22)$$

Špičkové závěrné napětí je dáno rovnicí (23).

$$U_{RRM} = 2 \cdot U_m = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U = 2,82 \cdot U = 3,14 \cdot U_d \quad (23)$$

Střední hodnota usměrněného proudu je dána rovnicí (24).

$$I_d = \frac{2}{\pi} \cdot I_m \quad (24)$$

Činitel zvlňení usměrněného dc proudu popisuje vztah (25).



$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{\pi \cdot I_d}{2 \cdot 2 \cdot I_d} = \frac{\pi}{4} = 0,786 \quad (25)$$

Veličiny na vstupní straně usměrňovače:

Ve dvoupulzním 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 dána vztahem:

$$I_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2(\theta) d(\theta)} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot I_d = 0,78 \cdot I_d \quad (26)$$

Zdánlivý výkon sekundárního vinutí transformátoru můžeme vyjádřit jako:

$$S = 2 \cdot U \cdot I_{ve} = 2 \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot U_d \cdot \frac{\pi}{4} \cdot I_d = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} U_{dv} \cdot I_d = 1,75 \cdot U_d \cdot I_d \quad (27)$$

Použití:

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

Jeho hlavní výhodou je použití pouze dvou diod.

Hlavní nevýhodou jednofázového dvoupulzního uzlového usměrňovače je nutnost použít transformátoru se dvěma vinutími. Zároveň závěrné napětí diod musí být dimenzované minimálně na dvojnásobek maximální hodnoty napětí zdroje.

8.2.1.3 Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač

Schéma zapojení trojpulzního uzlového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.9 (b). Trojpulzní uzlový usměrňovač je v praxi napájen z trojfázového transformátoru, jehož primární (vstupní) vinutí může být zapojeno buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka, viz Obr. 2.9 (a), kdežto sekundární (výstupní) vinutí je vždy zapojeno do hvězdy. Konce všech tří vinutí jsou spojeny a tvoří jeden uzel. Napájecí napětí usměrňovače tvoří trojfázovou souměrnou soustavu se vzájemným fázovým posunem $2\pi/3$. Střídavé sinusové napětí nabývá plynule hodnot od nuly až do svého kladného maxima, poté od kladného maxima až do nuly a od nuly plynule až do svého záporného maxima a vrací se zpět do nuly. Tento děj se periodicky stále opakuje.

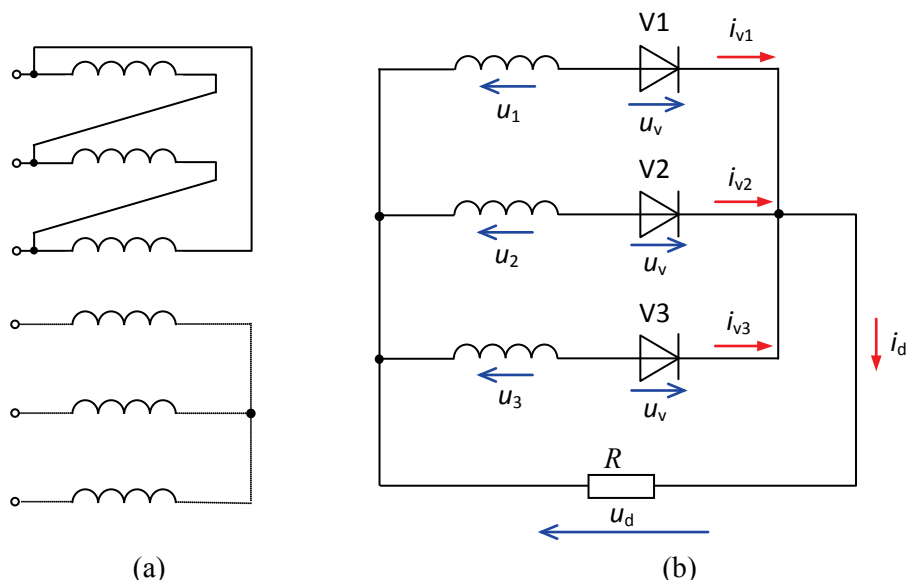
K realizaci zapojení třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače potřebujeme tři diody. Každou diodu zapojíme anodou na jednu fázi a jejich katody spojíme do uzlu a propojíme s uzlem vinutí.

Diody, označené jako V_1 , V_2 a V_3 , odstraní záporné půlvlny střídavého proudu ale s tím rozdílem, že dioda V_1 nevede po celou kladnou půlperiodu první fáze (u_1), ale jen do doby, než dojde ke zvýšení napětí v další fázi (u_2) nad napětí fáze první fáze, od té doby začíná vést dioda V_2 a vede až do doby než se zvýší napětí třetí fáze (u_3) nad napětí fáze druhé. Od té doby vede dioda V_3 až do doby, než napětí třetí fáze klesne pod hodnotu napětí fáze první. V tomto okamžiku začíná vést dioda V_1 a celý děj se periodicky opakuje. V sepnutém (vodivém) stavu se tedy nachází vždy dioda, která je připojena k fázovému napětí s největší okamžitou hodnotou.

Obecně určuje napětí n -té fáze m -fázového napájecího zdroje vztah (28).

$$u_n = U_m \cdot \sin \left[\omega \cdot t - (n-1) \cdot \frac{2\pi}{m} \right] \quad (28)$$



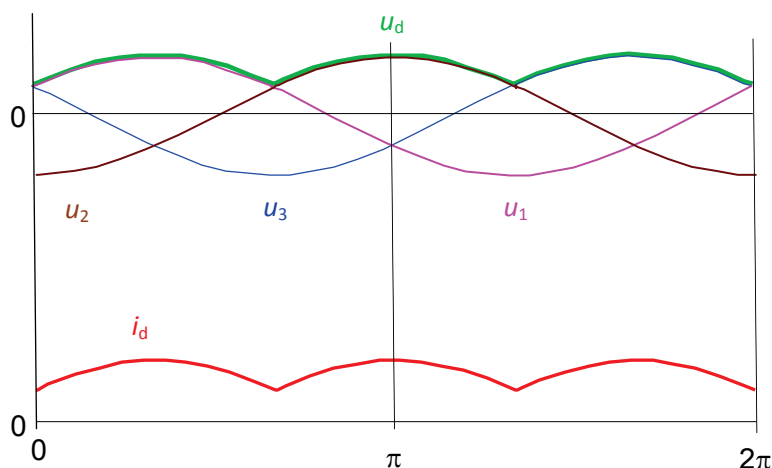


Obr. 2.9 Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač: (a) Možnosti zapojení primárního vinutí trojfázového transformátoru, (b) Obvodové schéma zapojení

Na horním grafu Obr. 2.10 jsou znázorněny časové průběhy napětí jednotlivých fází (u_1 - fialová, u_2 - hnědá, u_3 - modrá) posunutých o 120° . Na každou fázi je zapojena jedna dioda v propustném směru. Průběh usměrněného napětí u_d (znázorněn zelenou barvou) je obalovou křivkou kladných půlvln fázových napětí u_1 , u_2 a u_3 (každá fáze je usměrňována do doby dokud je hodnota jejího napětí vyšší než hodnota napětí jiné fáze). Výsledkem takto usměrněného napětí je nízké zvlnění, protože výstupní napětí po celou dobu neklesá až na nulu, ale je drženo na určité úrovni. Výstupní napětí má vysoký výkon a je vhodné k použití do obvodů s vysokým výkonem.

Na dolním grafu Obr. 2.10 je znázorněn průběh usměrněného proudu i_d .

Z grafů je zřejmé, že název trojpulzní usměrňovač vychází ze skutečnosti, že v průběhu jedné periody napájecího napětí vytváří usměrňovač tři pulzy. Všechny znázorněné průběhy odpovídají zapojení s odporovou zátěží na výstupu usměrňovače.



Obr. 2.10 Časové průběhy obvodových veličin třífázového trojpulzního uzlového usměrňovače

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot U = 1,17 \cdot U \quad (29)$$

Střední hodnota usměrněného proudu je dána rovnicí (30).



$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{1,17 \cdot U_m}{R \cdot \sqrt{2}} = 0,827 \cdot I_{\max} \quad (30)$$

Proudy jednotlivých diod mají tvar sinusových úseků šířky 120° .

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

$$I_{\text{Vav}} = \frac{1}{3} I_d = \frac{\sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,39 \cdot \frac{U}{R} \quad (31)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (25).

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,5)}{0,827 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,3 \quad (32)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (33).

$$U_{\text{RRM}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{6} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (33)$$

Použití:

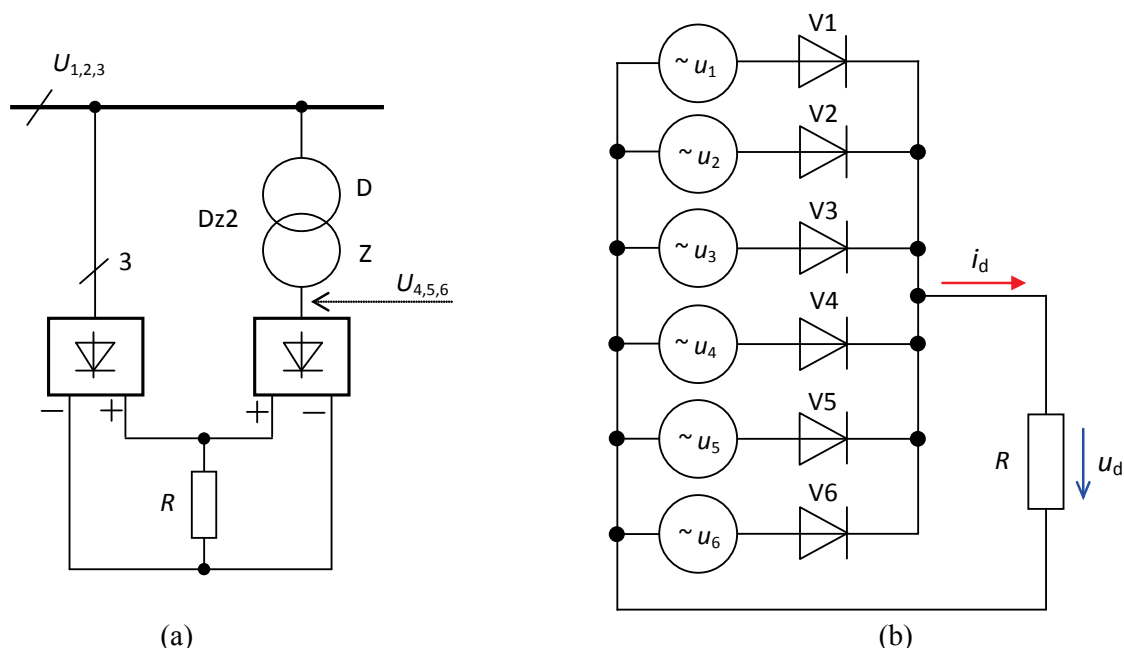
Výhody: Jednoduché zapojení, vysoký výkon a poměrně malé zvlnění.

Nevýhody: Třífázová soustava, velké proudy a napětí (potřeba transformátoru).

8.2.1.4 Třífázový šestipulzní 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° , napájecího jeden usměrňovač. Hodinový úhel je závislý na zapojení primárního a sekundárního vinutí. Napětí v každé fázi sekundárního vinutí je posunuto o daný úhel vůči napětí téže fáze primárního vinutí.

Schéma zapojení šestipulzního uzlového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.11 (a) a (b).

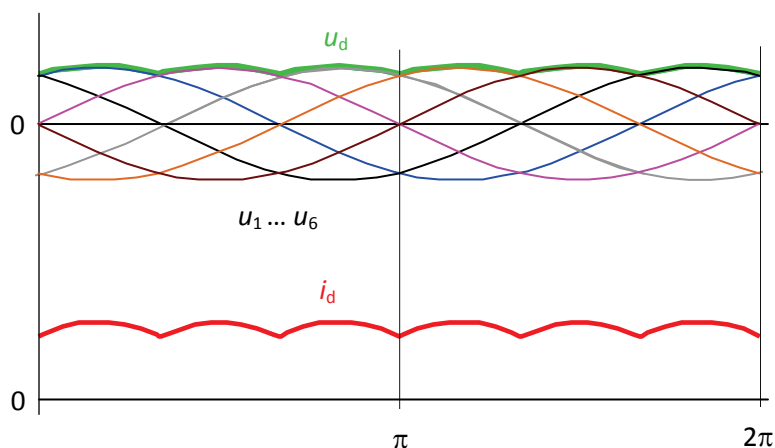


Obr. 2.11 Třífázový šestipulzní uzlový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Na horním grafu Obr. 2.12 jsou znázorněny časové průběhy napětí jednotlivých fází (u_1 až u_6) posunutých o 60° . Na každou fázi je zapojena jedna dioda v propustném směru. Průběh usměrněného napětí u_d je obalovou křivkou kladných půlvln fázových napětí u_1 až u_6 (každá fáze je usměrňována do doby dokud je hodnota jejího napětí vyšší než hodnota napětí jiné fáze). Výsledkem takto usměrněného napětí je nízké zvlnění, protože výstupní napětí po celou



dobu neklesá až na nulu, ale je drženo na určité úrovni. Výstupní napětí má vysoký výkon a je vhodné k použití do obvodů s vysokým výkonem.



Obr. 2.12 Časové průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 1,35 \cdot U = 0,779 \cdot U_s \quad (34)$$

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

$$I_{\text{Vav}} = \frac{1}{6} \cdot I_d = \frac{\sqrt{6}}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{U}{R} = 0,19 \cdot \frac{U}{R} \quad (35)$$

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (36).

$$q_i = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2 \cdot I_d} = \frac{I_d \cdot (1 - 0,866)}{1,35 \cdot 2 \cdot I_d} = 0,07 \quad (36)$$

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (37).

$$U_{\text{RRM}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{6} \cdot U = 2,45 \cdot U \quad (37)$$

Použití:

Výhody: Vysoký výkon, snadné zapojení, malé zvlnění napětí, které se přibližně blíží k „čistému“ stejnosměrnému napětí

Nevýhody: Třífázová soustava, vysoké napětí a proudy, potřeba šest napětí z transformátoru, velký počet diod.

8.2.2 Neřízené polovodičové usměrňovače v můstkovém zapojení

Usměrňovač v můstkovém zapojení je v podstatě sériové 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.

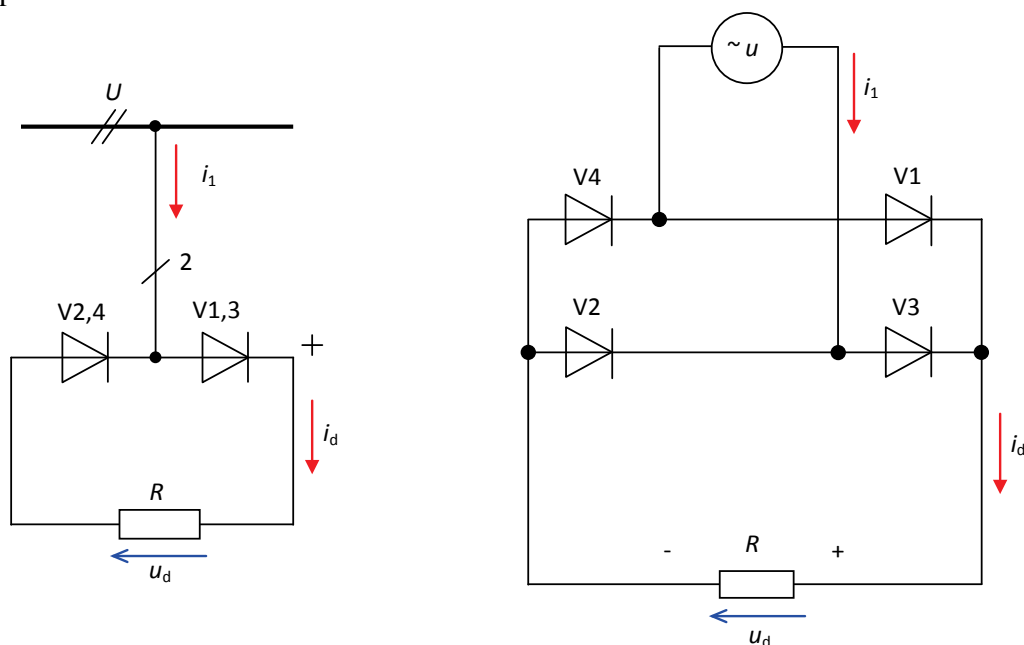
8.2.2.1 Jednofázový dvoupulzní dvoucestný (můstkový) usměrňovač

Dvoupulzní usměrňovače jsou elektrické obvody, u kterých využíváme zapojení více diod. Fungují tak, že převrátí záporné půlvlny střídavého napětí (proudu) do oblasti kladných. Takto usměrněné napětí není tolik zvlněné oproti jednopulznímu usměrňovači.

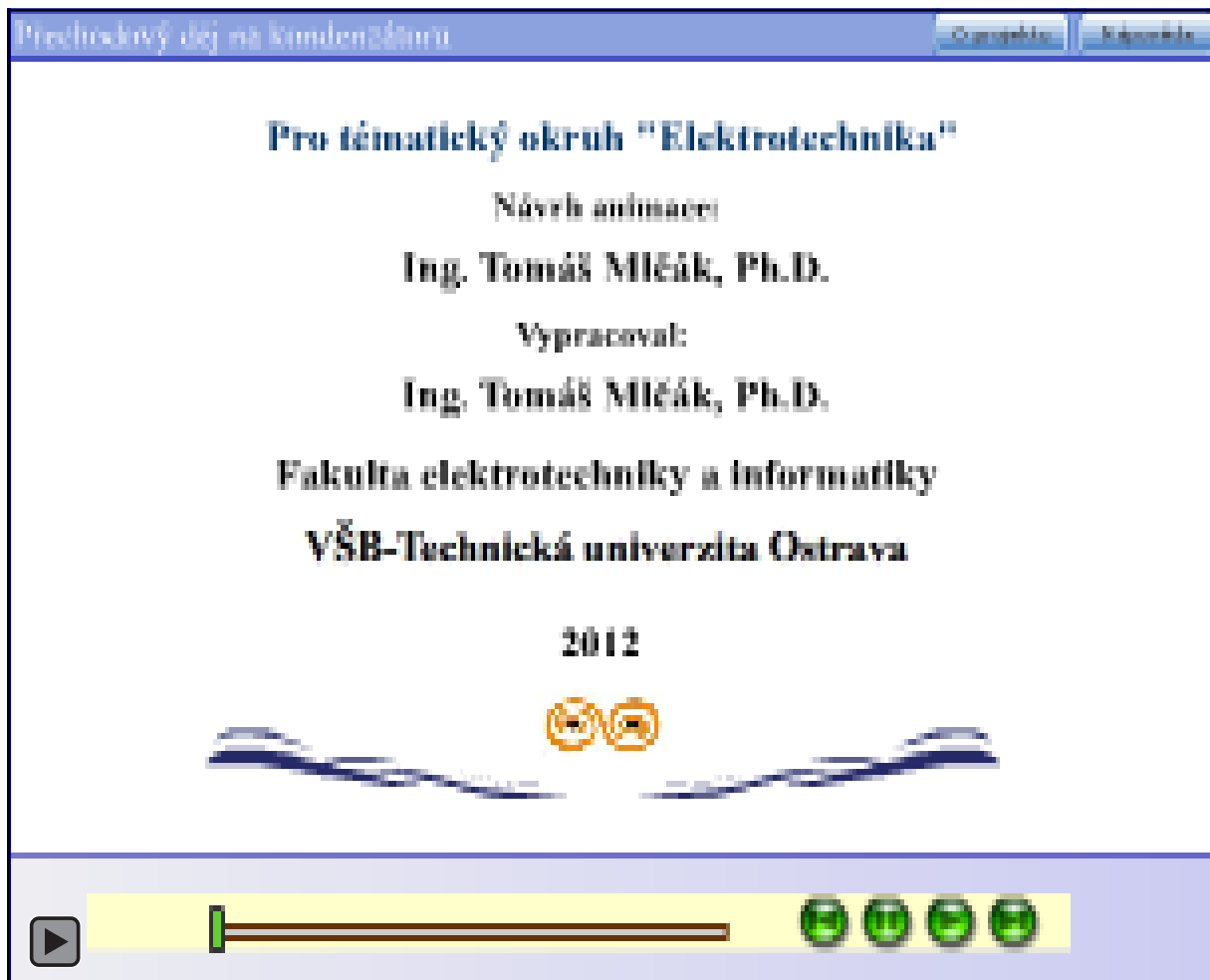
Schéma zapojení jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.13 (a) a (b).



Když dosáhne střídavý proud smyslu vyznačené polaroty (50-krát za 1 sekundu při 50 Hz), prochází proud od kladného pólu (+) zdroje diodou V1 na kladný (+) výstup U_d a přes zátěž R se vrací zpět diodou V2 na záporný (-) pól zdroje. Při změně polaroty zdroje (naopak než je vyznačeno, také 50-krát za 1 sekundu při 50 Hz), prochází proud od kladného pólu (+) zdroje diodou V3 na kladný (+) výstup U_d a přes zátěž R se vrací zpět diodou V4 na záporný (-) pól zdroje. Z toho vyplývá, že se na výstupu trvale objevují kladné pulzy. Takto usměrněné napětí si zachovává téměř stejný výkon, jako je napětí zdroje a je méně zvlněné oproti jednopulznímu usměrňovači.



Obr. 2.13 Jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma 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° , viz Obr. 2.14.

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

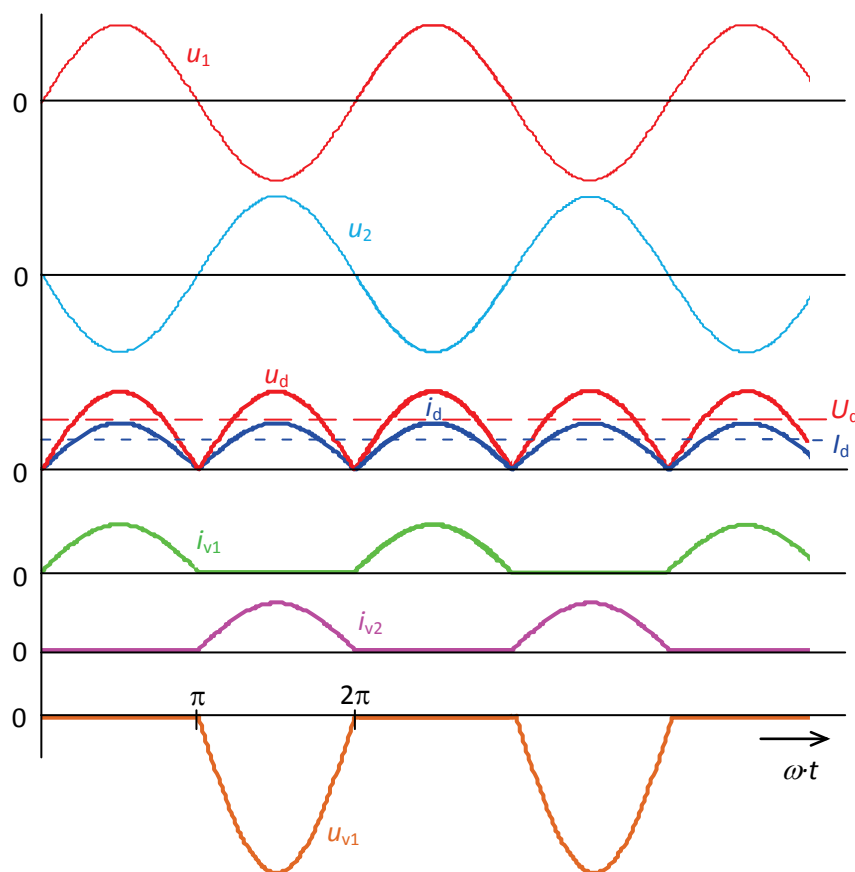
$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U = 0,9 \cdot U \quad (38)$$

Průběhy výstupních veličin u_d a i_d jsou obdobné jako v případě uzlového provedení usměrňovače. Napětí na jednotlivých ventilech u_v , je ale poloviční.

Špičkové závěrné napětí na diodě je rovno amplitudě sdruženého napětí, jak popisuje rovnice (39).

$$U_{RRM} = \sqrt{2} \cdot U \quad (39)$$





Obr. 2.14 Časové průběhy obvodových veličin jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače

Použití:

Neřízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač je využíván při napájení elektroniky a jako vstupní měnič pro napájení střídačů malých výkonů. Pro výkony větší musíme použít trojfázový můstek.

Řízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač se využívá v trakčních aplikacích, při buzení menších stejnosměrných strojů, atd. Jeho využití je vhodné pro aplikace, kde je potřeba rychlé změny řídicího úhlu α .

Pro možnost řízení střední hodnoty výstupního napětí na usměrňovači je vhodné použít polořízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač, kde jsou zapojeny dvě diody a dva tyristory, tudíž je levnější než plně řízený můstek se čtyřmi tyristory. Neumožňuje ovšem rychlý pokles proudu. Polořízený jednofázový dvoupulzní můstkový usměrňovač je využíván v traktaci a v aplikacích kde není potřeba rychlého odbuzování stroje.

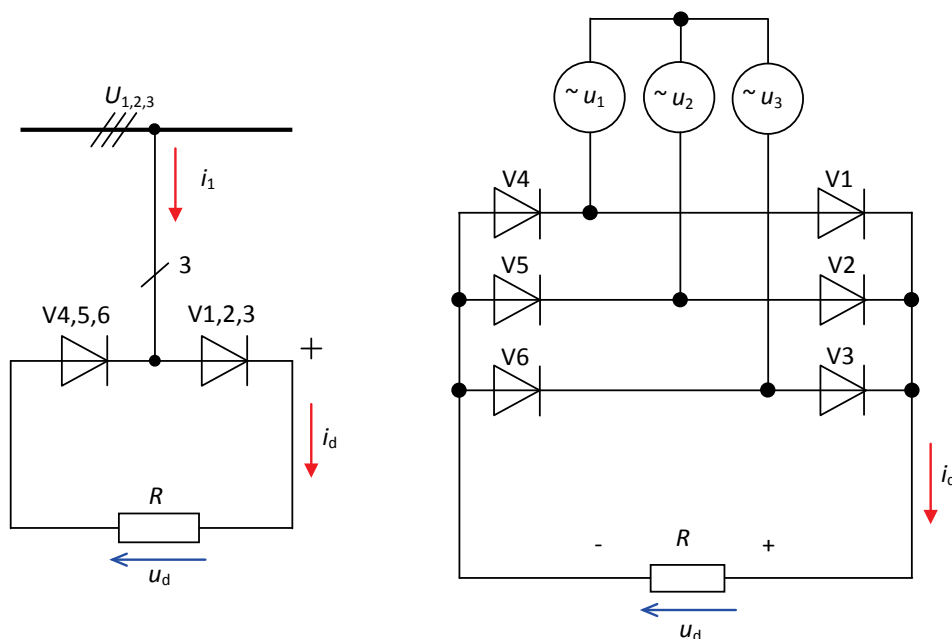
Nevýhodou jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače ve srovnání s trojfázovým je větší zvlnění proudu.

8.2.2.2 Trojfázový šestipulzní můstkový usměrňovač

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 prochází vždy tou dvojicí ventilů, na kterých je největší napětí. Každý ventil povede za dobu jedné periody proud v intervalu 120° a dvojice ventilů v intervalu 60° .

Obvodové schéma zapojení třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.15 (a). Náhradní schéma zapojení třífázového šestipulzního můstkového usměrňovače ukazuje Obr. 2.15 (b).





Obr. 2.15 Třífázový šestipulzní můstkový usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem:

$$U_d = \frac{6}{2 \cdot \pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_s = 1,35 \cdot U_s = 2,34 \cdot U_f \quad (40)$$

kde U_s je efektivní hodnota sdruženého napětí napájecí sítě ($U_s = U_{12} = U_{23} = U_{13}$) a U_f je efektivní hodnota fázového napětí napájecí sítě ($U_f = U_1 = U_2 = U_3$).

Činitel zvlnění usměrněného dc proudu popisuje vztah (41).

$$q_i = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2 \cdot I_d} = \frac{1 - \frac{\sqrt{3}}{2}}{2 \cdot \frac{3}{\pi}} = 0,07 \quad (41)$$

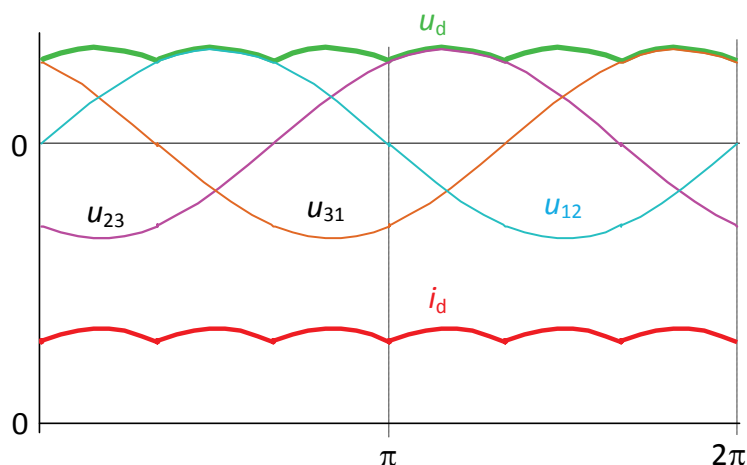
Proud odebíraný z napájecí sítě je neharmonický, obsahuje množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí. Skutečný tvar proudu je závislý na parametrech zátěže.

Průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače pro případ čistě odporové zátěže jsou znázorněny na Obr. 2.16.

Použití:

Třífázové můstkové usměrňovače mají velmi širokou škálu využití. Neřízený trojfázový můstkový usměrňovač je využíván jako vstupní měnič ve frekvenčním měniči, v měnících a například jako součást přepětových ochran.

Řízeným trojfázovým můstkovým usměrňovačem lze napájet kotvu stejnosměrných motorů nebo budící vinutí strojů velkých výkonů. Tvoří základ pro složitější měniče, jako jsou například reverzační měniče, cyklokonvertory, vysokonapětové měniče atd.



Obr. 2.16 Časové průběhy obvodových veličin třífázového šestipulzního uzlového usměrňovače

8.2.3 Řízené polovodičové usměrňovače

Pokud jsou v usměrňovačích nahrazeny diody řízenými tyristory, dostáváme řízený usměrňovač. Tyristory se stanou vodivými až od okamžiku, kdy dostanou v kladné půlperiodě se zpožděním α_f zapínací impuls. Úhel α_f se nazývá úhlem řízení (řídící úhel). Vypínání tyristoru nastává snížením napětí na tyristoru (průchod nulou). Řídí se množství přenesené energie a tím výkon připojeného zařízení (například topného tělesa, žárovky, dc motoru). Výhodou tohoto způsobu řízení oproti jiným jsou minimální energetické ztráty. Doba vedení proudu obvodem je závislá na charakteru zátěže.

U odporové zátěže je proud přímo úměrný odporu, což znamená, že při nulovém napětí je rovněž nulový proud. K řízeným usměrňovačům patří především tyristorové jednocestné i dvoucestné.

8.2.3.1 Jednofázový jednopulzní jednocestný řízený usměrňovač

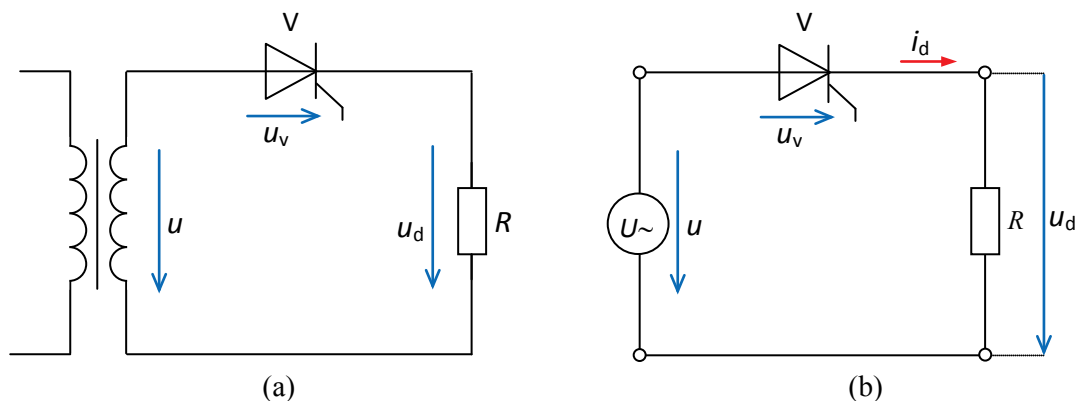
Jednofázový jednopulzní řízený usměrňovač propouští pouze jednu půlvlnu vstupního napětí a umožňuje s vysokou účinností řídit hodnotu výstupního napětí u_d usměrňovače v rozsahu od nuly do hodnoty napětí neřízeného usměrňovače. Sepnutí tyristoru V závisí na okamžiku přivedení proudového impulsu do řídící elektrody tyristoru. Posun řídícího impulsu proti okamžiku, kdy se tyristor dostal do blokovacího stavu, nazýváme řídící úhel α . Z hlediska činnosti tyristorů je nežádoucí, aby řídící impulsy přicházely v okamžiku, kdy je tyristor v závěrném stavu. Značně by tím vzrostl proud a tepelné namáhání tyristorů. Obvod je napájen z jednofázového střídavého zdroje (síť nebo transformátor) s harmonickým napětím:

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (42)$$

Střední hodnota usměrněného napětí je daná vztahem (43), kde $\theta = \omega \cdot t$.

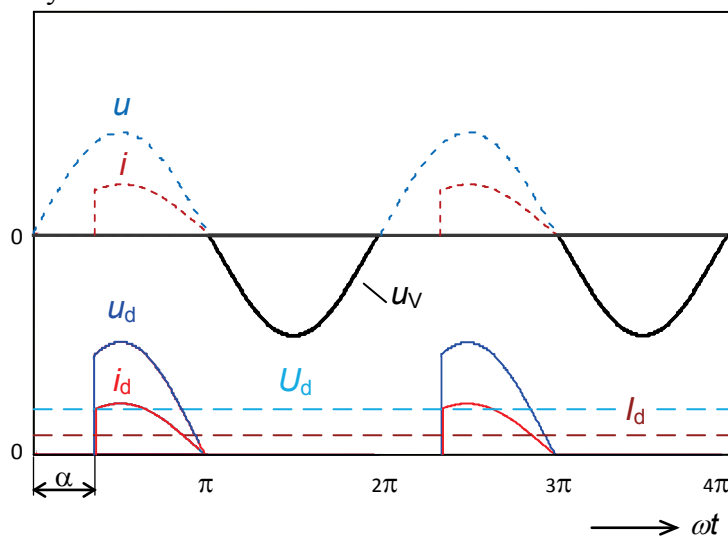
$$U_d = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \cdot \sin(\theta) d(\theta) \Rightarrow U_d = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} [-\cos(\theta)]_{\alpha}^{\pi} \Rightarrow U_d = \frac{U_m}{2 \cdot \pi} (1 + \cos \alpha) \quad (43)$$

Obvodové schéma zapojení jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.17 (a). Náhradní schéma zapojení jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače ukazuje Obr. 2.17 (b).



Obr. 2.17 Jednofázový jednopulzní řízený usměrňovač s odporovou zátěží: (a) obvodové schéma zapojení, (b) náhradní schéma zapojení

Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží jsou zobrazeny na Obr. 2.18.



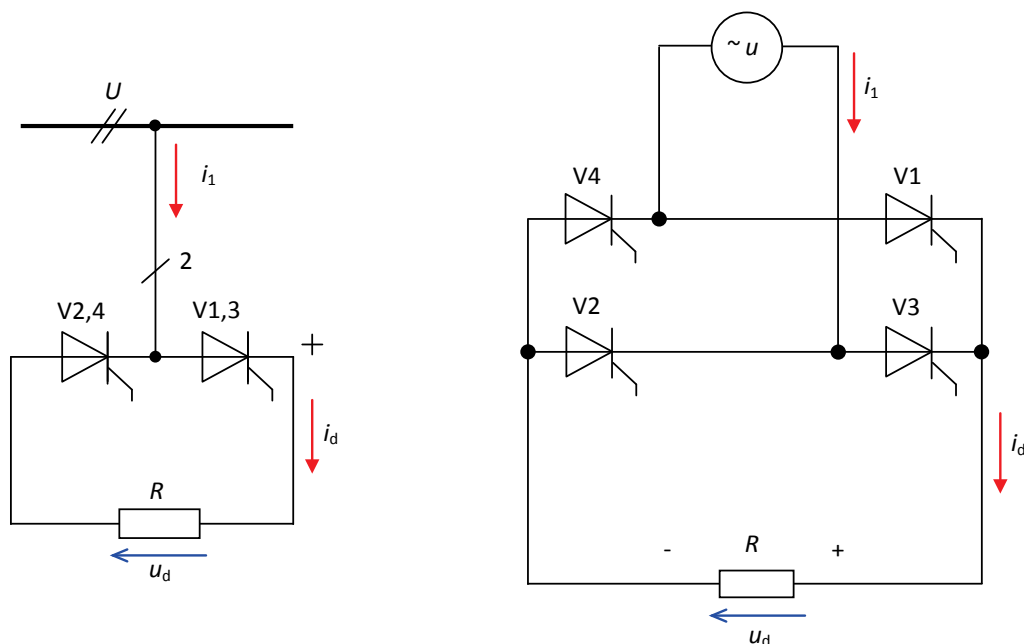
Obr. 2.18 Časové průběhy veličin jednofázového jednopulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží

8.2.3.2 Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač

Jednofázový dvoupulzní řízený usměrňovač propouští dvě půlvlny vstupního napětí a umožňuje s vysokou účinností řídit hodnotu výstupního napětí u_d usměrňovače v rozsahu od nuly do hodnoty napětí neřízeného usměrňovače.

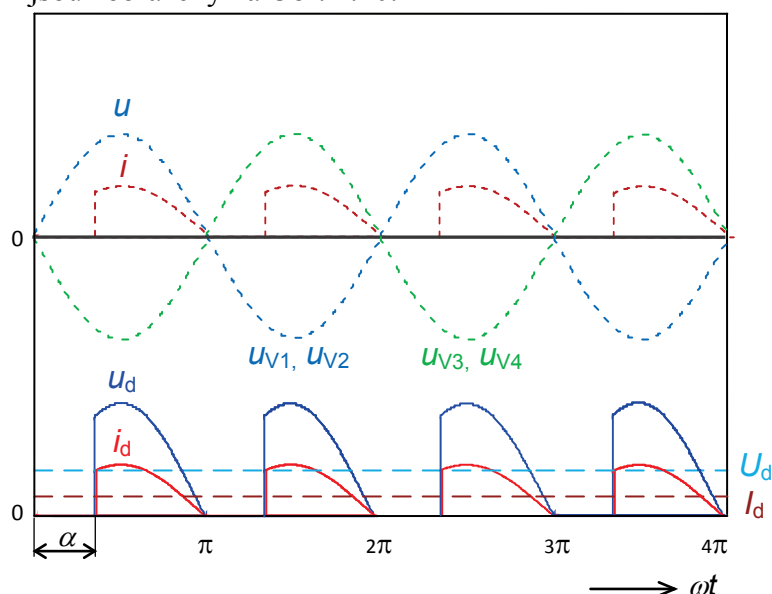
Vždy pracuje dvojice tyristorů V1 a V2 nebo V3 a V4. Aby došlo k sepnutí tyristoru, je nutné přivést proudový impuls do řídicí elektrody tyristoru. Jak už bylo uvedeno v předchozí kapitole, je z hlediska činnosti tyristorů nežádoucí, aby řídicí impulzy přicházely v okamžiku, kdy je tyristor v závěrném stavu.

Obvodové schéma zapojení řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače je znázorněno na Obr. 2.19 (a). Náhradní schéma zapojení řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače ukazuje Obr. 2.19 (b).



Obr. 2.19 Jednofázový dvoupulzní můstkový řízený usměrňovač: (a) Obvodové schéma zapojení, (b) Náhradní schéma zapojení

Časové průběhy veličin řízeného jednofázového dvoupulzního můstkového usměrňovače s odporovou zátěží jsou zobrazeny na Obr. 2.20.



Obr. 2.20 Časové průběhy veličin jednofázového dvoupulzního řízeného usměrňovače s odporovou zátěží

8.2.4 Střídače

Střídače jsou polovodičové měniče, které mění stejnosměrné napětí na střídavé.

Z hlediska tvaru výstupního napětí mohou být střídače:

- s harmonickým výstupním napětím,
- s obdélníkovým výstupním napětím (častější případ).

Z hlediska počtu výstupních fází rozdělit střídače na:

- jednofázové,
- trojfázové.

Základem každého střídače jsou polovodičové spínače, tranzistory – pro výkony do řádu desítek kW, nebo tyristory – pro výkony větší. Velkou výhodou tranzistorů je, že se dokážou



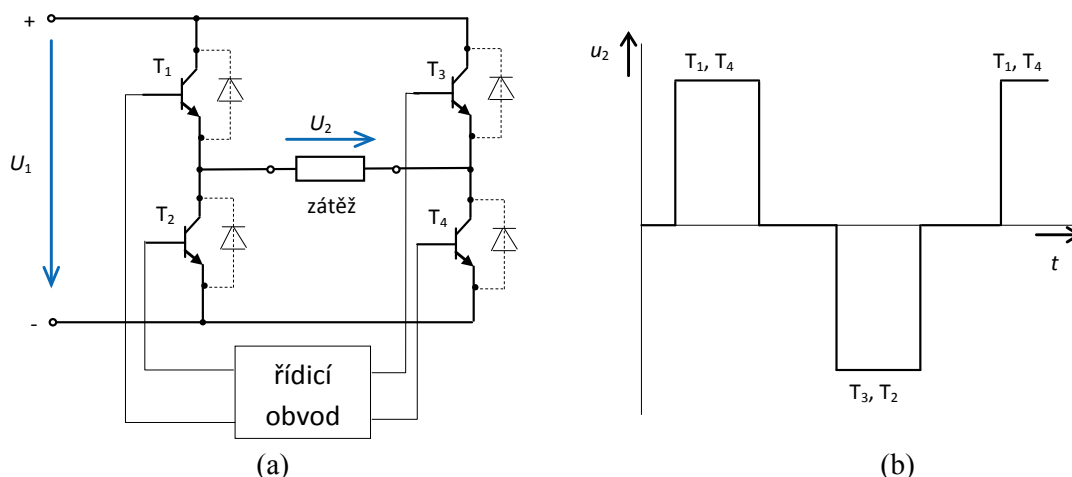
samy vypnout (tyristor potřebuje vypínací obvod, případně ho může vypínat komutace zátěže. Tranzistory mohou dosahovat velkých spínacích frekvencí (desítky kHz), proto jsou v poslední době stále rozšířenější střídače s tranzistory. Nejrozšířenější je tzv. střídač v můstkovém zapojení, který si dále popíšeme.

8.2.4.1 Střídače s obdélníkovým výstupním napětím (v můstkovém zapojení)

Tyto střídače můžou být jednofázové nebo trojfázové. Používá se ve zdrojích střídavého napětí pro napájení běžných spotřebičů v mobilních zařízeních (auta, vlaky), dále pro řízení otáček asynchronních případně synchronních motorů. Často je součástí tzv. nepřímých měničů frekvence, u kterých je na vstupu měniče usměrňovač, jenž střídavé napětí usměrní. Za usměrňovačem je tzv. meziobvod (napěťový, proudový) a dále následuje střídač, který usměrněné napětí opět rozstřídá s jinou frekvencí. Jako spínací prvky se v tomto typu střídače většinou používají tranzistory.

8.2.4.2 Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Princip si vysvětlíme na jednofázovém můstkovém střídači, jehož schéma je na Obr. 2.21 (a). Pro vysvětlení principu činnosti nemusíme uvažovat tzv. zpětné diody (na Obr. 2.21 (a) jsou znázorněné čárkovaně), které se uplatní pouze, jestliže má zátěž induktivní charakter (v tom případě by bez použití těchto zpětných diod došlo při vypnutí tranzistoru k jeho zničení vysokým indukovaným napětím).



Obr. 2.21 (a) Schéma jednofázového můstkového střídače, (b) Průběh výstupního napětí

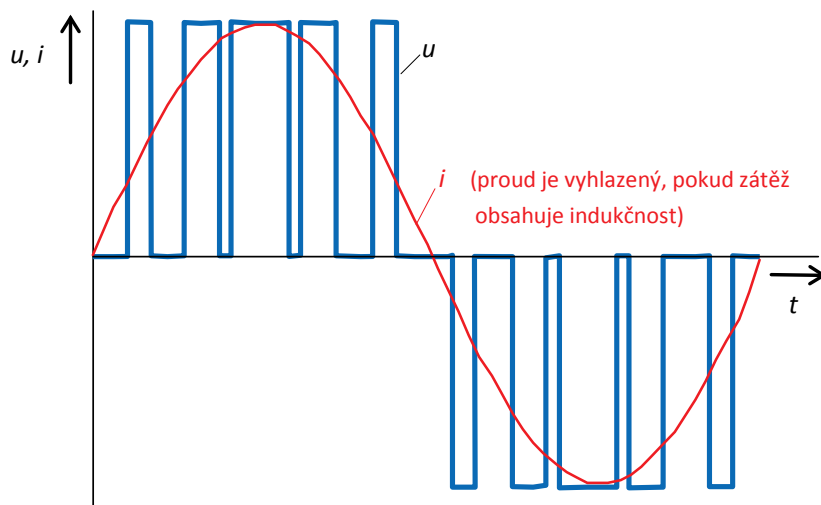
Na průbězích výstupního napětí na Obr. 2.21 (b) je na počátku nulové napětí. V tomto okamžiku není sepnut žádný tranzistor. Potom sepnou tranzistory T_1 a T_4 , na zátěž se dostane kladné napájecí napětí. Po určitém čase oba tranzistory vypnou, na zátěži je opět nulové napětí. Následně sepnou tranzistory T_3 a T_2 , na zátěž se připojí záporné napětí (tranzistory připojí zátěž jakoby obráceně než v prvním případě). Po určitém čase tranzistory opět vypnou a celý cyklus se opakuje.

Délkou doby sepnutí tranzistorů a prodlevy mezi sepnutími je možné řídit efektivní hodnotu výstupního napětí. Čím menší prodleva, tím vyšší efektivní hodnota napětí. V případě, že by byla zátěž induktivního charakteru, průběhy napětí i proudů by měly trochu odlišný tvar (induktivní zátěž by indukovala napětí v době, kdy tranzistory nejsou sepnuty). Pro vysvětlení principu však stačí příklad s odporovou zátěží. Při chodu střídače však nesmějí sepnout zároveň tranzistory T_1 a T_2 , nebo T_3 a T_4 , což by způsobilo zkrat.

Pulzně šířková modulace u střídačů v můstkovém zapojení

V případě, že nechceme mít na výstupu střídače obdélníkový průběh, ale průběh více podobný sinusovému průběhu, můžeme použít jiný způsob spínání tranzistorů, tzv. „Pulzně

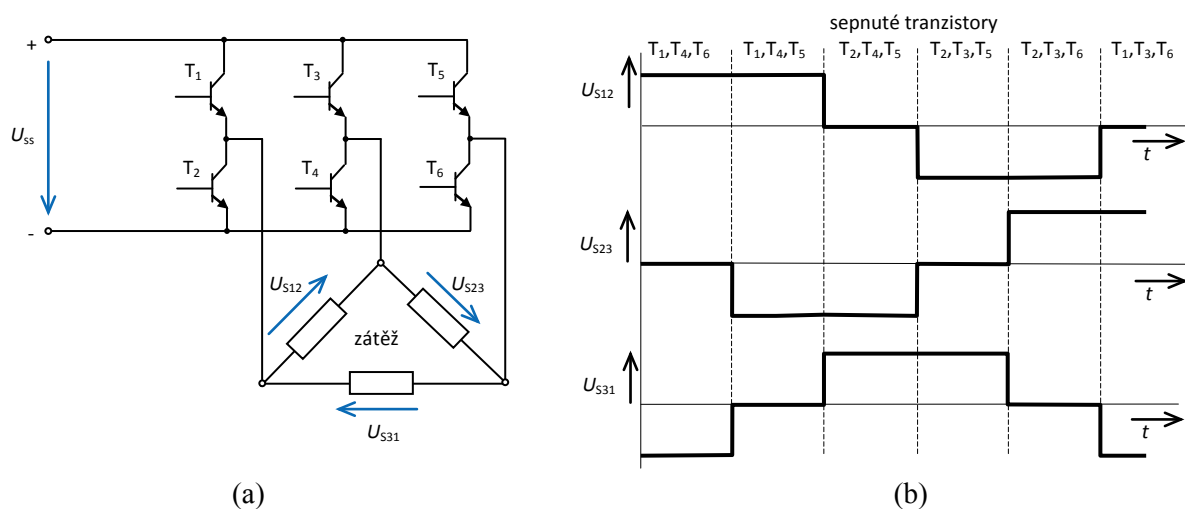
šířkovou modulací“. Průběhy napětí a proudu v tomto případě jsou na Obr. 2.22. Napětí je sice stále obdélníkové, k tomu značně „rozsekané“, ale proud bude v případě odporově induktivní zátěže (např. motoru) téměř sinusový. Indukčnost zátěže zde funguje jako setrvačnost vůči proudu a ten je potom vyhlazený. S tímto způsobem spínání pracuje většina dnešních střídačů.



Obr. 2.22 Princip pulzně šířkové modulace

8.2.4.3 Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídače tohoto typu se nejčastěji konstruují jako trojfázové. Zjednodušené schéma a průběh výstupního napětí trojfázového střídače v můstkovém zapojení je na Obr. 2.23 (a). Na Obr. 2.23 (b) jsou znázorněny průběhy sružených výstupních napětí a nad nimi je uveden tzv. spínací diagram, jenž naznačuje, ve kterém okamžiku je který tranzistor sepnutý.



Obr. 2.23 (a) Zjednodušené schéma trojfázového můstkového střídače, (b) Průběh sružených výstupních napětí

Můžeme si představit, že spínáním jednotlivých tranzistorů jsou výstupní svorky střídače připojovány buď na kladné, nebo záporné napětí. Rozdíl mezi napětím dvou sousedních výstupních svorek potom vytváří sružené napětí.

V praxi se tyto trojfázové střídače většinou konstruují s pulzně šířkovou modulací, podobně jak bylo uvedeno u jednofázového střídače. Pro vysvětlení principu ale stačí průběhy bez této modulace.

8.2.5 Střídavé měniče napětí

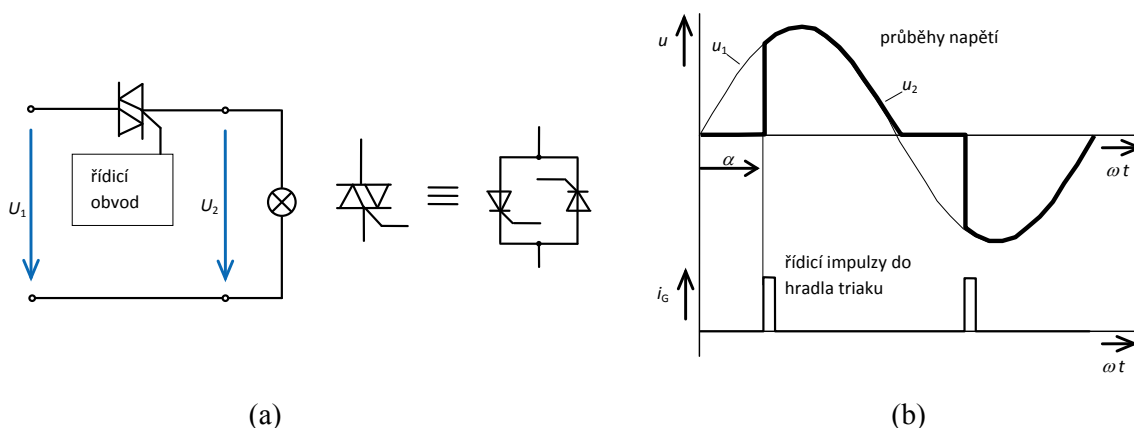
Tyto měniče mění efektivní hodnotu střídavého napětí, přičemž frekvence zůstává zachována. Základní částí tohoto měniče je polovodičový spínací prvek, který spíná střídavý proud. Bývá to triak, případně dva antiparalelně zapojené tyristory. Schéma a časové průběhy napětí jsou zobrazeny na Obr. 2.24. Princip činnosti je dobře patrný z průběhu výstupního napětí měniče na Obr. 2.24 (b).

Triak sepne v okamžiku, kdy řídící obvod pustí řídící proudový impuls do jeho hradla. Kdyby tento okamžik nastal hned v době začátku sinusové funkce, dostalo by se na výstup měniče celé vstupní napětí. Pokud triak sepne později, dostane se na výstup měniče menší část sinusovky a efektivní hodnota výstupního napětí je menší. Zpoždění sepnutí triaku vyjadřujeme takzvaným řídícím úhlem, který se obvykle značí α , viz Obr. 2.24 (b). Změnou řídícího úhlu α od 0° do 180° lze měnit efektivní hodnotu U_2 od 0 až do hodnoty U_1 .

Pro velikost efektivní hodnoty napětí U_2 při odporové zátěži platí vztah (44).

$$U_2 = U_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (44)$$

Tyto měniče se používají k regulaci výkonu u činných spotřebičů, jako žárovek (tzv. stmívače - velmi rozšířené použití) nebo některých tepelných spotřebičů, a také k řízení otáček střídavých komutátorových motorků, například v ručních vrtačkách. Konstrukce střídavého měniče může být v jednofázovém nebo trojfázovém provedení.



Obr. 2.24 (a) Schéma střídavého měniče napětí, (b) Průběh sdružených výstupních napětí

8.3 LITERATURA

Vrána V., Kolář V.: Základy polovodičové techniky, učební text VŠB-TU Ostrava, FEI, kat 452, Zář 2005.

Internet

http://fei1.vsb.cz/kat420/index_stary.html

<http://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bni%C4%8D>

<http://educon.zcu.cz>

<http://www.elektronikapc.wz.cz/en/info/usmernovace.htm>

