

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



## 9. Harmonické proudy pulzních usměrňovačů

Současná součástková základna výkonové elektroniky umožňuje přenos velkých výkonů. Jak vyplynulo z předcházejících kapitol, je přenos možný i za takových podmínek, že dochází k minimalizaci harmonických proudů (vyšších řádů), odebíraných z napájecí soustavy. Opakem mohou být měniče kmitočtu s napětovými střídači, kdy odebírané harmonické proudy mají relativně velké hodnoty, ale základní harmonická proudy je odebírána s účínkem první harmonické  $\cos\varphi \rightarrow 1$ .

Jedním ze způsobů, jak zajistit odběr proměnného stejnosměrného napětí s velmi dobrým účínkem je tzv. sektorové řízení usměrňovače. Princip spočívá ve vlastní komutaci součástky, která je vypínána tak, aby výsledný účinek první harmonické byl roven jedné. Nevýhodou tohoto řízení je to, že se omezuje pouze jalový výkon první harmonické, deformační výkon zůstává nepřijatelně vysoký<sup>112</sup>.

Další předností moderních elektronických zařízení jsou řídicí obvody. Vlivem mikropočítačových jednotek a driverů je umožněno spínání a vypínání velkých napětí a proudů ve velice krátkých časových jednotkách. Vlivem snižujících se spínacích ztrát ve výkonových součástkách pak můžeme používat vysoké spínací frekvence. Jedním z možných řešení u měničů s vlastní komutací je využití pulzně šířkové komutace. U usměrňovačů hovoříme o pulzních usměrňovačích.

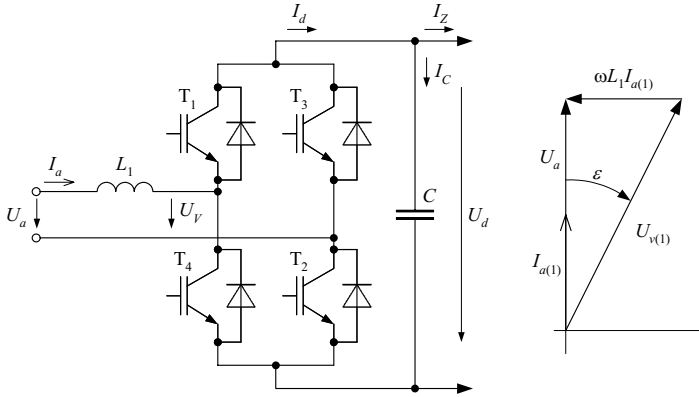
### 9.1 Základní vlastnosti pulzních usměrňovačů

Obdobně jako např. měniče kmitočtu lze rozdělit i pulzní usměrňovače dle zátěže na dva druhy – proudové pulzní usměrňovače a napětové pulzní usměrňovače.

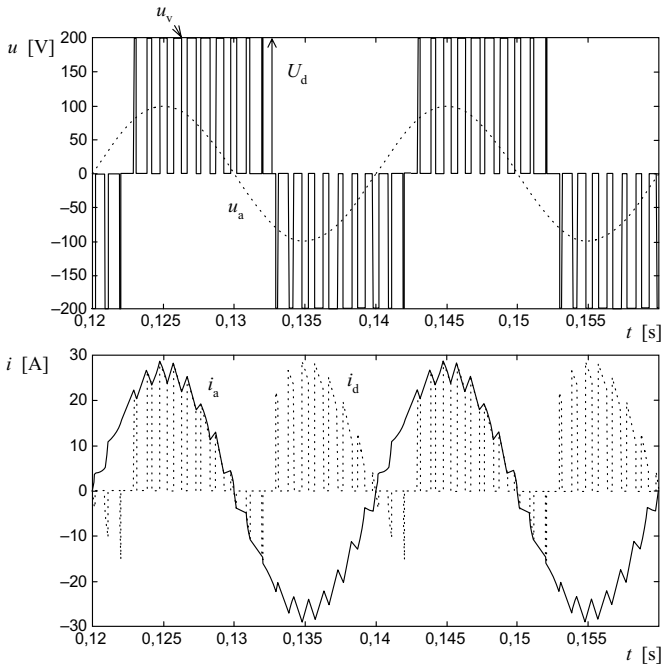
#### 9.1.1 Napětové pulzní usměrňovače

Napětové pulzní usměrňovače mají stejnosměrnou stranu spojenou s kondenzátorem, na kterém je udržováno zhruba konstantní napětí. Proto se předpokládá jejich využití zejména ve spojení s napětovým střídačem, přes který lze následně napájet asynchronní motor. Pokud bychom z napětového pulzního usměrňovače chtěli napájet stejnosměrný motor, je třeba soustavu doplnit (stejnoseměrným) pulzním měničem, který zajistí říditelnost stejnosměrného napětí. Pulzní usměrňovač na vstupu soustavy pak zajišťuje „pouze“ základní funkce, tj. usměrnění a odběr s dobrým účínkem a sinusovým proudem. Současně musí umožnit průchod výkonu oběma směry.

<sup>112</sup> Z tohoto důvodu nebude měničům se sektorovým řízením dále věnována pozornost. Bližší údaje jsou uvedeny např. v [71], str. 201 a v literatuře zde uvedené.



obr. 9.1 Schéma jednofázového pulzního usměrňovače napětového typu, fázový diagram



obr. 9.2 Napětové a proudové poměry napětového pulzního usměrňovače  
 Časové průběhy  $u_a$ ,  $u_v$ ,  $i_a$ ,  $i_d$  při provozních parametrech usměrňovače:  
 $U_m = 100 \text{ V}$ ,  $U_d = 200 \text{ V}$ ,  $f_{vz} = 1 \text{ kHz}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $L = 0,01 \text{ H}$

Schéma zapojení jednofázového pulzního usměrňovače napět'ového typu je na obrázku 9.1 včetně příslušného fázorového diagramu<sup>113</sup>. Zapojení se prakticky neliší od jednofázového napět'ového střídače.

Princip činnosti napět'ového pulzního usměrňovače spočívá ve vhodném spínání tranzistorů. Tím je dosaženo přibližně sinusového odběru proudu (s velmi malým zkreslením). Současně je třeba zaručit odběr proudu první harmonické s velmi dobrým účínkem. Jak vyplývá z fázorového diagramu, je třeba zajistit, aby napájecí napětí můstku  $U_v$  bylo zpožděno za odebíraným proudem  $I_a$  o úhel  $\varepsilon$ . Z toho dále vyplývá, že maximální hodnota napětí v meziobvodu bude větší než amplituda napájecího napětí. Průběhy napětí a proudů napět'ového pulzního usměrňovače jsou na obrázku 9.2.

Pro zajištění sledovaných veličin (zhruba harmonický jednovlnný proud ve fázi se vstupním napětím na střídavé straně usměrňovače) je použito buď dvouhodnotové řízení nebo ŠPM založené na koincidenci pilového napětí se sinusovým signálem. Napět'ový pulzní usměrňovač se řídí úhlem  $\varepsilon$  a poměrným sepnutím nebo tzv. modulačním poměrem  $M$ . Je-li  $U_d = \text{konst.}$ , jsou  $\varepsilon$  a  $M$  svázaný vztahem:

$$\frac{U_a}{\cos \varepsilon} = U = M U_d \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \varepsilon = \arccos \frac{\sqrt{2} U_a}{M U_d}. \quad (9.1)$$

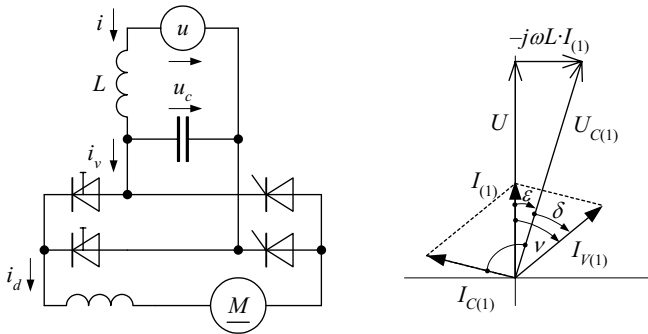
Velikostí  $\varepsilon$  je určeno  $M$  a naopak.

### 9.1.2 Proudové pulzní usměrňovače

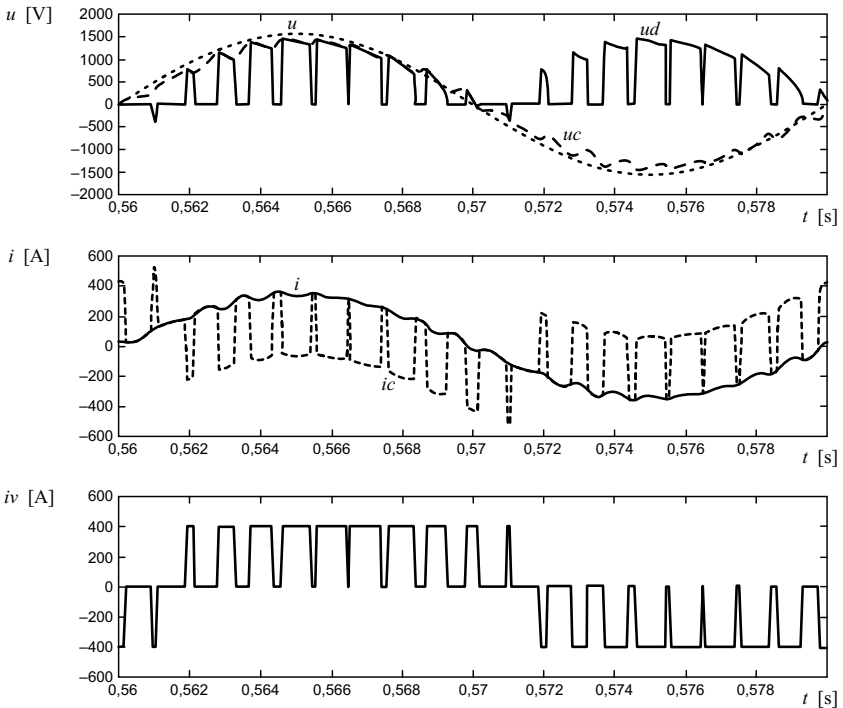
Proudové pulzní usměrňovače jsou vhodné pro práci do běžné stejnosměrné zátěže – například typu stejnosměrný motor nebo pro práci do proudového střídače. Schéma zapojení jednofázového pulzního usměrňovače proudového typu je na obrázku 9.3, včetně příslušných fázorových diagramů. Nezbytnou akumulaci funkci zde plní kondenzátor  $C$ . Řídící napětí  $u_r$  má dva říditelné parametry: poměrné sepnutí  $z$  a úhel posunutí  $\nu$ . Význam jednotlivých veličin vysvětlují fázorové diagramy prvních harmonických složek. Časové průběhy vypočtených proudů a napětí jsou na obrázku 9.4.

Proudový pulzní usměrňovač se řídí úhlem  $\nu = \varepsilon + \delta$  a modulačním poměrem  $M$ . Na rozdíl od napět'ových pulzních usměrňovačů zde není  $U_d = \text{konst.}$ . Závislost  $\delta$  na  $M$  je popsána velmi složitým vztahem, kde je rozhodující zatížení usměrňovače.

<sup>113</sup> Součástky T1–T4 jsou vypínatelné součástky (vypínatelný tyristor, tranzistor apod.), které jsou doplněny zpětnými diodami. Spínání jednotlivých součástek řídí trojúhelníková pulzní modulace. Popis činnosti přesahuje rámec knihy. Více v literatuře, např. [71], [74].



obr. 9.3 Jednofázový proudový pulzní usměrňovač – schéma, fázorový diagram



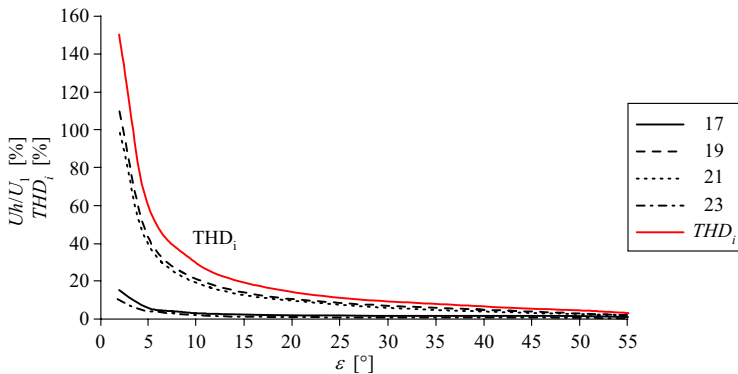
obr. 9.4 Napěťové a proudové poměry proudového pulzního usměrňovače.

Časové průběhy – příklad průběhů  $u$ ,  $u_c$ ,  $u_d$ ,  $i$ ,  $i_c$ ,  $i_v$  při provozních parametrech usměrňovače:  $U = 1107 \text{ V}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $f_v = 1 \text{ kHz}$ , proud zátěže  $I_d = 400 \text{ A}$

## 9.2 Výpočty harmonických proudů pulzních usměrňovačů

Z obrázků 9.2 a 9.4 vyplývá, že průběh proudu, který je pulzním usměrňovačem odebrán z napájecí sítě je takového charakteru, že jeho matematický popis je velmi složitý. Prakticky nemožný je analytický výpočet Fourierových koeficientů. Z tohoto důvodu je potřebné provádět simulace a popřípadě praktická měření<sup>114</sup>.

Nejprve jsou uvedeny výsledky simulací proudu a harmonické analýzy pro oba typy pulzních usměrňovačů. Výpočty byly prováděny pro různé hodnoty součástí usměrňovače, pro různé zatěžovací úhel a pro různou frekvenci spínání. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze některé výsledky. Protože měření pulzních usměrňovačů (viz kapitola 9.3) bylo provedeno pro nosnou modulační frekvenci  $f_{vz} = 1$  kHz, jsou výsledky simulací uvedené nejprve pro tuto frekvenci. Dále jsou uvedeny obrázky pro nosnou modulační frekvenci  $f_{vz} = 2$  kHz, kde již hodnoty koeficientu zkreslení klesají. V obrázcích jsou uvedeny pouze závislosti na zátěži, pro režim usměrňovač<sup>115</sup> a pouze pro harmonické blízké nosné modulační frekvenci  $f_{vz}$ <sup>116</sup>. Zároveň je ukázána hodnota celkového činitele harmonických proudů  $THD_i$ <sup>117, 118</sup>



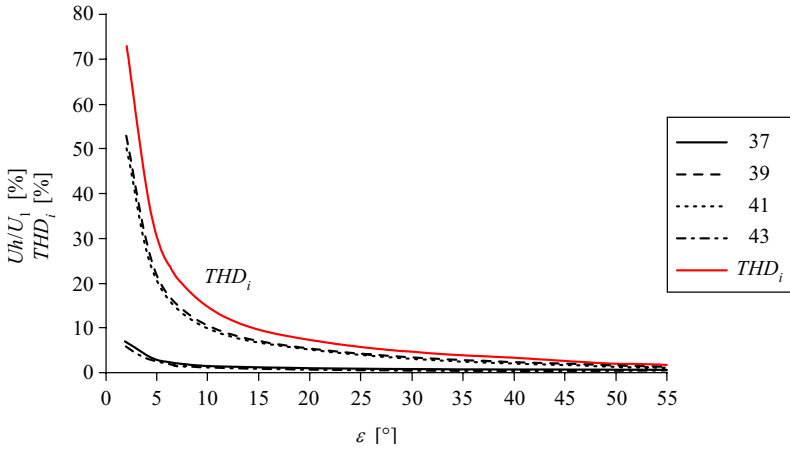
obr. 9.5 Závislost harmonických a  $THD_i$  na  $\varepsilon$ , usměrňovač napětového typu,  $f_{vz} = 1$  kHz

<sup>114</sup> V současné literatuře se objevují pouze základní teoretické rozbory, např. v [13]. Nejvíce se ukazují výsledky simulací či měření. Jak vyplývá dále, praxe vzhledem k nízkým hodnotám harmonických proudů tyto teoretické rozbory dosud nepožaduje.

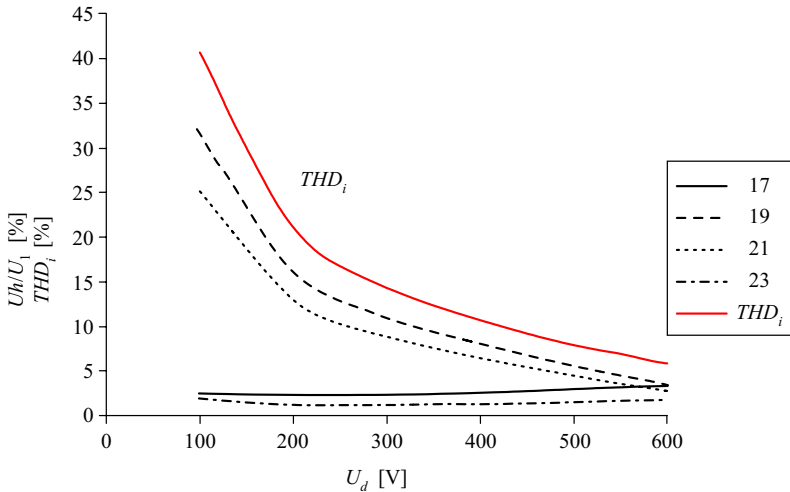
<sup>115</sup> Střídačový chod usměrňovače vede k obdobným výsledkům

<sup>116</sup> Jak ukazují výsledky v kapitole 9.3, jsou kromě třetí harmonické ostatní harmonické proudy velmi nízké.

<sup>117</sup> Při běžném pohledu je hodnota  $THD_i$  pro malé  $\varepsilon$  relativně vysoká. Jednak je trvalý chod při malém zatížení usměrňovače málo častý, jednak vzhledem k malé amplitudě odebraného proudu jsou absolutní hodnoty harmonických nízké. To je dokázáno v kapitole 9.3.

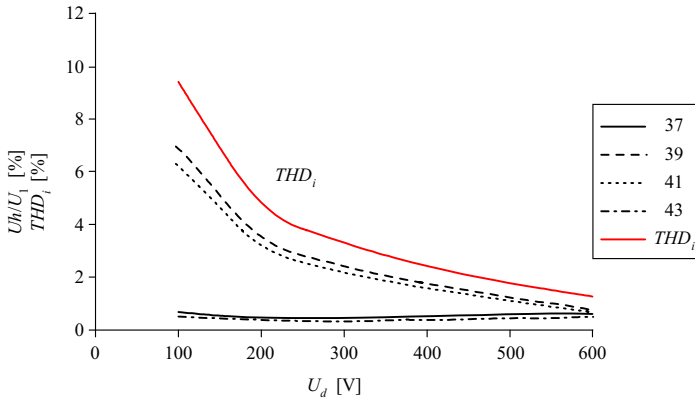


obr. 9.6 Závislost harmonických a  $THD_i$  na  $\varepsilon$ , usměrňovač napětového typu,  
 $f_{vz} = 2 \text{ kHz}$



obr. 9.7 Závislost harmonických a  $THD_i$ , proudový pulzní usměrňovač,  
 $f_{vz} = 1 \text{ kHz}$

<sup>118</sup> U průběhu  $THD_i$  proudového pulzního usměrňovače je uvedená závislost na  $U_d$  na rozdíl od závislosti na  $\varepsilon$  u napětového usměrňovače. Rozdíl je pouze z důvodu snadnější simulace.



obr. 9.8 Závislost harmonických a  $THD_1$ , proudový pulzní usměrňovač,  $f_{vz} = 2 \text{ kHz}$

### 9.3 Měření pulzního usměrňovače napětového typu

Výkonový obvod včetně regulačních obvodů, který byl realizován<sup>119</sup> a zapojen při měření je na obrázku 9.9<sup>120</sup>. Jednalo se o jednofázový pulzní usměrňovač napětového typu o jmenovitém proudu 6 A. Modulační frekvence byla  $f_r = 1 \text{ kHz}$ <sup>121</sup>.

Zatěžování měniče bylo prováděno odporem, který byl připojen přímo ve stejnosměrném obvodu. Alternativně, režim brzda byl realizován připojením dynamu s omezovacím odporem.

Realizovaný napětový pulzní usměrňovač byl konstruován pro výkon 2 kW. Vzhledem k tomuto výkonu byly nastavovány požadované hodnoty proudu ve stejnosměrné části v rozmezí  $-6 \text{ A}$  až  $0 \text{ A}$  režim brzda a  $0 \text{ A}$  až  $6 \text{ A}$  pro režim motor.

Vzhledem k předpokládanému využití byl pulzní usměrňovač realizován tak, že se skládal ze dvou můstků, kde bylo použito tzv. přesazeného řízení.<sup>122</sup>

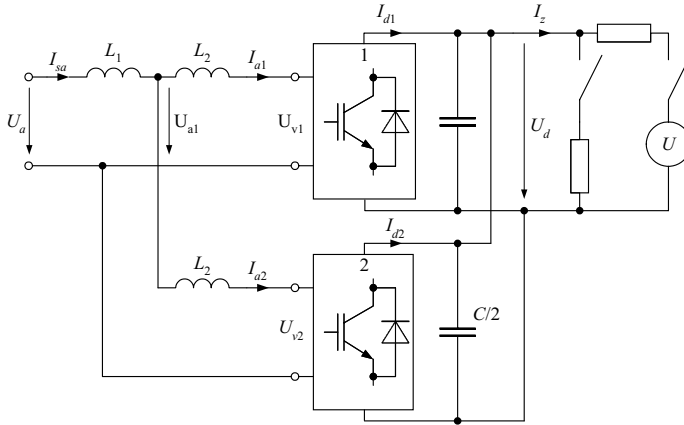
<sup>119</sup> Měření bylo provedeno v laboratořích elektrických pohonů ZČU v Plzni.

<sup>120</sup> V době měření nebyl proudový pulzní usměrňovač k dispozici. Z tohoto důvodu jsou uvedeny pouze výsledky měření usměrňovače napětového typu.

<sup>121</sup> Pro napájení bylo použito síťové napětí v laboratoři el. pohonů ZČU a následně regulační třífázový autotransfornátor. Na výstupu z tohoto transformátoru bylo využito dvou fází sdruženého napětí. Tento transformátor není ve schématu na obrázku 9.9 zakreslen, napájecí napětí  $U_a$  je výstupem z tohoto autotransfornátoru. To je důvodem toho, že průběhy napájecího napětí jsou zkreslené a rovněž výsledky Fourierovy analýzy ukazují na neobvyklé zkreslení napájecího napětí – výsledky analýzy napětí tím korespondují s výsledky analýzy proudu.

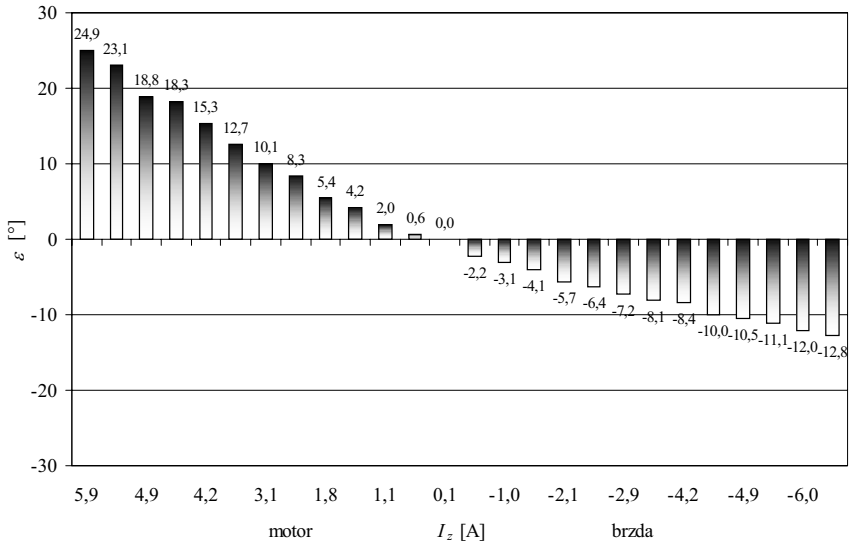
<sup>122</sup> Bližší podrobnosti ve zprávě [74].





obr. 9.9 Schéma měřeného pulzního usměrňovače

 Hodnoty úhlu  $\varepsilon$ 

 Pulzní usměrňovač, závislost na výstupním proudu  $I_z$ 

 obr. 9.10 Závislost zatěžovacího úhlu  $\varepsilon$  na zatěžovacím proudu pro oba režimy práce