

Václav Kůs

# Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu

*Vydáno s finanční podporou Grantové agentury České republiky,  
číslo úkolu GAČR 102/02/1355.*

2002



*Kniha se zabývá aktuální problematikou vlivu polovodičových zařízení na napájecí síť v oblasti nízkofrekvenčního rušení.*

*Jsou zde uvedeny jak postupy pro exaktní výpočty harmonických proudů, tak i zjednodušené návody na určení harmonických proudů s přesností, která je v praxi dostačující. Mnohé kapitoly jsou doplněny ukázkami časových průběhů proudů a výsledky jejich následné harmonické analýzy.*

*Je určena pro všechny, kteří se chtějí dozvědět více o polovodičových měničích, a to nejen z jejich kladné stránky. Projektanti a konstruktéři najdou návod na výpočty harmonických proudů, uživatelé měničů si mohou snadno zjistit jejich projevy v závodových sítích, možnosti jejich zjišťování a soulad s normami.*

---

Václav Kůs

## **Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu**

Bez předchozího písemného svolení nakladatelství nesmí být kterákoli část kopírována nebo rozmnožována jakoukoli formou (tisk, fotokopie, mikrofilm nebo jiný postup), zadána do informačního systému nebo přenášena v jiné formě či jinými prostředky.

Za původnost a jazykovou i věcnou správnost díla zodpovídá autor. Uvedené názvy výrobců, výrobků, metod a různých materiálů mohou být ochrannými známkami. Nároky na odškodnění na základě změn, chyb nebo vynechání jsou zásadně vyloučeny.

Recenzoval Prof. Ing. František Vondrášek, CSc.

Všechna práva vyhrazena.

© Doc. ing. Václav Kůs, CSc., Praha 2002

© Nakladatelství BEN – technická literatura, Věšínova 5, Praha 10

Kůs Václav: Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu  
BEN – technická literatura, Praha 2002

1. vydání

**ISBN 80-7300-062-8**

## Předmluva

S pojmem kompatibilita se u širší veřejnosti obvykle spojuje možnost užití určitého zařízení v součinnosti s jiným zařízením. Velmi často je to u výpočetní techniky, u různých televizních systémů či jiné audio – video techniky. Budeme-li hovořit o elektromagnetické kompatibilitě, pak je to v širším kontextu opět rušení televizi a podobných zařízení. V dnešní době, kdy jsou stále více nasazována polovodičová zařízení, je však celkový instalovaný výkon takový, že rušení, jak se někdy nesprávně zkráceně elektromagnetické kompatibilitě říká, se projevuje i ve frekvencích velmi nízkých, blízkých několika málo násobkům základní frekvence sítě. Takovému rušení pak říkáme nízkofrekvenční rušení.

Literatura se nízkofrekvenčním rušením zabývá velmi dlouho. U nás to byla například kniha „Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť“ [48], vydaná v roce 1979. Ve světě to jsou například knihy od Arrilagy [1], Pellyho [54] nebo Žeželenka [78]. Pouze negativními účinky měničů se zabývají knihy od Klosse [29], [30]. Od dob vydání těchto knih však pokrok výkonové polovodičové elektroniky velmi pokročil. Namátkou jmenujme pulzní usměrňovače a zejména měniče kmitočtu s napěťovými střídači. Přestože se v literatuře objevují dílčí články, popisující jednotlivé měniče, neexistuje souhrnná publikace, která by se vlivy polovodičových měničů na síť zabývala. Kniha „Elektromagnetická kompatibilita“ [67] se zabývá zejména vysokofrekvenčním rušením. Zůstává tedy nezpracována oblast vlivů měničů v nízkofrekvenčním pásmu.

Předkládaná kniha si klade za cíl uvedenou mezeru zaplnit. Snahou bylo napsat knihu takovým způsobem, aby v ní našli odpovědi jak specialisté, odborníci, ale i technici, kteří se chtějí (nebo i musí) vlivy měničů na síť zabývat. Proto je každá kapitola věnována jinému druhu měničů, včetně těch nejnovějších. V každé kapitole je obvykle proveden jak teoretický rozbor, tak jsou uvedeny výsledky simulací i praktických měření. Pokud se daným měničem zabývají normy, je uveden i vztah k danému měniči. Jak se mi podařilo cíl splnit, ponechám laskavě na čtenáři.

Rád bych též poděkoval kolektivu spolupracovníků z Katedry výkonové elektroniky Západočeské univerzity v Plzni za mnohé cenné rady a připomínky, které mi umožnily knihu dopsat. Můj dík patří též Grantové agentuře České republiky, s jejichž finanční podporou mohla tato kniha vyjít.

**Autor**

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Definice a průběhy neharmonických veličin .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Harmonická analýza .....</b>	<b>16</b>
2.1.1 Základní vlastnosti Fourierovy řady .....	16
2.1.2 Komplexní tvar Fourierovy řady, Fourierova transformace .....	18
2.1.3 Volba kmitočtu vzorkování .....	20
<b>2.2 Harmonické ve výkonové elektronice a v elektrických pohonech .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 Charakteristické a necharakteristické harmonické, meziharmonické .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4 Výkony v obvodech s neharmonickými průběhy napětí a proudu .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5 Poměrné hodnoty a celkoví činitelé zkraslení .....</b>	<b>26</b>
<b>3. Harmonické proudy usměřovačů .....</b>	<b>28</b>
<b>3.1 Harmonické proudy usměřovače při zjednodušených podmínkách činnosti .....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Idealizované podmínky činnosti, amplitudový zákon .....	29
3.1.2 Vliv úhlu komutace na harmonické proudy .....	32
<b>3.2 Harmonické proudy usměřovače při uvažování reálných parametrů .....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Výpočet proudu procházejícího tyristorem .....	34
3.2.2 Zvlnění ve stejnosměrném obvodu .....	37
3.2.3 Vliv úhlu komutace .....	38
3.2.4 Vliv úhlu řízení .....	39
3.2.5 Výsledky numerické analýzy .....	39
3.2.6 Ukázka naměřených průběhů z praxe .....	41
3.2.7 Harmonické proudy při přerušovaných proudech motoru .....	42
3.2.8 Harmonické proudy usměřovačů při nesymetrických podmínkách činnosti .....	43
<b>3.3 Harmonické proudy usměřovačů a normy .....</b>	<b>48</b>
<b>4. Harmonické proudy přímých měničů kmitočtu .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1 Harmonické a meziharmonické vstupního proudu měniče .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2 Amplitudy harmonických a meziharmonických přímých měničů kmitočtu .....</b>	<b>52</b>

4.3	Harmonické přímých měničů kmitočtu a normy .....	53
<b>5.</b>	<b>Harmonické proudy měničů napětí .....</b>	<b>54</b>
5.1	Jednofázové měniče napětí .....	54
5.2	Třífázové měniče napětí .....	56
5.3	Harmonické měničů napětí a normy .....	58
<b>6.</b>	<b>Harmonické proudy</b>	
	<b>pod synchronní polovodičové kaskády .....</b>	<b>59</b>
6.1	Problematika transformace harmonických proudů přes stejnosměrný meziobvod .....	61
6.2	Harmonické proudy pod synchronní polovodičové kaskády .....	61
6.3	Harmonické pod synchronní polovodičové kaskády a normy .....	62
<b>7.</b>	<b>Harmonické proudy</b>	
	<b>nepřímých měničů kmitočtu s proudovým střídačem .....</b>	<b>64</b>
7.1	Charakteristické harmonické proudy měničů s proudovým střídačem .....	64
7.2	Meziharmonické proudy měničů s proudovým střídačem .....	65
7.3	Harmonické měničů s proudovým střídačem a normy .....	65
<b>8.</b>	<b>Harmonické proudy</b>	
	<b>nepřímých měničů kmitočtu s napěťovým střídačem .....</b>	<b>66</b>
8.1	Harmonické proudy měniče kmitočtu s napěťovým střídačem při zjednodušených podmínkách činnosti .....	66
8.1.1	Harmonická analýza proudu jednofázového můstku .....	67
8.1.2	Harmonická analýza proudu třífázového můstku .....	68
8.1.3	Zobecněný amplitudový zákon .....	69
8.1.4	Zpřesněný popis průběhu proudu odebíraného měničem .....	70
8.2	Měnič kmitočtu s napěťovým střídačem při uvažování reálných parametrů .....	73
8.2.1	Základní model obvodu .....	73
8.2.2	Indukčnost v obvodu na straně usměrňovače, jednofázové spojení .....	75
8.2.3	Třífázový můstek, indukčnost na straně usměrňovače .....	81
8.2.4	Střídač, připojený ke stejnosměrnému obvodu .....	84
8.2.5	Shrnutí poznatků k průběhu proudu, odebíraného měničem ze sítě .....	86

<b>8.3 Vliv vlastností komponent měniče na harmonické proudy</b>	
<b>a energetické ukazatele .....</b>	<b>87</b>
8.3.1 Simulační model měniče .....	87
8.3.2 Prvky použité v modelu měniče .....	88
8.3.3 Vliv kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu .....	89
8.3.4 Vliv napájecí soustavy na harmonické proudy měniče kmitočtu .....	90
8.3.5 Vliv indukčnosti ve stejnosměrném meziobvodu měniče .....	96
8.3.6 Vliv indukčnosti na vstupní straně měniče .....	96
<b>8.4 Měření harmonických proudů, výkonů a účinníku měniče .....</b>	<b>97</b>
8.4.1 Měření v laboratorních podmínkách .....	97
8.4.2 Měření v průmyslových závodech .....	102
<b>8.5 Harmonické proudy měničů</b>	
<b>při nesymetrických podmínkách činnosti .....</b>	<b>103</b>
<b>8.6 Harmonické proudy impulzních napájecích zdrojů .....</b>	<b>105</b>
8.6.1 Základní blokové schéma síťového zdroje .....	106
8.6.2 Základní konfigurace výkonových obvodů impulzních zdrojů .....	107
8.6.3 Moderní řešení spínacích zdrojů .....	107
<b>8.7 Harmonické proudy měničů kmitočtu</b>	
<b>s napěťovým střídačem a normy .....</b>	<b>108</b>
<b>9. Harmonické proudy pulzních usměrňovačů .....</b>	<b>110</b>
<b>9.1 Základní vlastnosti pulzních usměrňovačů .....</b>	<b>110</b>
9.1.1 Napěťové pulzní usměrňovače .....	110
9.1.2 Proudové pulzní usměrňovače .....	112
<b>9.2 Výpočty harmonických proudů</b>	
<b>pulzních usměrňovačů .....</b>	<b>114</b>
<b>9.3 Měření pulzního usměrňovače napěťového typu .....</b>	<b>116</b>
<b>9.4 Pulzní usměrňovače a normy .....</b>	<b>121</b>
<b>10. Současná práce více měničů .....</b>	<b>122</b>
<b>10.1 Současná práce dvou měničů .....</b>	<b>122</b>
10.1.1 Eliminace proudů 5. a 7. harmonické .....	123
10.1.2 Rozdílný úhel řízení dvou měničů .....	123
<b>10.2 Současná práce většího počtu měničů .....</b>	<b>125</b>
<b>10.3 Statistické vyhodnocení .....</b>	<b>127</b>
<b>10.4 Současná práce měničů kmitočtu .....</b>	<b>129</b>
<b>10.5 Soubory současně pracujících měničů a normy .....</b>	<b>129</b>
<b>11. Měření energetických parametrů měničů .....</b>	<b>132</b>
<b>11.1 Způsoby měření a vyhodnocení harmonických .....</b>	<b>132</b>

<b>11.2 Norma ČSN EN 61000-4-7 .....</b>	<b>133</b>
11.2.1 Předmět a rozsah použití normy .....	133
11.2.2 Charakteristiky měřeného signálu .....	134
11.2.3 Všeobecné požadavky na přístrojovou techniku .....	134
11.2.4 Požadavky na přístrojovou techniku pracující v časové oblasti .....	135
11.2.5 Časové intervaly měření .....	136
<b>11.3 Antialiasing filtr .....</b>	<b>137</b>
<b>11.4 Vliv konečné doby pozorování signálu</b>	
<b>na jeho spektrum .....</b>	<b>140</b>
11.4.1 Porovnání vlastností nejvíce používaných okének .....	142
11.4.2 Porovnání oken .....	143
11.4.3 Doporučené využití oken .....	143
<b>11.5 Zpracování výsledků měření .....</b>	<b>144</b>
11.5.1 Použití statistiky .....	144
11.5.2 Časové závislosti naměřených veličin .....	144
11.5.3 Frekvenční závislosti naměřených veličin .....	145
11.5.4 Znázorňované parametry .....	145
<b>11.6 Ukázky měřených veličin .....</b>	<b>146</b>
<b>12. Normy a EMC</b>	
<b>v nízkofrekvenčním rušení .....</b>	<b>153</b>
<b>12.1 Základní zákony a nařízení o EMC .....</b>	<b>154</b>
<b>12.2 Popisy nejdůležitějších norem</b>	
<b>nízkofrekvenčního rušení .....</b>	<b>159</b>
12.2.1 ČSN IEC 1000-2-1 .....	159
12.2.2 ČSN EN 61000-2-2 .....	160
12.2.3 ČSN EN 61000 – 2 – 4 .....	161
12.2.4 ČSN EN 61000 – 3 – 2 .....	162
12.2.5 IEC 61000-3-4 .....	163
12.2.6 ČSN EN 61000-4-x .....	164
12.2.7 Normy pro vysokofrekvenční rušení .....	164
<b>12.3 Vyhledávání platných norem .....</b>	<b>165</b>
<b>13. Literatura .....</b>	<b>167</b>
<b>14. Použité značky .....</b>	<b>172</b>
<b>Knihy nakladatelství BEN – technická literatura .....</b>	<b>176</b>