

ZÁKLADY POLOVODIČOVÉ TECHNIKY

Určeno pro bakalářské studijní programy na FBI

Obsah

1. Úvod

2. Polovodičové prvky

2.1. Polovodičové diody

2.2. Tyristory

2.3. Triaky

2.4. Tranzistory

3. Polovodičové měniče

3.1. Usměrňovače

3.2. Střídače

3.3. Střídavé měniče napětí

3.4. Pulzní měniče

3.5 Měniče kmitočtu

11/ 2007

Doc. Ing Václav Vrána, CSc.
Ing. Václav Kolář, PhD.

1. Úvod

Polovodičová technika pronikla do všech oblastí elektrotechniky. Následně budou uvedeny základní vlastnosti vybraných polovodičových součástek a jejich využití zejména v silnoproudé elektrotechnice.

Kromě takzvaných diskrétních polovodičových součástek, (tedy diody, tranzistory, tyristory, triaky) existují dále integrované obvody (IO). IO je součástka, která má v sobě umístěn celý obvod sestávající někdy z několika desítek, ale někdy také několika milionů součástek (tranzistorů, diod a rezistorů), mající velikost několika centimetrů. Z důvodu omezeného prostoru IO v tomto textu nebudou obsaženy.

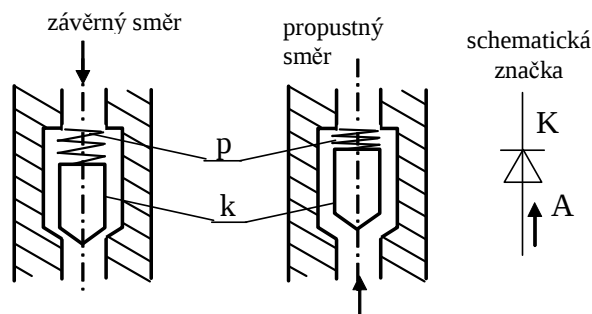
2. Polovodičové prvky

2.1 Polovodičové diody

Polovodičové diody využívají vlastností polovodičového přechodu P – N tj., vedení proudů pouze v jednom směru. Podle oblasti použití je lze rozdělit do několika základních skupin:

- Usměrňovací diody
- Zenerovy diody
- Světelné diody a fotodiody
- ostatní (Schottkyho diody, Varikapky, Tunelové diody)

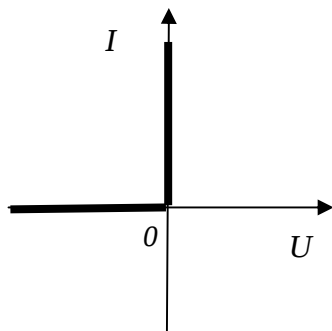
a) Usměrňovací diody tvoří nejpočetnější skupinu diod. Její schématická značka je uvedena na obr. 2-2. Dioda má dvě elektrody, anodu (A) a katodu (K). Vede proud jen jedním směrem a to od anody ke katodě. Pokud je anoda kladnější než katoda je dioda zapojena v propustném směru a diodou teče proud. V opačném případě, kdy katoda je kladnější anody, je dioda orientována



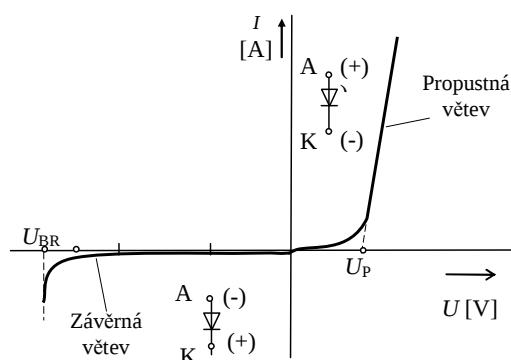
Obr.2-2 – Hydraulická analogie diody a schématická značka

v závěrném směru a proud diodou neteče. Hydraulickou analogii diody je zpětný ventil, (obr.2-2). s kuželkou „k“, která je přitlačována pružinou „P“. Působí-li tlak ve směru šipky, kuželka dosedne do sedla a kapalina neproudí. V opačném případě bude kuželka nadzvedávána proti síle pružiny ze sedla a kapalina bude ventilem proudit. Ideální dioda má v propustném směru nulový odpor a v závěrném směru nulovou vodivost.

Vlastnosti diody popisuje její voltampérová charakteristika, obr.2-3. Je to závislost velikosti proudu diodou na velikosti napětí mezi anodou a katodou.



Obr. 2-3 - ideální



Obr. 2-4 - skutečné

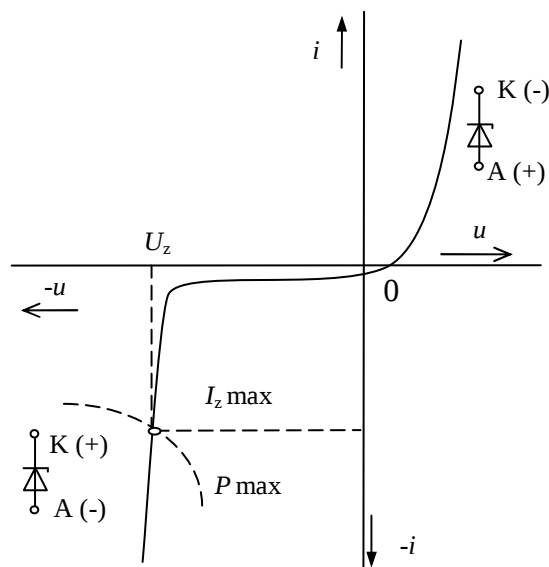
Voltampérová charakteristika diody

Při zvyšování napětí v propustném směru roste proud diodou nejdříve pozvolna až do hodnoty prahového napětí U_P . U V závěrném směru je proud velmi malý až do vysokých hodnot závěrného

napětí U_{BR} . Při hodnotě U_{BR} , nazývané průrazné (breaking), dochází k průrazu diody, velikost proudu se začne prudce zvyšovat. Tuto hodnotu by napětí v závěrném směru nemělo překročit, protože tím dochází ke zničení diody.

b) Zenerova dioda

Vhodnou technologií výroby přechodu P – N lze dosáhnout v závěrné oblasti strmého zlomu (nedestruktivního průrazu). Závěrný proud se po překročení napětí U_z (tzv. Zenerova) rychle, lineárně, zvyšuje (obr.2-5). Velikost U_z je závislá na měrném odporu výchozího polovodičového materiálu a může se pohybovat od 2 do 120 V. Zenerova dioda se používá v obvodech stabilizátorů a omezo-



Obr. 2-5 - VA charakteristika Zenerovy diody

vačů napětí

c) Kapacitní dioda – VARIKAP

Je to plošná dioda u které je kapacita P – N přechodu závislá na přiloženém napětí. Varikapy se používají v radiotechnice.

f) Fotodiody a svítivé diody

Diody využívající fotoelektrického a luminiscenčního jevu na přechodu P – N se používají v optoelektronice. Fotodiody fungují jako snímače reagující na světlo, svítivé (luminiscenční diody či LED) se často používají jako signálky, či jako součást svítících displejů.

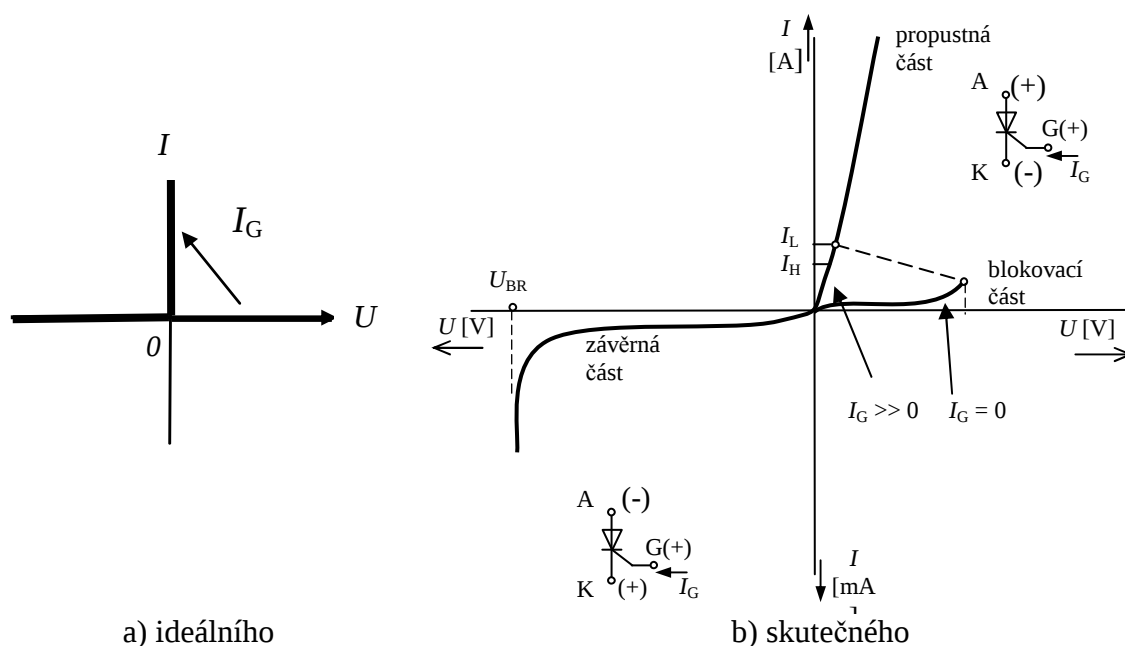
2.2 Tyristory

Tyristor je čtyřvrstvý polovodičový prvek, který mimo hlavních elektrod (katody a anody) má ještě

další, řídicí, elektrodu (G). Z hlediska funkce je tyristor řízená usměrňovací dioda a může pracovat jako spínač.

Tyristor lze sepnout proudovým impulzem do G a vypne se přerušením proudu mezi anodou a katodou (běžný tyristor se nedokáže vypnout sám, vypne se až po přerušení proudu (např i z vnějších příčin).

Vlastnosti tyristoru popisuje jeho voltampérová charakteristika V-A, obr. 2-6. Charakteristiku je možno rozdělit na tři části: závěrnou, blokovací a propustnou.



a) ideálního

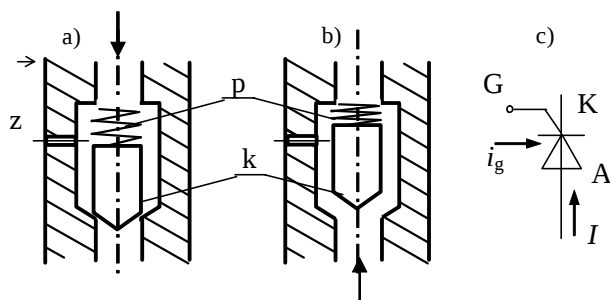
b) skutečného

Obr. 2-6 V- A charakteristika tyristoru

Vlastnosti tyristoru v oblasti závěrné části jsou shodné se závěrnou oblastí diody. Tyristorem protéká jen malý proud až do průrazné hodnoty závěrného napětí U_{BR} .

Průběh proudu mezi anodou a katodou v blokovací části charakteristiky je závislý na velikosti proudu řídicí elektrody I_G . Je-li $I_G=0$, je tyristor prakticky uzavřený. Při překročení určitého napětí mezi A a K by došlo k nežádoucímu samovolnému sepnutí tyristoru - vyznačeno na obr. 2-6 čárkovaně, pracovní bod přejde skokem na propustnou část charakteristiky.

Propustná část charakteristiky tyristoru je shodná s průběhem charakteristiky usměrňovací diody. Tyristor je sepnut dostatečně velkým proudem I_G (řádově stovky mA). Od okamžiku sepnutí nemá proud I_G na činnost tyristoru již žádný vliv. Tyristor se uzavírá jen v případě, když proud mezi A a K poklesne pod hodnotu blízkou nule.



Obr. 2-7 – Hydraulická analogie tyristoru:
a) závěrný směr, b) propustný směr, c) schematická značka

Funkci tyristoru lze objasnit na jeho hydraulické analogii zobrazené na obr. 2-7a,b.. Zpětný ventil je doplněn blokovací západkou Z. Pokud je západka vysunuta chová se ventil jako zpětný, tzn. v jednom směru propouští a v druhém je uzavřen. Pokud se západka zasune nad kuželku ventilu, a to je možné jen při uzavřeném ventilu, pak bude ventil uzavřen bez ohledu na směr působení tlaku.

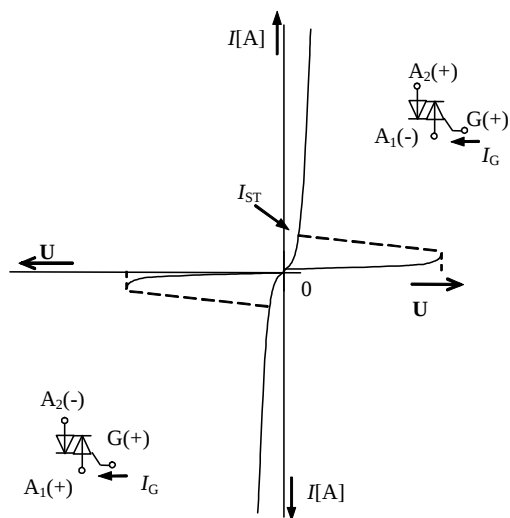
Tyristory se využívají pro bezkontaktní spínání elektrického proudu (zapínání spotřebičů apod.), k regulaci příkonu elektrického proudu (řízení osvětlení, bezztrátová regulace výkonu topení, svítidel, elektrických motorů tramvají, trolejbusů, lokomotiv apod.). Jejich výhodou je velká rychlost spínání.

Tyristory se využívají pro bezkontaktní spínání elektrického proudu (bezkontaktní zapalování, zapínání spotřebičů apod.), k regulaci příkonu elektrického proudu (řízení osvětlení, bezztrátová regulace výkonu topení, svítidel, elektrických motorů tramvají, trolejbusů, lokomotiv apod.). Jejich výhodou je velká rychlost spínání a velká proudová i napěťová zatížitelnost.

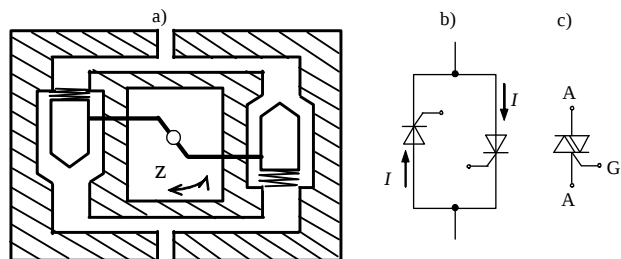
2.3 Triak

Je to pětivrstvý spínací prvek schopný vést elektrický proud oběma směry. Jeho vlastnosti popisuje voltampérová charakteristika zobrazená na obr. 2-8. Triak má vlastnosti přibližně odpovídající vlastnostem dvou antiparalerně zapojených tyristorů, obr. 2-9b u kterých jsou řídicí elektrody vhodně propojeny v jedinou. V prvním i třetím kvadrantu je vlastně blokovací a propustná část charakteristiky tyristoru.

Funkci triaku dokresluje jeho hydraulická analogie na obr.2-9a. Je to antiparalerní (protisměrné) spojení dvou řízených zpětných ventilů, jejichž blokovací západky jsou spojeny pákou tak, aby byly ovládány současně. Oblasti použití triaků jsou v podstatě shodné s tyristory. Jejich aplikace je v řadě případů jednodušší.



Obr. 2-8 – Zjednodušená VA charakteristika triaku

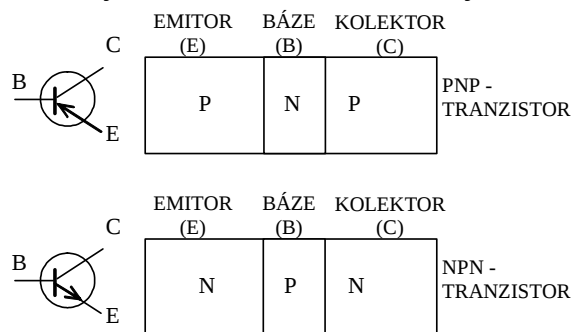


Obr.2-9 – Analogie triaku: a) hydraulická, b) pomocí dvou tyristorů, c) schematická značka

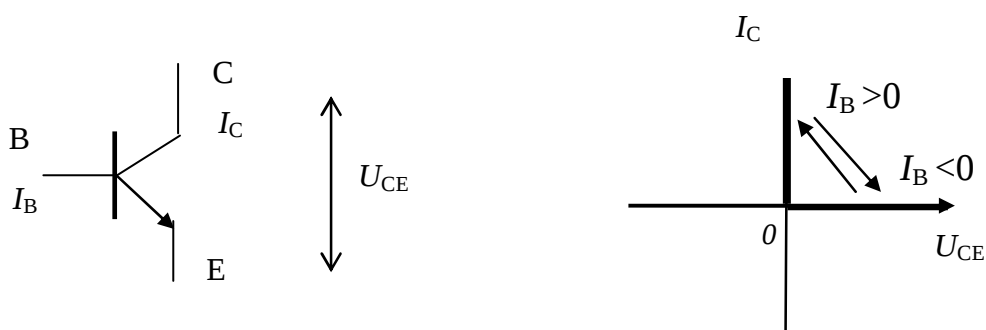
2.4 Tranzistory

Tranzistor je plně řízený polovodičový prvek, který může pracovat jako zesilovač nebo spínač. Na rozdíl od tyristoru, který zůstane sepnutý i po zániku proudu na řídící elektrodě (hradlu) je tranzistor sepnutý pouze po dobu kdy teče do řídící (báze) elektrody proud. Struktura tranzistoru se skládá se tří oblastí typu P a N, jež jsou za sebou řazeny buď ve sledu P – N – P, tj. tranzistor typu PNP, nebo N – P – N, tj. tranzistor typu NPN (obr.2-10). Vývody z jednotlivých oblastí se označují jako emitor E, báze B, kolektor C.

Podle principu funkce dělíme tranzistoru na bipolární a unipolární (řízené elektrickým polem).



Obr. 2-10 – Tranzistor PNP a NPN



Charakteristika tranzistoru

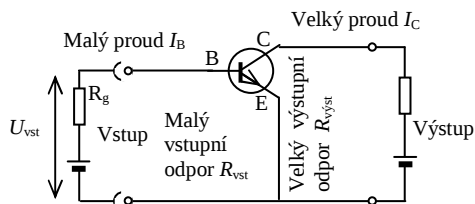
Bipolární tranzistor

Bipolární tranzistor (dále jen tranzistor) byl objeven v roce 1947 jako výsledek úsilí nahradit vákuové elektronky polovodičovým zesilovacím prvkem.

a) Základní zapojení tranzistoru

Je-li tranzistor zapojen jako zesilovač, musí mít dvě svorky na vstupní a dvě na výstupní straně. Každý ze tří vývodů tranzistorů může být vstupem i výstupem zesilovače, a proto existují tři základní zapojení tranzistoru, nazývaná zapojení se **společným emitorem** (obr.2-11), se **společnou bází**, se **společným kolektorem**.

V technické praxi se nejčastěji vyskytuje zapojení se společným emitorem (obr.2-11). Vstupní signál se u něj přivádí mezi bázi a emitor, výstupní signál se odebírá v obvodu kolektor-emitor. Malý vstupní proud (proud báze I_B) vyvolá velký výstupní proud kolektoru I_C , malá změna vstupního proudu vyvolá velkou změnu výstupního proudu. Protože proud báze bývá u moderních tranzistorů 100 až 1000 krát menší než proud emitoru, je stejnosměrný proudový zesilovací činitel takových tranzistorů



Obr. 2-11 – Zapojení tranzistoru se společným emitorem

$$h_{21E} = I_C/I_B = 100 \text{ až } 1000$$

Častěji je definován pro malé změny proudů jako

$$\text{jejich podíl: } h_{21E} = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

Druhým nejpoužívanějším zapojením je zapojení se **společným kolektorem**, tzv. emitorový sledovač. Toto zapojení je typické svým vysokým vstupním odporem, přibližně jednotkovým napěťovým zesíle-

ním a velkým zesílením proudovým. Používá se především do vstupních dílů zařízení u kterých vyžadujeme vysoký vstupní odpor.

Zapojení se **společnou bází** se využívá ve výjimečných případech.

c) Základní parametry tranzistoru

Pro provoz tranzistorů jsou důležité jeho jmenovité a maximálně přípustné hodnoty napětí a proudů jednotlivých elektrod.

d) Konstrukce tranzistoru

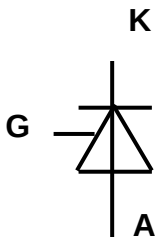
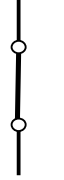
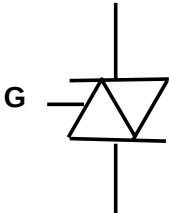
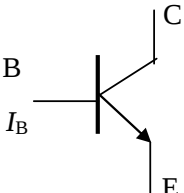
Vlastní systém tranzistoru vyráběný především planární technologií se umísťuje do vhodného kovového nebo plastického pouzdra. U výkonových tranzistorů se systém upevňuje pro snadný odvod tepla na silnější základovou desku. Ta tvoří současně vývod kolektoru a je konstruována většinou pro uchycení na větší kovovou plochu – chladič.

Unipolární tranzistor

U těchto tranzistorů proud tvořen pouze nosiči jednoho typu. Podle principu činnosti jsou nazývány **FET** – tranzistory řízené (elektrickým) polem.

Tranzistory řízené polem se používají v obvodech, které vyžadují vysoký vstupní odpor zesilovacího prvku, ve spínačích, zdrojích impulsů, jako napěťově řízené rezistory a pro celou řadu aplikací elektroniky.

Tabulka srovnání spínacích vlastností jednotlivých polovodičových prvků

Polovodičová součástka	Stav spínacího prvku	Podmínka stavu spínače
	 VYP  ZAP	Napětí na diodě je: ZAP: v propustném směru VYP: v nepropustném (závěrném) směru
	 VYP  ZAP	1. Napětí na tyristoru je:: ZAP: v propustném směru VYP: v nepropustném (závěrném) směru 2. ZAP: $I_G > I_{Gmin}$; nebo $I_A > 0$ VYP: $I_G = 0$; $I_A \approx 0$
	 VYP  ZAP	ZAP: $I_G > I_{Gmin}$; nebo $I_A > 0$ VYP: $I_G = 0$; $I_A \approx 0$
	 VYP  ZAP	ZAP: 1. Správná polarita přiváděných napětí dle typu (PNP, NPN) 2. : $I_B \geq I_{Bmin}$ ($I_B > 0$) VYP: $I_B < I_{Bmin}$ ($I_B = 0$)

3. Polovodičové měniče

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

Polovodičový měnič je statické zařízení, které využívá ke své činnosti spínacích vlastností polovodičových prvků. 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:

Druh měniče	Vstupní veličina	Výstupní veličina (u řízených var.)
- <i>usměrňovače</i>	Střídavá (AC) s U_1, f_1	Stejnosemnná (DC) s U_2 (pulzující)
- <i>střídače</i>	Stejnosemnná (DC) s U_1	Střídavá (AC) s f_2, U_2
- <i>fázově řízené měniče střídavého napětí (softstartéry)</i>	Střídavá (AC) s U_1, f_1	Střídavá (AC) U_2, f_1
- <i>pulsní měniče,</i>	Stejnosemnná (DC)	Stejnosemnná (DC) (pulzní)
- <i>měníče kmitočtu</i>	Střídavá (AC) s U_1, f_1	Střídavá (AC) s f_2, U_2

3.1. Usměrňovače

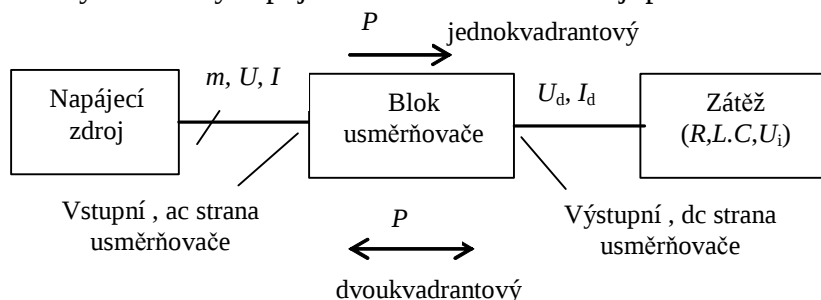
Jedná se o druh výkonového polovodičového měniče používaného k přeměně střídavého proudu na stejnosměrný (AC/DC). Tento druh provozní jednotky elektronické výkonové přeměny sestává z následujících bloků:

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. 3-1 Sestava polovodičového usměrňovače

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 (stejnosemnných) veličin:

- neřízené, osazené neřiditelnými polovodičovými spínacími součástkami - diodami;
- 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)

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

Jeho okamžitá hodnota u_d se vyznačuje střídavou složkou nasuperponovanou na jeho střední hodnotu U_d . Při 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 popř. vícepulzního zapojení.

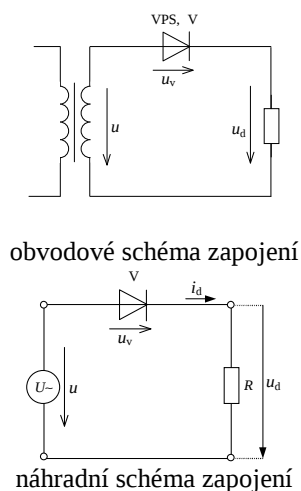
Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno U_d je závislá na zapojení usměrňovače a

Usměrněný proud

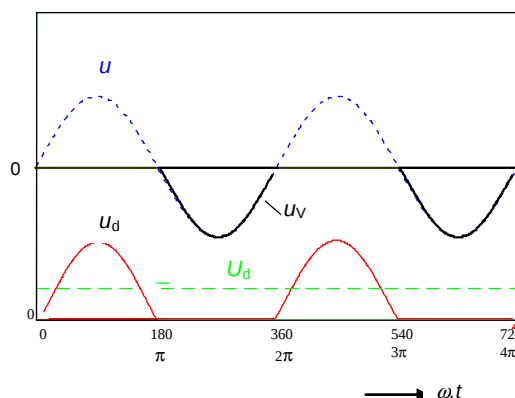
Jeho okamžitá hodnota i_d je dána průběhem usměrněného napětí u_d a druhem zátěže (R , L , C popř. protinapětí U_i .u napájení motoru). Usměrněný proud bude zvlněný a pokud v průběhu periody vstupního napětí nedosáhne nulové hodnoty nazývá se jako nepřerušovaný (spojitý).

3.1.1 Příklady provedení neřízených usměrňovačů v jednocestném (uzlovém) zapojení

Jednofázový jednopulsní jednocestný(uzlový) usměrňovač



a) obvodové a náhradní schéma zapojení



b) časové průběhy veličin

obr. 3-2. Jednopulsní usměrňovač s odporovou zátěží.

Jako VPS je zde použito diody ozn. V (ventil), která 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 napětím $u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t)$.

Dioda je v propustném stavu sepnuta - napětí zdroje a jemu úměrný proud se objeví na zátěži. Při poklesu proudu na nulu se dioda dostane do závěrného stavu, tedy vypíná. Plné napětí zdroje se objevuje na diodě, kterou polarizuje v závěrném směru.

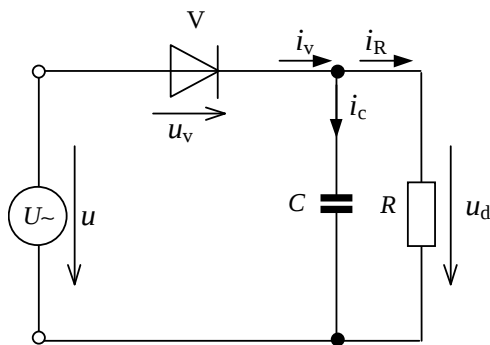
Střední hodnotu stejnosměrného (usměrněného) napětí naprázdno (při ozn. $\omega t = \theta$)

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

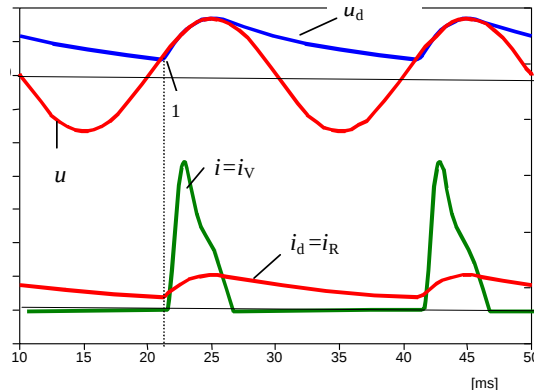
Vstupní proud (jenž je v tomto případě zátěže úměrný i výstupnímu dc napětí) jednopulsního neřízeného usměrňovače má neharmonický (pulzující) průběh viz. obr..

Odporová zátěž s kondenzátorem na výstupní straně

K vyhlazení pulzujícího průběhu napětí u_d se často používá kondenzátor C , který je zapojen na výstupní straně usměrňovače tj. paralelně k odporové zátěži R (obr. 3-3).



a) Náhradní schéma zapojení



b) Časové průběhy veličin

Obr. 3-3. Jednopulsní usměrňovač s RC zátěží.

Ventilem V začne téci proud i_v , je-li $u > u_d$ (dioda je polarizována v propustném směru, (v okamžiku ozn. bodem 1) a na zátěži se objeví napětí zdroje. Za vrcholem kladné půlvlny dochází k poklesu napětí zdroje a od okamžiku kdy $u < u_d$ se kondenzátor začne vybíjet do odporu s průběhem podle exponenciály. Současně s poklesem napětí klesá i celkový proud tekoucí odporem. Od okamžiku, kdy proud diodou klesl k nulové hodnotě (ventil vypnul) dodává kondenzátor celý proud do odporu $|i_c| = |i_R|$. Obvod RC je oddělen od napájecího zdroje.

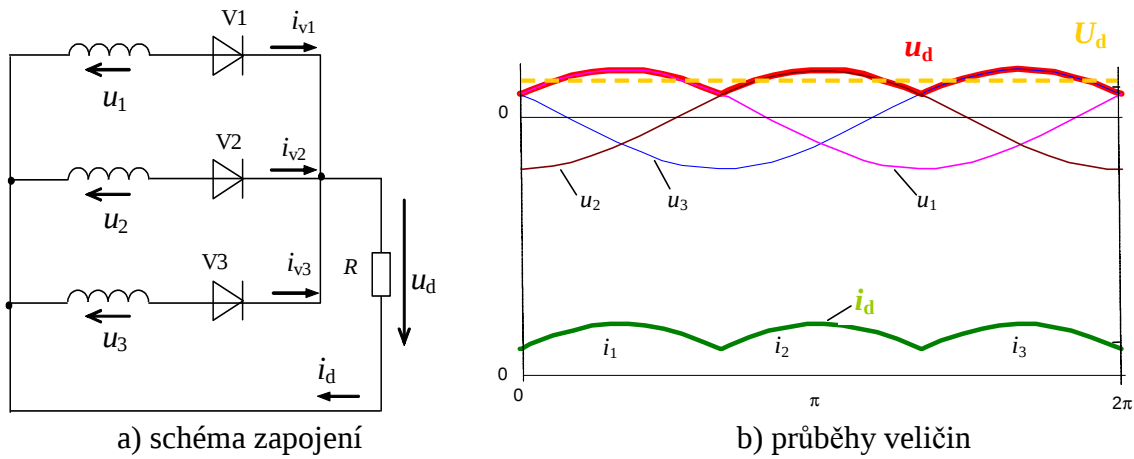
Při opětovném splnění podmínky $u > u_d$ a ventil opět sepne.

Z obr. 3-3 je zřejmé vyhlazení průběhu usměrněného napětí u_d . Proud odebíraný z napájecího ac zdroje i_v je neharmonický (má tvar strmého impulzu) a neodpovídá napětí zdroje (jedná se o nelineární zátěž – neplatí zde Ohmův zákon). Z matematického rozkladu tohoto průběhu na harmonické průběhy obdržíme velké množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí (způsobují jeho zkreslení).

Třífázový trojpulzní jednocestný (uzlový) usměrňovač.

Usměrňovač je napájen z trojfázové čtyřvodičové soustavy (s vyvedeným uzlem). Napájecí fázová napětí u_1, u_2, u_3 tvoří trojfázovou souměrnou soustavu s vzájemným fázovým posunem $2\pi/3$. Pro jednoduchost je následně proveden rozbor vlastností pro odporovou zátěž.

Kladné hodnoty napětí vytvářejí v příslušné větvi proud v přímém směru polovodičové součástky. V sepnutém (vodivém) stavu je vždy ta dioda, která je připojena k fázovému napětí s největší okamžitou hodnotou.



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. Střední hodnota usměrněného napětí

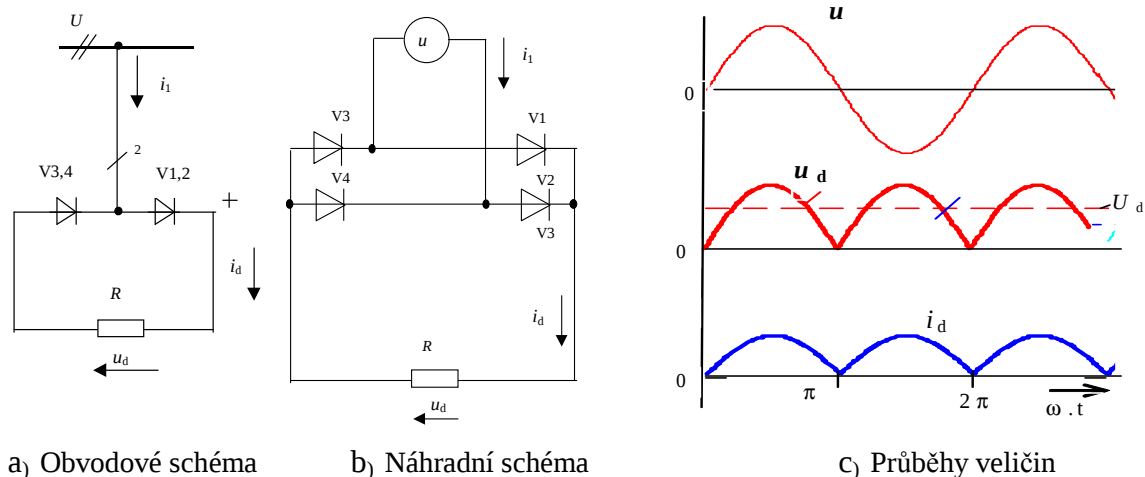
$$U_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\theta) d(\theta) = \frac{3 \cdot \sqrt{6}}{2 \cdot \pi} \cdot U = \mathbf{1,17 \cdot U} \quad ,$$

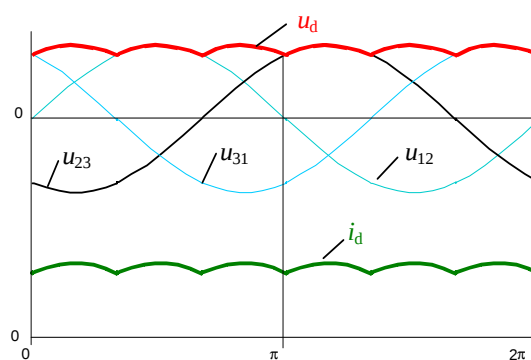
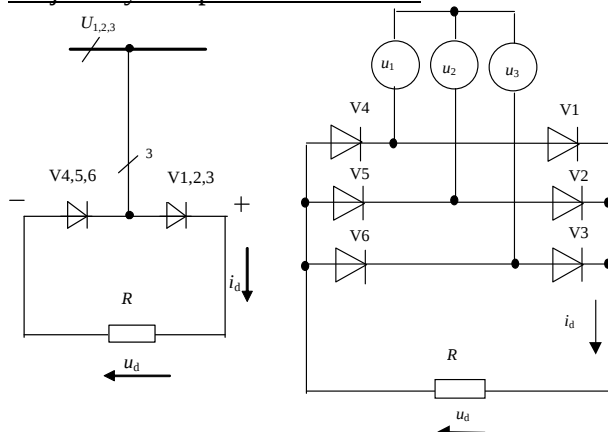
3.1.2 Příklady provedení neřízených usměrňovačů v můstkovém zapojení

Usměrňovač v můstkovém zapojení je v podstatě sériové spojení dvou uzlových usměrňovačů. Prakticky se nejčastěji používají jen jednofázová a trojfázová provedení těchto usměrňovačů. 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° . Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno

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

Jednofázový dvoupulzní usměrňovač



Trojfázový šestipulzní usměrňovač

a) Obvodové schéma

b) Náhradní schéma

c) Průběhy veličin

Obr. 3-6 Šestipulzní uzlové zapojení

Každý ventil povede za dobu jedné periody proud v intervalu 120° a dvojice v intervalu 60° .
Střední hodnota usměrněného napětí naprázdno

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

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

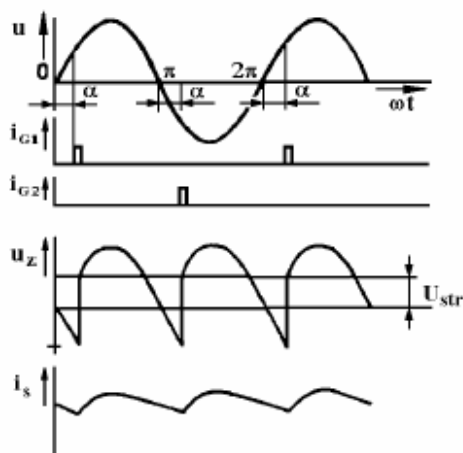
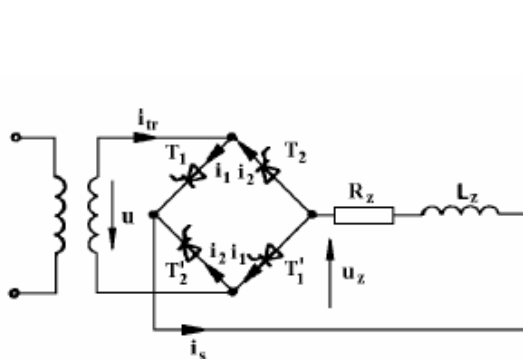
U_f je efektivní hodnota fázového napětí napájecí sítě ($U_f = U_1 = U_2 = U_3$)

Proud odebíraný usměrňovačem z napájecí sítě má neharmonický průběh, obsahuje množství harmonických složek, které negativně ovlivňují kvalitu napájecího napětí. Skutečný tvar proudu je závislý na druhu a parametrech zátěže (L , C , U_i).

Vlastnosti usměrňovače v závislosti na proudu jsou dány tzv. zatěžovací charakteristikou $U_d = f(I_d)$, která je objasněna v následující kapitole - viz. obr. 3-8 pro úhel řízení $\alpha = 0$.

3.1.3 Fázově řízené usměrňovače

Při náhradě diod v usměrňovačích fázově řízenými tyristory, dostáváme *řízený usměrňovač*, Tyristory sepnou až tehdy, když dostanou v kladné půlperiodě se zpožděním α_f zapínací impuls. Úhel α_f se nazývá *úhlem řízení (řídící úhel)*. 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.

Příklad jednofázového řízeného usměrňovače v můstkovém zapojení

a, Schéma zapojení

b, Časové průběhy veličin

Obr.3-7 Jednofázový řízený usměrňovač v můstkovém zapojení

Při sepnutí dvojice tyristorů ozn. T_1 teče proud obvodem stejně jako v případě diodového usměrňovače. Po přechodu napájecího napětí do záporné půlperiody ještě nedostává dvojice tyristorů T_2 zapínací impulzy. Vlivem indukčnosti zátěže L_Z protéká usměrněný proud i_s nadále původním směrem a to i proti napájecímu napětí u , které už změnilo svoji polaritu. Na zátěži se objeví záporné napětí a to až do okamžiku $\omega \cdot t = \pi + \alpha_f$, kdy buď proud klesne k nule, nebo sepnou dvojice tyristorů ozn. T_2 a na zátěži se objeví napětí v kladném směru.

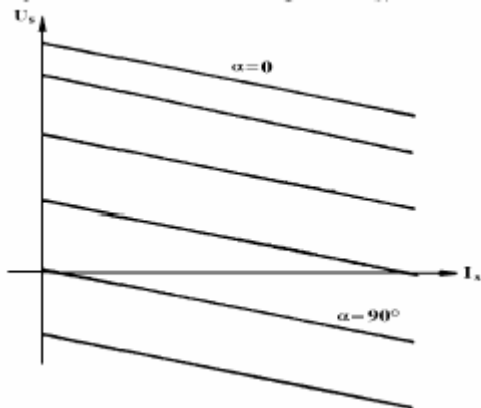
Změnou úhlu řízení α se tedy mění velikost střední hodnoty usměrněného napětí $U_{str} = U_{d\alpha}$,

$$U_{d\alpha} \cong U_{d0} \cdot \cos \alpha_f - R_i \cdot I_d - \Delta U_v,$$

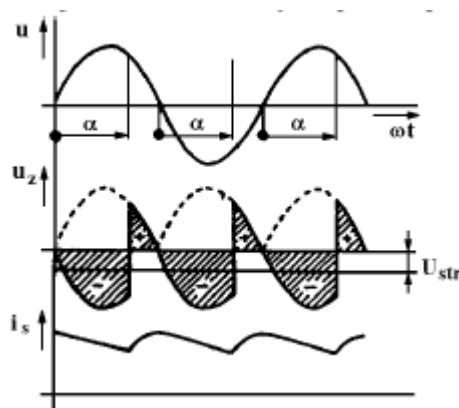
kde R_i představuje tzv. vnitřní odpor usměrňovače způsobující úbytek napětí, jehož velikost je závislá na parametrech napájecí sítě (X_L) a zapojení usměrňovače,

ΔU_v úbytek na ventilu, závislý na jeho druhu (křemík cca 0,7 V),

Závislost střední hodnoty usměrněného napětí U_{str} na úhlu řízení α a zatížení (I_d) je na obr.3-8.



Obr.3-8 Závislost výstupního napětí na úhlu řízení a zatížení (zatěžovací charakteristika).



Obr.3-9 Časové průběhy v invertorovém režimu řízeného usměrňovače ($L_Z \gg$)

Ze vztahu pro $U_{d\alpha}$ vyplývá, že při úhlu $\alpha_f = 0$ je výstupní napětí maximální a je stejné jako u neřízeného usměrňovače. Při úhlu $\alpha_f = \pi/2$ je výstupní napětí nulové, protože $\cos \pi/2 = 0$. Pro úhly řízení $\alpha_f > \pi/2$ je $\cos \alpha_f < 0$, výstupní napětí je záporné a usměrňovač pracuje v tzv. *invertorovém režimu* – obr.3-9. Výkon usměrňovače je záporný, usměrněný proud teče stále původním směrem), takže *stejnoseměrná* energie zátěže (nahromaděná v indukčnosti) se invertuje na *střídavou* a dodává se do napájecího zdroje. Tím je možné v případě napájení ss motoru tento elektricky brzdit. Při tom se mechanická energie přemění v motoru na energii elektrickou (generátorický brzdový režim) a tato se rekuperuje zpět do střídavé napájecí sítě.

3.2. Střídače

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

Z hlediska tvaru výstupního napětí mohou být střídače s

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

Základem každého střídače jsou řízené polovodičové spínače, může to být buďto **tranzistor** –pro výkony do řádu stovek kW, nebo **tyristor** pro výkony větší. Velkou výhodou tranzistorů je, že se dokážou samy vypnout (tyristor potřebuje vypínací obvod) a že 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.

Jednofázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Princip lze vysvětlit na **jednofázovém můstkovém střídači**, jehož schéma je na obrázku 3-10 (čárkovaně jsou zde zobrazeny zpětné - nulové diody, které se uplatní pouze v případě obsahuje-li

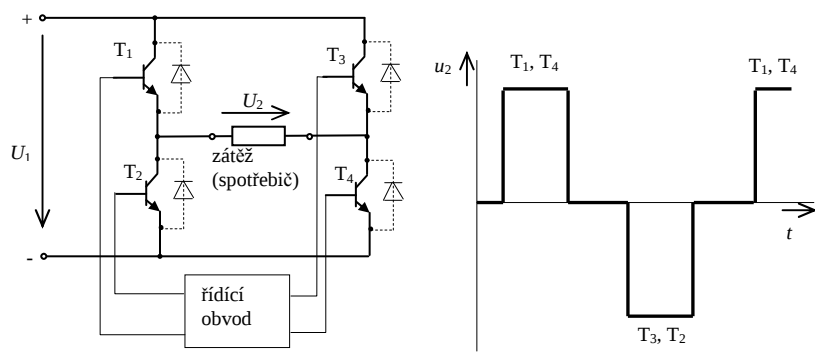
zátěž indukčnost (bez diod by došlo při vypnutí tranzistoru k jeho zničení vysokým indukovaným napětím).

V grafu výstupního napětí je na počátku nulové napětí, to není sepnut žádný tranzistor. Pak 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. Pak 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 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.)

Při chodu střídače nesmějí sepnout zároveň tranzistory T_1 a T_2 , nebo T_3 a T_4 , to by byl zkrat.



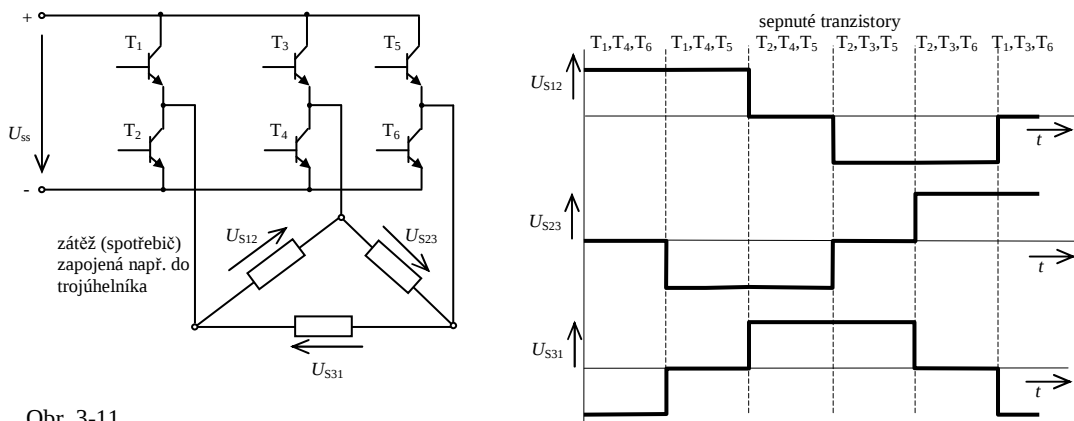
Obr. 3-10 Schéma jednofázového můstkového střídače a průběh výstupního napětí

Trojfázový můstkový střídač s obdélníkovým napětím

Střídače tohoto typu se ale nejčastěji konstruují jako trojfázové. Zjednodušené schéma a průběh výstupního napětí trojfázového střídače v můstkovém zapojení je na obrázku 3-11.

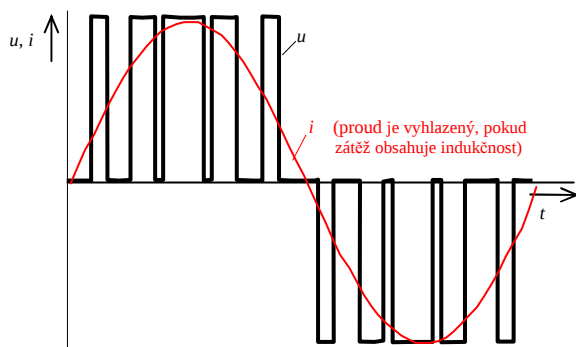
V obrázku je nad grafy výstupních napětí napsáno v kterém okamžiku je který tranzistor sepnutý (takzvaný spínací diagram). Můžeme si představit že spínáním jednotlivých tranzistorů jsou výstupní svorky střídače připojovány buďto na kladné, nebo záporné napětí. Rozdíl mezi napětím dvou sousedních výstupních svorek pak vytváří sdružené napětí.

V praxi jsou tyto trojfázové střídače většinou vyráběny s pulsně šířkovou modulací. Pro vysvětlení principu ale stačí zobrazit průběhy bez této modulace jak jsou na obrázku 3-11.



Obr. 3-11

Zjednodušené schéma trojfázového střídače



Obr. 3-12 Princip pulsně šířkové modulace

Pulsně šířková modulace u střídačů v můstkovém zapojení

V případě, že nechceme mít na výstupu střídače obdélníkový průběh, ale průběh více podobný sinusovce, můžeme použít jiný způsob spínání tranzistorů, takzvanou „Pulsně šířkovou modulaci“. Průběhy napětí a proudu v tomto případě jsou na obr.3-12. Napětí je sice stále obdélníkové, k tomu značně „rozsekané“, ale proud bude v případě odporově induktivní zátěže (např. motoru) téměř sinusový. (Indukčnost zátěže funguje jako

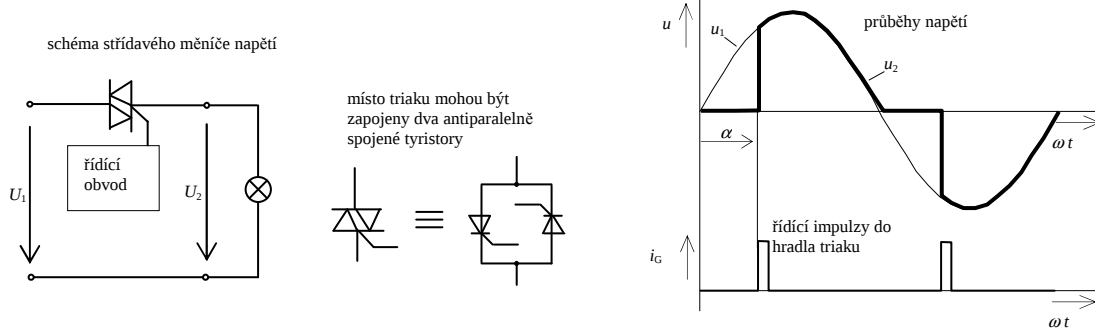
setrvačnost vůči proudu a ten je potom vyhlazený.) S tímto způsobem spínání pracuje většina dnešních střídačů.

Praktické použití střídačů: Na mobilních prostředcích (automobily, přepravní vozíky, lodě atd) a v elektrické trakci (tramvaje, trolejbusy, vlaky) jako akční členy k řízení rychlosti (otáček střídavých motorů), popř. jako komponent měniče kmitočtu (viz dále)

3.3. Střídavé měniče napětí

Tyto měniče mění efektivní hodnotu střídavého napětí, přičemž kmitočet zůstává zachován. 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 na obrázku 3-13.



Obr. 3-13 Střídavý měnič napětí a průběhy vstupního a výstupního napětí

Triak sepne v okamžiku, kdy řídící obvod pustí řídící proudový impuls do jeho hradla. Kdyby to nastalo hned v okamžiku kdy sinusovka začíná, 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 řídícím úhlem α . Změnou α od 0° do 180° lze měnit efektivní hodnotu výstupního napětí U_2 od 0 až do hodnoty U_1 . (Čím větší α , tím menší U_2 .)

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

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

Tyto měniče se používají k řízení výkonu u činných spotřebičů, jako žárovek (takzvané stmívače - velmi rozšířené použití) nebo některých tepelných spotřebičů a také k řízení otáček střídavých komutátorových motorků, například v ručních vrtačkách.

Střídavé měniče se mohou konstruovat jako jednofázové, i trojfázové. Trojfázové provedení se často používá k řízenému rozběhu asynchronních motorů – tzv. softstartéry.

3.4 Pulzní měniče (PM)

využívají ke své funkci periodicky spínaný polovodičový spínač a jsou používány pro tyto funkce:

- snižování, zvyšování, snižování i zvyšování dc napětí
- pulzní řízení odporu (rezistoru).

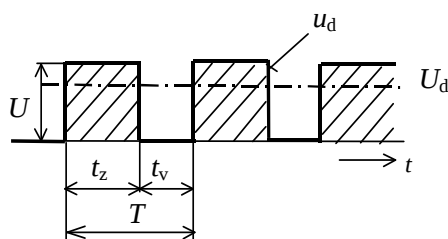
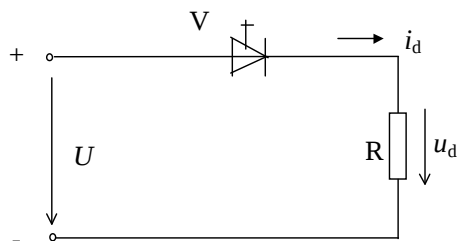
Pulzní měnič ke snižování dc napětí

Jeho vstupní veličinou je stejnosměrné napětí, výstupní veličinou je proměnlivá střední hodnota pulzujícího stejnosměrného napětí.

Způsoby řízení pulzních měničů

- s konstantním kmitočtem spínání [$z = f(t_z)$, $T = \text{konst.}$]
- dvouhodnotové [$I_{\text{dmin}} < I_d < I_{\text{dmax}}$]
- s konstantním dobou zapnutí [$z = f(T)$, $t_z = \text{konst.}$]

Principiální zapojení pulzního spínače s čistě odporovou zátěží je na obr. 3-14, kde V znázorňuje polovodičový spínací prvek (tyristorový, tranzistorový spínač).



a) schema zapojení,
obr.3-14 Pulsní měnič s odporovou zátěží

b) průběh napětí na zátěži.

Je-li spínač V sepnut, protéká obvodem proud i_d a na zátěži bude napětí $u_d = R \cdot i_d$.

Je-li spínač rozepnut, obvodem neteče proud a na zátěži je nulové napětí. $u_d = 0$

Při periodickém spínání se na zátěži objeví pulsy o amplitudě U a o délce t_z (doba zapnutí spínače). Napěťové pulsy na výstupu jsou od sebe odděleny intervaly bez napětí o délce t_v .

Průběh se opakuje s periodou $T = t_z + t_v = 1/f_{sp}$, která je nepřímo úměrná kmitočtu spínání pulzního měniče f_{sp} .

Ideální střední hodnota napětí na zátěži je dána vztahem: $U_{di} = \frac{t_z}{T} \cdot U = z \cdot U$,

kde z je poměrná doba sepnutí, která se pohybuje od nuly až do jedné. Z tohoto důvodu můžeme napětí na zátěži řídit v intervalu od nuly až do U , tedy na hodnotu nižší než je napájecí napětí.

Praktické použití. Na mobilních prostředcích (automobily, přepravní vozíky, lodě atd) a v elektrické trakci (tramvaje, trolejbusy, vlaky) jako akční členy k řízení rychlosti (otáček stejnosměrných motorů), v záložních zdrojích nepřerušovaného napájení v tzv. UPS.

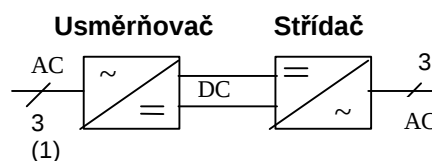
3.5 Měníče kmitočtu (MK)

Vstupní veličinou je střídavé napájecí napětí s kmitočtem 50 Hz. Výstupní veličinou je střídavé napětí s přibližně sinusovým průběhem a s proměnlivým kmitočtem $f = \text{var.}$ s možností dosažení i proměnlivé hodnoty výstupního napětí v rozmezí $0 \div U_s$.

Podle způsobu přeměny veličin a provedení dělíme MK na:

- **Přímé**, které lze dále dělit na:
 - **cyklokonvertory**, které pomocí antiparalelního zapojení řízených usměrňovačů střídavě (dle požadovaného výstupního kmitočtu) připojují jednotlivé měniče, čímž se na výstupu dosáhne střídavého napětí požadovaného kmitočtu (max. cca 35 Hz);
 - **maticové měniče**, které na základě většího počtu polovodičových spínačů a vhodného algoritmu dosáhnou potřebných hodnot výstupních veličin.
- **Nepřímé**, které obsahují usměrňovač a střídač. V usměrňovači dochází k přeměně střídavých veličin na stejnosměrné.

Ve střídači dochází k řízené přeměně stejnosměrné energie na střídavou s možnostmi řízení výstupních veličin. Střídač umožní obousměrný přenos energie.



Obr. 3-15 Struktura nepřímého MK

Praktické použití. Jako akční členy k řízení rychlosti (otáček motorů) a pro napájení dalších zařízení požadující jiný kmitočet (zpravidla) vyšší