

Vladimír Kudyn

Zlepšení vlastností usměrňovače s kapacitní zátěží z hlediska EMC

Klíčová slova: *usměrňovač, DPF, THD, přídavná tlumivka, kapacitní zátěž, spektrum harmonických složek.*

1. Úvod

Pro správnou funkci elektrických zařízení připojených do veřejného rozvodu elektrické energie je nutné dodržovat stanovené meze jednotlivých charakteristik napětí a proudu sítě všemi spotřebiteli. Znamená to především zajistit, aby nedocházelo k ovlivňování těchto charakteristik sítě provozovanými zařízeními.

Existuje několik skupin ukazatelů, podle kterých je možno posuzovat připojená zařízení. Jsou to například ukazatele výkonové (odběr činné nebo jalové energie), kvalitativní a ovlivňující. Mezi tyto ukazatele patří především účinník základní harmonické DPF (Displacement power factor), opravdový účinník λ (power factor), činitel celkového harmonického zkreslení THD (Total Harmonic Distortion).

Jedním z problematických a dosud ne zcela prozkoumaných problémů je chování usměrňovače s kapacitní zátěží. Je znám jeho negativní vliv na vstupní proud usměrňovače. Tato negativnost spočívá především v emitování širokého spektra proudových harmonických složek.

Hlavní úkol spočívá v popisu metody, kterou bude možno velikost tohoto spektra omezit, případně emise těchto složek úplně odstranit.

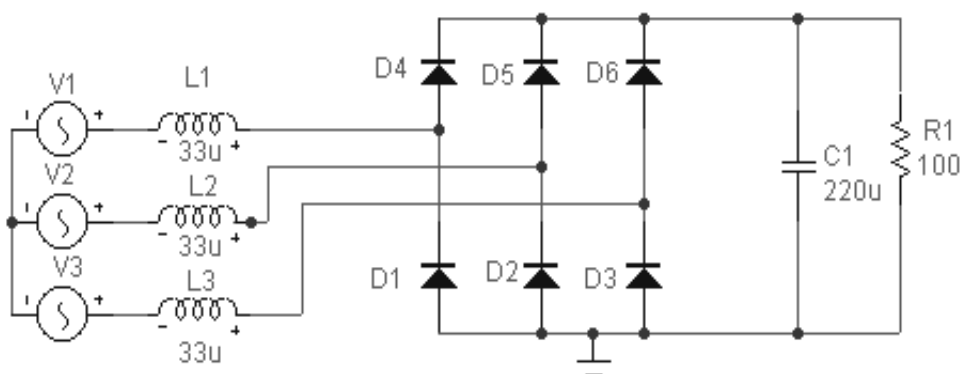
Všechna schémata i výsledné závislosti jsou vytvořeny pomocí programu MicroCap 6.0 Demo a Microsoft Excel.

Ing. Vladimír Kudyn, nar. 1976. Je absolventem Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice, kde studoval především napájení elektrických drah a elektromagnetickou kompatibilitou. Ve své diplomové práci se pak zabýval vlastnostmi usměrňovačů a jejich chováním v závislosti na zátěži. V současné době jako pracovník TÚDC – EMC Praha se zabývá hlouběji touto problematikou a navazujícími tématy.

2. Usměrňovač

Usměrňovače se začaly rozvíjet již v době, kdy se v elektrotechnice začal prosazovat jak ve výrobě, tak i v rozvodu systém střídavého napětí, který nahradil původní systém napětí stejnosměrného. V řadě aplikací však zůstala potřeba napájení zařízení stejnosměrným proudem, která trvá dodnes. Jako příklad je možno uvést průmyslové aplikace - elektrolýzu, pohony stejnosměrnými motory, napájení přepravních systémů atd. Jedny z prvních pokusů přeměny střídavé energie na stejnosměrnou byly prováděny rotačními elektrickými stroji (konvertory), později motorgenerátory nebo kontaktními, rtuťovými a dnes polovodičovými usměrňovači. V průběhu času spolu s rozvojem polovodičové techniky a stále novějšími technologiemi výroby součástek se staly polovodičové usměrňovače pro své velmi příznivé vlastnosti nejpoužívanějšími. Ostatní způsoby se již prakticky nepoužívají.

Usměrňovače patří do kategorie statických měničů. Tyto měniče se prosadily především vzhledem k vysoké účinnosti a malým nárokům na údržbu. Nemají problém mechanického provozního opotřebování, mají vysokou životnost a přijatelné ceny. Jejich všeobecné používání způsobilo, že se však projevily i jejich negativní vlastnosti. Usměrňovače odebírají z napájecí střídavé sítě proud nesinusového průběhu. V mnoha případech lze odebíraný proud aproximovat obdélníkem o délce základny $2/3 \pi$, jehož 1. harmonická nebývá s napájecím napětím ve fázi. Negativní vlastnosti usměrňovačů jsou způsobeny harmonickými složkami proudu a zhoršeným účínkem.

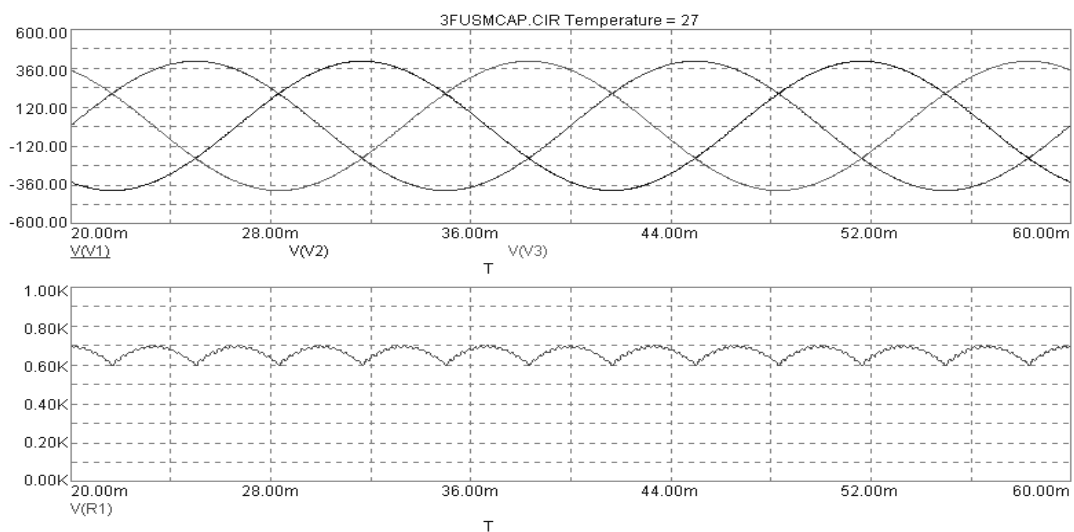


Obr. 1

Základní princip činnosti usměrňovače vyplývá z nelineárních vlastností polovodičů (tyristorů a diod) a jejich přechodu z vodivého do nevodivého stavu (komutaci) v závislosti na řízení. Většina usměrňovačů pracuje s řízením komutace síťovou frekvencí. (Usměrňovače se síťovou komutací).

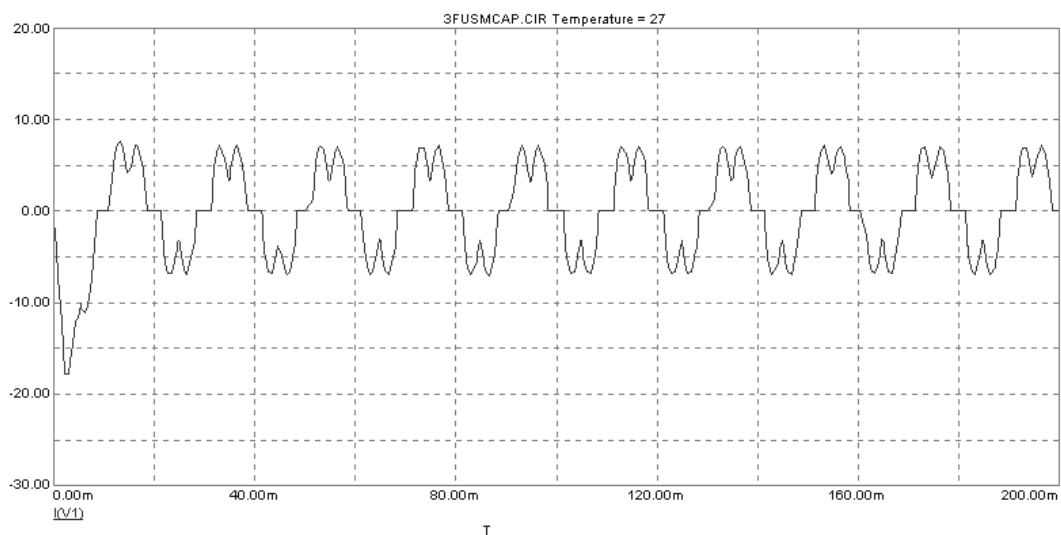
3. Srovnání kapacitní zátěže se zátěží induktivního charakteru

Pro popis funkce usměrňovače s kapacitní zátěží i možnosti jak omezit negativní vlivy, které tento usměrňovač vytváří, jsem zvolil konkrétní schéma trojfázového můstkového usměrňovače s kapacitní zátěží (obr.1).



Obr. 2

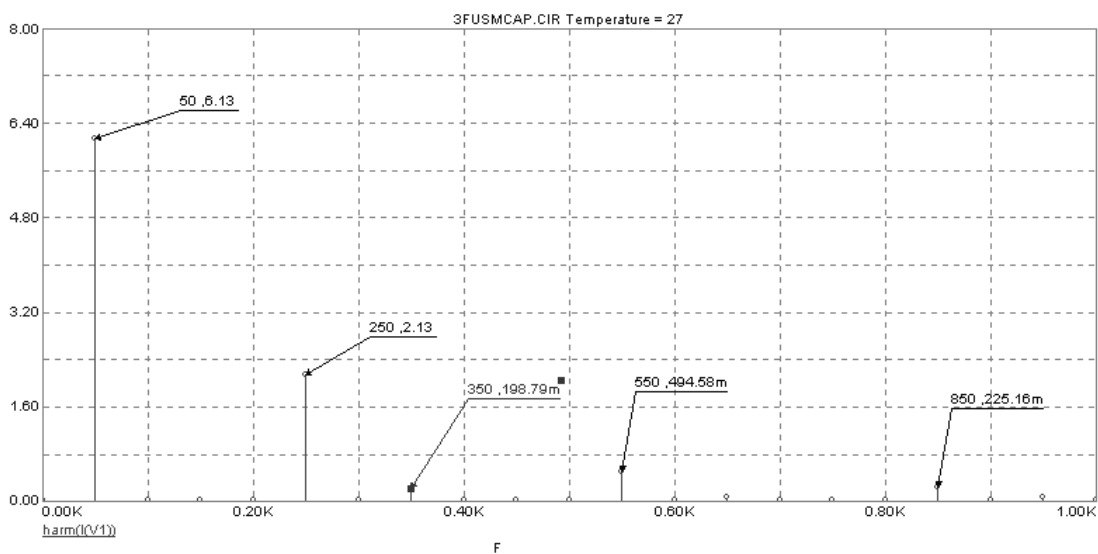
Na obr. 2 jsou znázorněny průběhy vstupního trojfázového a výstupního usměrněného napětí můstkového usměrňovače s kapacitní zátěží.



Obr. 3: Průběh proudu usměrňovače s RC zátěží

4. Výskyt a hodnoty harmonických složek vstupního proudu

Zkreslení napájecí sítě může mít za následek závažné škody. Transformátory se mohou přehřát, ačkoli byly správně dimenzovány nebo dokonce předdimenzovány vzhledem k očekávané zátěži, a může být zničena izolace. Kabely se mohou přehřát s následným zničením izolace. Rovněž i motory se mohou přehřát nebo se stát hlučnými a oscilace momentu v rotoru může vést k mechanické rezonanci a škodlivým vibracím. Kapacitory se přehřívají a v nejzávažnějších případech hrozí riziko exploze vzniklé průrazem dielektrika. Elektronické displeje a svítidla mohou blikat (flickr efekt), jističe mohou rozepnout, mohou selhat počítače a měření dávají nepravdivé výsledky. Všechny tyto vlivy mohou způsobit harmonické proudy (napětí). Vstupní proud daného usměrňovače je na obrázku 3.



Obr. 4

Na obr.4 můžeme vidět obsah harmonických ve spektru primárního proudu trojfázového můstkového usměrňovače. Nejvyšší hodnotu můžeme pozorovat u 7. harmonické. Ostatní hodnoty mají klesající tendenci se zvyšujícím se řádem harmonické složky. **V tomto případě se nejedná o chybu, protože při zátěži kapacitního charakteru neplatí tzv. Amplitudový zákon!**

V rozvodných sítích popisuje situaci PNE 33 3430 – 0 [6].

Proudy tekoucí do zařízení řady odběratelů připojených k elektrickým sítím jsou nesinusové. Tyto proudy vyvolávají na impedancích sítí nesinusové úbytky napětí, které kromě složky s kmitočtem sítě obsahují též podíl harmonických.

Nelineární odběry lze podle teoretických rozborů i praktických zkušeností považovat za proudové zdroje harmonických. Každá hodnota napětí harmonických vyskytující se v síti je výslednou hodnotou, k níž přispívají všechna zařízení odběratelů svými emisemi proudů harmonických, a závisí zejména na:

- impedanci sítě pro harmonické
- amplitudě a fázi proudů harmonických emitovaných každým odběratelem
- počtu zařízení odběratelů připojených k síti

V PNE 33 3430-0 jsou popsána tato omezení:

Usměrňovače s induktivní filtrací

K této skupině náleží usměrňovače pro napájení stejnosměrných motorů a usměrňovače s vyhlazovací tlumivkou ve stejnosměrném obvodu, které jsou často používány pro nejrůznější účely.

Směrné hodnoty proudu emitovaných do sítě těmito usměrňovači lze odhadovat podle následující tabulky :

v		5	7	11	13	17	19	23	25
i_v (%)	Šestipulsní můstek	27	11	9	6	5	4	3	3
i_v (%)	Dvanáctipulsní paralelní můstek	4	3	9	6	-	-	3	3
i_v (%)	Dvanáctipulsní sériový můstek	4	3	13	6	-	-	5	3

Tabulka 1

Harmonické	m = 3		m = 6		m = 12	
	$X_d = \infty$	$X_d = 0$	$X_d = \infty$	$X_d = 0$	$X_d = \infty$	$X_d = 0$
Základ. harmonická 50 Hz	100	100	100	100	100	100
2. harmonická 100 Hz	50	58,5	-	-	-	-
3. harmonická 150 Hz	-	-	-	-	-	-

4. harmonická	200 Hz	25	12,1	-	-	-	-
5. harmonická	250 Hz	20	14,6	20	18,6	-	-
7. harmonická	350 Hz	14,3	7,6	14,3	11,3	-	-
8. harmonická	400 Hz	12,5	8,6	-	-	-	-
9. harmonická	450 Hz	-	-	-	-	-	-
10. harmonická	500 Hz	10	5,5	-	-	-	-
11. harmonická	550 Hz	9,1	6	9,1	8,5	9,1	8,8
13. harmonická	650 Hz	7,7	4,3	7,7	6,5	7,7	7,2
14. harmonická	700 Hz	7,1	6,6	-	-	-	-
Celkový průběh		119	121	104,5	105	101,5	101

Tabulka 2 [7]

V **tabulkách č. 1 a č. 2**, je zřetelný princip výskytu harmonických vyráběných jednotlivými zapojeními usměrňovačů. Tabulka je převzata z literatury. Harmonická složka je buď daným usměrňovačem produkována, potom je její hodnota stejně velká jako u ostatních zapojení, nebo není produkována vůbec. Jako nejlepší se z hlediska EMC jeví 12-ti pulzní zapojení.

Usměrňovače s kapacitní filtrací

Tyto usměrňovače jsou masově používány v zařízeních spotřební elektroniky, počítačích, osvětlovacích tělesech, komunikačních systémech a dalších obdobných zařízeních. Proud, který odebírají ze sítě, má tvar špiček, jež přibližně souhlasí s maximy sinusovky napětí a jsou způsobeny nabíjením filtračního kondenzátoru. Tyto usměrňovače produkují liché harmonické s podstatně vyšší amplitudou oproti usměrňovačům s filtrací induktivní. Směrné hodnoty proudů i_v jsou uvedeny v následující tabulce:

N		3	5	7	9	11	13
i_v (%)	Jednofázový proud	95	80	70	65	62	60
	Trojfázový proud	-	86	70	-	36	22
	Trojfázový proud (směrná hodnota při obvyklé předřadné indukčnosti)	-	45	25	-	9	6

Tabulka 3

Činitel celkového harmonického zkreslení (THD – Total harmonic distortion) souhrnně popisuje zkreslení časového průběhu a je definován výrazem

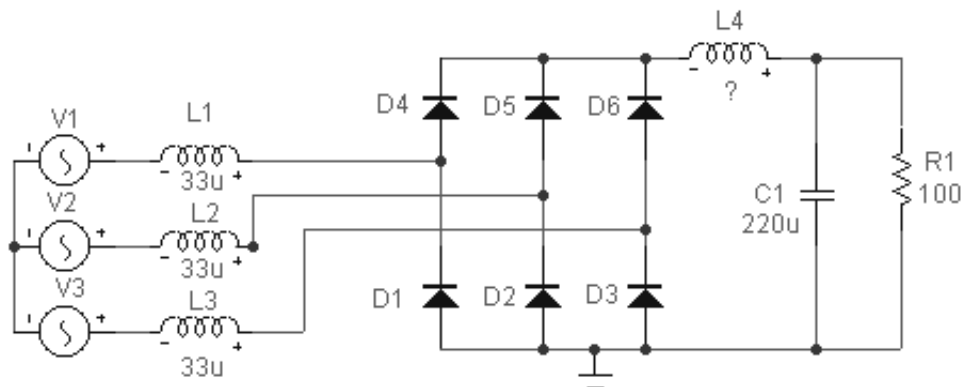
$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \frac{U_n^2}{U_1^2}} \cdot 100[\%]$$

kde U_n je poměrná amplituda n -té harmonické vztažená k amplitudě základní harmonické

Šestipulsní usměrňovač má navíc v odebíraném proudu obsaženu i 5. a 7. harmonickou. Obsah těchto harmonických je patrný z **Tab.1**. Hodnota činitele celkového harmonického zkreslení bude v tomto případě $THD_I = 28,4 \%$. Podstatně jiným způsobem se bude chovat trojfázový můstkový usměrňovač zatížený obvodem RC. Hodnota jeho THD_I se bude pohybovat mezi 70 až 120 %. Což je zkreslení z hlediska EMC naprosto nepřijatelné.

5. Přídavná tlumivka na výstupu usměrňovače

Existuje několik kroků k nápravě výše popsaného problému. Jedním z nejjednodušších a v mnohých případech i globálně nejlepších, se jeví použití tlumivky ve ss obvodu usměrňovače. Toto zapojení je zobrazeno na následujícím obrázku :



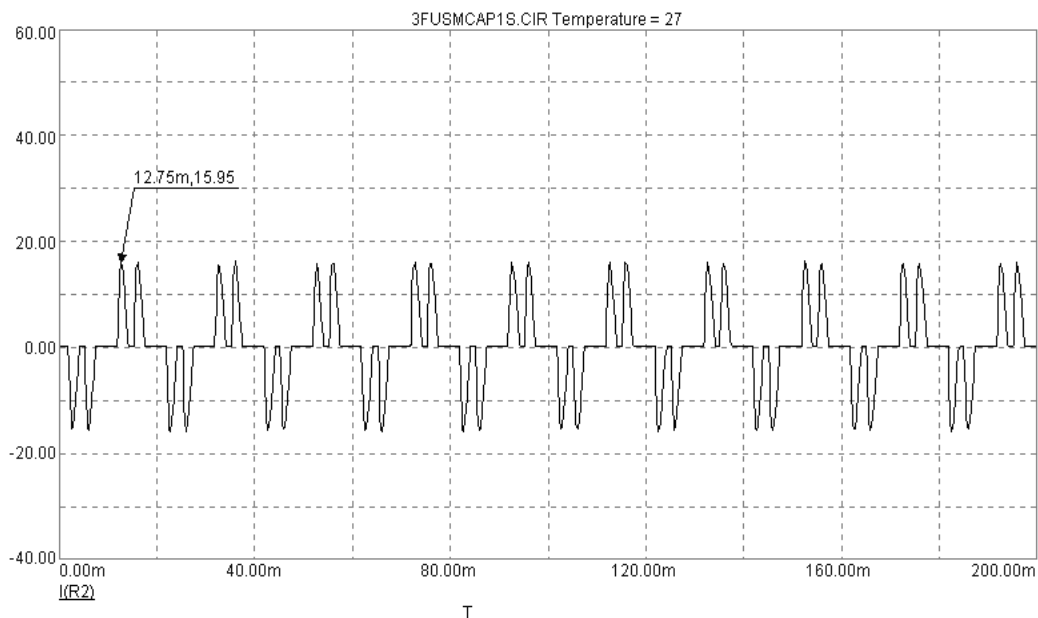
Obr. 5

Podrobnou analýzou tohoto zapojení získáme přehled o funkci tlumivky zapojené ve stejnosměrném obvodu. Proto byl zvolen hrubý rozsah hodnot připojené indukčnosti od 1 μ H do 500 mH. Pro tyto hodnoty byla provedena simulace. Simulovány byly především tyto veličiny v závislosti na proměnném chování obvodu:

- vstupní proud usměrňovače (na straně AC)
- spektrum harmonických složek vstupního proudu usměrňovače

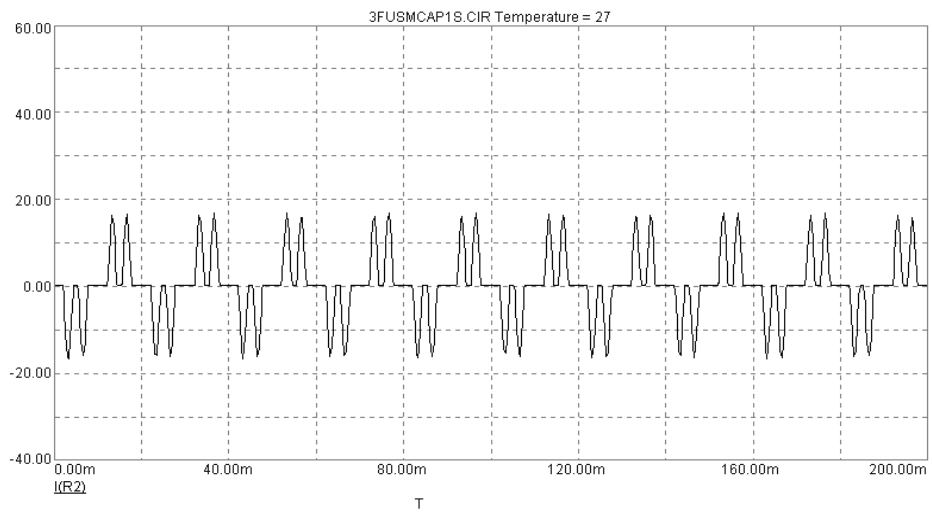
- činitel celkového harmonického zkreslení THD
- napětí na zátěži
- průběh napětí popřípadě proudů na jednotlivých diodách, pro odečtení úhlu překrytí

Vstupní proud usměrňovače je proud, který protéká střídavým obvodem usměrňovače, a je charakterizován harmonickými složkami proudu emitovanými usměrňovačem. Pro porovnání vlivu přídavné tlumivky ve stejnosměrné části obvodu usměrňovače jsou na **obrázcích 6., 7., 8.** zobrazeny průběhy primárního proudu pro hodnoty přídavné tlumivky $1\mu\text{H}$, 1mH a 100mH .

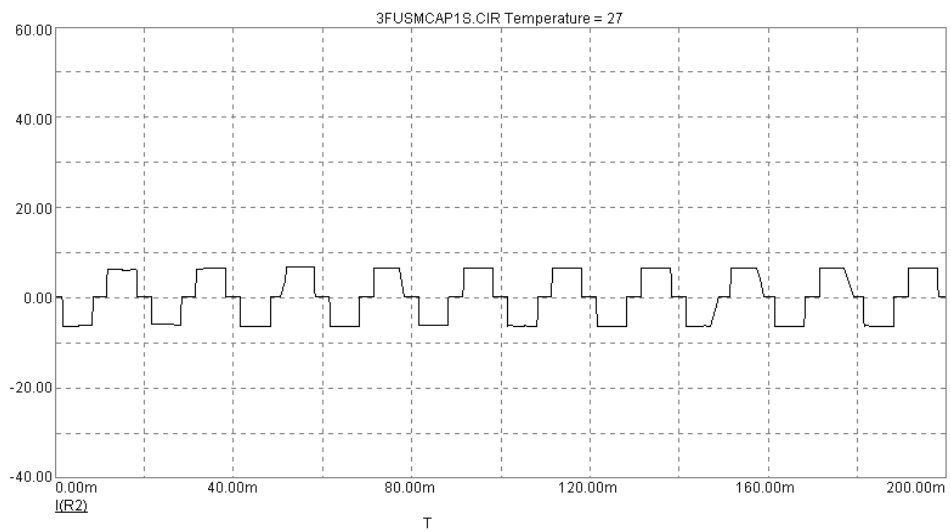


Obr 6: Vstupní proud usměrňovače pro $L_{ss} = 1\mu\text{H}$

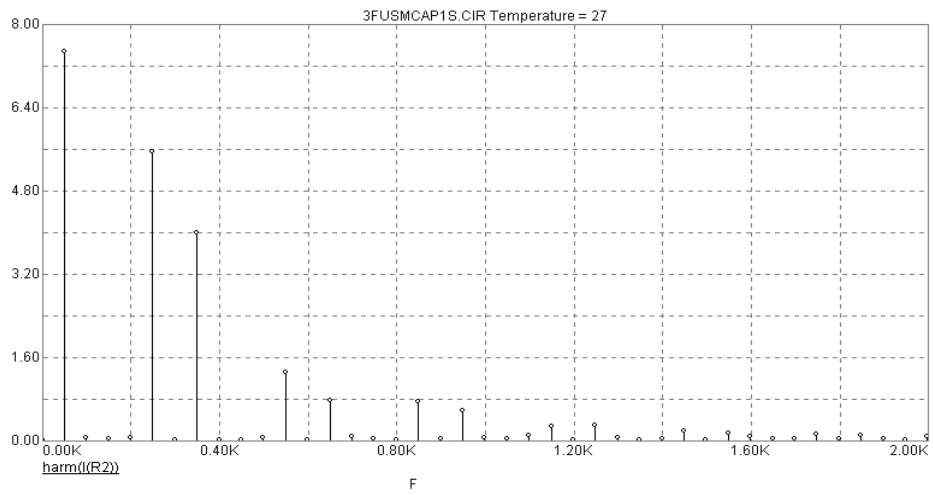
Na těchto průbězích lze vidět, že přídavná tlumivka ve stejnosměrném obvodu má vliv především na vyhlazení vstupního proudu usměrňovače. Na dalších průbězích je možno porovnat, jak se bude měnit spektrum harmonických složek tohoto primárního proudu. Pro přehlednost jsou uvedeny **obrázky 9., 10., 11.** pro stejné hodnoty přídavné tlumivky ve stejnosměrném obvodu, jako pro proudy zobrazené na **obrázcích 6., 7., 8.**



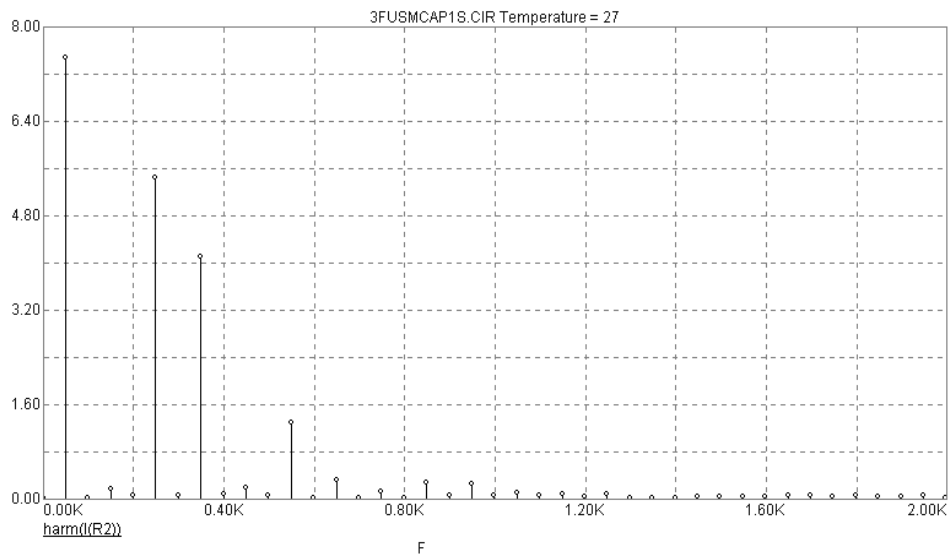
Obr. 7: Průběh vstupního proudu usměrňovače pro $L_{ss} = 1\text{mH}$



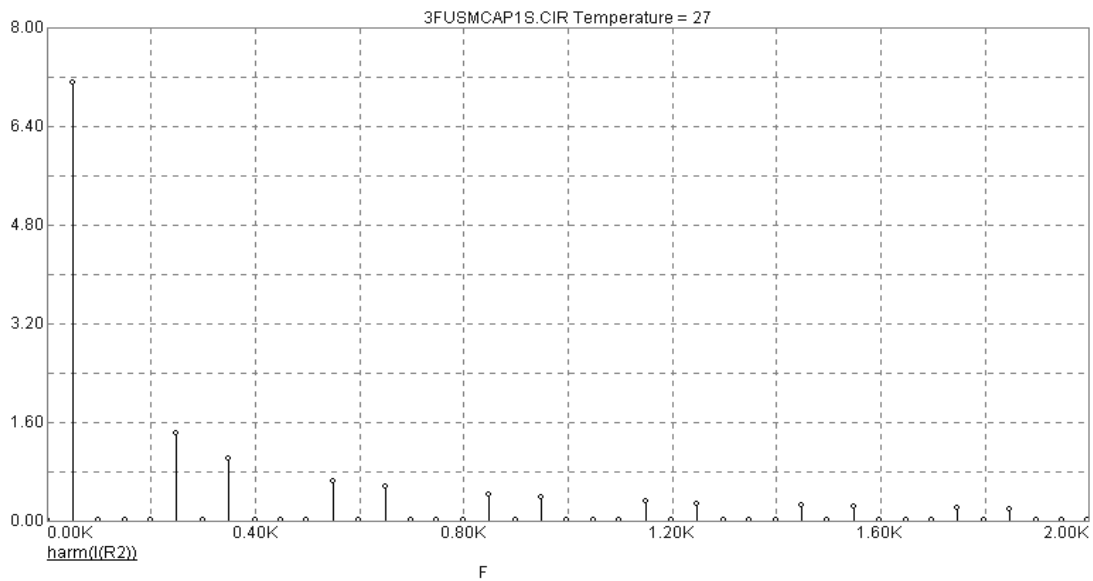
Obr. 8: Průběh vstupního proudu usměrňovače pro $L_{ss} = 100 \text{ mH}$



Obr. 9: Spektrum harmonických složek vstupního proudu pro $L_{ss} = 1 \mu\text{H}$

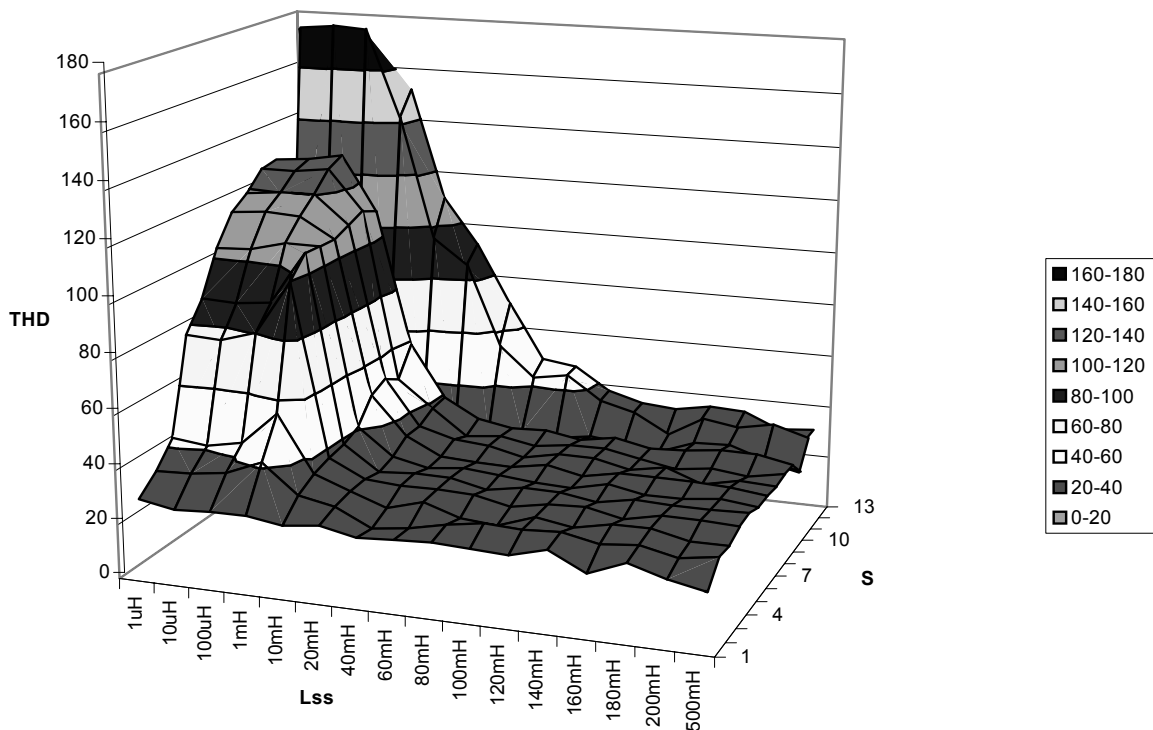


Obr. 10: Spektrum harmonických složek vstupního proudu pro $L_{ss} = 1 \text{ mH}$



Obr. 11: Spektrum harmonických složek vstupního proudu pro $L_{ss}=500$ mH

Na spektru harmonických složek primárního proudu usměrňovače je jasně patrný pokles amplitud jednotlivých harmonických složek primárního proudu. S rostoucí hodnotou



Obr. 12: Závislost poklesu THD na hodnotách L_{ss} a parametru S

indukčnosti přídavné tlumivky L_{ss} je amplituda těchto harmonických složek menší. Tento pokles je však, což bude prokázáno dále, patrný jen do určité hodnoty indukčnosti tlumivky L_{ss} .

Další důležitou veličinou pro posouzení chování obvodu je činitel celkového harmonického zkreslení proudu THD. Pomocí programu Micro Cap 6.0 lze zobrazit grafickou závislost, ze které je možno velikost THD odečíst.

Závěr

Na základě zde provedených analýz pro konkrétní zapojení je možno vytvořit závěrečnou závislost poklesu THD vstupního proudu usměrňovače na hodnotách tlumivky L_{ss} a na hodnotách jednotlivých prvků. Jako proměnné prvky byl zvolen kondenzátor a odpor ve stejnosměrném obvodu usměrňovače. Každé dvojici hodnot byl přiřazen parametr S , např.

$S1 \cong (C = 25 \mu\text{F}, R = 25 \Omega)$. Bylo vytvořeno 13 hodnot parametru S a provedeny analýzy pro indukčnosti od $1 \mu\text{H}$ do 500 mH . Indukčnost byla měněna skokově v 15 ti krocích, které byly voleny s ohledem na předpokládaný výskyt poklesu hodnot THD. Tím byla provedena tříprvková analýza a určen interval, v kterém je nutno zvolit hodnotu přídavné tlumivky L_{ss} ve stejnosměrném obvodu usměrňovače, aby bylo dosaženo potřebného procentuálního poklesu THD. Tato závislost je zobrazena na obr.č.13 .

Pro daný typ usměrňovače ($L_r = 33 \mu\text{F}$, $C = 220 \mu\text{F}$, $R = 100 \Omega$, $U = 400 \text{ V}$) je možno doporučit připojení přídavné tlumivky o velikosti 100 mH , pro kterou THD vstupního proudu nepřesáhne hodnotu 30% .

Dále je možno konstatovat, že pokud bude k tomuto obvodu připojena zátěž, jejíž parametry budou zvoleny z intervalu pro $C = \langle 25, 500 \rangle \mu\text{F}$ a pro $R = \langle 1, 1000 \rangle \Omega$, tak s připojenou přídavnou tlumivkou $L_{ss} = 120 \text{ mH}$ je možno měnit zátěž libovolně v těchto intervalech při zaručené maximální hodnotě THD vstupního proudu usměrňovače menší než 40% .

Literatura:

- [1] Kudyn, V. : Zlepšení vlastností šestipulsního usměrňovače s kapacitní zátěží z hlediska EMC. Diplomová práce, DFJP, Univerzita Pardubice 2001.

- [2] Bečka, J.: Příručka usměrňovací techniky – Polovodičová technika. SNTL, Praha 1971.
- [3] Pavelka, J. - Čeřovský, Z.: Výkonová elektronika (skripta). ČVUT, Praha 2000.
- [4] Heřman, J. a kolektiv: Příručka silnoproudé elektrotechniky. SNTL, Praha 1986.
- [5] Zákon č. 222/1994 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o státní energetické inspekci (energetický zákon).
- [6] PNE 33 3430-0. Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav. Podniková norma energetiky pro rozvod elektrické energie.
- [7] Kaganov, I. L.: Elektronnye i ionnye preobrazovateli. Moskva 1956.
- [8] Malík, L.: Analýza zpětných vlivů trojfázového můstkového usměrňovače s kapacitní zátěží na napájecí síť ON. Diplomová práce, DFJP, Univerzita Pardubice 2000.

V Praze, srpen 2001

Lektoroval: Ing. Jiří Krupica
ČD TÚDC Praha