USMĚRŇOVAČE

Usměrňovač je polovodičový měnič, který mění střídavý proud na stejnosměrný. Běžně patří mezi měniče s vnější komutací. Vzhledem k masivnímu nárůstu nepřímých měničů kmitočtu využití samotných usměrňovačů klesá. Usměrňovače jsou ale také součástí nepřímého měniče kmitočtu. Zejména z tohoto důvodu je třeba jim věnovat patřičnou pozornost.

Usměrňovače lze dělit dle několika hledisek:

a) dle řízení:	řízené
	neřízené
b) dle počtu fází:	jednofázové
	dvojfázové
	trojfázové
	m-fázové
c) dle zapojení:	uzlové
	můstkové
d) dle toku energie:	energeticky jednosměrné
	energeticky dvousměrné

Zdrojem střídavého napětí pro usměrňovač je zpravidla střídavá rozvodná síť. Usměrňovač je k ní připojen buď přímo (u měničů kmitočtu), přes transformátor (klasické řízené usměrňovače), nebo přes tlumivku (měnič kmitočtu, usměrňovač).

1. Usměrněné napětí a proud, vliv zátěže

Průběhy usměrněného napětí se vyznačují střídavou složkou u_σ superponovanou na jeho střední hodnotu U_d. To je dáno vlastností usměrňovače, který vybere ze střídavého napájecího napětí jen takovou část, aby napětí na zátěži bylo stejnosměrné. Okamžitá hodnota usměrněné veličiny se označuje indexem d (directed - usměrněný). Pak u_d je okamžitá hodnota usměrněného napětí, i_d je okamžitá hodnota usměrněného proudu. Průběh i_d je určen průběhem u_d a zátěží (charakterem a velikostí).

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni, reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Mezi základní typy zátěží můžeme považovat:

a) odporová zátěž (R) – žárovky, el. odporové pece,
b) kapacitní zátěž (C,R) – běžné napájecí zdroje spotřební elektrotechniky a elektroniky, meziobvod měniče kmitočtu – obvykle se jedná o zátěž RC,
c) motorická zátěž (R,L,U_i) – nejčastěji používaná zátěž v elektrických pohonech, U_i je indukované napětí.

Vliv indukčnosti zátěže:

Pro obecné odvození uvažujme zátěž **R,L,U$_i$** se zátěží stejnosměrný motor. Po připojení zátěže na usměrňovač narůstá proud až do ustáleného stavu. Z obrázku vyplývá, že usměrněný proud je rovněž zvlněný. V ustáleném stavu platí:

$$u_d = U_d + u_\sigma$$

$$i_d = I_d + i_\sigma$$

kde u_σ , i_σ jsou střídavé složky průběhu u_d, i_d . Pro stejnosměrnou složku (střední hodnotu) platí:

$$I_d = \frac{U_d - U_i}{R}$$

Protože musí být $I_d > 0$ (proud v polovodiči), musí být $U_d \geq U_i$

Pro střídavé složky pak platí:

$$I_{\sigma h} = \frac{U_{\sigma h}}{\sqrt{R^2 + (\omega_h L)^2}},$$

kde index **h** značí řád harmonické příslušné efektivní hodnoty proudu či napětí. Ze vztahu vyplývá, že jestliže je v obvodu zapojena velká indukčnost $L \to \infty$, je $I_{\sigma h} \to 0$, tzn. obvod je ideálně vyhlazený. Reálné typy zátěží obsahují většinou vždy určitou hodnotu L. Ta se do obvodu usměrňovače často připojuje právě za účelem snížení střídavé složky proudu.

Vliv kondenzátoru zátěže:

Napětí u_d, které je u usměrňovače na výstupu zátěže je značně zvlněné, což u mnohých spotřebičů je velmi nepříznivé pro jejich činnost. Zejména to platí u napájecích zdrojů. Vyrovnanější (vyhlazenější) průběh usměrněného napětí se docílí připojením filtru na stejnosměrnou stranu. Nejjednoduššímu filtrem napětí je kondenzátor připojený paralelně k zátěži. Při nárůstu napětí se kondenzátor nabíjí. Při poklesu napětí se vybíjí přes zátěž. Kondenzátor tím zároveň zvyšuje střední hodnotu usměrněného napětí. Ve výkonové elektronice se kapacity využívají ve stejnosměrných meziobvodech měničů kmitočtu (s napěťovým střídačem).

2. Neřízené usměrňovače

U neřízených usměrňovačů nelze provádět změny velikosti výstupního napětí či proudu. Neřízené usměrňovače jsou osazeny diodami a změnit výstupní napětí nebo proud lze jen mimo vlastní usměrňovač (např. změnou napájecího napětí). Jejich význam je v napájecích zdrojích pro malé spotřebiče, ve výkonové elektronice pak jako součást nepřímých měničů kmitočtu se stejnosměrným napěťovým meziobvodem.

V následujících obrázcích jsou uvedena schémata zapojení používaných usměrňovačů a průběhy napětí a proudů v obvodu. Důležitá je též znalost střední hodnoty usměrněného napětí U_d.

Jednofázový usměrňovač se skládá pouze z jedné polovodičové součástky (diody). Je napájen jednofázovým napětím a v praxi se používá velmi málo. Pro jeho jednoduchost a obecný význam v měničích bude uveden více popis tohoto usměrňovače a děje, které v něm probíhají.

Odporová zátěž (R)

Zdroj napětí má sinusový průběh o amplitudě U_m a efektivní hodnotě U, přičemž platí $U_m = \sqrt{2}U$

Pro časový průběh napětí zdroje můžeme napsat: $u(t) = \sqrt{2}U.\sin \omega t$.

Protože obvod obsahuje jedinou diodu, vyskytují se pouze dva takty vedení:

Dioda vede – při zanedbání úbytku napětí na diodě pltí pro časové průběhy napětí a proudu ve stejnosměrném obvodu (na zátěži):

$$u_d = u = \sqrt{2}\sin \omega t \qquad i_d = \frac{U}{R} = \frac{\sqrt{2}U.\sin \omega t}{R} = \sqrt{2}I \sin \omega t$$

Takt končí v okamžiku, kdy proud klesne k nule.

Dioda nevede – do závěrného stavu se dostává v okamžiku, kdy se na ní objevuje záporné napětí. To se stává v druhé půlperiodě záporného napětí.

Platí:

$$i_1 = i_d = 0 \qquad u_d = R.i_d = 0 \qquad u_v = u = \sqrt{2}.\sin \omega t$$

Pro praxi je důležitá střední hodnota usměrněného napětí U_d:

$$U_d = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \sqrt{2}U.\sin \omega t = \frac{\sqrt{2}U}{\pi} = 0.45.U$$

Odporově – induktivní zátěž (RL)

Připojená indukčnost způsobí, že při poklesu napájecího napětí (**u)** k nule nedojde k vypnutí diody. Energie, nahromaděná v indukčnosti se postupně vybíjí[1]. Dioda vypíná v okamžiku, kdy je proud nulový. Znamená to, že okamžitá hodnota napětí na zátěži je v určitých částech vedení diody záporná. Proud vždy zůstává kladný. Rovněž střední hodnota usměrněného napětí je nižší.

Zátěž odporově – induktivní s protinapětím (RLU_i)

Proud, který obvodem po otevření diody začne protékat, má nyní tři složky:

- složku ustáleného střídavého proudu,
- složku stejnosměrnou exponenciálně zanikající,
- složku stejnosměrnou exponenciálně narůstající na hodnotu U_i/R, vyvolanou

[1] Za ucelenou periodu se magnetický tok ani energie v indukčnosti nehromadí.

protinapětím, které působí jako aktivní napětí v obvodu zátěže.

Ukončení vedení diody nastává opět až v okamžiku, kdy proud klesne na nulu. Na rozdíl od předchozích případů je na zátěží při vypnuté diodě napětí U_i.

Kapacitní zátěž[2] (CR)

Na rozdíl od indukčnosti umožňuje kondenzátor vyhlazení napětí na zátěži. Nepříznivým důsledkem použití kondenzátoru je průběh proudu, odebíraný ze zdroje. To vede ke vzniku harmonických proudů a s tím spojených dalších nepříznivých jevů.

Dvojfázový usměrňovač v uzlovém spojení[3] sestává ze dvou diod a speciálního transformátoru, jehož sekundární vinutí má vyvedenu odbočku ze středu. Na tuto odbočku je připojen jeden vývod zátěže. Pak se transformátor jeví jako dva zdroje napětí s fázovým posuvem 180^0. Ve vodivém stavu může být proto pouze jedna dioda. Porovnáním obrázků jednopulzního a dvojpulzního usměrňovače je patrné, že jednofázový usměrňovač se skládá ze dvou jednopulzních. Průběhy napětí i proudů budou tedy superpozicí průběhů dvou jednopulzních usměrňovačů posunutých o 180. Rovněž střední hodnota usměrněného napětí bude dvojnásobná.

c) Jednofázový neřízený usměrňovač v můstkovém spojení

Můstková spojení[4] jsou dnes v praxi nejvíce používaná. Důvodem je menší zvlnění napětí na zátěži. Současně není zapotřebí speciální transformátor. Nutnost použití

d) Trojfázový neřízený usměrňovač v uzlovém spojení

Pro usměrnění větších výkonů se používají třífázové usměrňovače. Nejjednodušším zapojením je třípulzní uzlové spojení. Princip práce je velmi jednoduchý – ze součástek D_1, D_2, D_3 může vést pouze ta dioda, která má kladné napětí. U neří-

[2] Obdobně jako u indukčnosti neexistuje čistě kapacitní charakter zátěže.
[3] Velmi často se též nazývá dvojpulzní usměrňovač.
[4] Platí i pro trojfázové usměrňovače i ostatní typy měničů.

zeného usměrňovače nastává tato situace pro jednotlivé součástky v okamžiku průsečíku kladných půlvln fázových napětí (na předcházející diodě se poté objeví závěrné napětí). Proud jednotlivých diod komutuje na následující diodu pod vlivem napětí sítě. Každá dioda vede proud po dobu 120^0. Na zátěži bude napětí té fáze, která je diodou sepnuta. Průběhem napětí na zátěži je obálka kladných průběhů napětí.

Střední hodnota usměrněného napětí je:

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sqrt{2}.U \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U = 1.17U$$

3. Řízené usměrňovače

Řízené usměrňovače jsou měniče, u nichž lze řídit výstupní veličiny, tj. napětí nebo proud. Usměrňovače mohou být buď plně řízené (ve výkonovém obvodu se používají tyristory) nebo polořízené (ve výkonovém obvodu se používají diody a tyristory). Změny výstupních veličin lze dosáhnout tzv. fázovým řízením. Změnou okamžiku zapnutí tyristoru, tzn. změnou úhlu řízení[5] α měníme i střední hodnotu výstupního stejnosměrného napětí.

a) Jednofázový řízený usměrňovač v uzlovém spojení

Tento usměrňovač se v praxi téměř nepoužívá. Důvodem je velké zvlnění napětí. Pro vysvětlení bude popsán případ jednopulzního řízeného usměrňovače se zátěží RL, protinapětí $U_i = 0$, úhel řízení $\alpha = 60^0$. Od času t = 0 je na tyristoru kladné napětí. Protože nebyl přiveden řídící impuls, je obvod rozpojen, neteče proud. Celé napětí zdroje u(t) se objevuje na tyristoru (blokovací napětí). V době odpovídající úhlu řízení je na tyristor přiveden řídící impuls a tyristor sepne. Napětí na tyristoru klesne na nulu. Na zátěži se objeví napětí a obvodem začíná téci proud. Pokud je tento proud kladný, tj. protéká v propustném směru tyristoru, nemůže tyristor bez

[5] Úhel řízení α nabývá nulové hodnoty pro případ neřízeného usměrňovače. U třífázových měničů není tedy počítán od nuly napětí, ale vždy od počátku kladného napětí na diodě, která začne vést proud.

vypínacích obvodů vypnout. K vypnutí dochází v čase, kdy proud klesne k nule. V další části periody je na tyristoru závěrné napětí a tyristor nemůže sepnout.

V době sepnutí na tyristoru mohou být okamžité hodnoty napětí na zátěži kladné i záporné. Okamžitý výkon zátěže $p_d = u_d * i_d$ může tedy být též kladný i záporný, neboť proud usměrňovače je vždy kladný.

Předpokládejme nyní případ, že zátěž je charakteru RLU_i (viz. obrázek 4.8c). V době nárůstu napájecího napětí u(t) od času t = 0 až do času odpovídajícího úhlu řízení α je obvod rozpojen. Na svorkách spotřebiče je napětí $u_d = U_i$. Tyristor může sepnout až v okamžiku, kdy je napájecí napětí $u_d > U_i$. Další činnost je obdobná jako u zátěže RL. Po vypnutí tyristoru ale bude na zátěži opět napětí U_i. V případě, že bude hodnota protinapětí U_i záporná (případ rekuperačně brzděného stejnosměrného motoru, úhel řízení $\alpha > 90^0$), bude střední hodnota napětí na zátěži záporná a též přenášený výkon usměrňovače bude záporný. V praxi to znamená, že je výkon přenášen ze spotřebiče do zdroje (napětí).

b) Dvojfázový řízený usměrňovač v uzlovém spojení

U dvojfázového řízeného usměrňovače dochází obdobně jako u neřízeného usměrňovače ke spojení vlastností dvou jednopulzních zapojení.

c) Jednofázový řízený usměrňovač v můstkovém spojení

Řízený usměrňovač patří mezi jednofázovými spojeními v praxi k nejvíce používaným. Použití je zejména pro malé výkony. Průběhy napětí a proudů zátěže jsou totožné s průběhy dvoupulzního usměrňovače. Liší se pouze napětí v závěrném směru.

d) Trojfázový řízený usměrňovač v uzlovém spojení

Vyšetření průběhů napětí a proudů třífázového řízeného usměrňovače v uzlovém spojení vysvětlíme na příkladu, že úhel řízení $\alpha = 60^0$. Uvažujme dva druhy zátěže. V prvém případě zátěž obsahuje pouze odpor, v druhém případě pak současně indukčnost $L \to \infty$.

Pro výklad sledujme nejprve druhý případ, tj. v zátěži je velká indukčnost. V inter-

valu $(0,\chi_1)$ je sepnut T_3, vypnut T_1,T_2. Platí: $\mathbf{-u_3 + u_d + u_{T3} = 0}$. Při $\mathbf{u_{T3} = 0}$ je napětí na zátěži $\mathbf{u_d = u_3}$. Napětí na tyristoru T_1 získáme z rovnosti $\mathbf{u_{T1} - u_1 + u_d}$=0. Dosazením za u_d dostaneme : $\mathbf{u_{T1} = u_1 - u_3}$. V okamžiku χ_1 je $\mathbf{u_{T1} = 0}$, tyristor T_1 přechází do blokovacího stavu. Od tohoto okamžiku lze tento tyristor sepnout přivedením řídícího impulsu. V χ_2 je řídící impuls přiveden na T_1; tyristor T_1 sepne, T_3 vypne; $\mathbf{u_{T1}= 0}$, $\mathbf{u_d = u_1}$, $\mathbf{u_{T3} = u_3 - u_1}$. Tento stav platí až do χ_4. Protože proud ve stejnosměrném obvodu $\mathbf{I_d}$ je v tomto případě ideálně vyhlazený, může dojít ke komutaci až po sepnutí dalšího tyristoru. Proto může být $\mathbf{u_d < 0}$ (zde interval χ_3-χ_4). Od tohoto okamžiku se děj opakuje.

Jestliže je v obvodu pouze činný odpor, sledujme pouze průběh od úhlu χ_2. Zde sepneme tyristor T_1. Až do χ_3 jsou podmínky vedení stejné, jako v předchozím případě. Protože se ale jedná o zátěž R, je $i_d = u_d / R$. V χ_3 je $u_d = 0$ a tedy $i_d = 0$. Tyristor $\mathbf{T_1}$ vypne. V intervalu χ_3-χ_4 je $\mathbf{i_d=0}$, neboť dosud nebyl přiveden řídící impuls na tyristor $\mathbf{T_2}$. Od χ_4 se cyklus opakuje. Porovnáním hodnot $\mathbf{U_d}$ zjistíme, že při ohmické zátěži není možná okamžitá hodnota $\mathbf{u_d < 0}$ a tím je i $\mathbf{U_d}$ větší než v případě zapojené indukčnosti ve stejnosměrném obvodu.

Odvození střední hodnoty usměrněného napětí pro $\alpha = 60^0$:

a) zátěž R : $$U_{d(R)} = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} . \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} U_m . \sin \omega t (d\omega t) = \frac{2}{\pi} U_m$$

b) zátěž R, $L \to \infty$: $$U_{d(RL)} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} . \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} U_m . \sin \omega t (d\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} U_m$$

Pro představu činnosti řízeného usměrňovače jsou na obrázcích ukázány průběhy napětí a proudů pro různé zátěže a různé úhly řízení u trojpulzního usměrňovače. U odporové zátěže nemůže nastat případ, že okamžitá hodnota napětí na zátěži bude záporná. U zátěže RL může být okamžitá hodnota záporná, ale střední hodnota usměrněného napětí je kladná. Pouze u zátěže RLUi v případě záporného Ui (mo-

tor v brzdném režimu) je i střední hodnota usměrněného napětí na zátěži záporná. Pro zátěž RL je pak ukázán na obrázku 4-13 vliv úhlu řízení na velikost usměrněného napětí (jeho střední hodnoty). Naopak u kondenzátorů dochází k vyhlazování napětí – toho se využívá pro napěťové zdroje malých výkonů. Jestliže je v obvodu pouze činný odpor, sledujme pouze průběh od úhlu χ_2. Zde sepneme tyristor T_1. Až do χ_3 jsou podmínky vedení stejné, jako v předchozím případě. Protože se ale jedná o zátěž R, je $i_d = u_d / R$. V χ_3 je $u_d = 0$ a tedy $i_d = 0$. Tyristor $\mathbf{T_1}$ vypne. V intervalu χ_3-χ_4 je $\mathbf{i_d=0}$, neboť dosud nebyl přiveden řídící impuls na tyristor $\mathbf{T_2}$. Od χ_4 se cyklus opakuje. Porovnáním hodnot $\mathbf{U_d}$ zjistíme, že při ohmické zátěži není možná okamžitá hodnota $\mathbf{u_d < 0}$ a tím je i $\mathbf{U_d}$ větší než v případě zapojené indukčnosti ve stejnosměrném obvodu.

Odvození střední hodnoty usměrněného napětí $\alpha = 60^0$:

a) zátěž R : $$U_{d(R)} = \frac{1}{\frac{\pi}{2}} . \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} U_m . \sin \omega t (d\omega t) = \frac{2}{\pi} U_m$$

b) zátěž R, $L \to \infty$: $$U_{d(RL)} = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} . \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{6}} U_m . \sin \omega t (d\omega t) = \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} U_m$$

Pro představu činnosti řízeného usměrňovače jsou na obrázcích ukázány průběhy napětí a proudů pro různé zátěže a různé úhly řízení u trojpulzního usměrňovače. U odporové zátěže nemůže nastat případ, že okamžitá hodnota napětí na zátěži bude záporná. U zátěže RL může být okamžitá hodnota záporná, ale střední hodnota usměrněného napětí je kladná. Pouze u zátěže RLUi v případě záporného Ui (motor v brzdném režimu) je i střední hodnota usměrněného napětí na zátěži záporná. Pro zátěž RL je pak ukázán na obrázku vliv úhlu řízení na velikost usměrněného napětí (jeho střední hodnoty). Naopak u kondenzátorů dochází k vyhlazování napětí – toho se využívá pro napěťové zdroje malých výkonů.

4. Řídící charakteristika usměrňovače

Jednou ze základních vlastností usměrňovače je střední hodnota usměrněného napětí na zátěži. U neřízených usměrňovačů je tato hodnota dána pouze hodnotou napájecího napětí, druhem zapojení usměrňovače a charakterem zátěže. U řízených usměrňovačů je to navíc závislost na úhlu řízení α. Může tedy napsat:

a) u neřízených usměrňovačů: $U_d = f(U_{zdroje}$, zapojení, zátěž)

b) u řízených usměrňovačů: $U_d = f(U_{zdroje}$, zapojení, zátěž, α).

Je zřejmé, že prakticky můžeme využít pouze změnu úhlu řízení α. V další části bude provedeno jako příklad obecné odvození velikosti střední hodnoty usměrněného napětí pro 3 fázový uzlový usměrňovač v uzlovém spojení (p-pulzní usměrňovač, obecný úhel řízení) pro zátěž $L \to \infty$. Změnou okamžiku zapnutí tyristoru, tzn. změnou úhlu řízení α měníme i střední hodnotu výstupního stejnosměrného napětí. Pokud je proud ve stejnosměrném obvodu nepřerušovaný, lze odvodit:

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{p}} \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{p}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{p}+\alpha} U_m . \sin \omega t . d(\omega t) = \frac{pU_m}{\pi} . \sin \frac{\pi}{p} . \cos \alpha = U_{d0} . \cos \alpha$$

U_{d0} je střední hodnota usměrněného napětí pro úhel řízení $\alpha = 0^0$, pro kterou platí:

$$U_d = \frac{pU_m}{\pi} . \sin \frac{\pi}{p}$$

Jestliže znázorníme závislost střední hodnoty usměrněného napětí na řídící veličině (úhel řízení α), získáme tzv**. řídící charakteristiku**. Z uvedeného vyplývá, že při nepřerušovaném proudu je řídící charakteristika nezávislá na velikosti zátěže.

Pro jiný charakter zátěže dostaneme jiné průběhy. Například pro zátěž odpor dostaneme:

$$U_d = \frac{pU_m}{\pi} . \sin \frac{\pi}{p} . \frac{1+\cos \alpha}{2} = U_{do} . \frac{1+\cos \alpha}{2}$$

5. Způsob práce řízeného usměrňovače

V popisech jednotlivých zapojení usměrňovačů a v obrázcích s časovými průběhy napětí na zátěži je ve většině případů uvažován případ, kdy napětí $U_{di} = 0$ nebo $U_{di} > 0$; znamená to, že energie je předávána ze střídavé strany měniče na stranu stejnosměrnou. Při $L \to \infty$ je tento stav splněn pro $\alpha < 90^0$. Jestliže však je $U_{di} < 0$ (při $L \to \infty$), pak pro $\alpha > 90^0$ je energie předávána ze stejnosměrné strany na stranu střídavou. Pak hovoříme o tzv. s**třídačovém** (inventorovém) režimu usměrňovače. Podmínky pro střídačový chod jsou:

- na stejnosměrné straně musí být zapojen zdroj stejnosměrného napětí (akumulátor, ss. generátor, indukčnost s nahromaděnou energií),
- měnič musí mít schopnost vytvořit na stejnosměrné straně záporné U_{di} .

V pohonářských aplikacích se invertorový chod využívá k rekuperaci energie při reverzaci stejnosměrných motorů. Dále se využívá ve statických budících systémech synchronních alternátorů k rychlému odbuzení. Schématicky jsou režimy práce znázorněny na obrázku.

6. Zvlnění proudu a napětí

Z dosud uvedených obrázků vyplývá, že napětí a proud na stejnosměrné straně jsou zvlněné. Zvlnění σ_I je definováno jako poměr rozdílu maximální a minimální okamžité hodnoty usměrněného proudu (napětí) ku součtu obou hodnot. Platí:

$$\sigma = \frac{i_{d\,\max} - i_{d\,\min}}{i_{d\,\max} + i_{d\,\min}} = \frac{\Delta i_d}{2I_d}$$

Kromě toho můžeme definovat též efektivní zvlnění, definované jako poměr efektivní hodnoty střídavé složky usměrněného proudu (napětí) ke střední hodnotě usměrněného proudu (napětí).

Jestliže jsou usměrňovačem napájeny taková zařízení, které požadují nízké zvlnění, je třeba v případě požadavku na vyhlazení proudu do obvodu přiřadit do série indukčnost, v případě požadavku na malé zvlnění napětí zvolíme vícepulzní zapojení usměrňovače nebo paralelně k zátěži připojíme kondenzátor.

Požadavek na vyhlazený proud je častý u napájení motorů, požadavek na vyhlazené napětí pak v případě zdrojů napětí a velmi často v případě nepřímých měničů kmitočtu.

7. Jalový výkon usměrňovače, účiník

V usměrňovačích vzniká fázový posun mezi první harmonickou síťového napětí a první harmonickou síťového proudu. Činný příkon je daný vztahem:

$$P_{(1)} = m.U_{(1)}.I_{(1)}.\cos\varphi_{(1)}$$

Jalový výkon první harmonické:

$$Q_{(1)} = m.U_{(1)}.I_{(1)}.\sin\varphi_{(1)}$$

U řízených usměrňovačů platí, že $\varphi \cong \alpha$. To znamená, že při $\alpha \to 90^0$ je nulový činný výkon, ale měnič odebírá maximální jalový výkon. Jalový výkon usměrňovače lze zmenšit sériovým řazením několika usměrňovačů, přičemž se úhel řízení mění postupně. Kromě složek základní harmonické jsou usměrňovačem též odebírány složky vyšších harmonických. To vede ke zhoršení tzv. skutečného účiníku, definovaného: $\Lambda = \frac{P}{S}$

U neřízených usměrňovačů je $\alpha = 0^0$. Proto i jalový výkon je velmi malý (způsobený pouze úbytky napětí na diodách).

8. Reverzační usměrňovače

Neřízené usměrňovače mohou dodávat energii pouze ze zdroje do zátěže. Pracují tedy pouze v jednom kvadrantu (jednokvadrantové měniče). Řízený usměrňovač, pracující do zátěže RLU_i může přenášet energii i z motoru do zdroje napětí (dvou – kvadrantový měnič). Vždy ale bude zachován kladný smysl proudu. V technické praxi však nastávají případy, kdy je zapotřebí činnost usměrňovače ve všech kvadrantech – to znamená potřebujeme činnost motoru v obou směrech otáčení a též brzdění motoru v obou směrech otáčení – potřebujeme tedy i záporný proud. To lze zajistit pouze připojením dvou měničů, z nichž každý zabezpečuje činnost

v jednom směru proudu. Toto spojení se nazývá “dvouměničová reverzační skupina“. Pro dynamicky náročné pohony je pak řízení takové, že změna smyslu proudu je velmi rychlá – je zapotřebí speciálního řízení obou měničů současně.

9. Řídící obvody usměrňovačů

Pro tvorbu řídících impulsů pro řízené součástky usměrňovače se používají tzv. řídící obvody. Jejich úkolem je vytvořit impulsy potřebného tvaru, velikosti a také v přesně definovaném okamžiku. V bloku synchronizace **(S**) se stanovuje okamžik, od kterého je počítán úhel řízení α. Obvykle je to průchod fázového nebo sdruženého napětí nulou. Aby tato synchronizace dobře fungovala, je třeba zajistit, aby byla použita pouze základní sinusová křivka napětí. Proto jsou bloky vybaveny filtrem. Blok současně provádí galvanické oddělení síťového napětí od řídících obvodů. V bloku generátoru pilového napětí **(GP)** je vytvářeno napětí, které má tvar pily. Počátek růstu je dán blokem synchronizace. V bloku komparátoru **(K)** se provádí porovnání okamžitého napětí pily s řídícím napětím $\mathbf{u_v}$**.** Tím je určena velikost řídícího úhlu α. V tvarovacím bloku **(BT)** je vygenerován a upraven impulz na potřebný tvar a následně v bloku koncového zesilovače **(Z)** proudově zesílen.
Obdobný princip se uplatňuje při číslicovém řízení.

10. Pulzní usměrňovače[6]

Součástková základna výkonové elektroniky dnes umožňuje přenos velkých výkonů. V části 7 je uvedeno, že účiník je při činnosti usměrňovače závislý na úhlu řízení α. Kromě toho jsou odebírány proudy s vysokým obsahem harmonických. Jednou z možností odstranění uvedených negativních vlastností u měničů s vlastní komutací je využití pulzně šířkové modulace. U usměrňovačů hovoříme o pulzních usměrňovačích. Princip činnosti napěťového pulzního usměrňovače spočívá ve vhodném spínání tranzistorů. Tím je dosaženo přibližně sinusového odběru prou-

[6] Pulzní usměrňovače patří mezi měniče s vnější komutací.

du. Současně je třeba zaručit odběr proudu první harmonické s dobrým účiníkem. Je třeba zajistit, aby napájecí napětí můstku Uv bylo zpožděno za odebíraným proudem Ia o úhel ε. Z toho dále vyplývá, že maximální hodnota napětí v meziobvodu bude větší než amplituda napájecího napětí.