

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

EMC trakční měnírny vůči napájecí síti
při paralelním provozu trakčních usměrňovačů

Ladislav Mlynařík

Diplomová práce

2008

SOUHRN

Tato diplomová práce se zabývá studii paralelního provozu několika trakčních usměrňovacích jednotek a jejich působení na napájecí síť. Je zde zkoumán především obsah vyšších harmonických v primárním proudu transformátoru usměrňovače.

Kvůli srovnání je také provedena simulace jedné, samostatně pracující jednotky, jejíž emitovaný obsah vyšších harmonických je porovnán s odhadem uvedeným v PNE 33 3430-0.

Reálnost prováděných simulací je v závěru dokázána srovnáním s reálně naměřenými hodnotami z několika TNS v oblasti severní Moravy.

KLÍČOVÁ SLOVA

primární proud, vyšší harmonická, usměrňovač, transformátor, šestipulzní zapojení, dvanáctipulzní zapojení

TITLE

EMC of traction substation in the face of supply network by parallel operation of traction rectifiers

ABSTRACT

This diploma work is concerned with parallel operation of several traction rectifier units and their impact on supply network. In the first place content of current harmonics in primary current of rectifier's transformer is examined here.

For a chance of comparison also a simulation of one independently working unit is performed. Its emitted content of current harmonics is compared with an estimation stated in PNE 33 3430-0.

Objectivity of performed simulations is proved by comparison with practically measured values from several TSS in a district of northern Moravia.

KEYWORDS

primary current, current harmonic, rectifier, transformer, six-pulse connection, twelve-pulse connection

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Karlu Hlavovi, CSc., za návrh a zadání této zajímavé práce. Dále bych mu chtěl poděkovat za poskytnuté rady a cenné připomínky při následné realizaci zadaného tématu.

V Klatovech dne 1.května 2008

Ladislav Mlynařík

OBSAH

Úvod	8
1 Diodová trakční usměrňovací jednotka a její vliv na odebíraný primární proud.....	9
1.1 Šestipulzní jednotka s odporovou a indukční zátěží	9
1.1.1 Popis funkce šestipulzního usměrňovače.....	9
1.1.2 Šestipulzní jednotka s odporovou zátěží.....	12
1.1.3 Šestipulzní jednotka s RL zátěží	14
1.2 Dvanáctipulzní jednotka s odporovou a indukční zátěží	15
1.2.1 Popis funkce dvanáctipulzního usměrňovače	16
1.2.2 Důkaz eliminace některých vyšších harmonických v primárním proudu vzájemným působením můstků zapojených do Y a D.....	19
1.2.3 Dvanáctipulzní jednotka s odporovou zátěží	22
1.2.4 Dvanáctipulzní jednotka s RL zátěží	23
1.3 Úhel překrytí diodových proudů	23
1.3.1 Vznik úhlu překrytí	23
1.3.2 Vliv úhlu překrytí na časový průběh odebíraného proudu.....	25
2 Odvození náhradních schémat pro simulace trakčních usměrňovačů	27
2.1 Výkonová polovodičová dioda	27
2.1.1 Parametry reálně používané diody	27
2.1.2 Model diody v programu PSpice	28
2.2 Náhradní schéma usměrňovačového transformátoru	29
2.3 Odvození náhradního schématu jedné jednotky	30
2.4 Náhradní schéma paralelního provozu více jednotek	32
2.5 Zatěžovací charakteristika usměrňovače	34
2.5.1 Úbytek napětí na činných odporech diod a vinutí transformátoru.....	35
2.5.2 Vliv úhlu překrytí na průběh zatěžovací charakteristiky	38
3 Procentní obsah harmonických v proudu odebíraném jedním trakčním usměrňovačem.....	39
3.1 Maximální obsah vyšších harmonických v primárním proudu podle PNE 33 3430-0.....	39
3.2 Simulační studie závislosti obsahu vyšších harmonických primárního proudu na zátěži	41

3.3	Porovnání hodnot získaných simulací s hodnotami odhadnutými v PNE 33 3430-0.....	43
4	Simulační studie paralelního provozu několika trakčních usměrňovačů.....	46
4.1	Simulace dvou paralelně pracujících usměrňovačů	46
4.2	Simulace tří paralelně pracujících jednotek	48
5	Porovnání výsledků simulačních studií a reálně naměřených spekter primárního proudu odebíraného měnírnou	50
5.1	Srovnání spekter primárního proudu jedné, dvou a tří paralelně pracujících jednotek.....	50
5.1.1	Vysvětlení zjištěných poznatků	52
5.2	Srovnání simulacemi získaných a naměřených hodnot	53
	Závěr	55
	Seznam použité literatury	56
	Seznam obrázků.....	57
	Seznam tabulek	58
	Seznam grafů	59
	Seznam příloh	60

ÚVOD

Elektromagnetická kompatibilita, tedy vliv na ostatní elektrická zařízení, je v dnešní době často zmiňovaný termín. Zvláště v případě výkonových zařízení, mezi které trakční usměrňovače neodmyslitelně patří, lze předpokládat možnost často i výrazného ovlivnění okolních, většinou slaboproudých zařízení. To se projevilo například již na počátku elektrizace československých železničních tratí, kdy zvlněné stejnosměrné trakční napětí rušilo souběžná sdělovací vedení.

EMC trakční měřírny je nutné sledovat především kvůli jejímu zpětnému působení na napájecí síť v připojovacím bodě do této sítě, tj. na primárních vinutích transformátorů usměrňovačů.

Jedná se zejména o existenci proudů vyšších harmonických, které nesmí přesáhnout určitou procentní hodnotu vztaženou k velikosti 1.harmonické. Dále je v připojovacím bodě sledován účinník 1.harmonické, pro který jsou opět předepsány meze.

Tato diplomová práce je reakcí na situaci, kdy při měření obsahu vyšších harmonických v primárním proudu napájecí stanice docházelo k „nevysvětlitelným“ skokovým změnám procentního obsahu těchto vyšších harmonických. Po podrobnějším zkoumání uvedeného jevu bylo usouzeno, že k této situaci může docházet v době připojování a odpojování usměrňovačových jednotek v TNS.

Právě z tohoto důvodu se práce zabývá především rozdílem poměrného obsahu harmonických primárního proudu transformátoru usměrňovače, který nastává při provozu trakční měřírny s jedním nebo více paralelně pracujícími usměrňovacími jednotkami při stejném trakčním zatížení.

K pochopení uvedených jevů je v úvodu popsána funkce šestipulzního a dvanáctipulzního zapojení trakčního usměrňovače a také vznik a důsledek existence tzv. „úhlu překrytí“ diodových proudů.

Samotný důkaz rozdílu obsahu vyšších harmonických při provozu s jedním nebo více usměrňovači je proveden pomocí počítačové simulace náhradního schématu trakční měřírny programem PSpice 10 demo.

1 DIODOVÁ TRAKČNÍ USMĚRŇOVACÍ JEDNOTKA A JEJÍ VLVIV NA ODEBÍRANÝ PRIMÁRNÍ PROUD

Šestipulzně i dvanáctipulzně zapojená usměrňovací jednotka má značný vliv na časový průběh odebíraného proudu. To je dáno především periodicky se opakující komutací diod. Doba komutace závisí na rozptylové reaktanci usměrňovačového transformátoru (který je možno nahradit podélnou indukčností podle kapitoly 2.2) a velikosti odebíraného stejnosměrného proudu.

Právě díky nesinusovému tvaru primárního proudu obsahuje tento proud značné množství vyšších harmonických a může proto dojít k ovlivnění ostatních zařízení připojených k napájecí síti.

1.1 Šestipulzní jednotka s odporovou a indukční zátěží

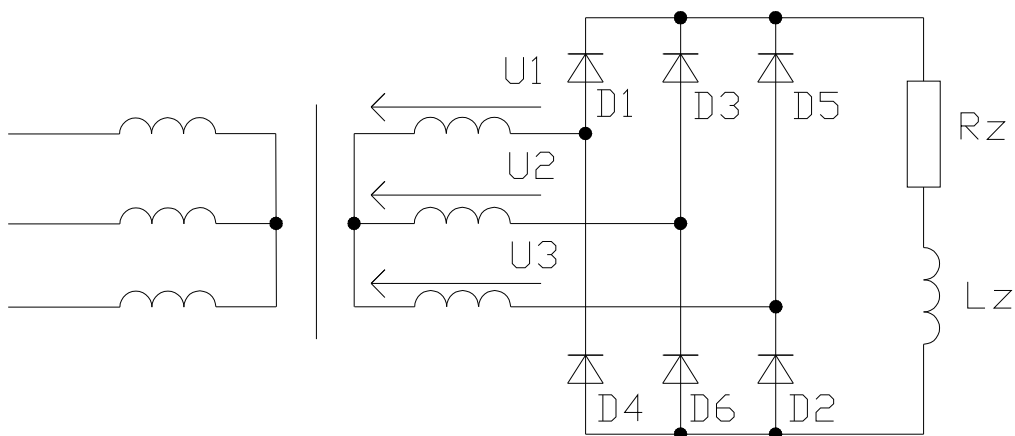
Šestipulzní schéma trakčního usměrňovače představuje běžné průmyslově používané zapojení třífázového usměrňovače.

V následujícím textu je popsána funkce šestipulzního usměrňovače a dále pak zapojení usměrňovače s primárním vinutím do hvězdy a sekundárním vinutím do hvězdy nebo trojúhelníku. Pro představu o vlivu indukčnosti zátěže na vyhlazení usměrněného proudu je znázorněna vždy také varianta se zátěží čistě odporovou, i když tato možnost se v trakci nevyskytuje.

Uvedená šestipulzní uspořádání trakčních usměrňovačů jsou využívána například v měnírnách městské dopravy nebo u zahraničních železnic.

1.1.1 Popis funkce šestipulzního usměrňovače

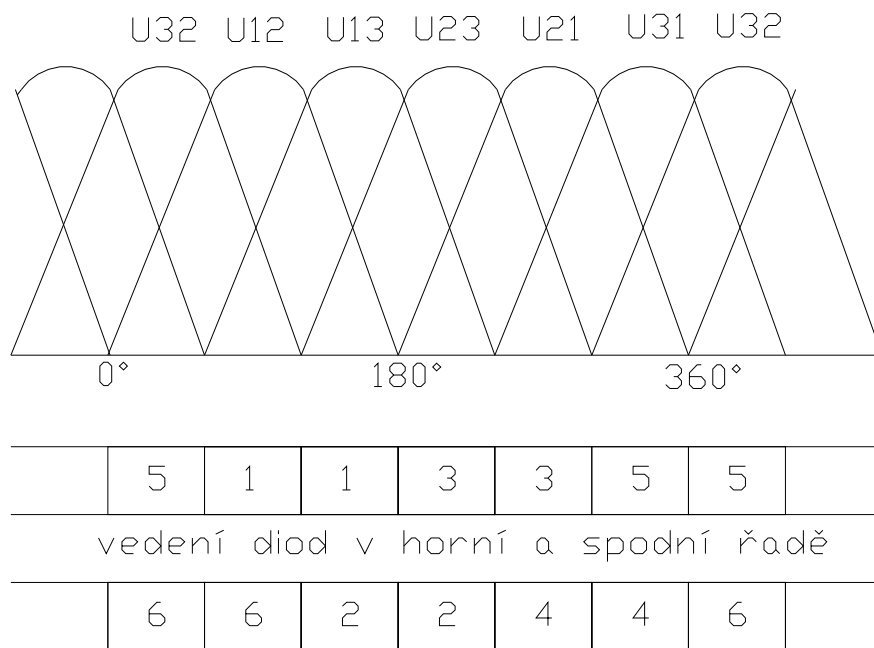
Šestipulzní usměrňovač vznikne spojením dvou třípulzních uzlových usměrňovačů do série bez vyvedení nulového vodiče (např. obr. 1.1). Takové usměrňovače mohou být napájeny transformátory zapojenými do hvězdy nebo do trojúhelníku. Používané jsou i kombinace těchto zapojení. Výhodou uvedeného zapojení je, že sekundární proud transformátoru neobsahuje stejnosměrnou složku a transformátor je proto plně využit. První harmonická takto usměrněného napětí má 6 pulzů.



obr. 1.1: zapojení šestipulzního můstkového usměrňovače

Po připojení napájecího napětí je ve vedení dioda z horní řady můstku, jejíž anoda má nejvyšší kladný potenciál. Na ostatních diodách v horní řadě bude závěrné napětí o velikosti sdruženého napětí příslušné diody a diody, jež je právě ve vedení. Ve spodní řadě povede ta dioda, jejíž potenciál katody bude nejnižší. Na zbývajících dvou diodách bude závěrné napětí opět o velikosti sdruženého napětí té diody a diody ve vedení.

Pro znázornění napětí na usměrňovači můžeme vycházet se sdružených napětí U_{12} , U_{21} , U_{23} , U_{32} , U_{31} a U_{13} . Tato napětí a pořadí vedení jednotlivých diod vystihuje obr. 1.2. Na tomto obrázku, který nerespektuje úhel překrytí, je také dobře vidět šest pulzů zvlněného stejnosměrného napětí.



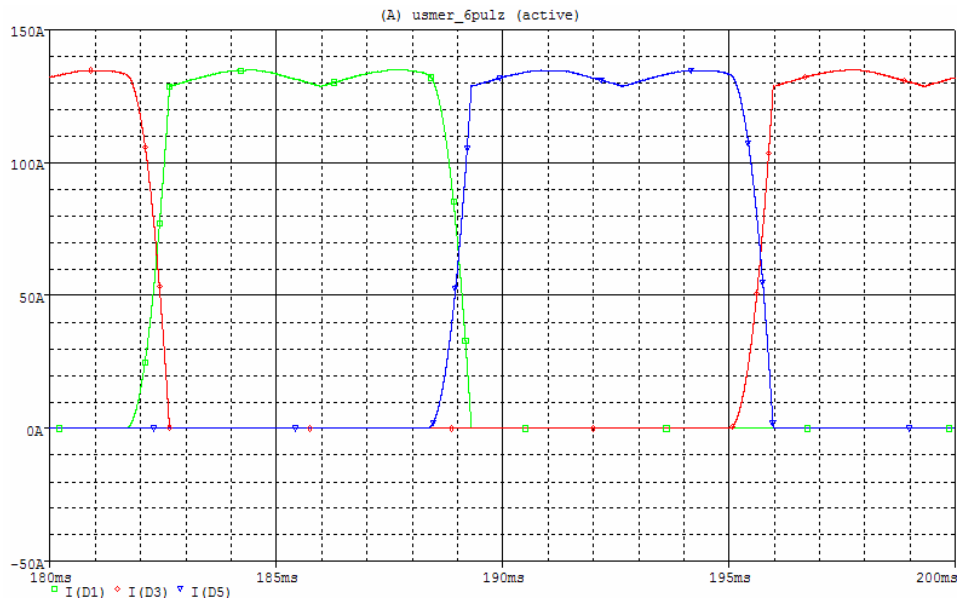
obr. 1.2: vedení diod ve třífázovém šestipulzním usměrňovači

Střední hodnotu usměrněného napětí a proudu udávají následující vztahy:

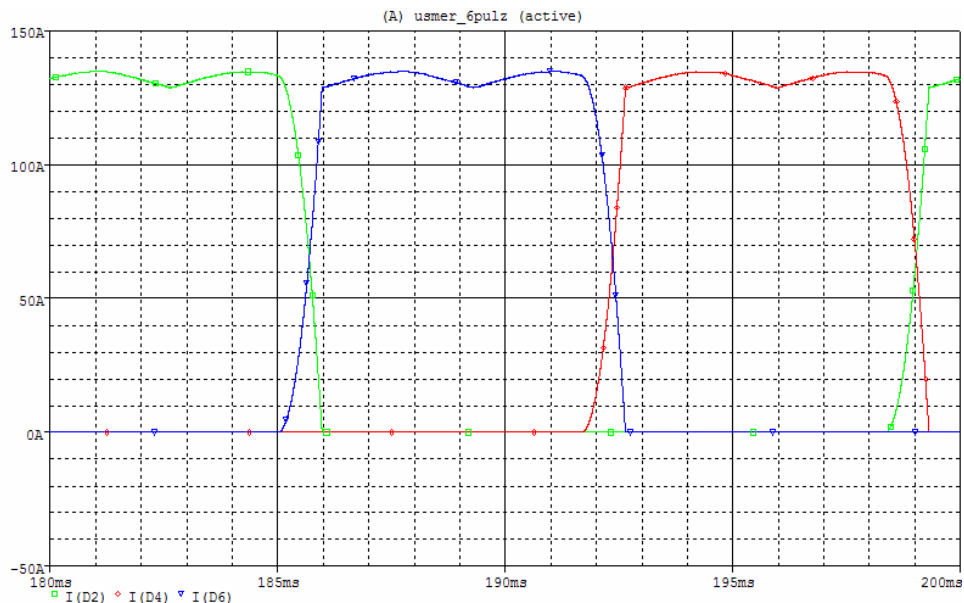
$$U_{str} = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{3}\sqrt{2} U_{ef} \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{ef} ; \text{kde } U_{ef} \text{ je fázové napětí}$$

$$I_{str} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \frac{U_{ef}}{R} ; \text{kde } R \text{ představuje zátěž}$$

Následující obr. 1.3 a obr. 1.4 ukazují pořadí vedení diod ve skutečném šestipulzním usměrňovači. Porovnání obrázků s obr. 1.2 potvrdí správnost teoretických úvah v této kapitole.



obr. 1.3: pořadí vedení diod v „horní řadě“ šestipulzního usměrňovače



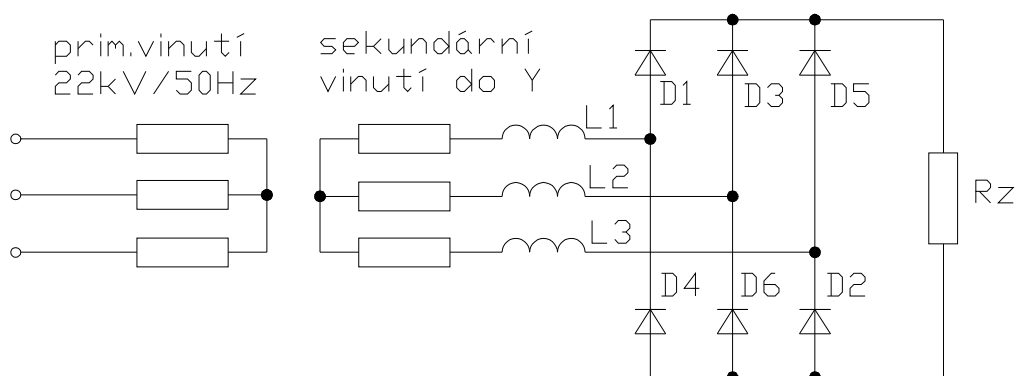
obr. 1.4: pořadí vedení diod ve „spodní řadě“ šestipulzního usměrňovače

1.1.2 Šestipulzní jednotka s odporovou zátěží

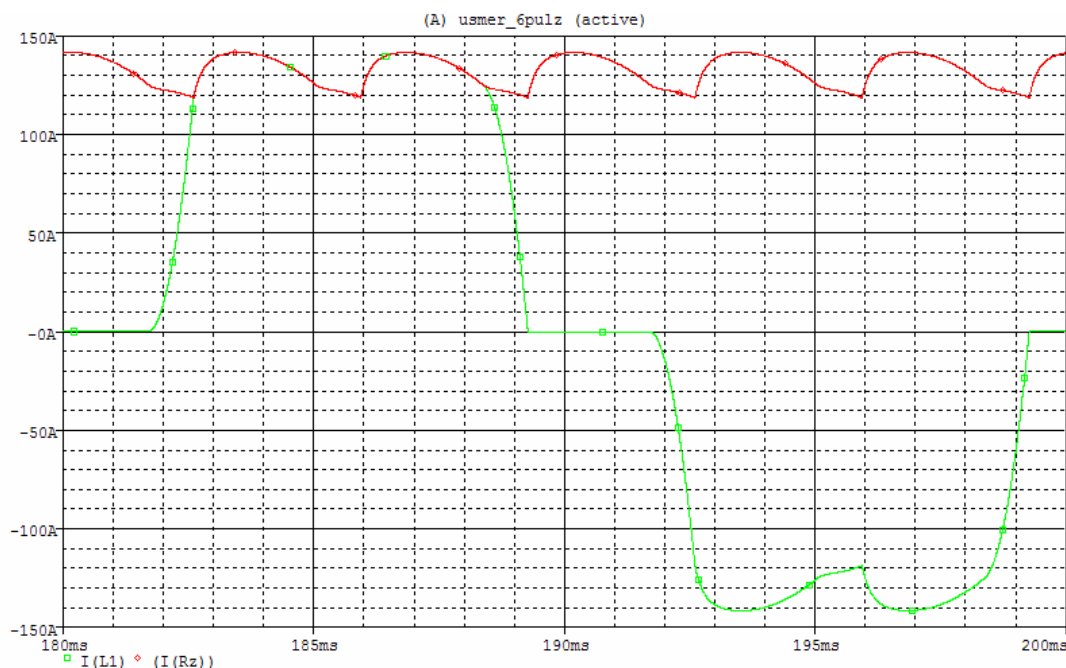
Zapojení usměrňovače je možné provést se spojením sekundárního vinutí transformátoru do hvězdy nebo trojúhelníku, jak bylo uvedeno výše. Proto jsou dále ukázány obě možnosti.

Na obr. 1.5 je znázorněno zapojení třífázového usměrňovače s primárním i sekundárním vinutím spojeným do hvězdy. obr. 1.6 ukazuje zvlnění usměrněného proudu a především značně nesinusový průběh primárního proudu usměrňovače. Dále je zde dobře vidět, jak vlnění stejnosměrného proudu „kopíruje“ průběh proudu na primární straně transformátoru.

Indukčnosti L1, L2, L3 představují rozptylové indukčnosti transformátoru.

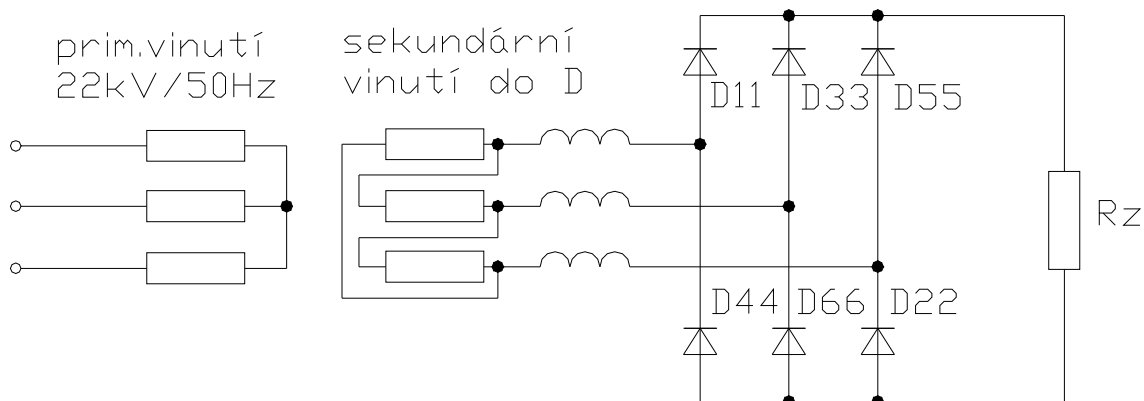


obr. 1.5: šestipulzní usměrňovač se sekundárním vinutím do Y a odporovou zátěží

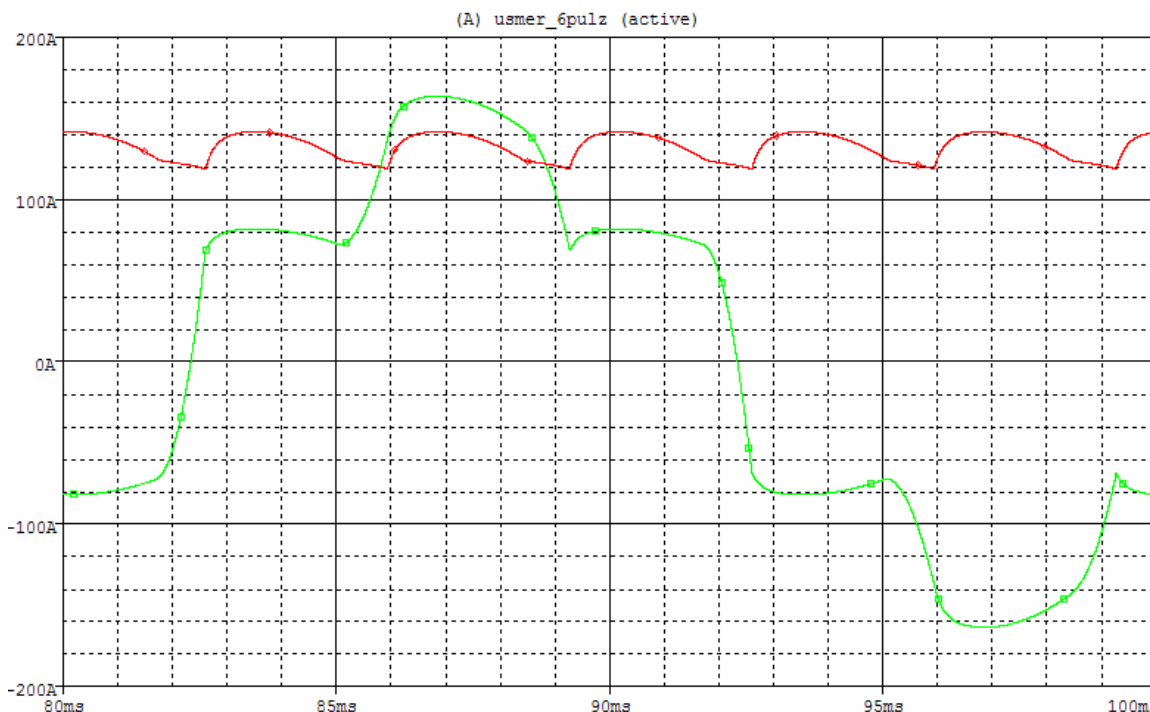


obr. 1.6: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a stejnosměrného proudu odporovou zátěží $I(Rz)$

obr. 1.7 ukazuje zapojení šestipulzního usměrňovače, tentokrát se sekundárním vinutím do trojúhelníku. Na obr. 1.9 je potom vidět primární proud, který se odlišuje od předchozího zapojení a je opět značně nesinusový.



obr. 1.7: šestipulzní usměrňovač se sekundárním vinutím do D a odporovou zátěží



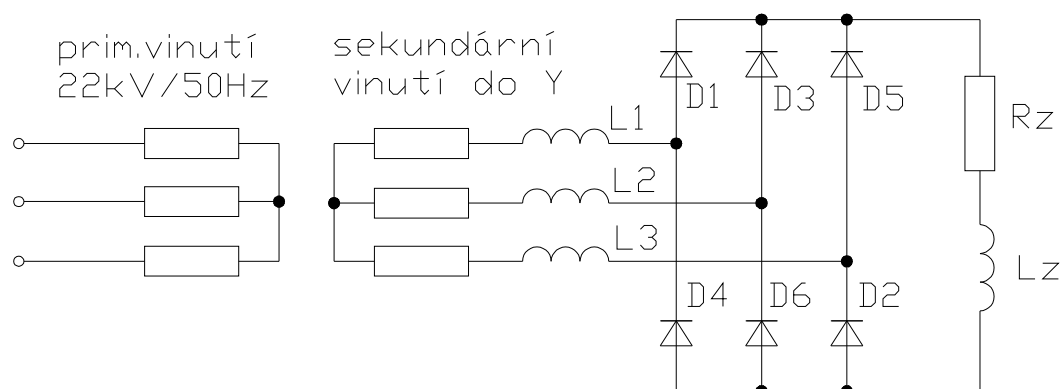
obr. 1.8: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a stejnosměrného proudu odporovou zátěží $I(Rz)$

1.1.3 Šestipulzní jednotka s RL zátěží

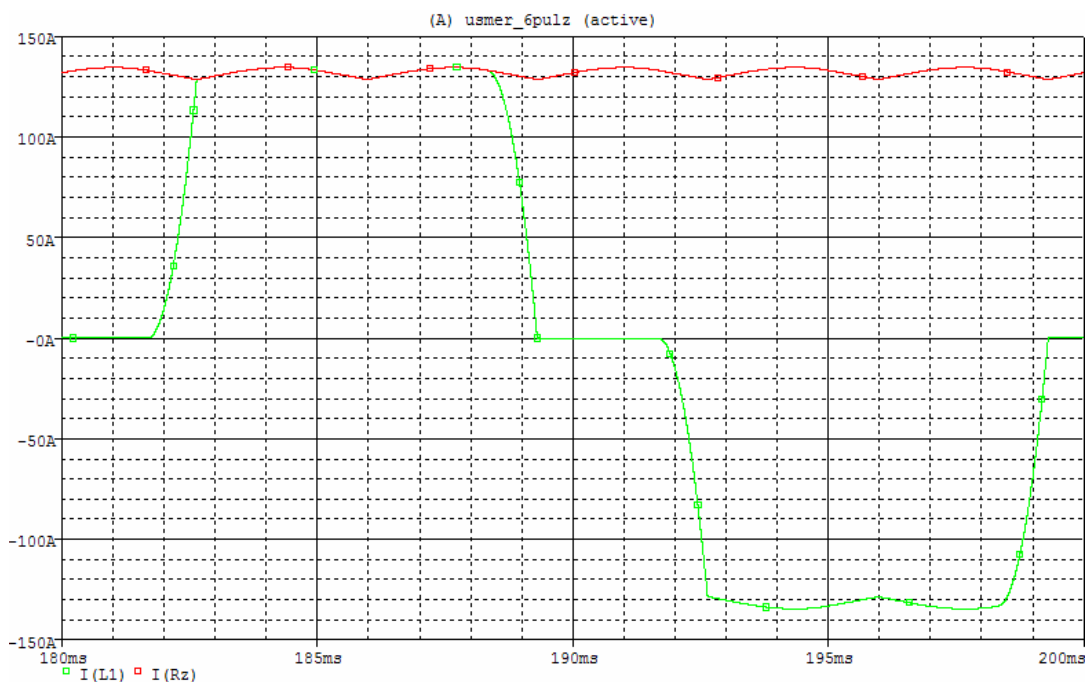
Při zatížení usměrňovače RL zátěží jsou opět popsány obě možnosti zapojení sekundárního vinutí usměrňovačového transformátoru.

Při zapojení indukčnosti (50mH) do zátěže usměrňovače je možné pozorovat vyhlazení usměrněného proudu a také částečnou změnu průběhu primárního proudu (vyhlazení), který je opět nesinusový.

Zde uvedené průběhy s indukční zátěží odpovídají reálným průběhům na používaných šestipulzních trakčních usměrňovačích.

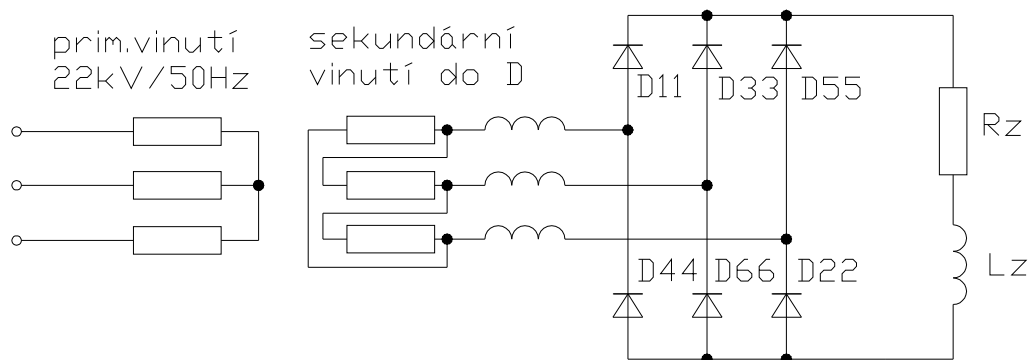


obr. 1.9: zapojení šestipulzního usměrňovače se sekundárním vinutím do Y a RL zátěží

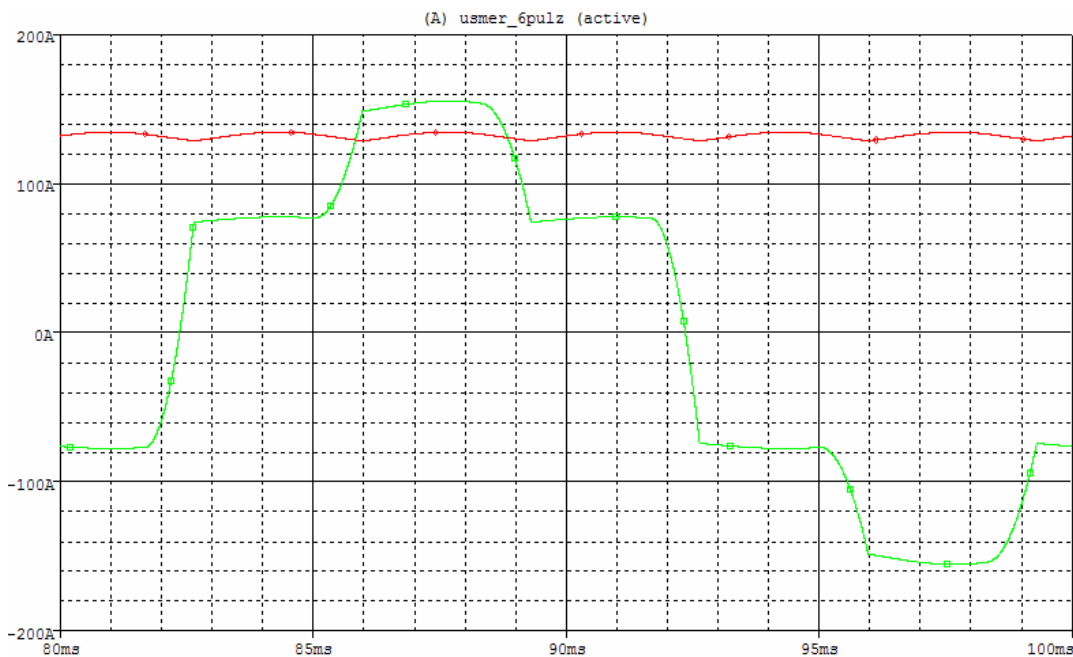


obr. 1.10: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a usměrněného proudu RL zátěží $I(Rz)$

Na obrázku obr. 1.11 je znovu nakreslen šestipulzní usměrňovač s RL zátěží, v tomto případě však se sekundárním vinutím transformátoru zapojeným do trojúhelníku. Při porovnání obr. 1.8 s obr. 1.12 je opět vidět vyhlazení usměrněného proudu podobně jako u výše uvedeného zapojení se sekundárním vinutím transformátoru do hvězdy.



obr. 1.11: zapojení šestipulzního usměrňovače se sekundárním vinutím do D a RL zátěží



obr. 1.12: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a stejnosměrného proudu RL zátěží $I(Rz)$

1.2 Dvanáctipulzní jednotka s odporovou a indukční zátěží

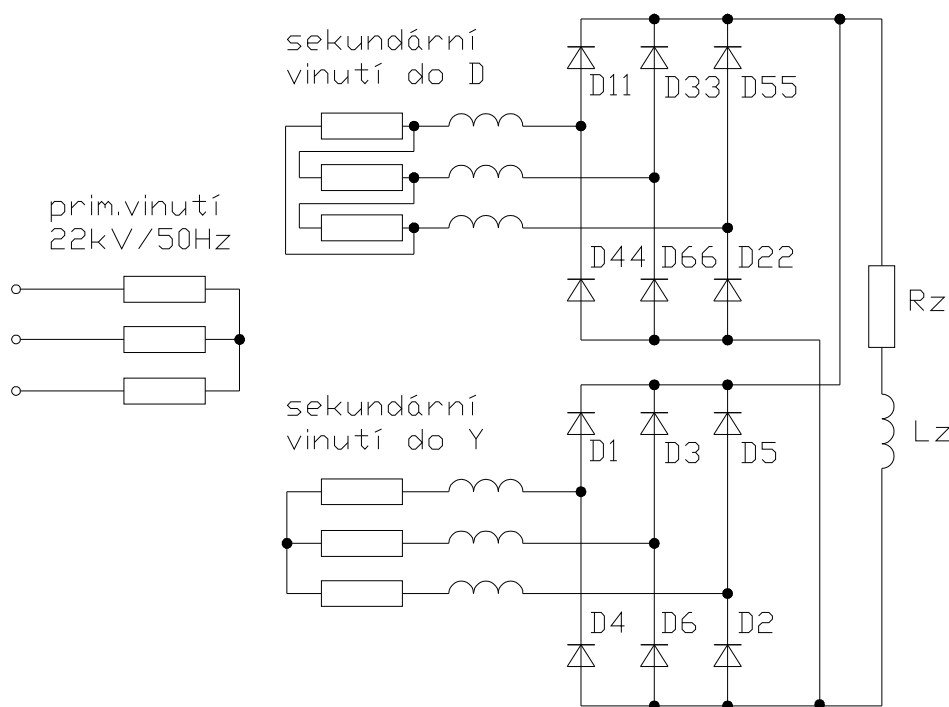
Dvanáctipulzní schéma trakčního usměrňovače se používá od počátku elektrizace československých tratí napětím 3kV, kdy bylo navrženo Ing. Iblem.

Dvanáctipulzní usměrnění je výhodné pro menší zvlnění výstupního napětí oproti usměrnění šestipulznímu a také kvůli lepšímu využití sekundárního vinutí transformátoru, kde oběma sekcemi sekundárního vinutí protéká proud dvakrát za periodu napájecího napětí.

Velkou výhodou dvanáctipulzního zapojení z hlediska EMC je, že dochází ke generování 5., 7., 17. a 19. harmonické primárního proudu u obou sekcí usměrňovače v protifázi, čímž je dosaženo zanedbatelných hodnot na těchto frekvencích a nejnižší harmonická frekvence na primární straně transformátoru je 550Hz, jak popisuje kapitola 1.2.2.

1.2.1 Popis funkce dvanáctipulzního usměrňovače

Dvanáctipulzní usměrňovač (obr. 1.13) je tvořen dvěma paralelně pracujícími trojfázovými můstky, z nichž jeden je napájen sekundárním vinutím transformátoru zapojeným do hvězdy a druhý vinutím zapojeným do trojúhelníku. Činnost těchto můstků je popsána v kapitole 1.1. Oba můstky byly v počátcích elektrizace odděleny ještě tzv. nulovou tlumivkou, která zajišťovala oddělení obou částí usměrňovače v době komutace.

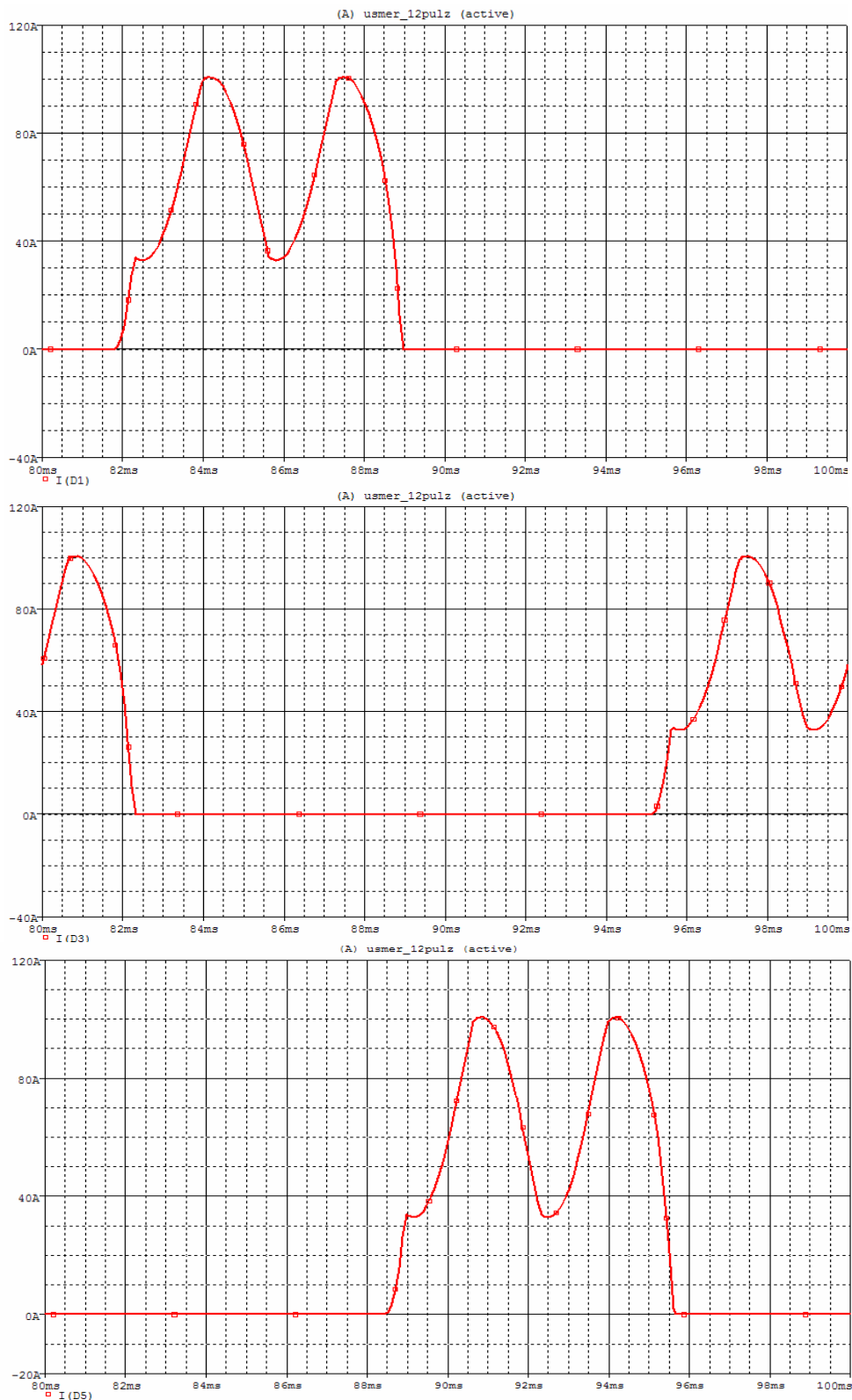


obr. 1.13: zapojení dvanáctipulzního usměrňovače

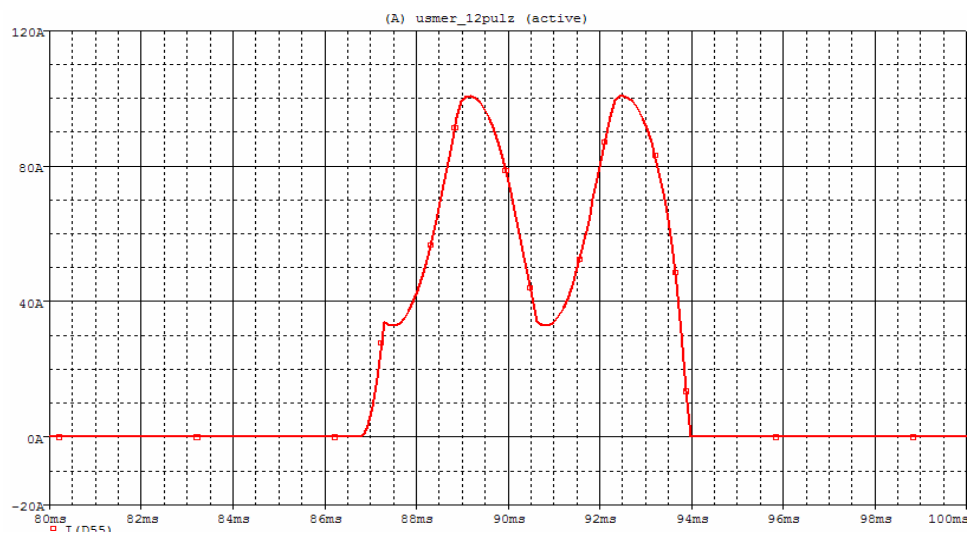
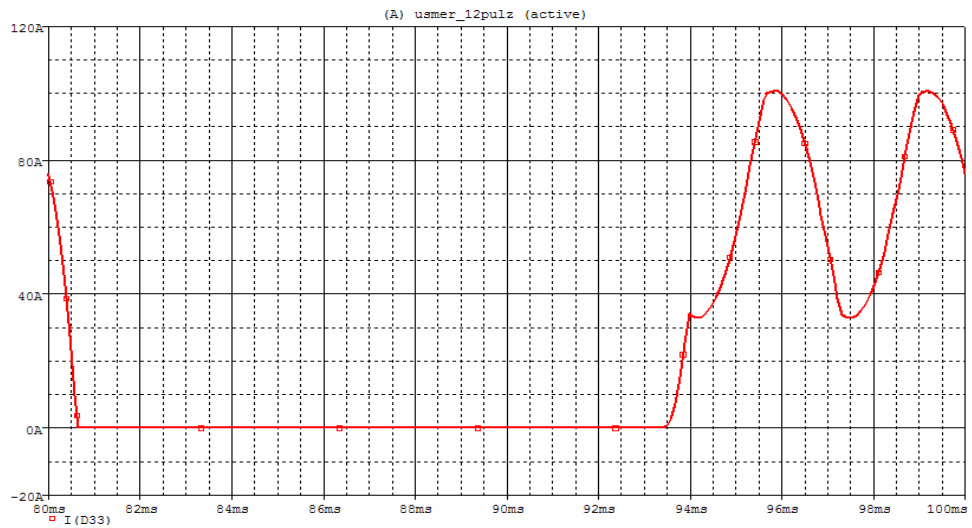
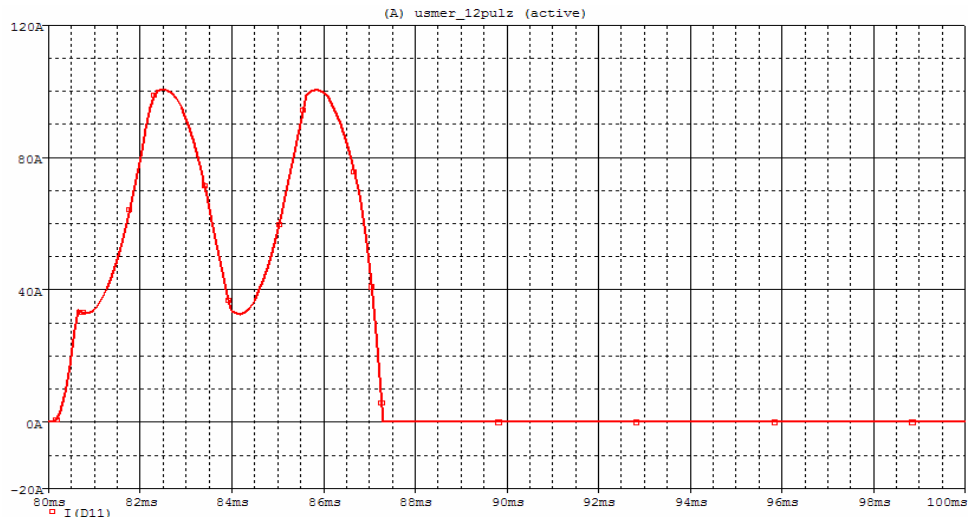
Usměrňovačový transformátor má za tímto účelem navinuto jedno vinutí primární a dvě galvanicky oddělená vinutí sekundární. Primární vinutí je zapojeno do hvězdy, sekundární potom do hvězdy a do trojúhelníku. Díky tomu je dosaženo posunutí pulzů výstupního stejnosměrného napětí o 30° elektrických a napětí je tedy dvanáctipulzní.

Pořadí vedení diod kladné polarity výstupního napětí v Y sekci usměrňovače ukazuje obr. 1.14, vedení diod v D sekci usměrňovače potom obr. 1.15. Porovnáním obou obrázků je vidět dvanáct pulzů výstupního napětí.

Podmínkou pro takto paralelně pracující usměrňovače je stejná hodnota sdružených napětí obou sekcí transformátoru (Y,D) přiváděných na vstup usměrňovačů. Další důležitou podmínkou je stejná rozptylová indukčnost obou sekcí usměrňovačového transformátoru.



obr. 1.14: pořadí vedení diod kladné polarity Y sekce dvanáctipulzního usměrňovače



obr. 1.15: pořadí vedení diod kladné polarity *D* sekce dvanáctipulzního usměrňovače

1.2.2 Důkaz eliminace některých vyšších harmonických v primárním proudu vzájemným působením můstků zapojených do Y a D

Jak již bylo zmíněno v úvodu, dvanáctipulzní zapojení usměrňovače, tedy společné působení můstku zapojeného do hvězdy a do trojúhelníku, negeneruje některé vyšší harmonické zpět do sítě.

Obě části dvanáctipulzního usměrňovače komutují díky nulové tlumivce samostatně. Na primární straně se tedy jeví jako dva samostatně pracující šestipulzní můstkové usměrňovače. Každý z těchto usměrňovačů generuje do primárního proudu své vyšší harmonické. Jak je ovšem ukázáno dále, dochází ke generování vyšších harmonických řádů 5., 7., 17. a 19. oběma můstky ve stejné velikosti, ale zároveň v protifázi, čímž je na zmiňovaných frekvencích na primární straně dosaženo téměř nulových hodnot.

Abychom získali spektrum primárního proudu šestipulzního usměrňovače zapojeného do hvězdy, byla provedena počítačová simulace schématu zobrazeného na obr. 2.4 programem PSpice 10 demo. Součástí simulace bylo také provedení Fourierovy analýzy proudu označeného jako $I(L1)$, a to až do 25. harmonické. Okamžité hodnoty primárního proudu v přívodu do sekce Y jsou označeny jako $I_Y = I(L1)$.

Podobnou simulaci pro zapojení usměrňovače s vinutím transformátoru do trojúhelníku nebylo možné pomocí programu PSpice 10 provést. Proto bylo zapojení trojúhelníku transfigurováno na zapojení do hvězdy.

V netlistu uvedeného v kapitole 2.3 pro zapojení do hvězdy došlo k posunu fázových napětí o 30° el. na 30° , 150° a 270° . Součástí transfigurace bylo také snížení amplitudy fázového napětí na hodnotu $2050/\sqrt{3}$.

Okamžité hodnoty primárního proudu v přívodu do sekce D jsou vyjádřeny použitím Kirchhoffova zákona jako: $I_D = I(L1D) - I(L2D)$; kde $I(L1D)$ je proud procházející podélnou indukčností L1D připojenou na napětí VV1D a proud $I(L2D)$ je proud procházející podélnou indukčností L2D připojenou na napětí VV2D. Tento proud je nutné od $I(L1D)$ odečítat, protože napětí -VV2D je vůči VV1 otočeno o 30° el., ale v opačném smyslu než VV1D.

Protože proud I_D není získán jako samostatný výsledek simulace, ale je popsán kombinací několika individuálně simulovaných průběhů, není možné získat amplitudové a fázové složky spektra pomocí programu PSpice přímo. Proto byla programem PSpice spočtena Fourierova transformace nejdříve proudu $I(L1D)$ a v dalším kroku proudu $I(L2D)$. Odečtením výsledků těchto simulací podle vztahu $I_D = I(L1D) - I(L2D)$ na jednotlivých

harmonických byly získány amplitudové a fázové složky spektra primárního proudu sekce usměrňovače zapojené do trojúhelníka.

Okamžité hodnoty celkového primárního proudu dvanáctipulzního usměrňovače I_{celk} jsou dány součtem I_Y a I_D . $I_{\text{celk}} = I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)]$.

Všechny simulace byly prováděny při zátěži $5\Omega/10\text{mH}$, což odpovídá velikosti usměrněného proudu 603A.

V tab. 1.1 jsou přehledně uvedeny amplitudy a fáze jednotlivých harmonických získaných výše popsanými simulacemi. Dále jsou uvedeny výpočty obsahu těchto harmonických v celkovém primárním proudu dvanáctipulzního usměrňovače podle vztahu $I_{\text{celk}} = I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)]$.

řád harmonické	I(L1)		I(L1D)		I(L2D)	
	velikost	úhel	velikost	úhel	velikost	úhel
5	9.948E+01	4.697E+01	5.741E+01	-1.630E+02	5.740E+01	7.702E+01
7	4.732E+01	-1.039E+00	2.732E+01	-1.510E+02	2.733E+01	-3.097E+01
11	1.368E+01	1.905E+01	7.896E+00	-1.085E+01	7.893E+00	-1.308E+02
13	9.908E+00	-4.680E+01	5.720E+00	-1.668E+01	5.723E+00	1.034E+02
17	7.021E+00	-2.498E+01	4.051E+00	1.251E+02	4.049E+00	5.217E+00
19	5.211E+00	-8.350E+01	3.010E+00	1.267E+02	3.012E+00	-1.133E+02
23	3.530E+00	-7.831E+01	2.036E+00	-1.081E+02	2.034E+00	1.320E+02
25	3.082E+00	-1.378E+02	1.779E+00	-1.076E+02	1.781E+00	1.255E+01

tab. 1.1: složky spektra primárních proudů Y a D sekce dvanáctipulzního usměrňovače

5.harmonická:

$$I_{\text{celk}} = I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] =$$

$$99,4 (\cos 46,9^\circ + j \sin 46,9^\circ) + [57,4 (\cos -163^\circ + j \sin -163^\circ) - 57,4 (\cos 77^\circ + j \sin 77^\circ)] =$$

$$\underline{\underline{= 0,11 - j 0,13 \Rightarrow 0}}$$

7.harmonická:

$$I_{\text{celk}} = I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] =$$

$$47,3 (\cos -1^\circ + j \sin -1^\circ) + [27,3 (\cos -151^\circ + j \sin -151^\circ) - 27,3 (\cos -30,9^\circ + j \sin -30,9^\circ)] =$$

$$\underline{\underline{= 0,0095 - 0,04 j \Rightarrow 0}}$$

11.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &13,68(\cos 19^\circ + j \sin 19^\circ) + [7,89(\cos -10,85^\circ + j \sin -10,85^\circ) - 7,89(\cos -130,8^\circ + j \sin -130,8^\circ)] = \\ &= \underline{25,83 - 8,94 j \neq 0} \end{aligned}$$

13.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &9,9(\cos -46,8^\circ + j \sin -46,8^\circ) + [5,72(\cos -16,6^\circ + j \sin -16,6^\circ) - 5,72(\cos 103,4^\circ + j \sin 103,4^\circ)] = \\ &= \underline{13,58 + 14,4 j \neq 0} \end{aligned}$$

17.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &7(\cos -24,9^\circ + j \sin -24,9^\circ) + [4(\cos 125,1^\circ + j \sin 125,1^\circ) - 4(\cos 5,2^\circ + j \sin 5,2^\circ)] = \\ &= \underline{0,065 + 0,037 j \Rightarrow 0} \end{aligned}$$

19.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &5,2(\cos -83,5^\circ + j \sin -83,5^\circ) + [3(\cos 126,7^\circ + j \sin 126,7^\circ) - 3(\cos -113,3^\circ + j \sin -113,3^\circ)] = \\ &= \underline{-0,017 + 0,0059 j \Rightarrow 0} \end{aligned}$$

23.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &3,53(\cos -78,3^\circ + j \sin -78,3^\circ) + [2(\cos -108,1^\circ + j \sin -108,1^\circ) - 2(\cos 132^\circ + j \sin 132^\circ)] = \\ &= \underline{1,43 + 6,84 j \neq 0} \end{aligned}$$

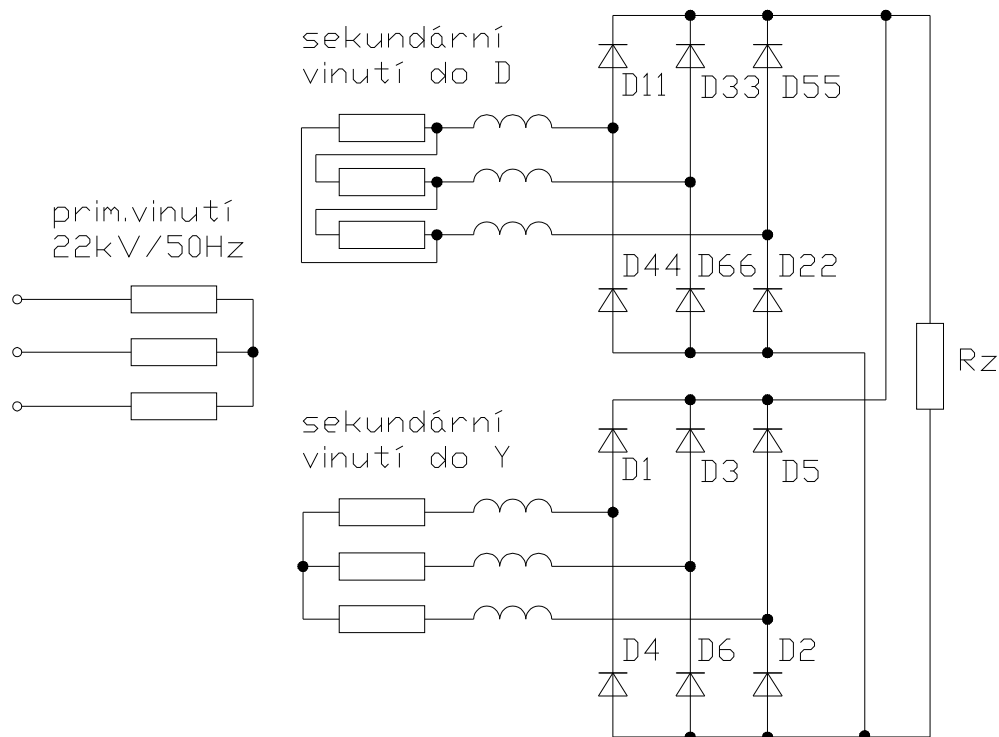
25.harmonická:

$$\begin{aligned} I_{\text{celk}} &= I_Y + I_D = I(L1) + [I(L1D) - I(L2D)] = \\ &3(\cos -137,8^\circ + j \sin -137,8^\circ) + [1,78(\cos -107,6^\circ + j \sin -107,6^\circ) - 1,78(\cos 12,5^\circ + j \sin 12,5^\circ)] = \\ &= \underline{-4,49 + 4,09 j \neq 0} \end{aligned}$$

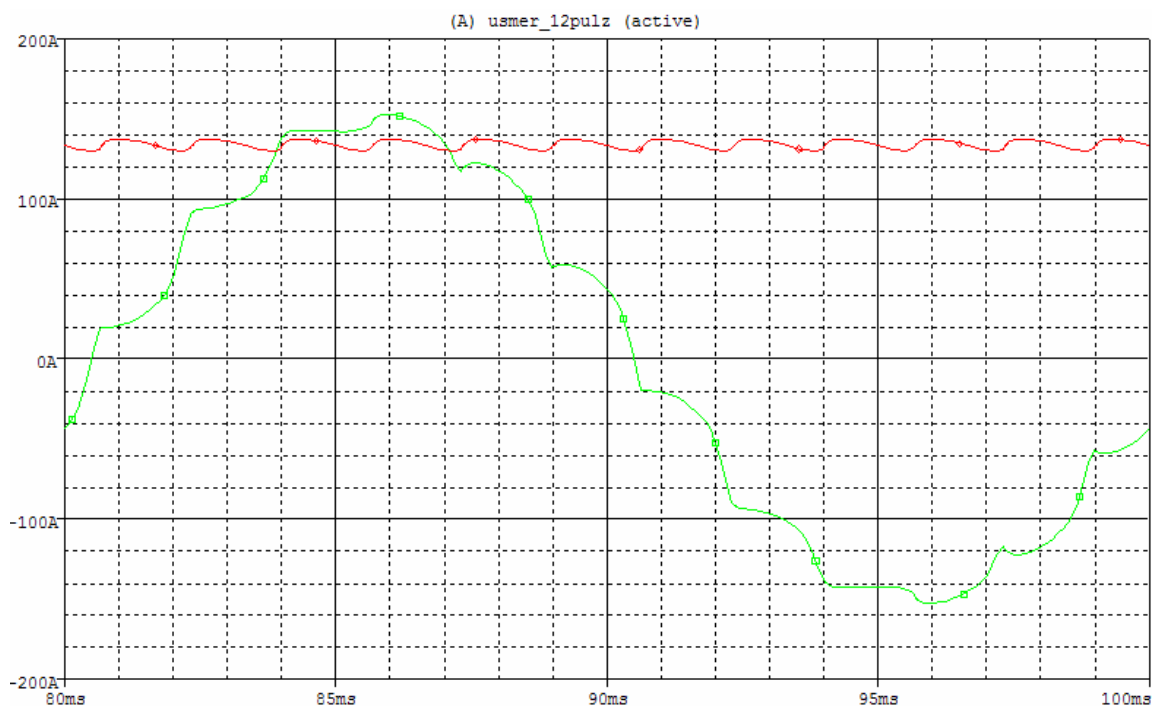
Z výše uvedených výpočtů je zřejmé, že na frekvencích 5., 7., 17. a 19. harmonické dochází k odečtení složek generovaných sekcemi usměrňovače zapojenými do Y a do D, což je velkou výhodou dvanáctipulzního zapojení, jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 1.2.

1.2.3 Dvanáctipulzní jednotka s odporovou zátěží

Zapojení usměrňovače s čistě odporovou zátěží je zobrazeno na obr. 1.16. Při porovnání obr. 1.17 s obr. 1.18 je vidět vliv indukčnosti v zátěži na vyhlazení výstupního proudu.



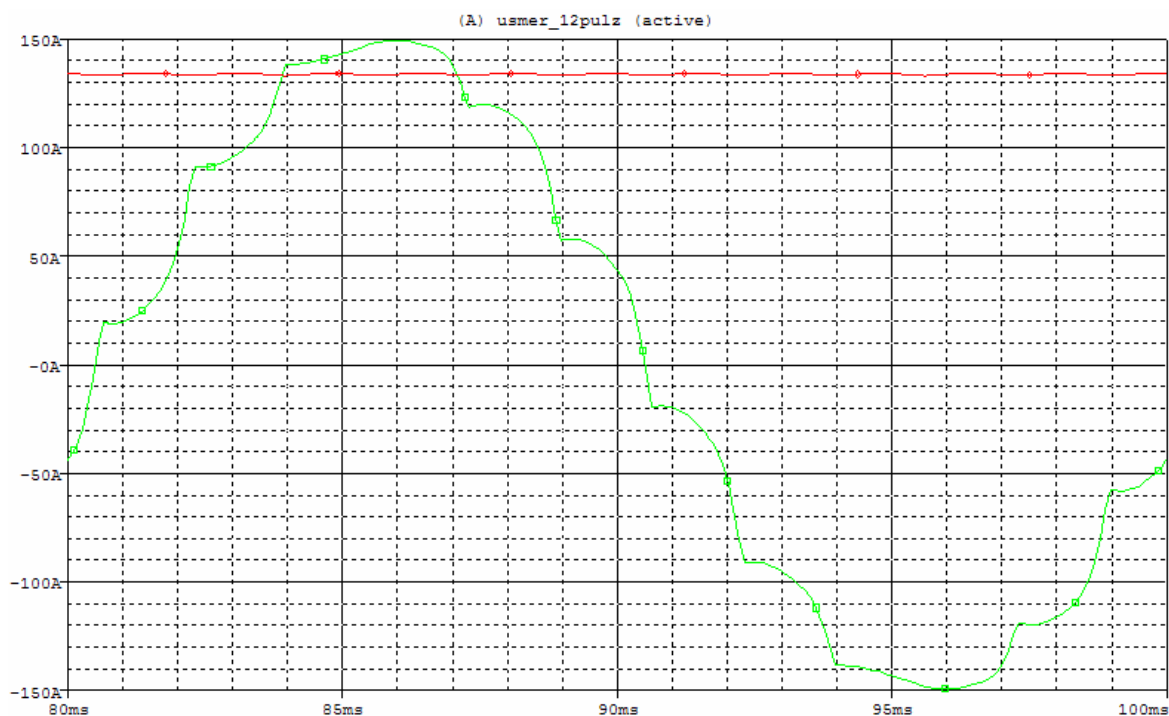
obr. 1.16: zapojení dvanáctipulzního usměrňovače s odporovou zátěží



obr. 1.17: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a stejnosměrného proudu R zátěží $I(Rz)$

1.2.4 Dvanáctipulzní jednotka s RL zátěží

Zapojení dvanáctipulzního usměrňovače se zátěží RL je zobrazeno na obr. 1.13.



obr. 1.18: průběh primárního proudu usměrňovače $I(L1)$ a stejnosměrného proudu RL zátěží $I(Rz)$

1.3 Úhel překrytí diodových proudů

1.3.1 Vznik úhlu překrytí

Úhel překrytí (na obr. 1.19 označen jako γ) je přímo úměrný součinu rozptylové reaktance transformátoru ($L1$) se součinem usměrněného proudu. Úhel překrytí, a tedy i tvar primárního proudu usměrňovače, je značně závislý na velikosti odebíraného proudu. V případě, že by došlo k zanedbání rozptylové reaktance transformátoru, by byl umožněn skokový nárůst primárního proudu a úhel překrytí by byl nulový.

Doba odpovídající danému úhlu překrytí na časové ose odpovídá době komutace sousedních diod v můstku.

Na obr. 1.19 je vidět průběh fázového napětí s amplitudou 2050V a průběh posunutého proudu rozptylovou indukčností transformátoru $L1$ při hodnotě usměrněného proudu 1112A.

U zapojení na obr. 2.4 platí: $U_{VW1} - U_{VW2} = -\sqrt{6} U_{ef} \sin(\omega t)$

$$i_{D1} + i_{D4} = I_{SS}$$

$$U_{VW1} - U_{VW2} - L_{TT} \frac{d i_{D1}}{dt} + L_{TT} \frac{d i_{D3}}{dt} = 0 ; \text{ kde } i_{D1} \text{ je okamžitá}$$

hodnota proudu diodou, ve které proud při komutaci klesá, a i_{D3} je okamžitá hodnota proudu diodou, ve které při komutaci narůstá

- z výše uvedených výrazů vyplývá proud diodou D_1 :

$$i_{D1} = \frac{\sqrt{6} U_{ef}}{2 \omega L_{TT}} \cos(\omega t) + Ik ; \text{ kde integrační konstanta je}$$

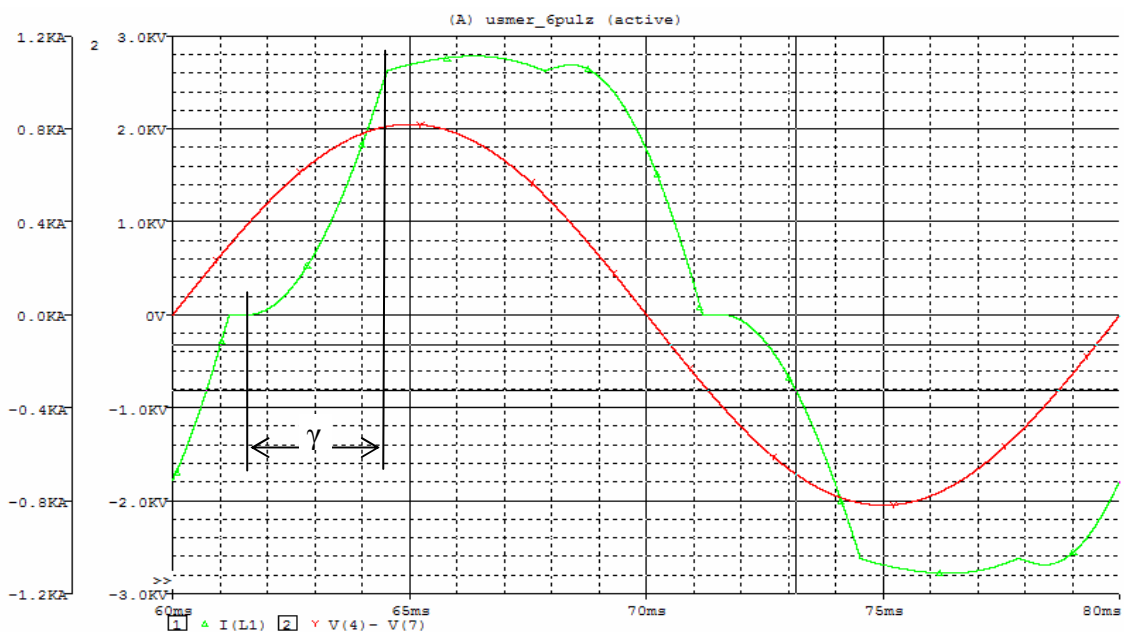
$$Ik = I_{SS} \frac{\sqrt{6} U_{ef}}{2 \omega L_{TT}}$$

- protože v čase 0, kdy $i_{D1} = I_{SS}$, je proud diodou

$$i_{D1} = \frac{\sqrt{6} U_{ef}}{2 \omega L_{TT}} [1 - \cos(\omega t)]$$

Úhel překrytí pro šestipulzní usměrňovač pak vychází z doby komutace ($0 - \gamma$, kdy i_{D1} je nulový a $i_{D4} = I_{SS}$) a je dán výrazem $\cos \gamma = 1 - \frac{2 I_{SS} L_{TT} \omega}{U_{ef} \sqrt{6}}$; kde L_{TT} je rozptylová

indukčnost transformátoru usměrňovače a U_{ef} efektivní hodnota fázového napětí.



obr. 1.19: sinusový průběh napětí na zdroji VV1 a posunutý průběh proudu zdrojem VV1 s označeným úhlem překrytí

1.3.2 Vliv úhlu překrytí na časový průběh odebíraného proudu

obr. 1.19 ukazuje, že se zvyšujícím se úhlem překrytí, a tedy se zvyšujícím se zatížením usměrňovače, dochází k přiblížení tvaru primárního proudu k sinusovce a tím k menšímu obsahu vyšších harmonických. Toto platí pro šestipulzní i dvanáctipulzní zapojení usměrňovače a je to dobře vidět porovnáním obr. 1.20 s obr. 1.21 a obr. 1.22.

Z existence úhlu překrytí je tedy zřejmé, že procentní obsah vyšších harmonických primárního proudu usměrňovače bude vždy nižší, než ukazuje „amplitudový zákon“

$$I_n \leq \frac{100}{h} [\%]; \text{ (kde } h \text{ je řád harmonické), který platí pro obdélníkový průběh.}$$

Díky posunutí průběhu primárního proudu oproti napájecí sinusovce napětí bude mít usměrňovač induktivní charakter a účinník $\cos\varphi$ bude menší než 1. Z existence úhlu překrytí je zřejmé, že se vzrůstajícím úhlem bude docházet k posunu průběhu primárního proudu a tím i k poklesu účinníku $\cos\varphi$. Tento pokles je však minimální a ani při velkém zatížení usměrňovače v praxi neklesá účinník pod 0,965.

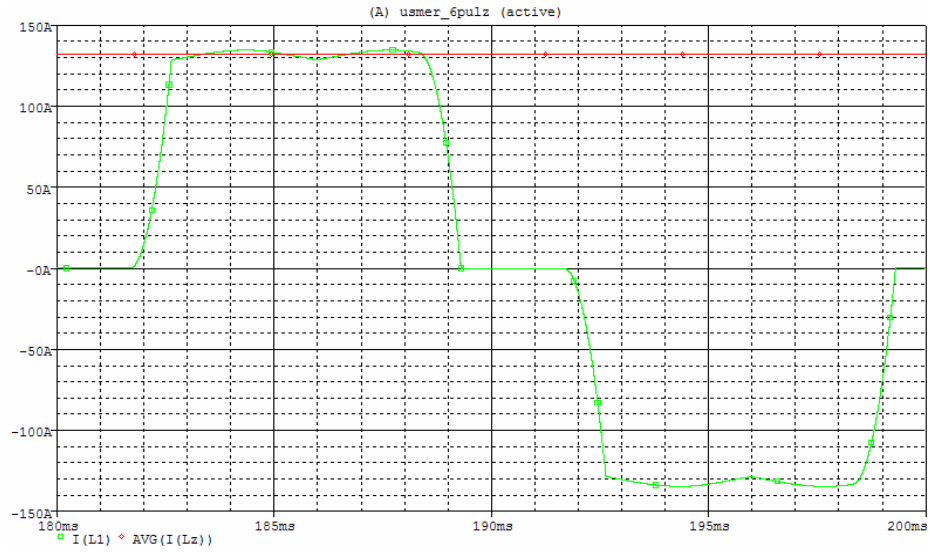
Podle vzorce pro úhel překrytí $\cos\gamma = 1 - \frac{2 I_{SS} L_{TT} \omega}{U_{ef} \sqrt{6}}$ odvozeného v kapitole 1.3.1 je

možné úhly překrytí pro jednotlivé zátěže také spočítat. Z tab. 1.2 vyplývá srovnání vypočtených a z obr. 1.20, obr. 1.21 a obr. 1.22 odečtených úhlů překrytí. Tyto obrázky byly získány pomocí počítačové simulace programem PSpice 10 demo. Simulovaný obvod je popsán v kapitole 2. Proudů jsou zobrazeny v periodě od 180ms do 200ms, kdy se jejich průběhy jeví jako již dostatečně ustálené.

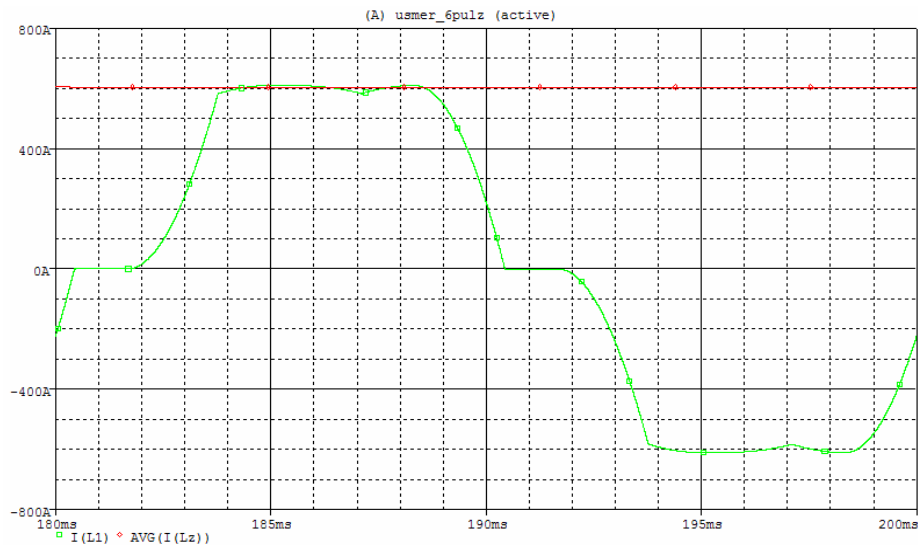
ISS [A]	164,5	604,3	1090
$\varphi_{\text{naměřené}}$ [°]	18,9	37,44	51,4
$\varphi_{\text{vypočtené}}$ [°]	19,64	38,73	52,1

tab. 1.2: porovnání vypočtených a naměřených hodnot úhlu překrytí

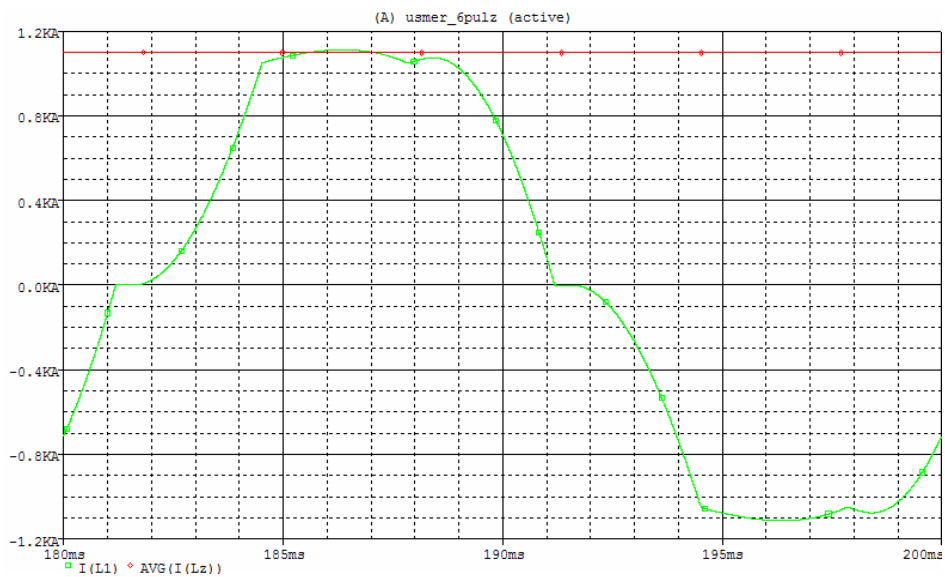
Porovnáním výsledků je zřejmá odchylka hodnot vzniklá při odečtu úhlu překrytí z grafu.



obr. 1.20: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěžném proudu 132,5A



obr. 1.21: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěžném proudu 604,3A



obr. 1.22: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při středním zátěžném proudu 1090A

2 ODVOZENÍ NÁHRADNÍCH SCHÉMAT PRO SIMULACE TRAKČNÍCH USMĚRŇOVAČŮ

Schéma trakčního usměrňovače v šestipulzním zapojení, jehož činnost byla popsána v kapitole 1.1.1, je nutné pro potřeby počítačových simulací upravit. Simulace v této diplomové práci jsou provedeny programem PSpice 10 demo.

Právě podle požadavků tohoto programu byl vytvořen model polovodičové výkonové diody, který je popsán v následující kapitole 2.1. Dále bylo nutné nahradit trojfázový transformátor sinusovým zdrojem sériově spojeným s podélnou indukčností. Tato indukčnost reprezentuje rozptylovou indukčnost transformátoru a její odvození uvádí kapitola 2.2.

Trakční zátěž, která má v praxi značně induktivní charakter, je modelována vždy sériovým spojením ohmického odporu a indukčnosti.

2.1 Výkonová polovodičová dioda

Použitý model výkonové diody má zásadní význam při provádění simulací programem PSpice. Na základě parametrů tohoto modelu program sestavuje diferenciální rovnice, na jejichž výsledku závisí zobrazované průběhy obvodových veličin.

2.1.1 Parametry reálně používané diody

V reálných nově dodávaných usměrňovačích pro trakčních napájecí stanice jsou instalovány pastilkové diody DV 808-1360-60 z produkce firmy ČKD Polovodiče a.s. Výhodou těchto síťových diod je široký rozsah závěrného napětí, možnost paralelního řazení a také nízká pracovní teplota ($T_{jmin} = -40\text{ °C}$).

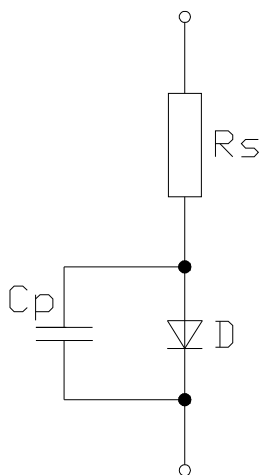
Parametry diody jsou uvedeny v následující tab. 2.1.

opakovatelné špičkové závěrné napětí	V_{RRM}	6000V
střední propustný proud diodou při 85°C	I_{FAVM}	1360A
mezní teplota přechodu	T_{JMAX}	150°C
neopakovatelný špičkový propustný proud po dobu 10ms	I_{FSM}	17,5kA
mezní přetěžovací integrál po dobu 10ms	I^2t	$1531\ 10^3 A^2s$
prahové napětí	V_{T0}	1060V
diferenciální odpor v propustném stavu	r_T	0,390mΩ
tepelný přechod PN přechod-pouzdro diody	R_{thjc}	20K/KW

tab. 2.1: parametry diody DV 808-1360-60

2.1.2 Model diody v programu PSpice

Model diody v programu PSpice vychází z obecně platného náhradního schématu polovodičové diody, které je uvedeno na obr. 2.1. R_s označuje sériový odpor diody, nebo-li ohmický odpor, který klade dioda tekoucímu proudu v propustném stavu. Dalším důležitým parametrem diody je bariérová a difúzní kapacita. Tyto kapacity shrnuje kondenzátor C_p . Dioda D vyjadřuje v modelu pouze voltampérovou charakteristiku PN přechodu.



obr. 2.1: náhradní schéma diody

Stejnoseměrný model diody je určen saturačním proudem I_S , emisním koeficientem N a sériovým ohmickým odporem R_S . Akumulace náboje je znázorněna průletovou dobou TT společně s nelineární kapacitou vyprázdněné oblasti. Tato oblast je určena kapacitou přechodu při nulovém napětí C_{JO} , zabudovaným potenciálem V_J a exponentem bariérové kapacity M . Teplotní závislost saturačního proudu definuje šířka zakázaného pásu E_G a teplotní součinitel saturačního proudu X_{TI} . Opakovatelný průraz je modelován exponenciálním růstem proudu závěrně orientované diody. Je určen průrazným napětím B_V a proudem diody při tomto napětí I_{BV} . Šumový model diody zahrnuje tepelný a blikavý šum, který je určen koeficientem a exponentem blikavého šumu K_F a A_F .

Podle výše uvedených parametrů byl sestaven model diody zakládající se na standardní diodě D1N914, kterou obsahuje knihovna eval.lib. Model byl pojmenován DV808. Tento model se snaží respektovat co nejvíce parametrů skutečné diody popsané v tab. 2.1.

Parametry diody používané v simulacích programem PSpice a označené jako DV808 jsou uvedeny v tab. 2.2.

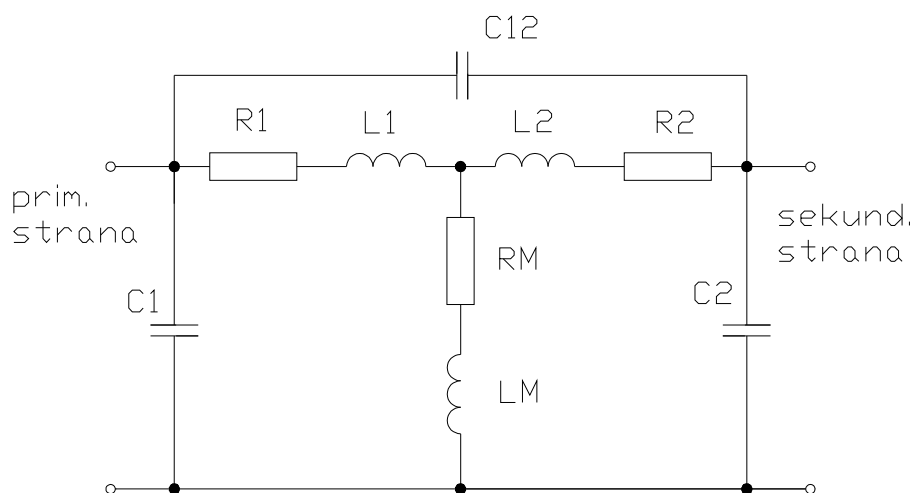
$I_s=168.1E-21$	$V_j=.75$
$N=1$	$F_c=.5$
$R_s=.0003$	$I_{sr}=100p$
$I_{kf}=0$	$N_r=2$
$X_{ti}=3$	$B_v=6000$
$E_g=1.11$	$I_{bv}=100u$
$C_{jo}=4p$ $M=.3333$	$T_t=11.54n$

tab. 2.2: parametry diody DV808

2.2 Náhradní schéma usměrňovačového transformátoru

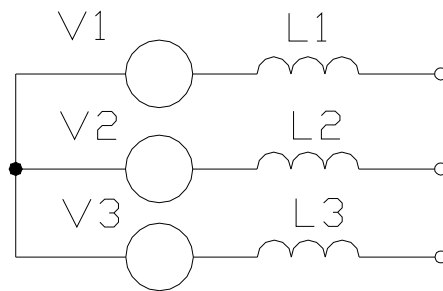
Náhradní schéma trakčního transformátoru lze pro výpočty do 25. harmonické (tj. 1250Hz) podstatně zjednodušit. Úplné náhradní schéma jednofázového transformátoru ukazuje obr. 2.2.

Prvky R_M a L_M nahrazují vliv magnetizačních proudů v transformátoru. Prvky R_1 a L_1 , případně L_2 a R_2 , zobrazují rozptylové indukčnosti primárního (případně sekundárního) vinutí a jejich ztráty. Kondenzátor C_{12} reprezentuje kapacitu primárního a sekundárního vinutí, kondenzátory C_1 a C_2 potom kapacity vinutí proti kostře transformátoru.



obr. 2.2: náhradní schéma jednofázového transformátoru

Pro nízké frekvence (energetické harmonické) je možné vliv jednotlivých kapacit zanedbat. Nejjednodušší náhradní schéma třífázového transformátoru ukazuje obr. 2.3. Toto náhradní schéma je využito při všech následujících simulacích.



obr. 2.3: použité náhradní schéma třífázového trakčního transformátoru

obr. 2.3 ukazuje, že proudové harmonické procházejí transformátorem ovlivněné pouze jeho závitovým převodem.

Z literatury plyne, že pro jmenovité zatížení používaných usměrňovačů (1000A pro 1 rtuřovou usměrňovací jednotku) v TNS je úhel překrytí přibližně 25° el. Aby byla tato skutečnost splněna při simulacích, byla zvolena velikost náhradní indukčnosti 2mH.

2.3 Odvození náhradního schématu jedné jednotky

Jak již bylo uvedeno výše, pro potřeby simulačního programu PSpice je nutné zapojení šestipulzního usměrňovače z obr. 1.9 upravit.

Především je nutné nahradit sekundární vinutí transformátoru sinusovými zdroji VV1, VV2 a VV3, jejichž amplitudové napětí je 2050V/50Hz. Tyto zdroje jsou od sebe vzájemně posunuty o 120° el. Rozptylové indukčnosti transformátoru jsou 2mH. Jako usměrňovací diody byly použity diody DV808, jejichž průrazné napětí je 6kV a hodnota sériového odporu $0,3\text{m}\Omega$. Program PSpice vyžaduje označení jednoho uzlu jako „nulového“. Za tento referenční bod byl zvolen společný uzel diod D_2 , D_4 a D_6 .

Amplituda fázového napětí 2050V byla zvolena s ohledem na požadovanou výši stejnosměrného napětí, které je naprázdno 3,38kV.

Zátěžný proud byl měněn nastavením RL zátěže v netlistu příslušné simulace. Tato změna reprezentuje změny trakčního odběru. Při změnách zátěže byl udržován konstantní poměr R_z/L_z , aby bylo dosaženo srovnatelného vyhlazení primárního proudu pro všechny zátěže. Také je tímto dodržena zásada „neměnit více parametrů najednou“.

Maximální zátěž byla volena tak, aby výstupní stejnosměrné napětí nepokleslo pod 2100V. Toto napětí vychází z normy pro dovolenou minimální hodnotu stejnosměrného trakčního napětí 3kV, která je 2000V.

Upravený obvod pro simulaci jedné usměrňovací jednotky, jehož netlist je uveden níže, ukazuje obr. 2.4. Hodnoty zátěže v tomto schématu jsou měněny podle požadovaného zatížení.

```

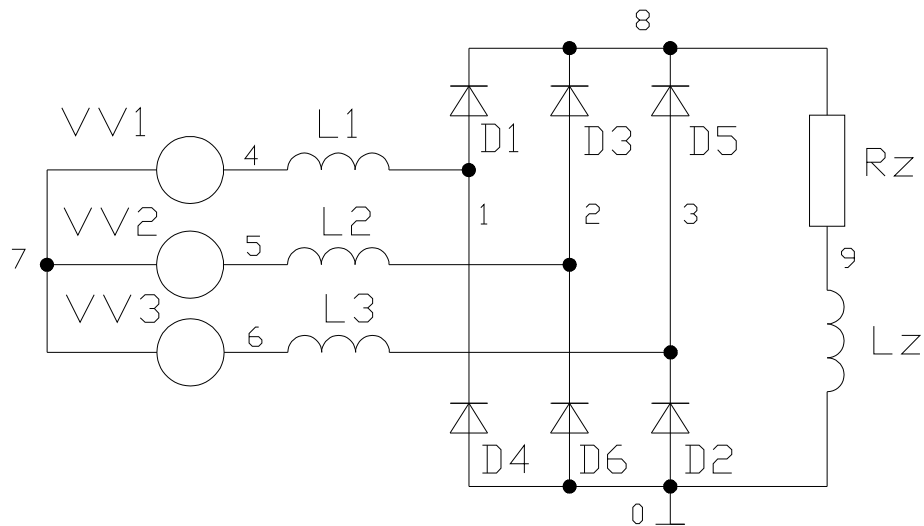
*
vv1 4 7 sin (0 2050 50 0 0 0)
vv2 5 7 sin (0 2050 50 0 0 120)
vv3 6 7 sin (0 2050 50 0 0 240)

L1 4 1 2m
L2 5 2 2m
L3 6 3 2m
D1 1 8 DV808
D3 2 8 DV808
D5 3 8 DV808
D4 0 1 DV808
D6 0 2 DV808
D2 0 3 DV808

Rz 8 9 2.5
Lz 9 0 3m

.tran 1u 200m 180m 1u
.probe
.model DV808 D(Is=168.1E-21 N=1 Rs=.0003 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11
+ Cjo=4p M=.3333 Vj=.75 Fc=.5 Isr=100p Nr=2
+ Bv=6000 Ibv=100u Tt=11.54n)
.four 50 25 I(L1)
.end

```



obr. 2.4: obvod zadaný v PSpice

2.4 Náhradní schéma paralelního provozu více jednotek

V reálném drážním provozu je nutné provozovat zároveň více paralelně pracujících usměrňovacích jednotek, především pro nedostatečný výkon dodávaný jednotkou jednou a také z důvodu zajištění nepřetržitého napájení v případě poruchy na jedné z jednotek.

Ve většině měření jsou proto instalovány minimálně tři usměrňovací jednotky. Jsou známy i případy velmi zatížených měření, které mají instalováno více jednotek, jako například TNS v Kolíně nebo na Štrbě.

Náhradní schéma paralelního provozu tří usměrňovačových jednotek uvedené na obr. 2.5 vychází z výše odvozeného schématu pro jednu jednotku uvedenou na obr. 2.4. Aby byla simulace paralelně pracujících tří jednotek porovnatelná se simulací jednotky jedné, je nutné tuto kombinaci postupně zatěžovat stejnými výkony jako jednotku jednu.

Podobně jako pro tři jednotky by bylo možné odvodit schéma pro dvě paralelně pracující usměrňovačové jednotky.

Schéma na obr. 2.5 je do programu PSpice zadáno formou následujícího netlistu:

```
*
vv1 4 7 sin (0 2050 50 0 0 0)
vv2 5 7 sin (0 2050 50 0 0 120)
vv3 6 7 sin (0 2050 50 0 0 240)

L1 4 1 2m
L2 5 2 2m
L3 6 3 2m
D1 1 8 DV808
D3 2 8 DV808
D5 3 8 DV808
D4 0 1 DV808
D6 0 2 DV808
D2 0 3 DV808

L11 4 11 2m
L12 5 12 2m
L13 6 13 2m
D11 11 8 DV808
D13 12 8 DV808
D15 13 8 DV808
D14 0 11 DV808
D16 0 12 DV808
D12 0 13 DV808

L21 4 21 2m
L22 5 22 2m
L23 6 23 2m
D21 21 8 DV808
D23 22 8 DV808
D25 23 8 DV808
```

```

D24 0 21 DV808
D26 0 22 DV808
D22 0 23 DV808

```

```

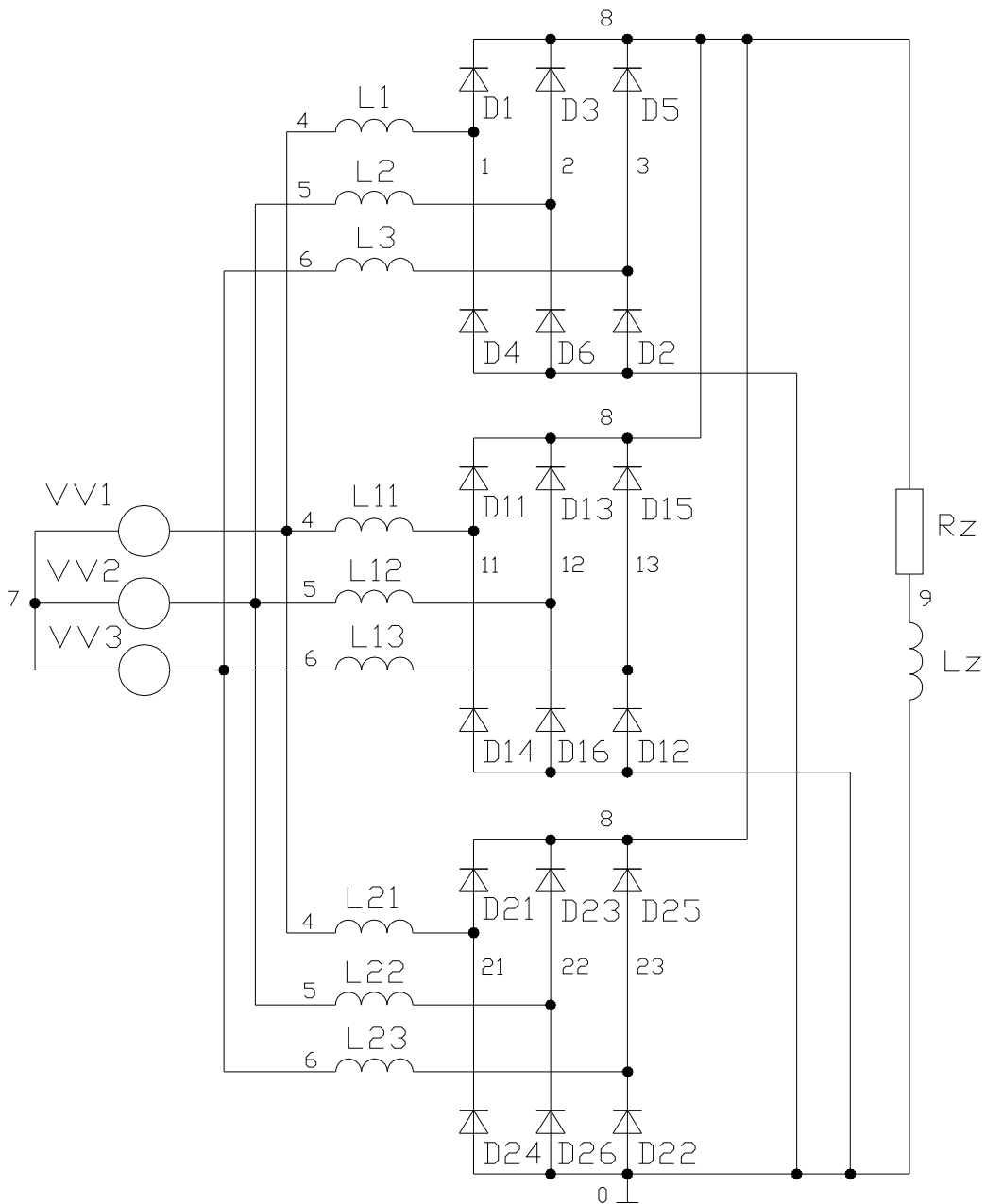
Rz 8 9 25
Lz 9 0 50m

```

```

.tran 1u 200m 180m 1u
.probe
.model DV808 D(Is=168.1E-21 N=1 Rs=.0003 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11
+ Cjo=4p M=.3333 Vj=.75 Fc=.5 Isr=100p Nr=2
+ Bv=6000 Ibv=100u Tt=11.54n)
.four 50 25 I(vv1)
.end

```



obr. 2.5: obvod pro simulaci paralelního provozu 3 usměrňovacích jednotek

2.5 Zatěžovací charakteristika usměrňovače

Jak již bylo zmíněno výše, při provádění následujících simulací v kapitolách 3 a 4, je nutné zatěžovat různé počty paralelně pracujících usměrňovačů nikoli stejným zátěžným proudem ale stejným zatěžujícím výkonem.

To je dáno především rozdílnou strmostí zatěžovacích charakteristik jedné samostatně pracující jednotky a několika paralelně zapojených usměrňovačů, jak ukazuje tato kapitola.

Podstatně rozdílné vlastnosti, jedné nebo více jednotek, především pro proudy nad 2000A dokumentují tab. 2.3 a graf 2.1.

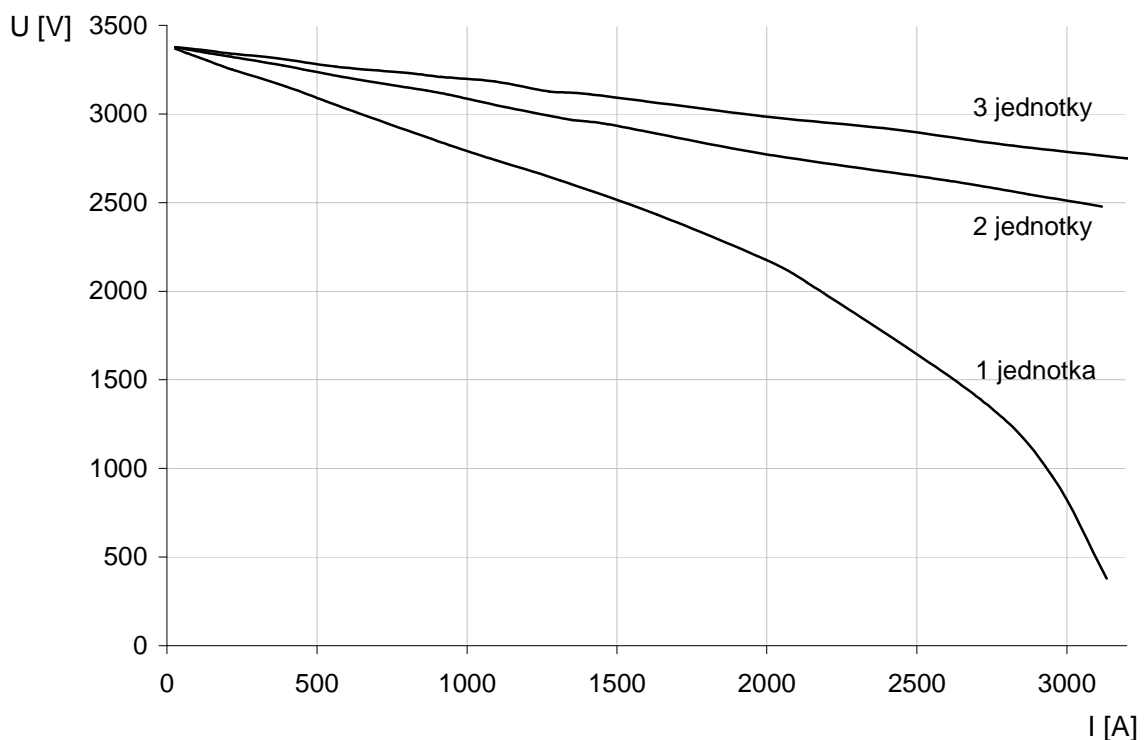
Úbytek napětí je zde způsoben několika vlivy. Úbytkem na činném odporu diody, který je v modelu označen jako R_s , a na odporu vinutí transformátoru. Tento úbytek lineárně narůstá s rostoucím propustným proudem a je popsán v kapitole 2.5.1.

V případě použití rtuťových usměrňovačů bylo také nutné uvažovat úbytky na oblouku rtuťového ventilu, které mohou dosahovat až 15V. Při použití polovodičových diod je však tento úbytek minimální a je možné jej zanedbat.

Nejvýraznější vliv na zatěžovací charakteristiku usměrňovače má však tzv. úhel překrytí, jenž je teoreticky odvozen v kapitole 1.3 a jeho vliv na průběh charakteristiky je popsán v kapitole 2.5.2.

při samostatné jednotce		při dvou jednotkách		při třech jednotkách	
I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	I_{ss} [A]	U_{ss} [V]	I_{ss} [A]	U_{ss} [V]
13.5	3386	13.5	3377	13.5	3380
27	3367	27	3375	27	3377
67	3343	67.4	3365	67.5	3370
132	3302	128.8	3346	129.3	3358
217	3250	214.3	3322	209.3	3341
393	3157	385.2	3273	368.6	3313
603	3026	583.8	3209	564	3266
940	2825	867.5	3131	806	3230
1095	2739	939.6	3108	915	3208
1312	2624	1125	3040	1092	3183
1633	2432	1351	2966	1275	3126
1994	2179	1469	2942	1409	3111
2101	2098	1991	2774	1986	2987
2712	1374	2602	2624	2415	2914
2918	879	2872	2547	2822	2820
3132	311	3117	2478	3394	2715

tab. 2.3: zatěžovací charakteristiky bez respektování činných ztrát ve vinutí transformátoru



graf 2.1: porovnání vnějších zatěžovacích charakteristik

2.5.1 Úbytek napětí na činných odporech diod a vinutí transformátoru

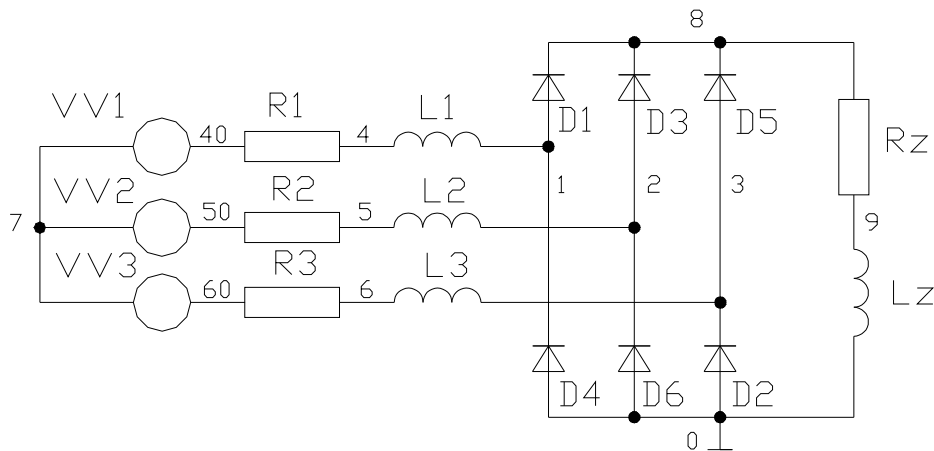
Z modelu diody DV808 odvozeného v kapitole 2.1.2 vyplývá hodnota sériového odporu $0,3\text{m}\Omega$. Tento „odpor“ je nutné počítat dvojnásobný, protože vedení proudu se vždy účastní dvě diody v sérii. I přesto je jeho hodnota zanedbatelná a na úbytky napětí nemá téměř žádný vliv.

Výrazněji ovlivňují vnější charakteristiku usměrňovače činné ztráty transformátoru. Protože není možné parametry reálně používaných transformátorů získat, byla pro možnost ukázat vliv odporu vinutí na vnější charakteristiku usměrňovače zvolena hodnota podle vztahu $\omega L/R = 30$. Po dosazení 2mH za L dostáváme hodnotu odporu $0,021\Omega$. Těmito odpory byl simulovaný obvod doplněn (označeny jako R1, R2, R3), jak ukazuje následující netlist a obr. 2.6.

```

*
L1 4 1 2m
L2 5 2 2m
L3 6 3 2m
R1 40 4 21m
R2 50 5 21m
R3 60 6 21m
vv1 40 7 sin (0 2050 50 0 0 0)
vv2 50 7 sin (0 2050 50 0 0 120)
vv3 60 7 sin (0 2050 50 0 0 240)
D1 1 8 DV808
D3 2 8 DV808
D5 3 8 DV808
D4 0 1 DV808
D6 0 2 DV808
D2 0 3 DV808
Rz 8 9 0.2
Lz 9 0 0.4m
.tran 1u 200m 180m 1u
.probe
.model DV808 D(Is=168.1E-21 N=1 Rs=.0003 Ikf=0 Xti=3 Eg=1.11 Cjo=4p
+
M=.3333 Vj=.75 Fc=.5 Isr=100p Nr=2 Bv=6000 Ibv=100u
+
Tt=11.54n)
*.four 50 25 I(L1)
.end

```



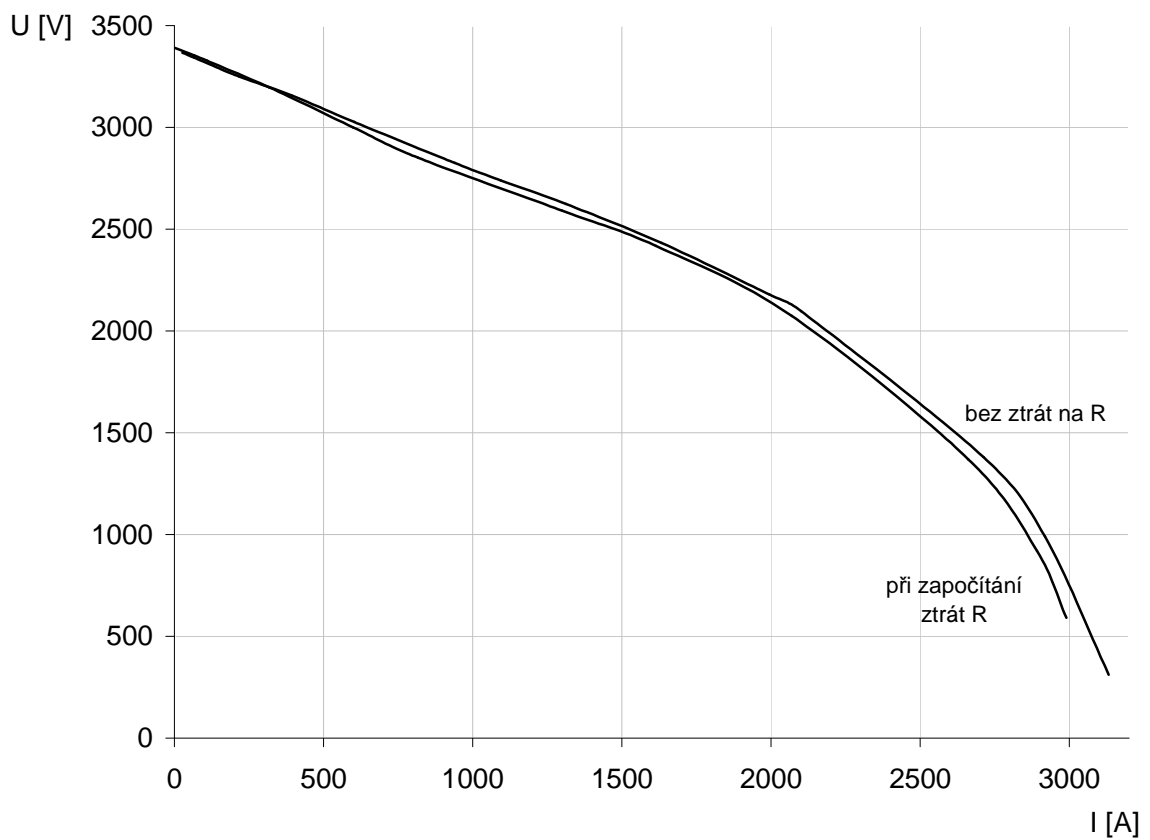
obr. 2.6: zapojení respektující činné ztráty transformátoru

Postupným měněním zátěže byly získány hodnoty usměrněného proudu a napětí na zátěži, které jsou uvedeny v tab. 2.4. Na graf 2.2 je potom dobře vidět rozdíl mezi reálným průběhem voltampérové charakteristiky usměrňovače a průběhem idealizovaným, získaným při zanedbání činného odporu vinutí transformátoru.

Protože nebyly získány údaje o skutečných hodnotách vinutí reálných transformátorů, je v následujících simulacích tento odpor zanedbán a vinutí transformátoru nahrazeno pouze podélnou indukčností podle obr. 2.4. Tato skutečnost však nemůže nijak ovlivnit závěry této práce.

I_{ss} [A]	U_{ss} [V]
2.70	3391
67.00	3354
110.60	3327
318.00	3197
599.00	3000
818.00	2850
1299.00	2591
1614.00	2418
2069.00	2074
2661.00	1343
2891.00	862
2990.00	590

tab. 2.4: výsledky simulace při zapojení respektujícím činné ztráty ve vinutí transformátoru



graf 2.2: porovnání zatěžovacích charakteristik jedné usměrňovačové jednotky při respektování činného odporu vinutí transformátoru a bez něj

2.5.2 Vliv úhlu překrytí na průběh zatěžovací charakteristiky

Jak již bylo uvedeno, existence úhlu překrytí má nejméně výraznější vliv na zatěžovací charakteristiku usměrňovače. Tento úbytek napětí je způsoben existencí nenulové rozptylové indukčnosti vinutí transformátoru, která byla zvolena 2mH. Kdyby byla tato indukčnost nulová, uvedené úbytky by na reaktanci ωL nemohly vzniknout.

Vliv úhlu překrytí na úbytek napětí je možno vysvětlit tak, že v době komutace diod dochází ke zkratu dvou fází sekundárního vinutí transformátoru (z obr. 2.4). Tato komutace nemůže probíhat skokově právě díky existenci rozptylových indukčností transformátoru, ve schématu označených jako L1, L2 a L3, které nedovolí skokové změny proudů tekoucích obvodem.

Z kapitoly 1.3.1 vyplývá, že úhel překrytí se zvyšujícím se zatížením roste. Proto také, podle následujícího vztahu, roste se zvyšujícím se zatížením úbytek stejnosměrného napětí.

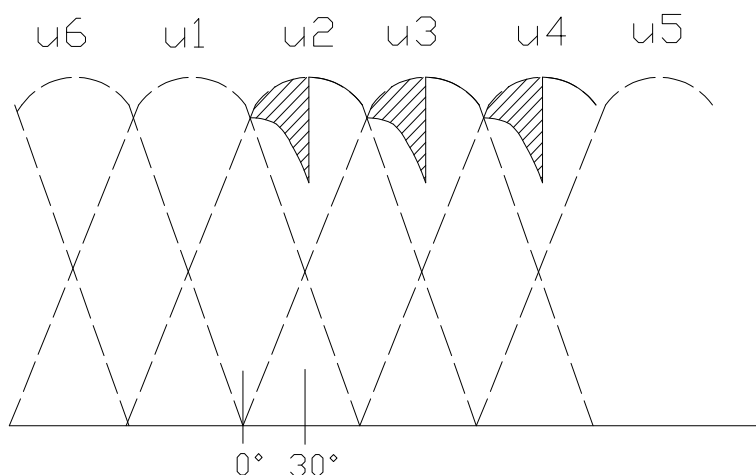
Stejnoseměrný úbytek napětí je možné vyjádřit jako:

$$\Delta U_{ss} = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2} U_{ef\ fáz}}{\frac{2\pi}{3}} \int_0^{\gamma} \sin x \, dx = 1,17 U_{ef\ fáz} (1 - \cos \gamma) = \frac{U_{ss}}{2} (1 - \cos \gamma);$$

kde γ vyjadřuje úhel překrytí.

Střední hodnota stejnosměrného napětí tedy vlivem rozptylové indukčnosti sekundárního vinutí transformátoru se zatížením klesá. Velikost úbytku tohoto napětí odpovídá vyšrafované ploše na obr. 2.7.

Usměrněné napětí probíhá podle naznačené křivky. Pouze v případě chodu usměrňovače naprázdno může průběh stejnosměrného napětí kopírovat vrcholy fázových napětí. Podstatným rozdílem oproti úbytku napětí na činných odporech je, že tento úbytek se nemění v teplo a není tedy nutné jej vychladit.



obr. 2.7: vliv úhlu překrytí na úbytek napětí

3 PROCENTNÍ OBSAH HARMONICKÝCH V PROUDU ODEBÍRANÉM JEDNÍM TRAKČNÍM USMĚŘOVAČEM

3.1 Maximální obsah vyšších harmonických v primárním proudu podle PNE 33 3430-0

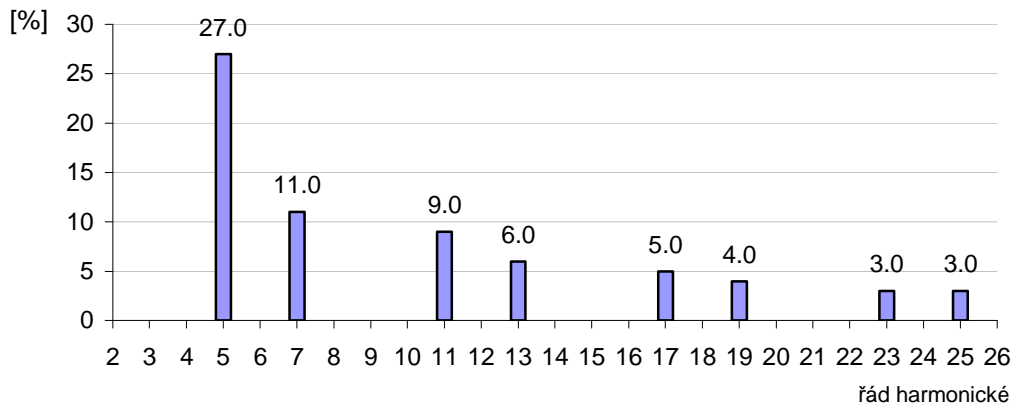
PNE 33 3430-0 se zabývá odhadem hodnot proudů emitovaných do sítě trakčním usměřovačem. Odhad procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu transformátoru šestipulzního usměřovače uvádí první část tab. 3.1. V její druhé části jsou potom z procentních hodnot spočteny skutečné hodnoty proudů (na jednotlivých harmonických frekvencích v ampérech) v závislosti na proudu 1. harmonické.

řád harmonické	5.	7.	11.	13.	17.	19.	23.	25.
frekvence [Hz]	250	350	550	650	850	950	1150	1250
max.dovolený obsah [%]	27	11	9	6	5	4	3	3

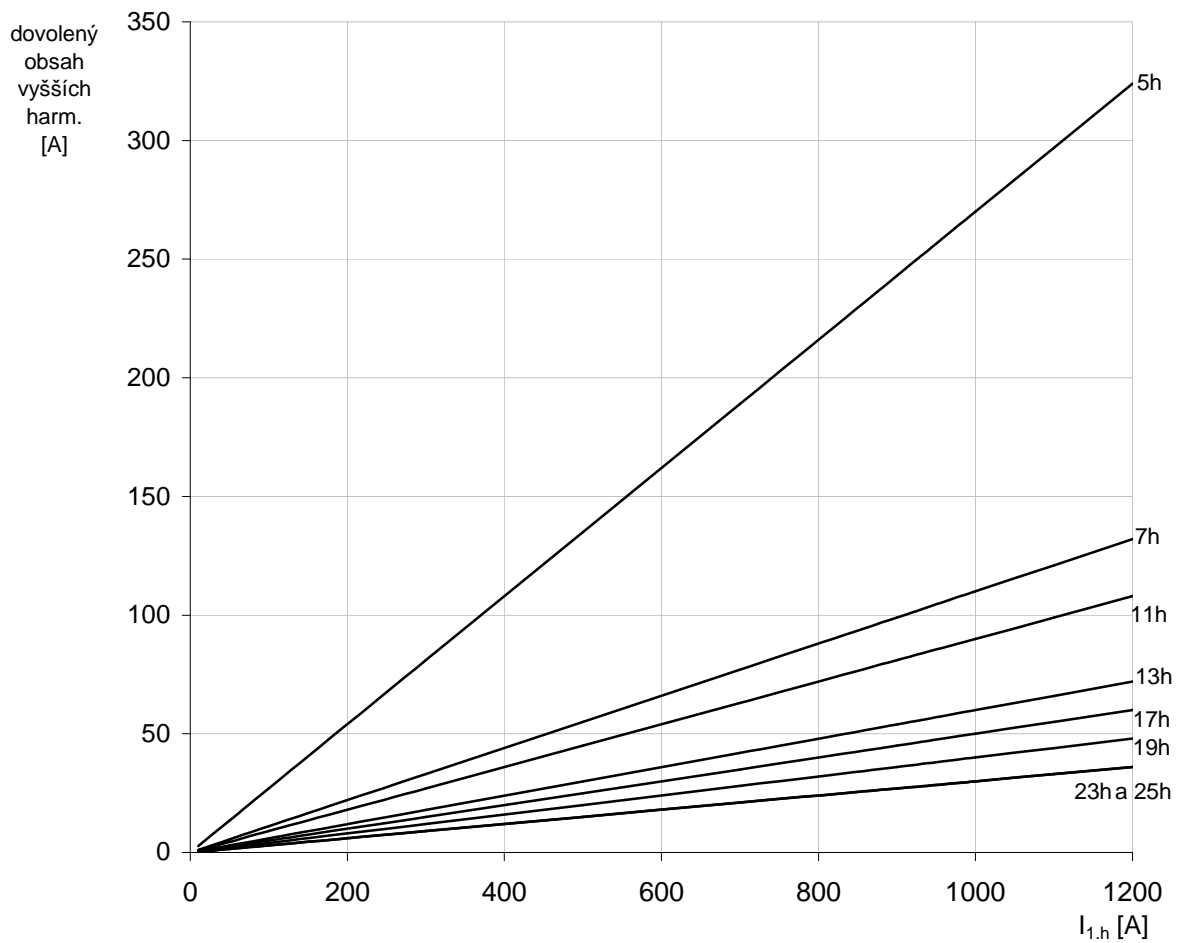
$I_{1\text{harm}}$ [A]	$I_{5\text{harm}}$ [A]	$I_{7\text{harm}}$ [A]	$I_{11\text{harm}}$ [A]	$I_{13\text{harm}}$ [A]	$I_{17\text{harm}}$ [A]	$I_{19\text{harm}}$ [A]	$I_{23\text{harm}}$ [A]	$I_{25\text{harm}}$ [A]
10	2.7	1.1	0.9	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3
50	13.5	5.5	4.5	3	2.5	2	1.5	1.5
100	27	11	9	6	5	4	3	3
300	81	33	27	18	15	12	9	9
500	135	55	45	30	25	20	15	15
700	189	77	63	42	35	28	21	21
900	243	99	81	54	45	36	27	27
1000	270	110	90	60	50	40	30	30
1100	297	121	99	66	55	44	33	33
1200	324	132	108	72	60	48	36	36

tab. 3.1: maximální obsah vyšších harmonických primárního proudu transformátoru šestipulzního usměřovače podle PNE 33 3430-0

Lepší obrázek o maximálních dovolených procentních a ampérových hodnotách proudů vyšších harmonických, jež jsou uvedeny v tabulce a výše zmíněné normě, podávají graf 3.1 a graf 3.2.



graf 3.1: odhad maximálního procentního obsahu vyšších harmonických v primárním proudu usměrňovače podle PNE 33 3430-0



graf 3.2: maximální obsah vyšších harmonických v primárním proudu usměrňovače v závislosti na 1.harmonické podle PNE 33 3430-0

3.2 Simulační studie závislosti obsahu vyšších harmonických primárního proudu na zátěži

Pomocí počítačové simulace činnosti náhradního schématu jedné usměrňovačové jednotky odvozeného v kapitole 2.3 je možné získat průběhy proudů v uvedeném obvodu. Simulační program PSpice umožňuje také provést Fourierovu analýzu proudu $I(L1)$, díky níž je možné sestavit tab. 3.2, která vyjadřuje závislost procentního i ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu usměrňovače na zátěžném výkonu tohoto usměrňovače. Obsah harmonických, které zde nejsou uvedeny, je zanedbatelný.

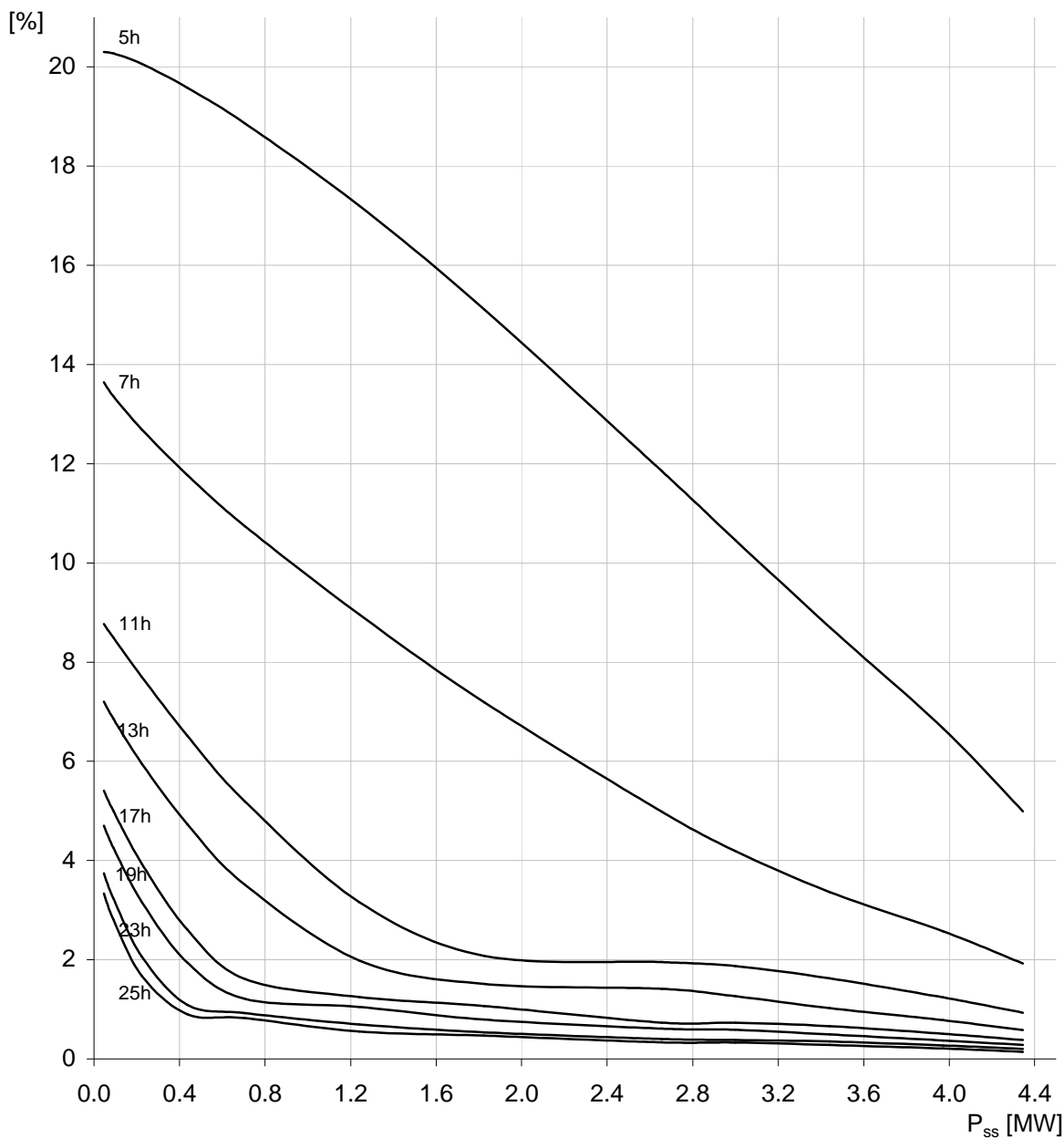
Zátěžný proud byl měněn nastavením RL zátěže v netlistu příslušné simulace. Při změnách zátěže byl udržován konstantní poměr R_z/L_z .

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 5.h			obsah 7.h		obsah 11.h		obsah 13.h	
		50Hz		250Hz			350Hz		550Hz		650Hz	
P_{ss} [MW]	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
0,046	13,5	14,9	3,025	20,30	2,032	13,64	1,306	8,77	1,073	7,20		
0,091	27	29,7	6,020	20,27	3,968	13,36	2,522	8,49	2,035	6,85		
0,224	67	73,7	14,784	20,06	9,353	12,69	5,675	7,70	4,385	5,95		
0,436	132	145,6	28,508	19,58	17,137	11,77	9,486	6,52	6,887	4,73		
0,705	217	238,5	44,981	18,86	25,615	10,74	12,378	5,19	8,371	3,51		
1,241	393	430,7	74,080	17,20	38,591	8,96	13,610	3,16	8,545	1,98		
1,825	603	658,1	99,439	15,11	47,317	7,19	13,662	2,08	9,924	1,51		
2,656	940	1017,0	120,515	11,85	50,647	4,98	19,852	1,95	14,350	1,41		
2,999	1095	1179,0	123,323	10,46	49,400	4,19	22,047	1,87	14,891	1,26		
3,443	1312	1404,0	122,148	8,70	47,174	3,36	22,745	1,62	14,321	1,02		
3,971	1633	1733,0	115,418	6,66	44,538	2,57	21,489	1,24	13,517	0,78		
4,345	1994	2101,0	104,840	4,99	40,339	1,92	19,539	0,93	12,186	0,58		

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 17.h		obsah 19.h		obsah 23.h		obsah 25.h		
		50Hz		850Hz		950Hz		1150Hz		1250Hz		
P_{ss} [MW]	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
0,046	13,5	14,9	0,805	5,40	0,700	4,70	0,557	3,74	0,497	3,33		
0,091	27	29,7	1,483	4,99	1,262	4,25	0,960	3,23	0,833	2,80		
0,224	67	73,7	2,896	3,93	2,329	3,16	1,518	2,06	1,231	1,67		
0,436	132	145,6	3,793	2,61	2,825	1,94	1,587	1,09	1,310	0,90		
0,705	217	238,5	3,840	1,61	2,886	1,21	2,194	0,92	1,956	0,82		
1,241	393	430,7	5,358	1,24	4,509	1,05	2,993	0,70	2,373	0,55		
1,825	603	658,1	7,015	1,07	5,199	0,79	3,527	0,54	3,086	0,47		
2,656	940	1017,0	7,424	0,73	6,183	0,61	4,058	0,40	3,376	0,33		
2,999	1095	1179,0	8,595	0,73	6,909	0,59	4,468	0,38	3,879	0,33		
3,443	1312	1404,0	9,266	0,66	6,880	0,49	4,914	0,35	3,931	0,28		
3,971	1633	1733,0	8,786	0,51	6,412	0,37	4,679	0,27	3,639	0,21		
4,345	1994	2101,0	7,984	0,38	5,883	0,28	4,202	0,25	2,941	0,16		

tab. 3.2: závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu usměrňovače na zátěži

Z následujícího grafu je vidět, jak poměrný obsah vyšších harmonických v primárním proudu usměrňovače se zvyšující se zátěží klesá, což je způsobeno zvyšujícím se zátěžným úhlem, který je popsán v kapitole 1.3.



graf 3.3: závislost procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu usměrňovače na jeho zátěži

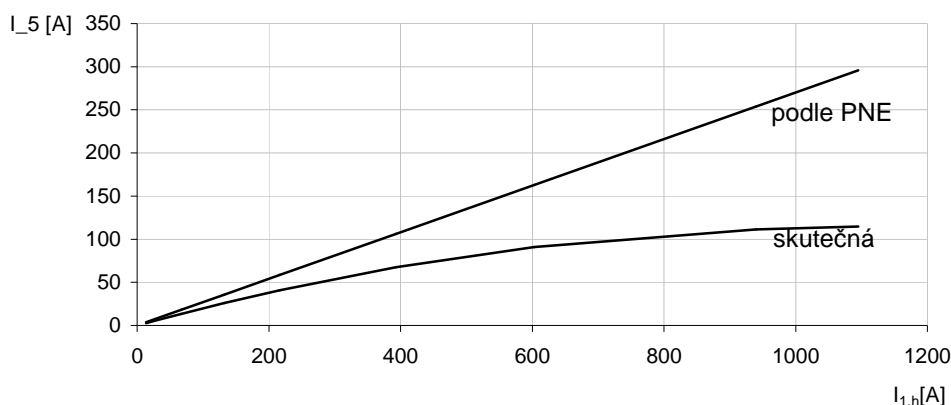
V **příloze 1** této diplomové práce jsou uvedeny sloupcové grafy procentního obsahu jednotlivých harmonických a také průběhy primárních proudů (označené jako $I(L1)$) pro tři hodnoty zátěže podle tab. 3.2.

3.3 Porovnání hodnot získaných simulací s hodnotami odhadnutými v PNE 33 3430-0

Ze srovnání tab. 3.1, která vychází z PNE 33 3430-0, s tab. 3.2, jež reprezentuje skutečné hodnoty, vyplývá, že pro běh trakčního usměrňovače naprázdno dochází pro většinu harmonických k překročení normou odhadnutých hodnot. Toto překročení je způsobeno téměř obdélníkovým průběhem proudu, při kterém platí „amplitudový zákon“ uvedený v 1.3.2. To však již neplatí při mírném zatížení usměrňovače, kdy jsou hodnoty obsahu vyšších harmonických s rezervou plněny.

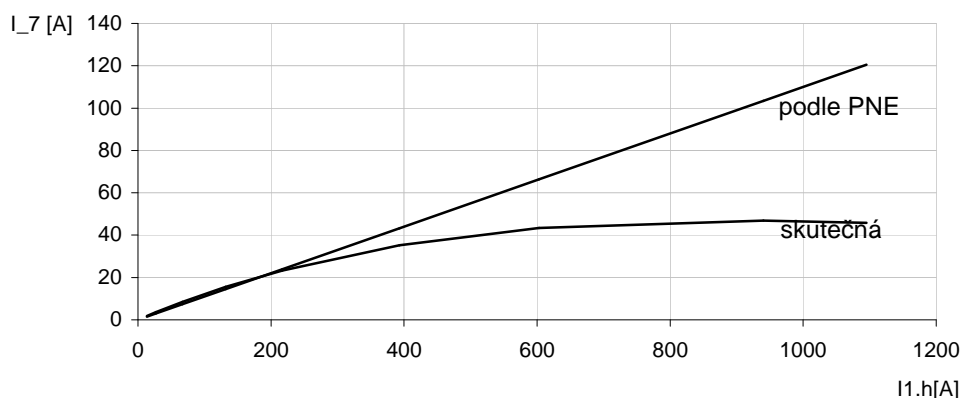
Porovnání odhadu PNE 33 3430-0 se simulací získanými hodnotami pro jednotlivé harmonické přehledně ukazují následující grafy.

5. harmonická



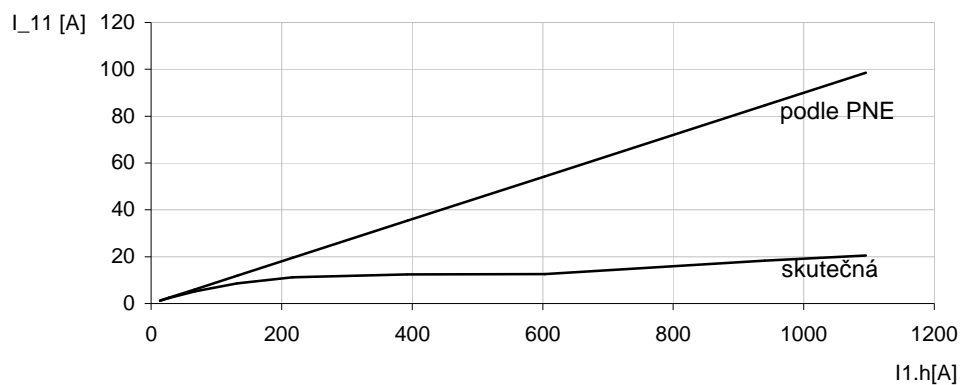
graf 3.4: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 5.harm. pro různá trakční zatížení

7. harmonická



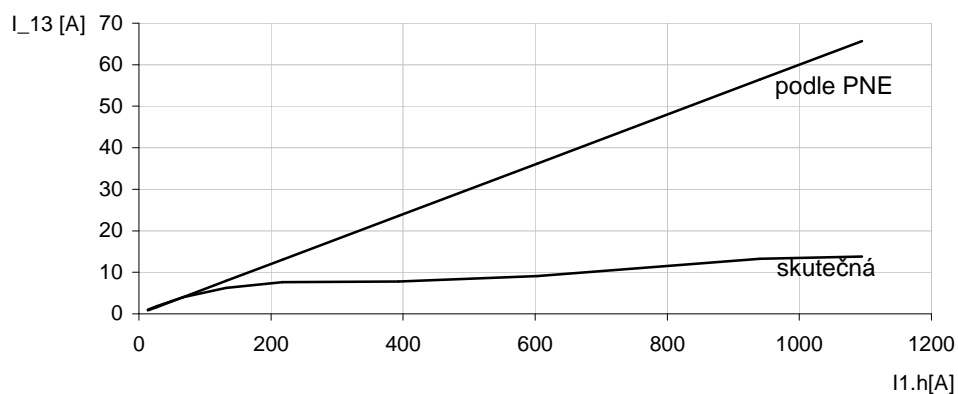
graf 3.5: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 7.harm. pro různá trakční zatížení

11. harmonická



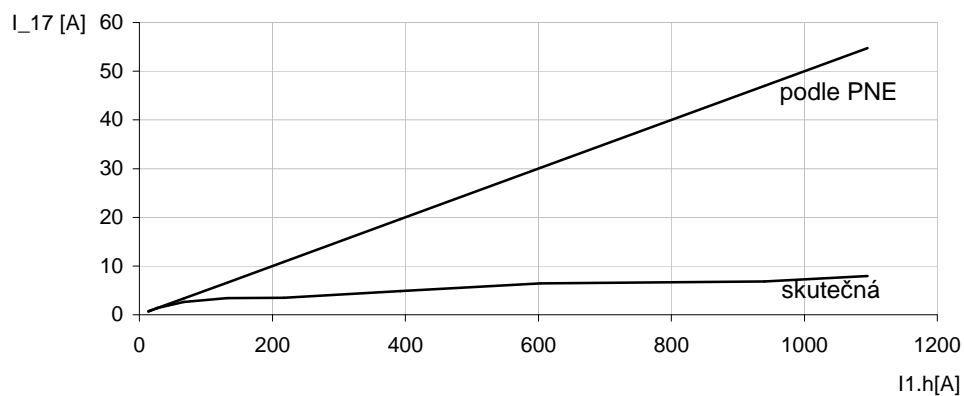
graf 3.6: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 11.harm. pro různá trakční zatížení

13. harmonická



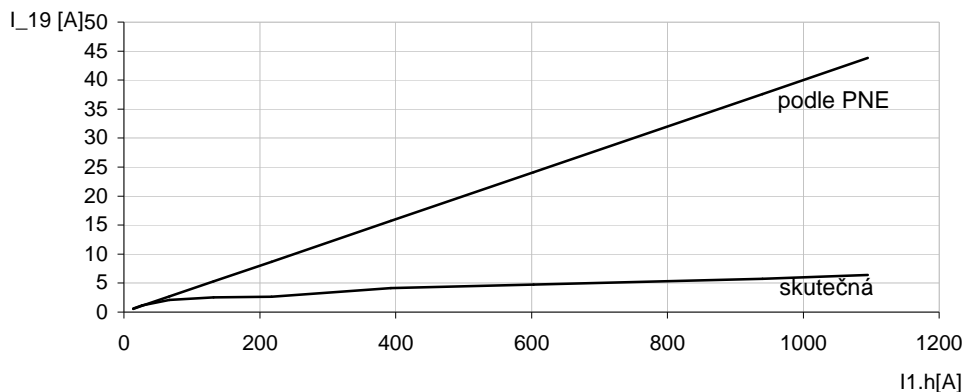
graf 3.7: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 13.harm. pro různá trakční zatížení

17. harmonická



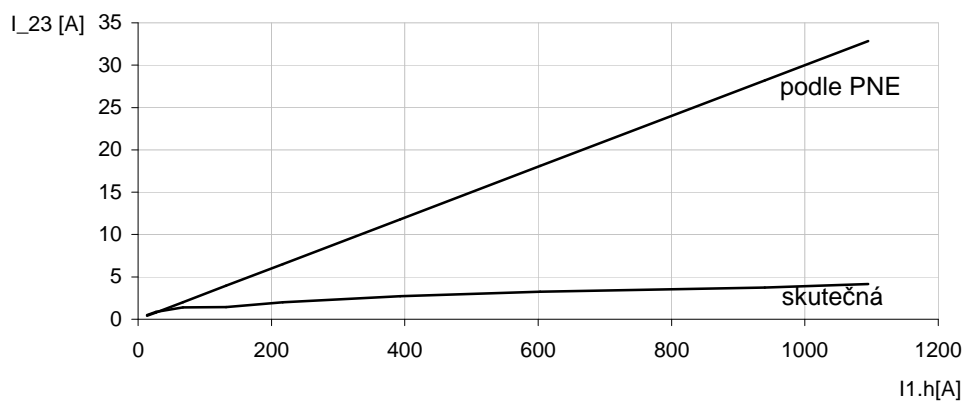
graf 3.8 porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 17.harm. pro různá trakční zatížení

19. harmonická



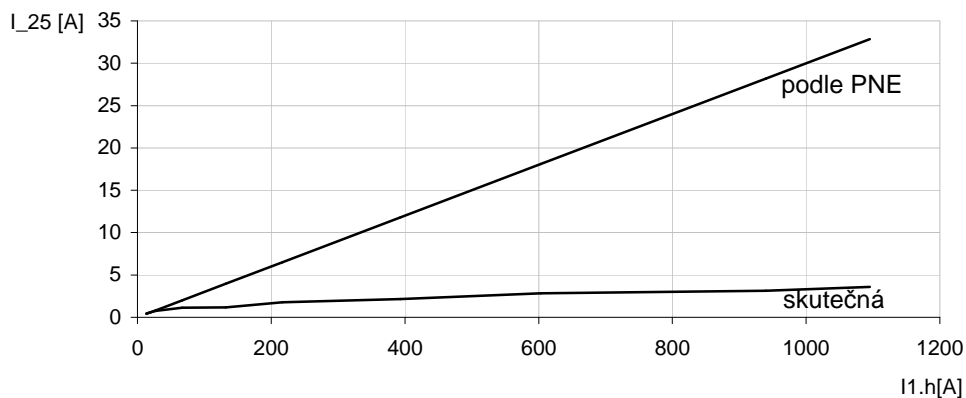
graf 3.9: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 19.harm. pro různá trakční zatížení

23. harmonická



graf 3.10: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 23.harm. pro různá trakční zatížení

25. harmonická



graf 3.11: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 25.harm. pro různá trakční zatížení

4 SIMULAČNÍ STUDIE PARALELNÍHO PROVOZU NĚKOLIKA TRAKČNÍCH USMĚRŇOVAČŮ

V této kapitole je opět sledován procentní obsah harmonických v primárním proudu, odebíraném tentokrátě několika paralelně pracujícími usměrňovačovými jednotkami. To je opět provedeno pomocí Fourierovy analýzy proudu $I(VV1)$ ve schématu z kapitoly 2.4. Tyto simulace jsou prováděny pro stejné zátěže (stejný dodávaný stejnosměrný výkon) jako v případě jedné jednotky v předchozí kapitole, aby byly výsledky porovnatelné. Stejného zatěžujícího výkonu bylo dosaženo pokusným nastavováním zátěže.

4.1 Simulace dvou paralelně pracujících usměrňovačů

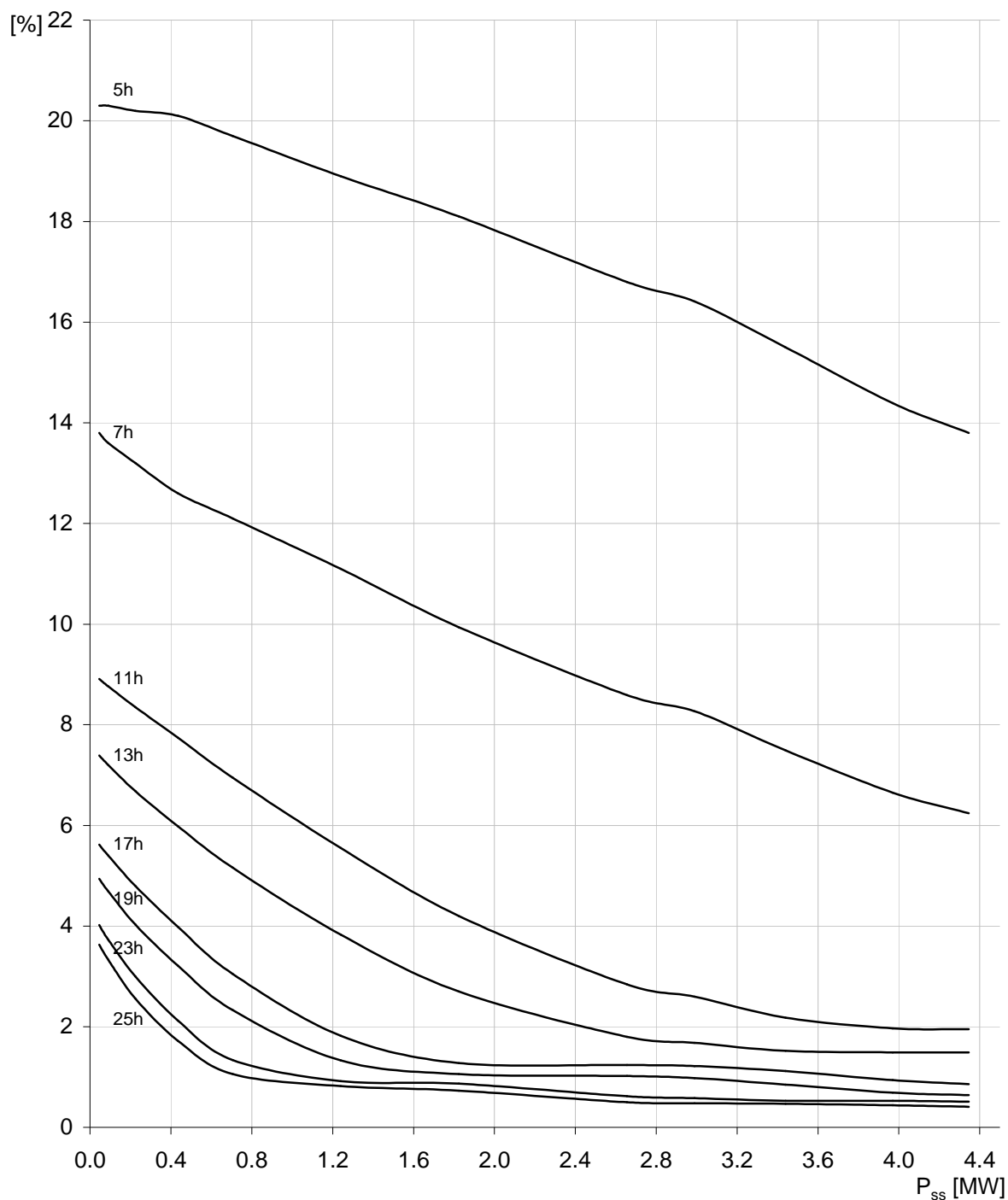
Situaci při dvou paralelně pracujících jednotkách popisuje následující tab. 4.1.

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 5.h			obsah 7.h		obsah 11.h		obsah 13.h	
		50Hz		250Hz			350Hz		550Hz		650Hz	
P_{ss} [MW]	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
0,045	13,5	14,9	3,025	20,30	2,056	13,80	1,328	8,91	1,101	7,39		
0,090	27	29,8	6,049	20,30	4,053	13,60	2,610	8,76	2,146	7,20		
0,224	67,4	74,2	14,988	20,20	9,794	13,20	6,196	8,35	4,957	6,68		
0,435	128,8	141,9	28,522	20,10	17,879	12,60	10,983	7,74	8,486	5,98		
0,705	214,3	236,0	46,492	19,70	28,556	12,10	16,402	6,95	12,178	5,16		
1,240	385,2	422,9	79,928	18,90	46,942	11,10	23,471	5,55	16,197	3,83		
1,824	583,8	640,1	115,858	18,10	63,626	9,94	26,884	4,20	17,283	2,70		
2,655	867,5	948,4	159,331	16,80	81,468	8,59	26,935	2,84	17,071	1,80		
2,990	939,6	1026,0	168,367	16,41	84,850	8,27	26,676	2,60	17,237	1,68		
3,440	1125	1229,0	190,495	15,50	92,052	7,49	26,792	2,18	18,681	1,52		
3,970	1351	1471,0	211,677	14,39	97,822	6,65	28,979	1,97	21,918	1,49		
4,345	1469	1596,0	220,248	13,80	99,590	6,24	31,122	1,95	23,780	1,49		

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 17.h			obsah 19.h		obsah 23.h		obsah 25.h	
		50Hz		850Hz			950Hz		1150Hz		1250Hz	
P_{ss}	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]
0,045	13,5	14,9	0,837	5,62	0,736	4,94	0,599	4,02	0,541	3,63		
0,090	27	29,8	1,609	5,40	1,398	4,69	1,112	3,73	0,992	3,33		
0,224	67,4	74,2	3,562	4,80	2,990	4,03	2,226	3,00	1,900	2,56		
0,435	128,8	141,9	5,648	3,98	4,555	3,21	3,008	2,12	2,441	1,72		
0,705	214,3	236,0	7,198	3,05	5,499	2,33	3,162	1,34	2,502	1,06		
1,240	385,2	422,9	7,697	1,82	5,625	1,33	3,891	0,92	3,468	0,82		
1,824	583,8	640,1	8,193	1,28	6,785	1,06	5,569	0,87	4,673	0,73		
2,655	867,5	948,4	11,760	1,24	9,674	1,02	5,880	0,62	4,742	0,50		
2,990	939,6	1026,0	12,517	1,22	10,055	0,98	5,951	0,58	4,925	0,48		
3,440	1125	1229,0	13,765	1,12	10,447	0,85	6,514	0,53	5,776	0,47		
3,970	1351	1471,0	13,827	0,94	10,150	0,69	7,796	0,53	6,472	0,44		
4,345	1469	1596,0	13,726	0,86	10,214	0,64	8,140	0,51	6,544	0,41		

tab. 4.1: závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu dvou usměrňovačových jednotek na zátěži

Tato tabulka má pro větší přehlednost stejný formát jako tab. 3.2, která uvádí výsledky Fourierovy analýzy samostatně pracujících jednotek. Je zde opět vidět závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu na zátěži těchto dvou jednotek. Graficky jsou výsledky simulace znázorněny v graf 4.1.



graf 4.1: závislost procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu dvou usměřňovačových jednotek na jejich zátěži

V **příloze 2** této diplomové práce jsou uvedeny tři průběhy primárních proudů (označené jako I(VV1)) při měnící se zátěži dvou paralelně pracujících jednotek. Dále jsou uvedeny sloupcové grafy procentního obsahu jednotlivých harmonických.

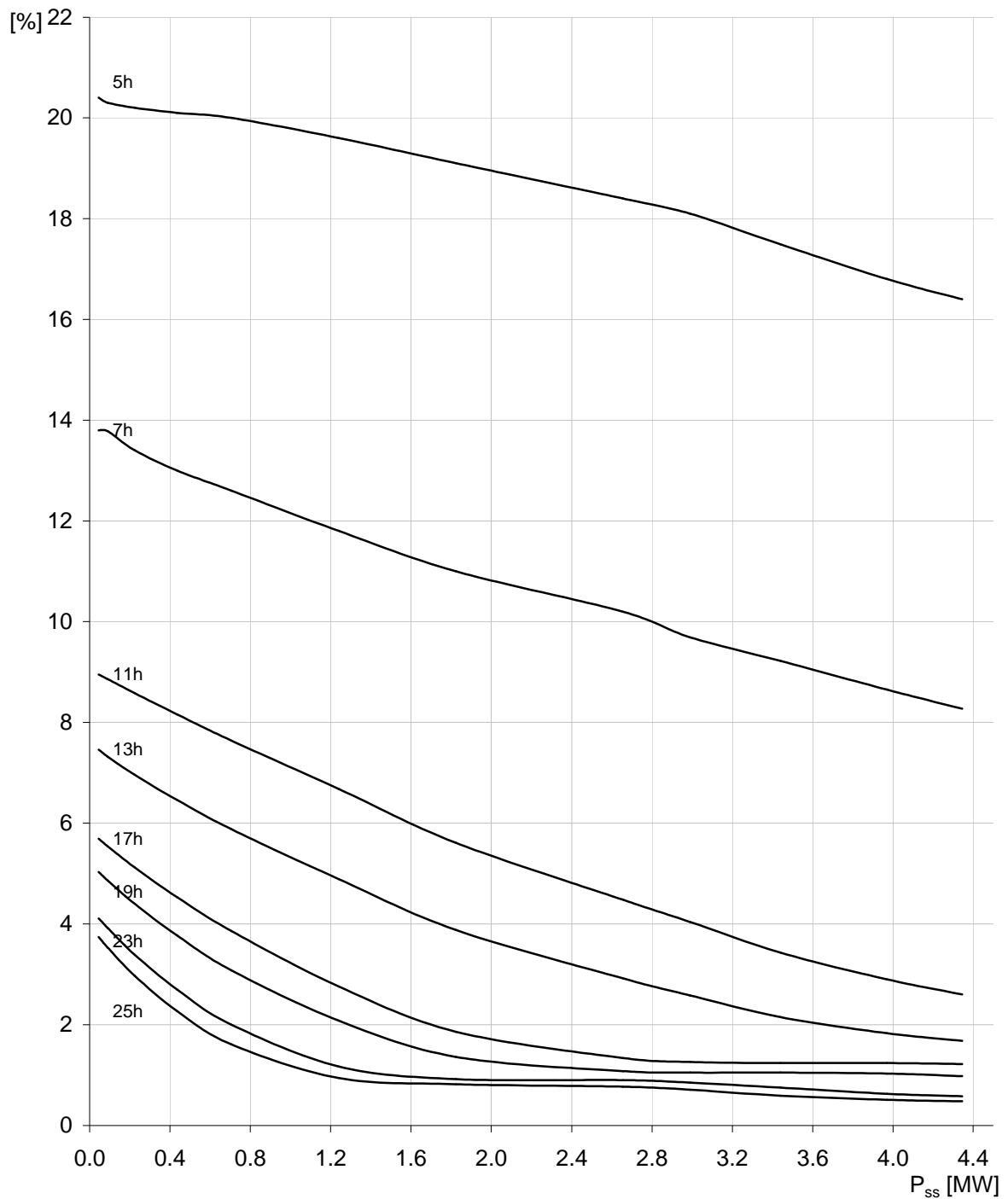
4.2 Simulace tří paralelně pracujících jednotek

Podobně jako v předchozí kapitole pro dvě jednotky je zde popsána situace tří paralelně pracujících usměrňovačových jednotek.

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 5.h		obsah 7.h		obsah 11.h		obsah 13.h	
		50Hz	250Hz		350Hz		550Hz		650Hz		
P_{ss} [MW]	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	
0,045	13,5	14,9	3,040	20,40	2,056	13,80	1,334	8,95	1,112	7,46	
0,090	27	29,8	6,049	20,30	4,106	13,78	2,640	8,86	2,181	7,32	
0,224	67,5	74,4	15,029	20,20	9,970	13,40	6,384	8,58	5,178	6,96	
0,435	129,3	142,5	28,643	20,10	18,525	13,00	11,628	8,16	9,206	6,46	
0,705	209,3	230,4	46,080	20,00	29,030	12,60	17,603	7,64	13,548	5,88	
1,240	368,6	405,2	79,419	19,60	47,814	11,80	27,067	6,68	19,814	4,89	
1,824	564	620,4	118,496	19,10	68,244	11,00	34,804	5,61	24,072	3,88	
2,655	806	884,4	162,730	18,40	90,209	10,20	39,621	4,48	25,824	2,92	
2,990	915	1003,0	181,543	18,10	97,191	9,69	40,521	4,04	25,877	2,58	
3,440	1092	1195,0	209,006	17,49	110,179	9,22	40,989	3,43	25,693	2,15	
3,970	1275	1396,0	234,528	16,80	120,754	8,65	40,484	2,90	25,547	1,83	
4,345	1409	1540,0	252,560	16,40	127,358	8,27	40,040	2,60	25,872	1,68	

obsah primárního proudu		obsah 1.h		obsah 17.h		obsah 19.h		obsah 23.h		obsah 25.h	
		50Hz	850Hz		950Hz		1150Hz		1250Hz		
P_{ss} [MW]	I_{ss} [A]	[A]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	[%]	
0,045	13,5	14,9	0,848	5,69	0,749	5,03	0,612	4,11	0,557	3,74	
0,090	27	29,8	1,651	5,54	1,448	4,86	1,168	3,92	1,052	3,53	
0,224	67,5	74,4	3,809	5,12	3,274	4,40	2,522	3,39	2,210	2,97	
0,435	129,3	142,5	6,455	4,53	5,372	3,77	3,848	2,70	3,235	2,27	
0,705	209,3	230,4	8,893	3,86	7,096	3,08	4,608	2,00	3,709	1,61	
1,240	368,6	405,2	11,184	2,76	8,428	2,08	4,741	1,17	3,809	0,94	
1,824	564	620,4	11,539	1,86	8,437	1,36	5,708	0,92	5,087	0,82	
2,655	806	884,4	11,851	1,34	9,552	1,08	7,960	0,90	6,810	0,77	
2,990	915	1003,0	12,638	1,26	10,532	1,05	8,526	0,85	7,121	0,71	
3,440	1092	1195,0	14,818	1,24	12,548	1,05	8,963	0,75	7,051	0,59	
3,970	1275	1396,0	17,310	1,24	14,379	1,03	8,795	0,63	7,120	0,51	
4,345	1409	1540,0	18,788	1,22	15,092	0,98	8,932	0,58	7,392	0,48	

tab. 4.2: závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu tří usměrňovačových jednotek na zátěži



graf 4.2: závislost procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu tří usměrňovačových jednotek na jejich zátěži

Ve **příloze 3** jsou opět uvedeny tři průběhy primárních proudů (označené jako I(VV1)) tří paralelně pracujících jednotek. Podobně jako v předchozích případech jsou sestrojeny sloupcové grafy procentního obsahu jednotlivých harmonických v primárním proudu.

5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULAČNÍCH STUDÍ A REÁLNĚ NAMĚŘENÝCH SPEKTER PRIMÁRNÍHO PROUDU ODEBÍRANÉHO MĚNÍRNOU

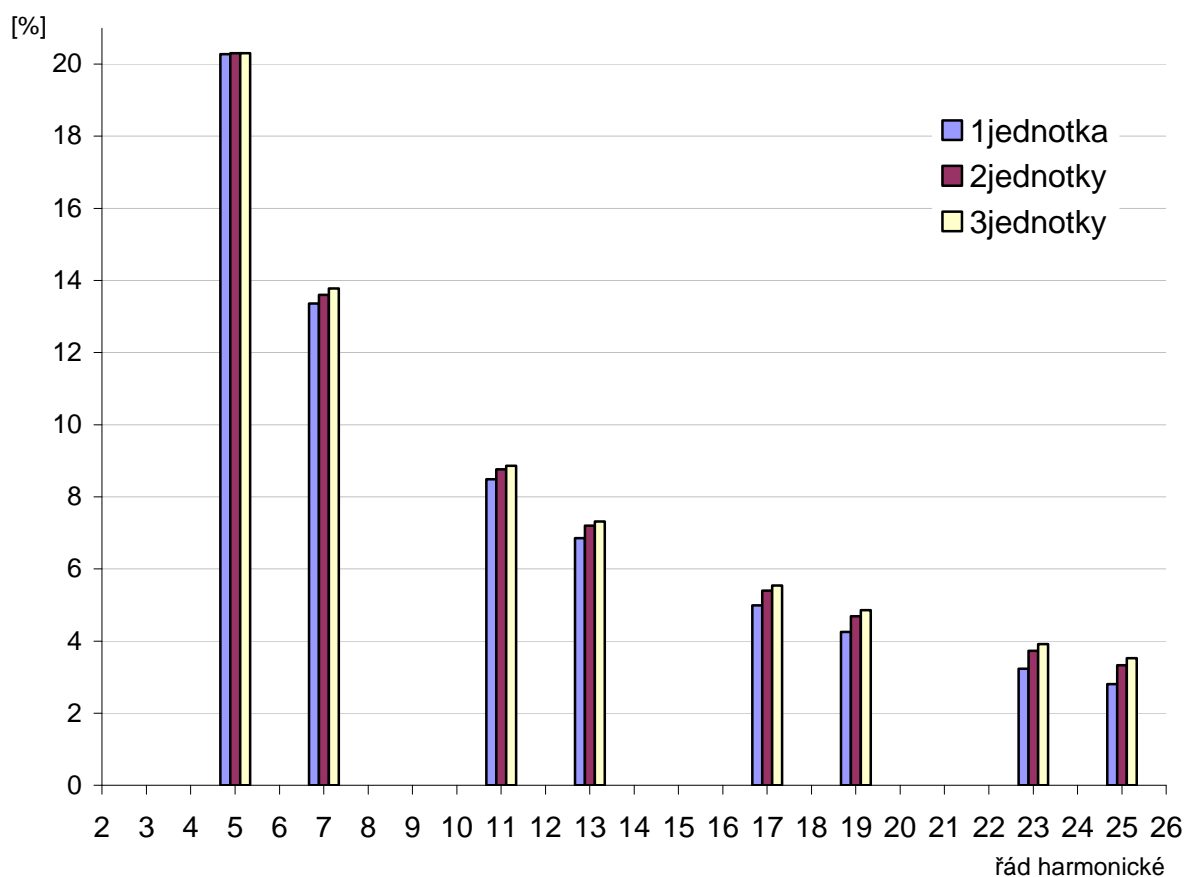
V reálném železničním provozu není důležité, kolika usměrňovačovými jednotkami je konkrétní úsek napájen, ale jaký je dodávaný výkon do tohoto úseku. Proto, aby bylo možné výsledky simulací vzájemně porovnávat, byly u různého počtu jednotek simulovány stejné zatěžující výkony. Primární proud tedy vždy reprezentuje celkový proud do měnírny, pokaždé ale usměrňovaný jiným počtem jednotek.

Právě z tohoto důvodu dochází k odlišnosti spekter primárních proudů získaných při simulacích jedné, dvou nebo tří jednotek. Tento rozdíl je popsán v následující kapitole.

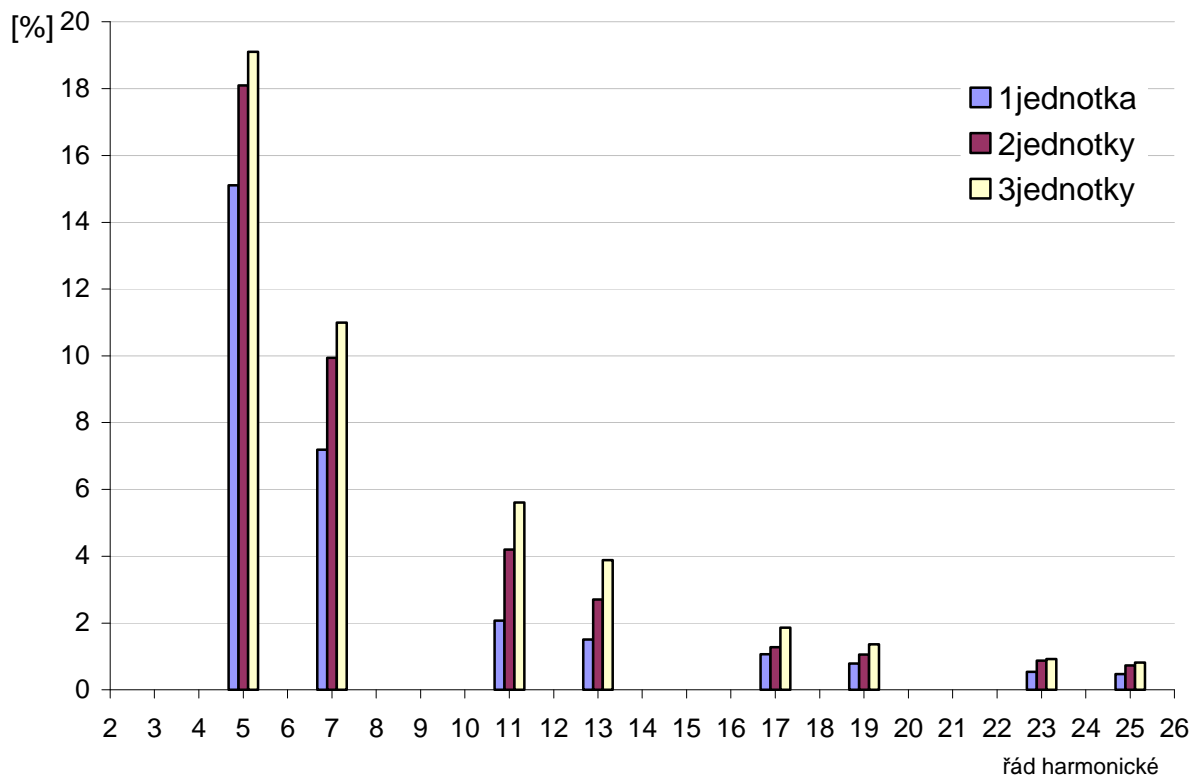
5.1 Srovnání spekter primárního proudu jedné, dvou a tří paralelně pracujících jednotek

Při porovnání výsledků simulací z tab. 3.2, tab. 4.1 a tab. 4.2 je zřejmé, jak se zvyšujícím se počtem usměrňovačových jednotek roste procentní obsah vyšších harmonických v primárním proudu. Tuto skutečnost dokumentují následující grafy 5.1, 5.2 a 5.3.

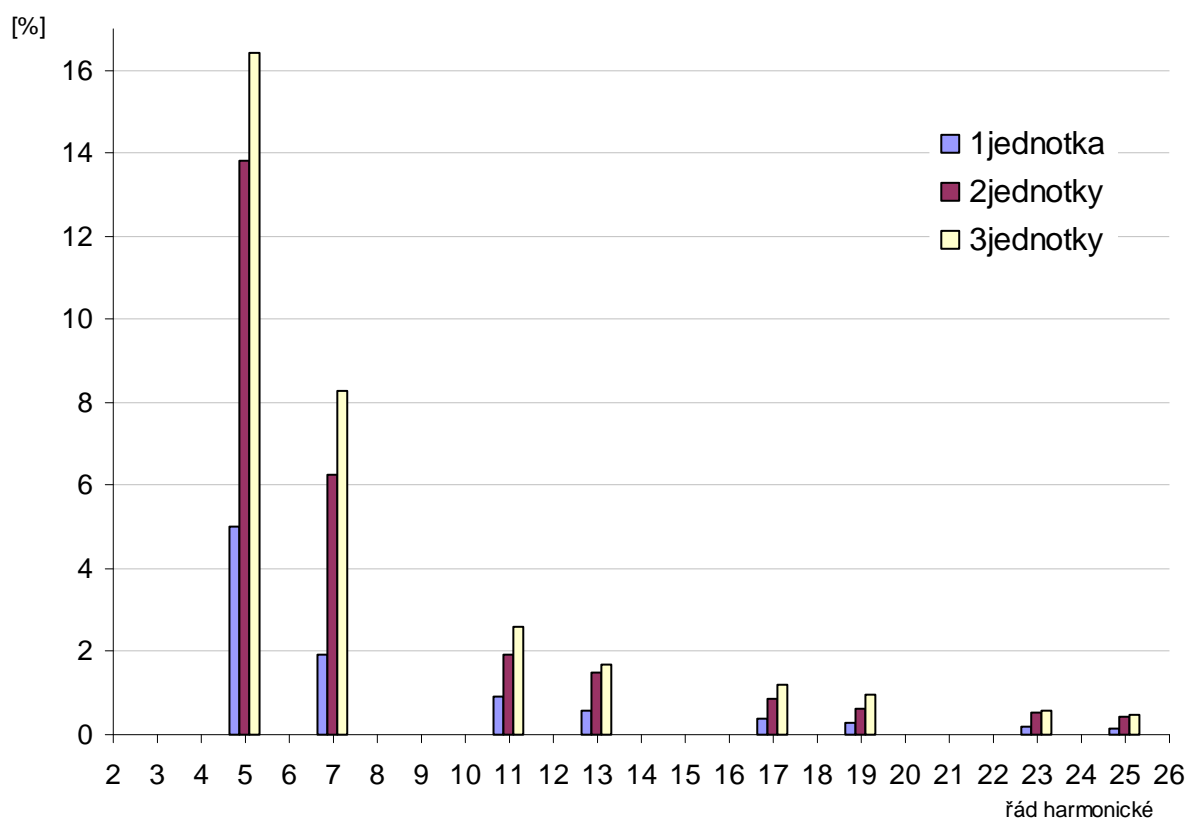
Z grafu 5.1 (který vyjadřuje běh napájecí stanice prakticky naprázdno) není rozdíl natolik patrný jako z dalších obrázků, které vyjadřují spektrum napájecí stanice při vyšším odebíraném výkonu. Především u posledního obrázku (graf 5.3) pro zátěž 4,34MW je zřejmé, jak je napájecí síť ovlivněna přidáním každé další jednotky, aniž by se zvýšil odebíraný výkon.



graf 5.1: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 0,091MW



graf 5.2: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 1,824MW



graf 5.3: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 4,34MW

Podobně by bylo možné sestavit srovnávací grafy pro všechny simulované zátěžné výkony.

Situaci čtyř a více paralelně pracujících usměrňovačových jednotek je možné odhadnout z předchozích simulací dvou a tří jednotek. Je jisté, že procentní obsah vyšších harmonických v primárním proudu měnírně při stejném dodávaném výkonu by byl opět o něco vyšší, než tomu je u jednotek tří.

5.1.1 Vysvětlení zjištěných poznatků

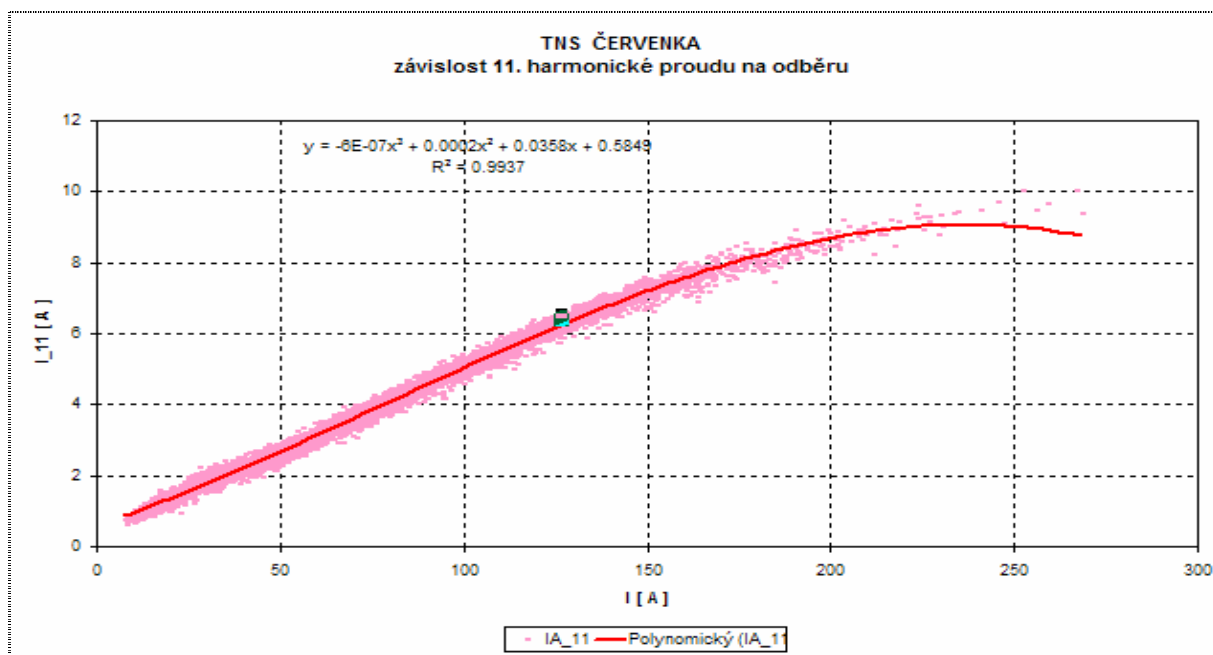
Skutečnost reprezentovanou výše uvedenými grafy vysvětluje existence úhlu překrytí, který je popsán v kapitole 1.3. Z této kapitoly je zřejmé, že se zvyšující se zátěží usměrňovače dochází ke zvyšování úhlu překrytí, k přiblížení primárního proudu sinusovce a tím ke snížení procentního obsahu harmonických v primárním proudu.

V případě, že dojde k odběru stejného výkonu z více paralelně pracujících jednotek, dochází k situaci, že je každá z těchto paralelně pracujících jednotek zatížena méně, než kdyby dodávala celý požadovaný výkon sama. Tím dojde ke snížení úhlu překrytí a díky tomu ke zvýšení poměrného obsahu vyšších harmonických v proudu napájejícím tyto jednotky.

5.2 Srovnání simulacemi získaných a naměřených hodnot

V roce 2003 bylo Technickou ústřednou dopravní cesty ČD provedeno měření spekter primárních proudů v přípojovacích bodech 12 stejnosměrných TNS na Moravě. Toto měření se zabývalo především získáním poznatků pro posouzení platnosti procentního odhadu harmonických uvedených v PNE 33 3430-0 (tab. 3.1 nahoře).

Jako příklad výsledku tohoto měření může posloužit obr. 5.1, který vyjadřuje průběh závislosti 11.harmonické na odebíraném proudu TNS v Července.



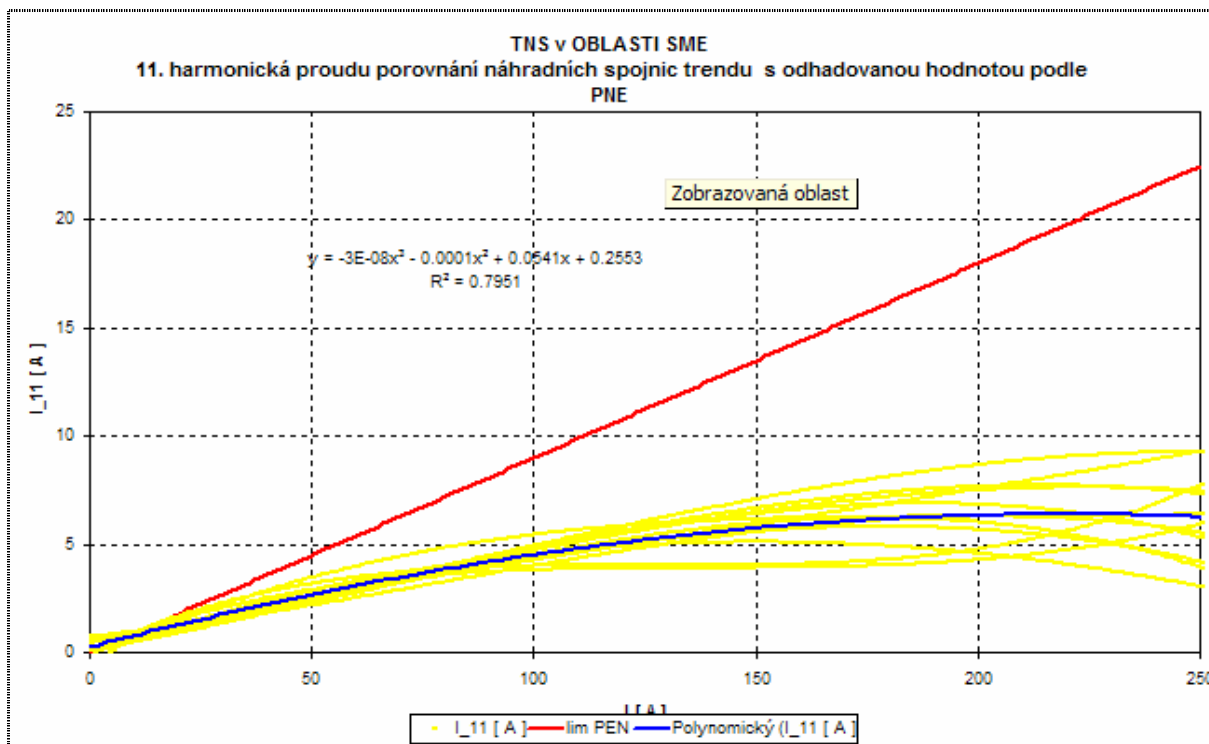
obr. 5.1: závislost průběhu 11.h. na odebíraném proudu v TNS Červenka (převzato ze zprávy TUDC)

Pro srovnání naměřeného průběhu 11. harmonické s výsledky získanými simulací poslouží lépe obr. 5.2, který ukazuje průběhy všech měřených TNS a také jejich průměr. Tento průměr je zde zároveň porovnáván s odhadem podle PNE 33 3430-0.

Při porovnání náhradní spojnice trendu z obr. 5.2 s průběhy na grafu 5.4 je vidět shoda simulacemi získaných hodnot s reálným provozem. Z tohoto grafu je také vidět, že ani při „nepříznivém stavu“ daném paralelním provozem tří jednotek nedochází k překračování hodnot odhadnutých v normě PNE 33 3430-0.

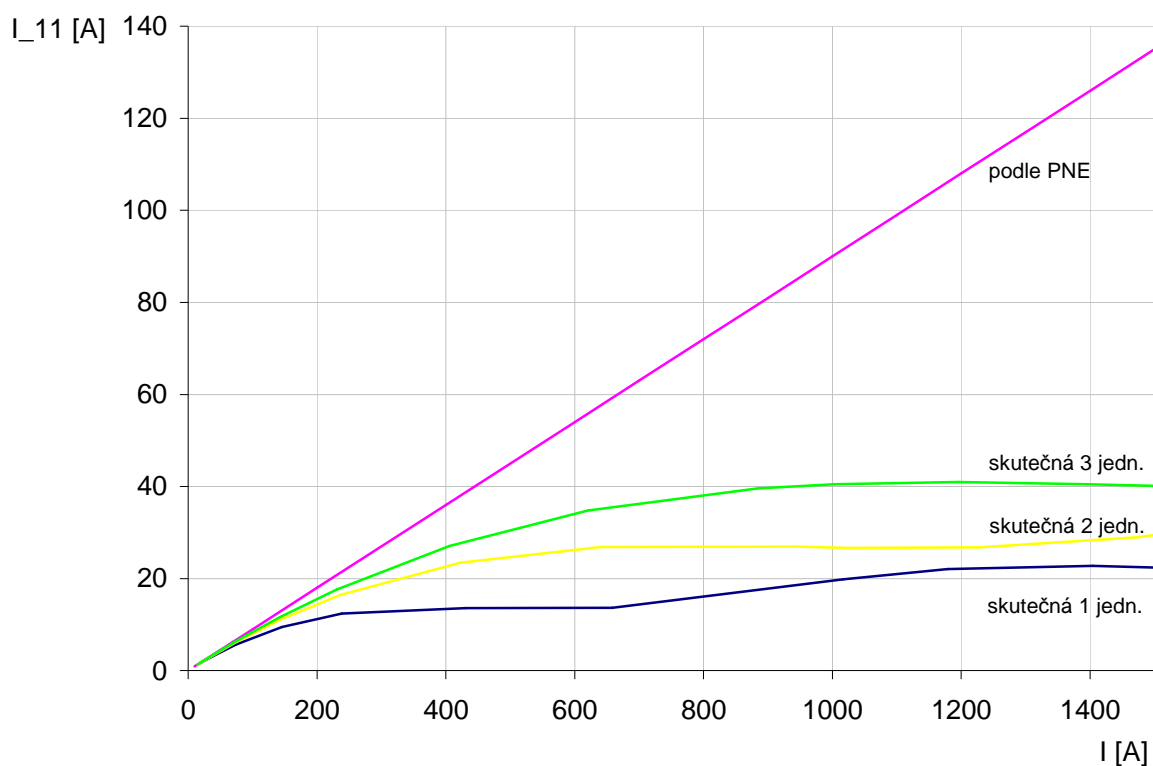
Lze předpokládat, že i při měření v TNS bylo v provozu vždy několik paralelně pracujících usměrňovačových jednotek.

Rozdíl ve velikostech zobrazovaných proudů je dán měřením na straně 22kV, zatímco simulace probíhaly při jmenovitém napětí 3kV. Z tohoto důvodu je nutné pro porovnání všechny hodnoty násobit příslušnými koeficienty.



obr. 5.2: závislost průběhů 11.harmonické na odebíraném proudu
(převzato ze zprávy TÚDC)

11.harmonická



graf 5.4: závislost obsahu 11.harmonické prim.proudu na odběru

Porovnání průběhů 13., 23. a 25. harmonické je uvedeno v **příloze 4**.

ZÁVĚR

Cíl této práce, odpovědět na otázku, proč může docházet ke skokovým změnám obsahu vyšších harmonických v primárních proudech napájecích stanic, nejlépe vystihují grafy v kapitole 5.1. Z těchto grafů, které jsou podloženy předchozími simulacemi, je zřejmé, že k uvedeným skokovým změnám obsahu vyšších harmonických dochází v případech, kdy jsou paralelně připojovány další usměrňovací jednotky v trakční napájecí stanici. Ke změnám obsahu vyšších harmonických, avšak opačného směru, dochází také při odpojování některého z paralelně pracujících usměrňovačů.

Všechny simulace byly prováděny pro šestipulzní zapojení trakčního usměrňovače. Takové zapojení je v současné době používáno například v provozech MHD. Zjištěné poznatky je však možné velmi dobře aplikovat i na zapojení dvanáctipulzní (popsané v kapitole 1.2), které je instalováno ve všech stejnosměrných napájecích stanicích české železnice.

I u dvanáctipulzního zapojení dochází se zvyšující se zátěží ke zvětšování úhlu překrytí a tím ke snížení poměrného obsahu vyšších harmonických primárního proudu. Jediný rozdíl spočívá ve skutečnosti, že dvanáctipulzní usměrňovač emituje pouze harmonické řádů 11., 13., 23., 25. a další.

Reálnost prováděných simulací je dokumentována v závěrečné kapitole 5.2, kde jsou obsahy 11., 13., 23., a 25. harmonické získané simulacemi porovnány se skutečně naměřenými průběhy v konkrétních TNS.

Z této práce vyplývá, že z hlediska ovlivňování napájecí sítě by bylo vhodné napájet trakční vedení vždy jen jednou výkonnou usměrňovačovou jednotkou. Další možností, jak snižovat obsah vyšších harmonických v primárním proudu, je v případě malých trakčních odběrů použít jen nejvýše nutný počet usměrňovačů.

Obě zmíněné možnosti by však měly značný dopad na stálost napájení a tím i na pravidelnost a plynulost dopravy. V případě, že by došlo v době, kdy je zapojena pouze jedna jednotka, k její poruše, byl by až do připojení další jednotky celý napájený úsek bez napětí, což by jistě mělo výše zmíněné negativní dopady.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] IBL, Jaroslav. *Průmyslová elektronika II.část: Rtuťové usměrňovače*.
1. vyd. Praha : SNTL, 1955. 196 s.
- [2] HLAVA, Karel. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*.
1. vyd. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
- [3] HLAVA, Karel. Parametry odběru elektrické energie dvanáctipulzním trakčním usměrňovačem v závislosti na jeho zatížení. In *Vědeckotechnický sborník ČD č.14*.
Praha : 2002.
- [4] ROZANOV, J.K. *Základy výkonové měničové techniky*.
1. vyd. Praha : SNTL, 1985.
- [5] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk, GRIC, Rudolf, PAVELKA , Jiří. *Výkonová elektronika I*.
1. vyd. Praha : ČVUT, 1996. 196 s. ISBN 80-01-00723-5.
- [6] *PNE 33 3430-0 Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav*
- [7] KRUPICA, Jiří. *Možnosti splnění dovolených hodnot napěťových harmonických v připojovacím bodě TNS DC*. Praha: TÚDC ČD, 2003
- [8] MLYNÁŘÍK, Ladislav. *EMC diodové trakční usměrňovací jednotky vůči napájecí síti*.
[s.l.], 2007. 24 s. Ročníkový projekt II.
- [9] *Katalog produktů firmy Polovodiče a.s.* [online]. 2007 [cit. 2007-12-11].
Dostupný z WWW: <http://www.polovodice.cz/_files/soubory/katalog2007.cz.pdf>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

obr. 1.1: zapojení šestipulzního můstkového usměrňovače	10
obr. 1.2: vedení diod ve třífázovém šestipulzním usměrňovači	10
obr. 1.3: pořadí vedení diod v „horní řadě“ šestipulzního usměrňovače	11
obr. 1.4: pořadí vedení diod ve „spodní řadě“ šestipulzního usměrňovače	11
obr. 1.5: šestipulzní usměrňovač se sekundárním vinutím do Y a odporovou zátěží	12
obr. 1.6: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a stejnosměrného proudu odporovou zátěží I(Rz) 12	
obr. 1.7: šestipulzní usměrňovač se sekundárním vinutím do D a odporovou zátěží	13
obr. 1.8: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a stejnosměrného proudu odporovou zátěží I(Rz) 13	
obr. 1.9: zapojení šestipulzního usměrňovače se sekundárním vinutím do Y a RL zátěží	14
obr. 1.10: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a usměrněného proudu RL zátěží I(Rz).....	14
obr. 1.11: zapojení šestipulzního usměrňovače se sekundárním vinutím do D a RL zátěží	15
obr. 1.12: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a stejnosměrného proudu RL zátěží I(Rz).....	15
obr. 1.13: zapojení dvanáctipulzního usměrňovače	16
obr. 1.14: pořadí vedení diod kladné polarity Y sekce dvanáctipulzního usměrňovače	17
obr. 1.15: pořadí vedení diod kladné polarity D sekce dvanáctipulzního usměrňovače	18
obr. 1.16: zapojení dvanáctipulzního usměrňovače s odporovou zátěží	22
obr. 1.17: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a stejnosměrného proudu R zátěží I(Rz)	22
obr. 1.18: průběh primárního proudu usměrňovače I(L1) a stejnosměrného proudu RL zátěží I(Rz).....	23
obr. 1.19: sinusový průběh napětí na zdroji VV1 a posunutý průběh proudu zdrojem VV1	24
obr. 1.20: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěžném proudu 132,5A.....	26
obr. 1.21: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěžném proudu 604,3A.....	26
obr. 1.22: průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při středním zátěžném proudu 1090A....	26
obr. 2.1: náhradní schéma diody	28
obr. 2.2: náhradní schéma jednofázového transformátoru	29
obr. 2.3: požité náhradní schémata třífázového trakčního transformátoru	30
obr. 2.4: obvod zadaný ve PSpice	31
obr. 2.5: obvod pro simulaci paralelního provozu 3 usměrňovacích jednotek.....	33
obr. 2.6: zapojení respektující činné ztráty transformátoru.....	36
obr. 2.7: vliv úhlu překrytí na úbytek napětí.....	38
obr. 5.1: závislost průběhu 11.h. na odebíraném proudu v TNS Červenka (převzato ze zprávy TÚDC)	53
obr. 5.2: závislost průběhů 11.harmonické na odebíraném proudu	54

SEZNAM TABULEK

tab. 1.1: složky spektra primárních proudů Y a D sekce dvanáctipulzního usměřovače	20
tab. 1.2: porovnání vypočtených a naměřených hodnot úhlu překrytí	25
tab. 2.1: parametry diody DV 808-1360-60	27
tab. 2.2: parametry diody DV808.....	29
tab. 2.3: zatěžovací charakteristiky bez respektování činných ztrát ve vinutí transformátoru	34
tab. 2.4: výsledky simulace při zapojení respektujícím činné ztráty ve vinutí transformátoru	37
tab. 3.1: maximální dovolený obsah vyšších harmonických primárního proudu.....	39
tab. 3.2: závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických	41
tab. 4.1:závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu dvou usměřovačových jednotek na zátěži.....	46
tab. 4.2: závislost procentního a ampérového obsahu vyšších harmonických primárního proudu tří usměřovačových jednotek na zátěži	48

SEZNAM GRAFŮ

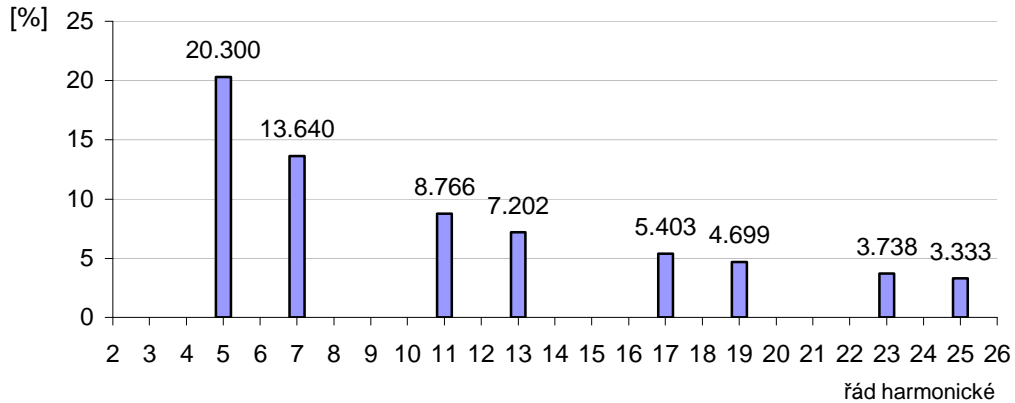
graf 2.1: porovnání vnějších zatěžovacích charakteristik	35
graf 2.2: porovnání zatěžovacích charakteristik, jedné usměrňovačové jednotky, při respektování činného odporu vinutí transformátoru a bez něj.....	37
graf 3.1: odhad maximálního procentního obsahu vyšších harmonických v primárním proudu usměrňovače podle PNE 33 3430-0	40
graf 3.4: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 5.harm. pro různá trakční zatížení.....	43
graf 3.5: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 7.harm. pro různá trakční zatížení.....	43
graf 3.6: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 11.harm. pro různá trakční zatížení.....	44
graf 3.7: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 13.harm. pro různá trakční zatížení.....	44
graf 3.8 porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 17.harm. pro různá trakční zatížení.....	44
graf 3.9: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 19.harm. pro různá trakční zatížení.....	45
graf 3.10: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 23.harm. pro různá trakční zatížení.....	45
graf 3.11: porovnání normou odhadovaného a skutečného obsahu 25.harm. pro různá trakční zatížení.....	45
graf 4.1: závislost procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu dvou usměrňovačových jednotek na jejich zátěži.....	47
graf 4.2: závislost procentního obsahu vyšších harmonických primárního proudu tří usměrňovačových jednotek na jejich zátěži.....	49
graf 5.1: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 0,091MW	51
graf 5.2: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 1,824MW	51
graf 5.3: porovnání spekter primárních proudů jedné, dvou a tří jednotek, při zátěži 4,34MW	52
graf 5.4: závislost obsahu 11.harmonické prim.proudu na odběru	54

SEZNAM PŘÍLOH

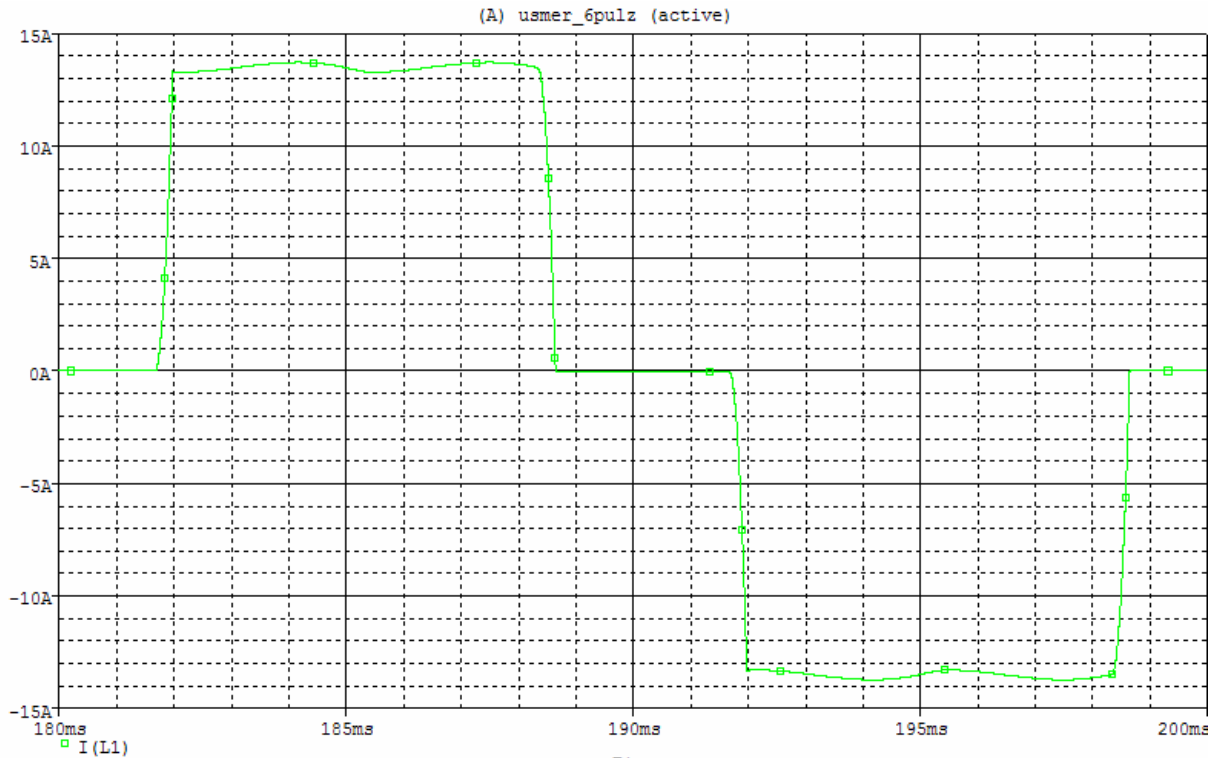
- {1} Grafy procentního obsahu harmonických a průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při samostatně pracující jednotce
- {2} Průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při dvou paralelně pracujících jednotkách
- {3} Průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při třech paralelně pracujících jednotkách
- {4} Porovnání průběhů naměřených a simulací získaných hodnot 13., 23., a 25. harmonické

PŘÍLOHA {1}

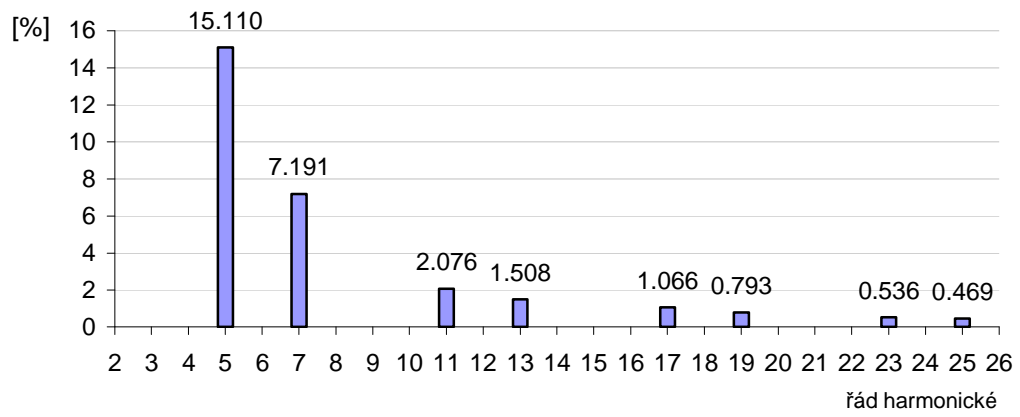
Grafy procentního obsahu harmonických a průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při samostatně pracující jednotce



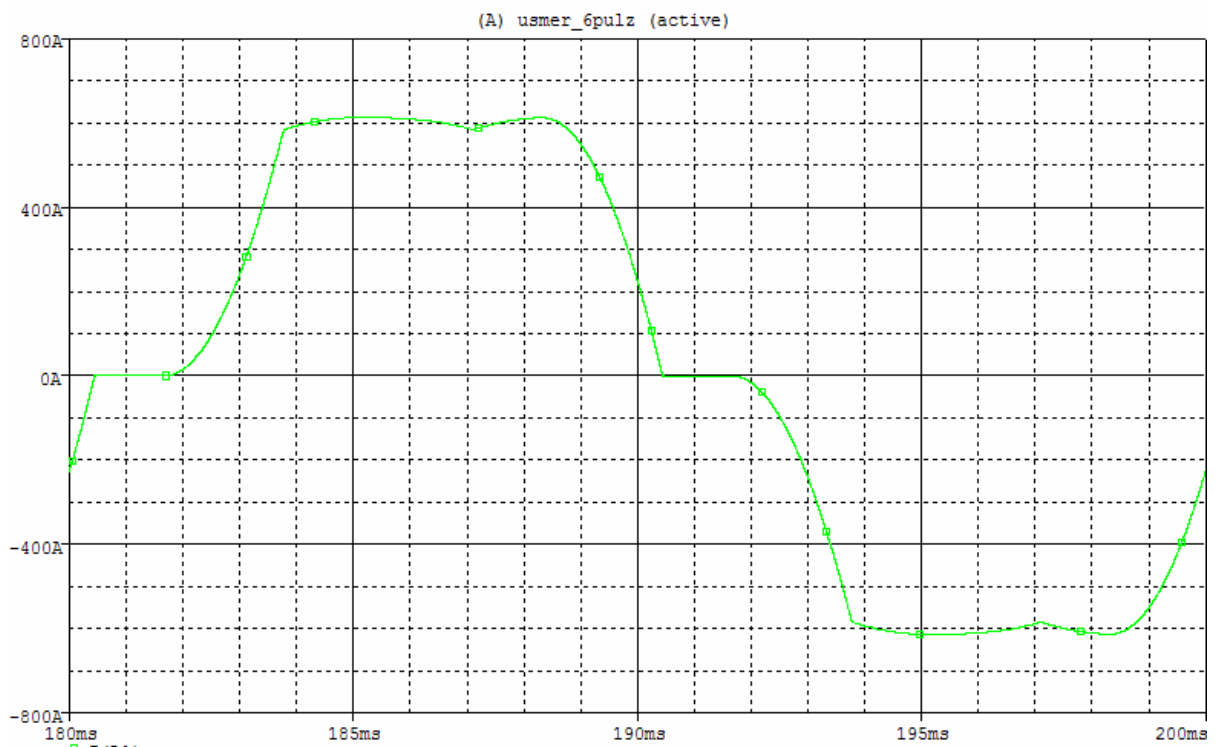
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu usměrňovače při zátěži 250Ω, 500mH (0,046MW)



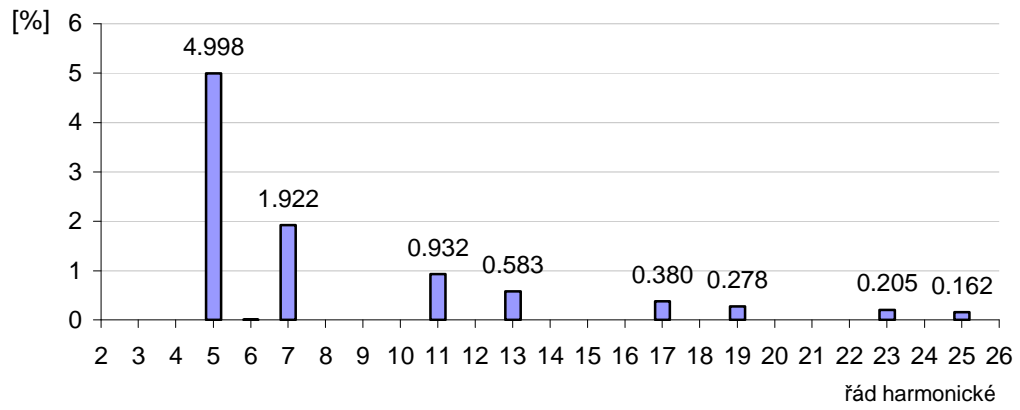
průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěži 250Ω, 500mH (0,046MW)



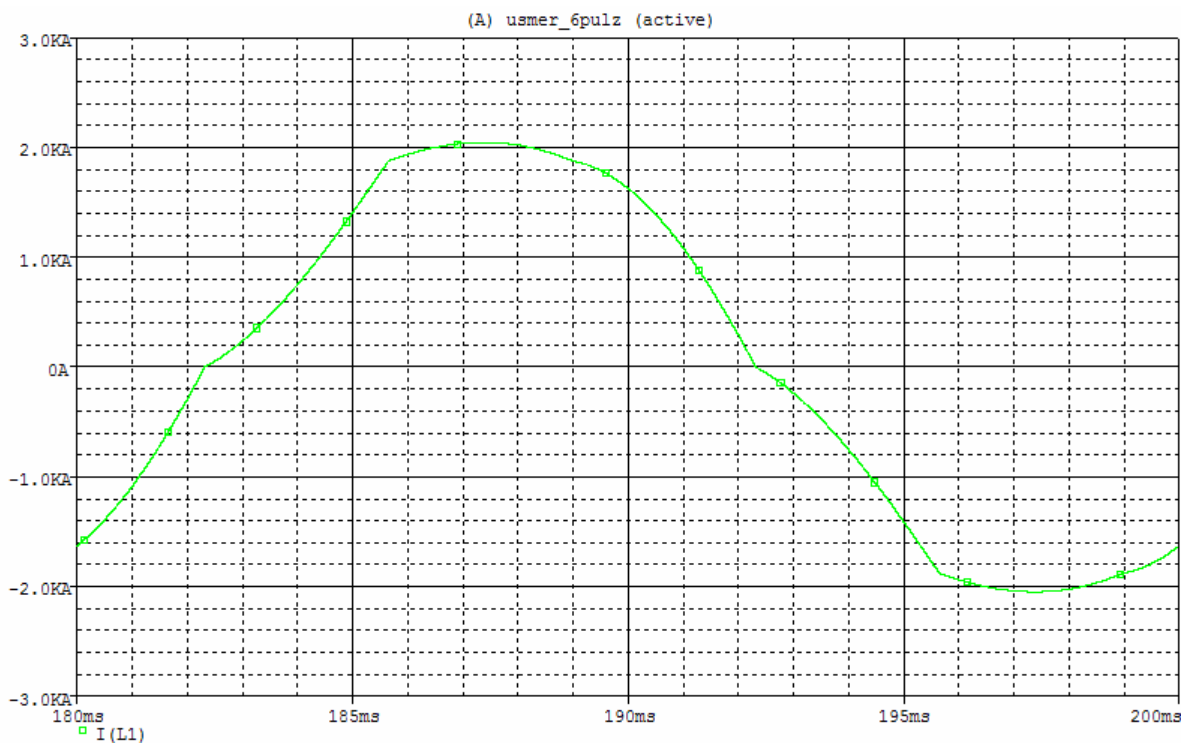
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu usměrňovače při zátěži 5Ω , $10mH$, ($1,82MW$)



průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěži 5Ω , $10mH$, ($1,82MW$)



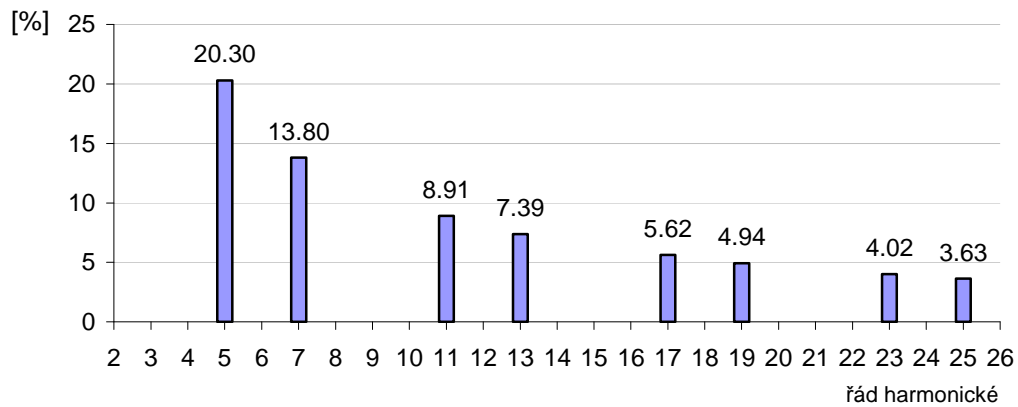
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu usměrňovače při zátěži $1,1\Omega$, $2,2mH$ ($4,33MW$)



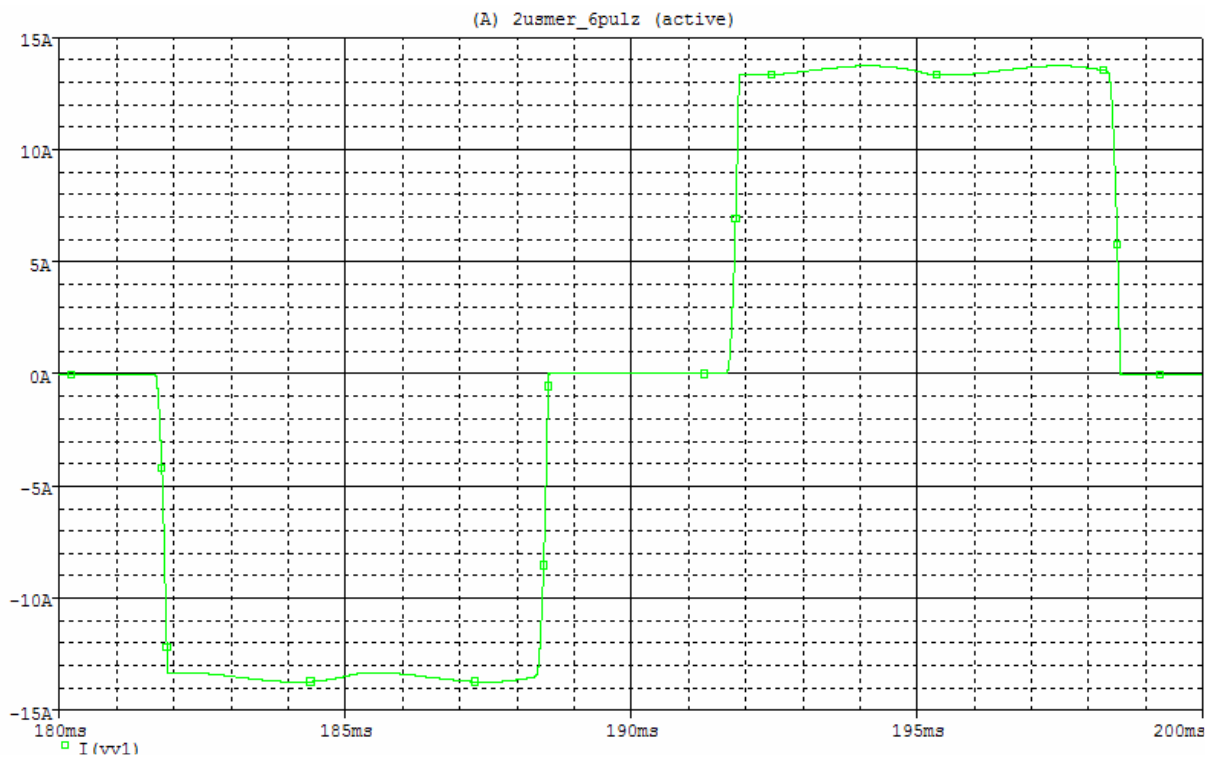
průběh primárního proudu šestipulzního usměrňovače při zátěži $1,1\Omega$, $2,2mH$ ($4,33MW$)

PŘÍLOHA {2}

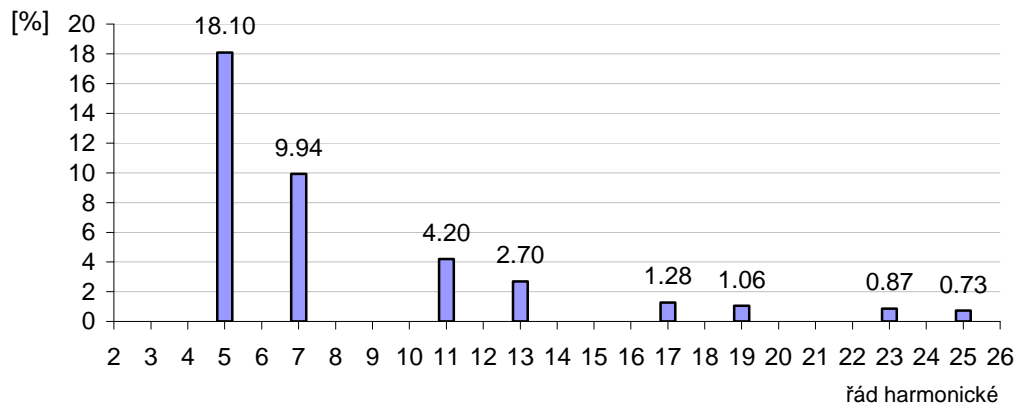
Průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při dvou paralelně pracujících jednotkách



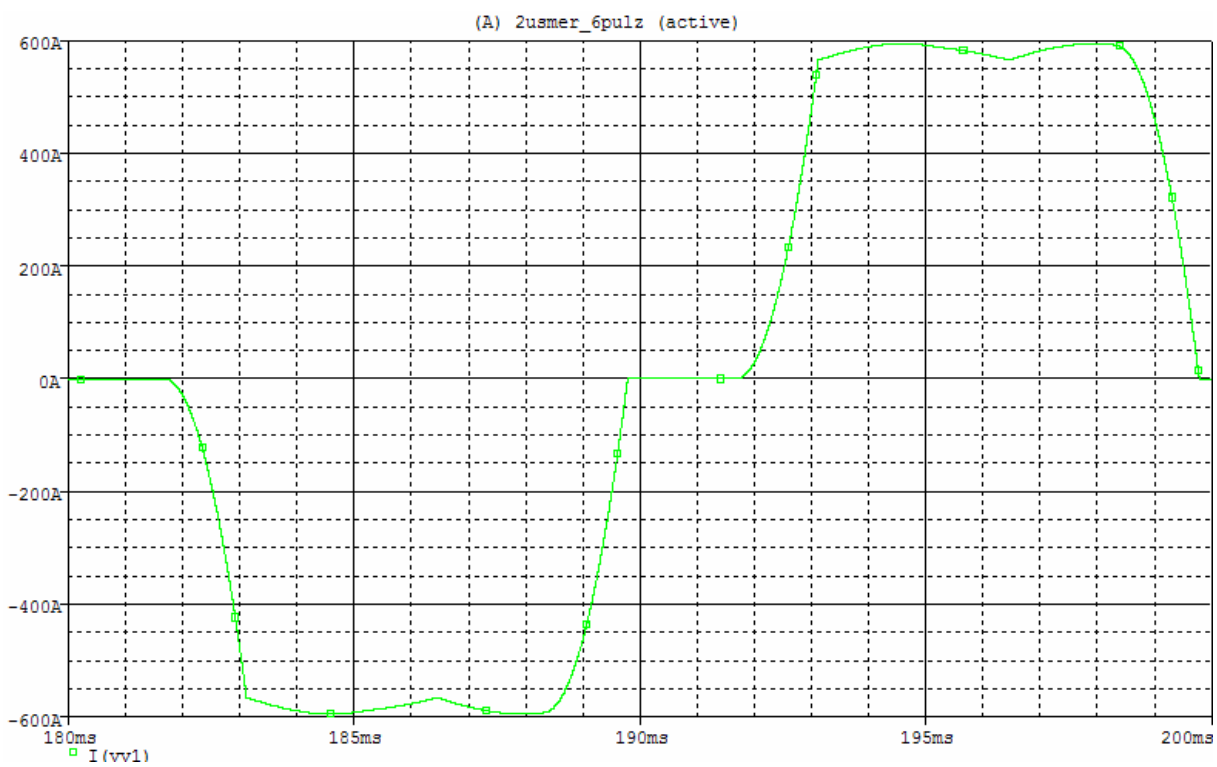
*obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu dvou jednotek při zátěži 250Ω, 500mH
(0,045MW)*



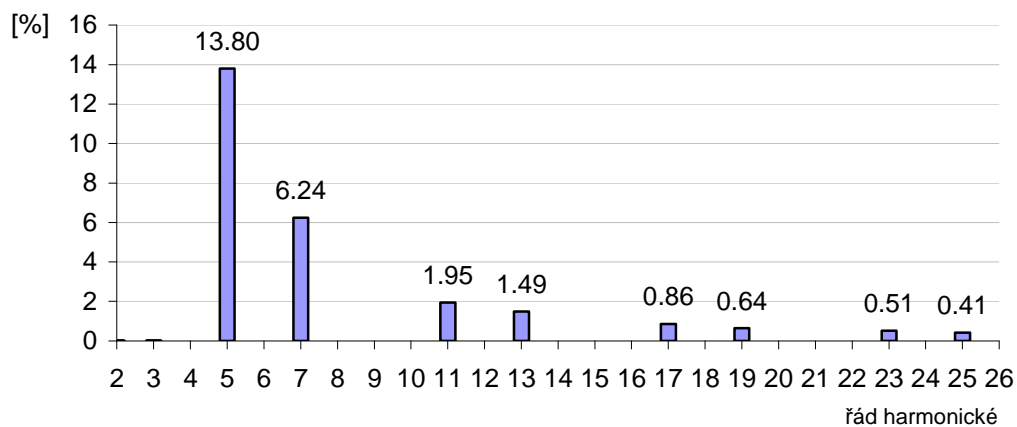
*průběh primárního proudu dvou jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži 250Ω, 500mH
(0,045MW)*



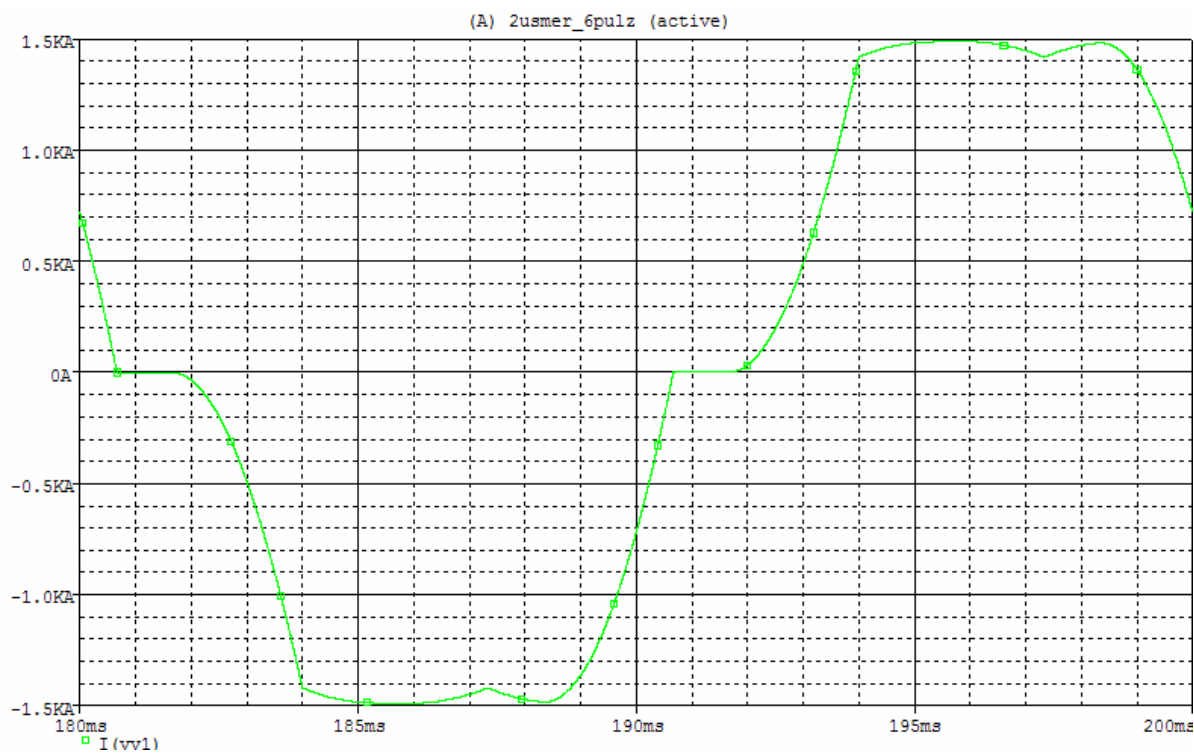
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu dvou jednotek při zátěži $5,5\Omega$, 11mH ($1,83\text{MW}$)



průběh primárního proudu dvou jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži $5,5\Omega$, 11mH ($1,83\text{MW}$)



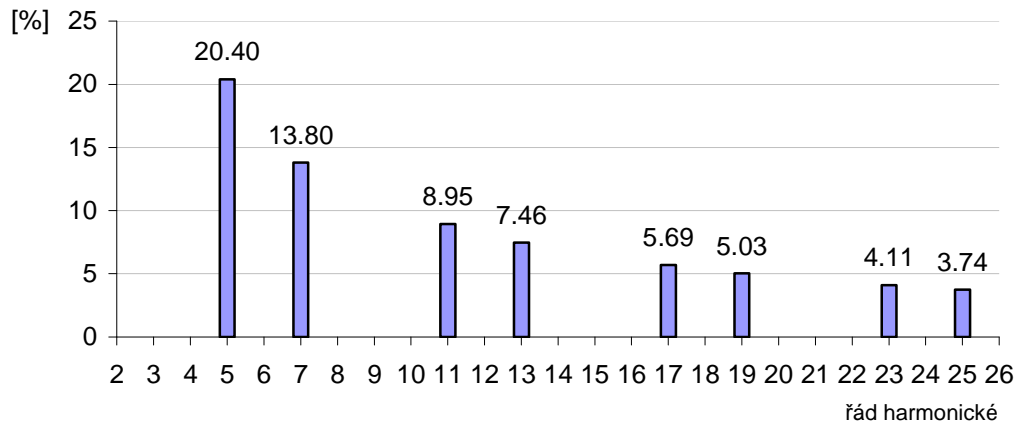
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu dvou jednotek při zátěži 2Ω , $4mH$ ($4,33MW$)



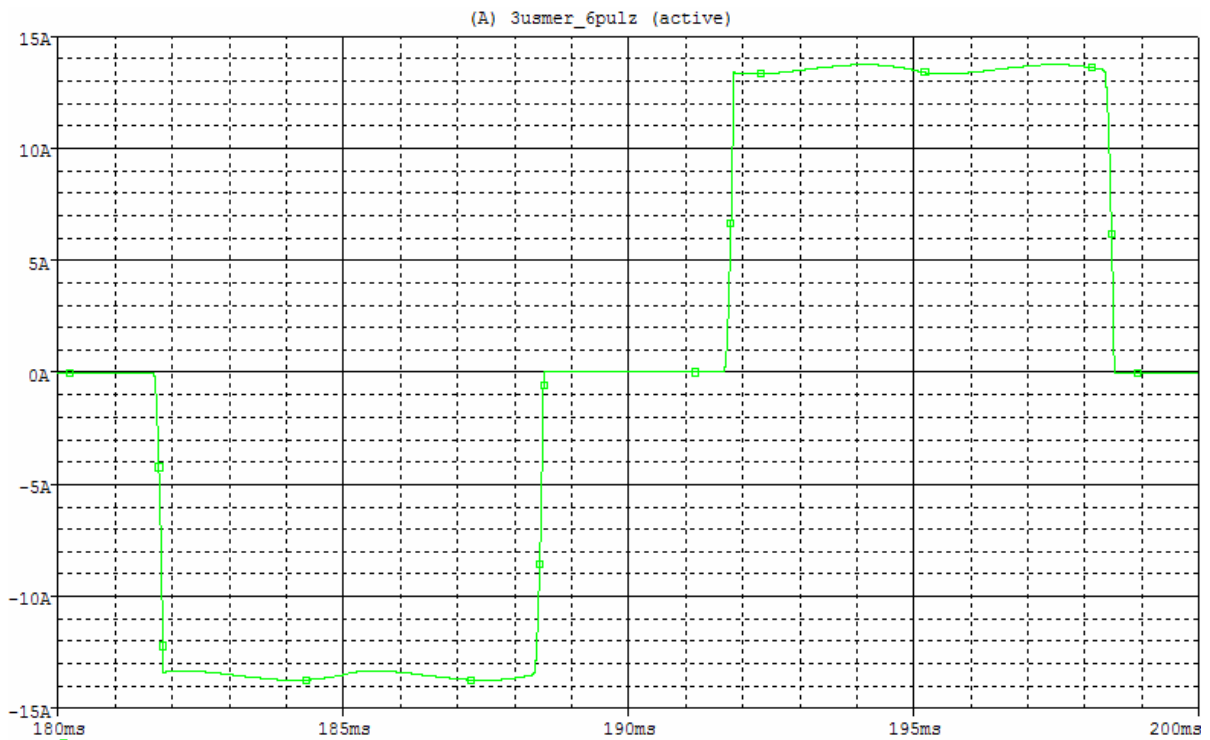
průběh primárního proudu dvou jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži 2Ω , $4mH$ ($4,33MW$)

PŘÍLOHA {3}

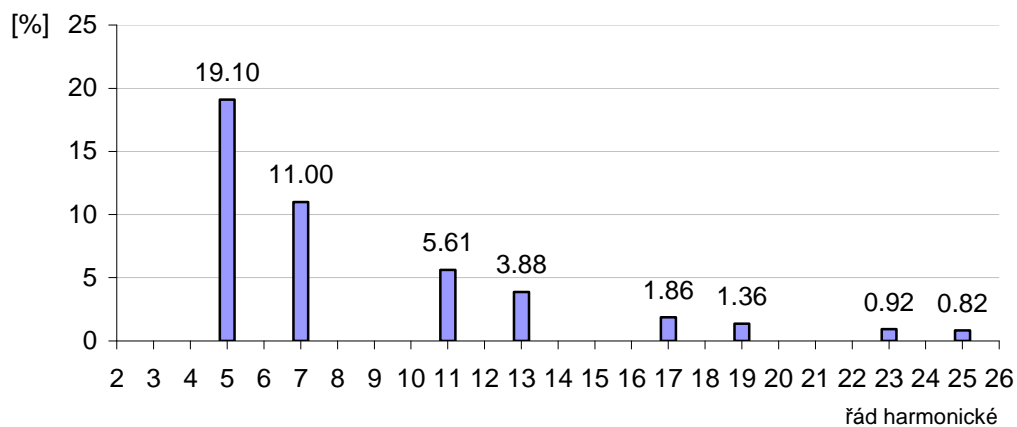
Průběhy primárního proudu pro různá zatížení usměrňovače při třech paralelně pracujících jednotkách



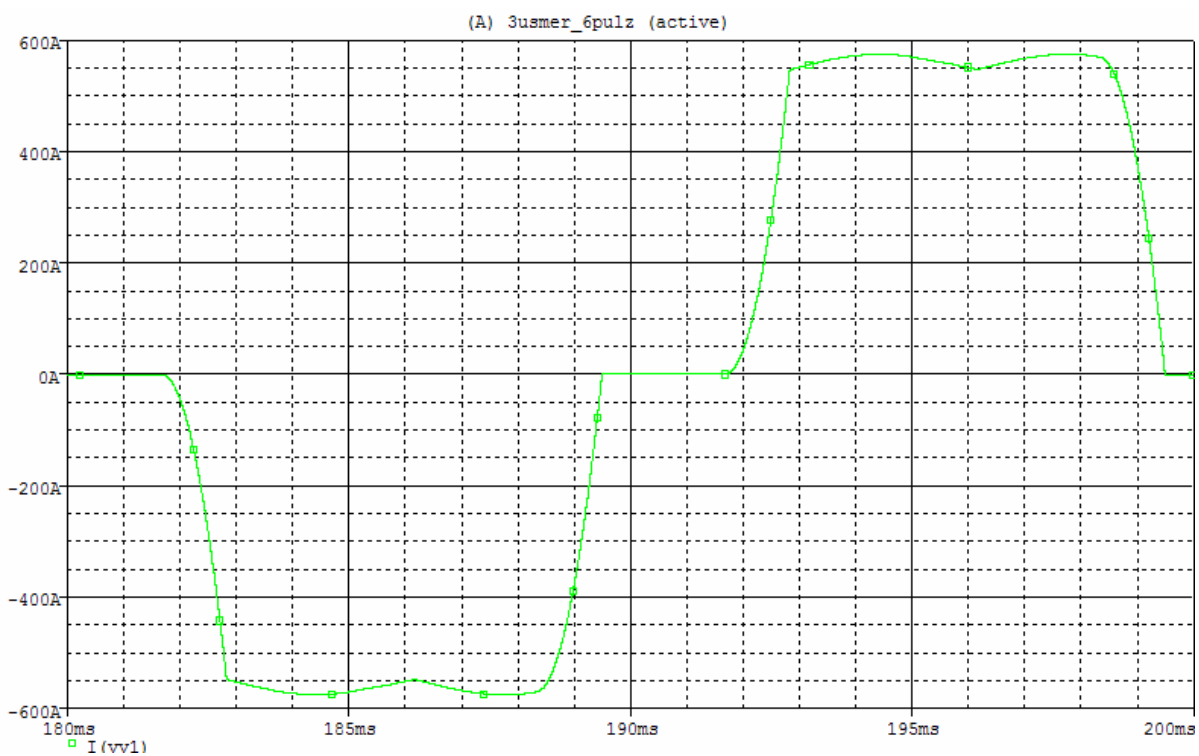
*obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu tří jednotek při zátěži 250 Ω , 500mH
(0,045MW)*



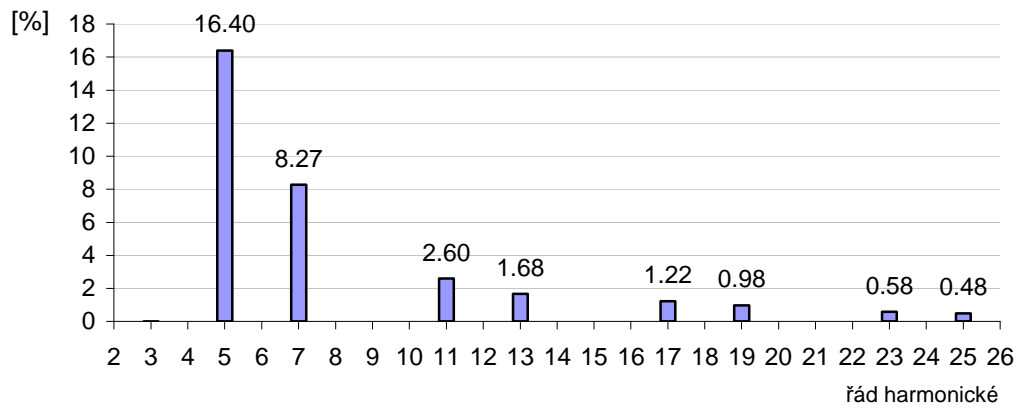
*průběh primárního proudu tří jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži 250 Ω , 500mH
(0,045MW)*



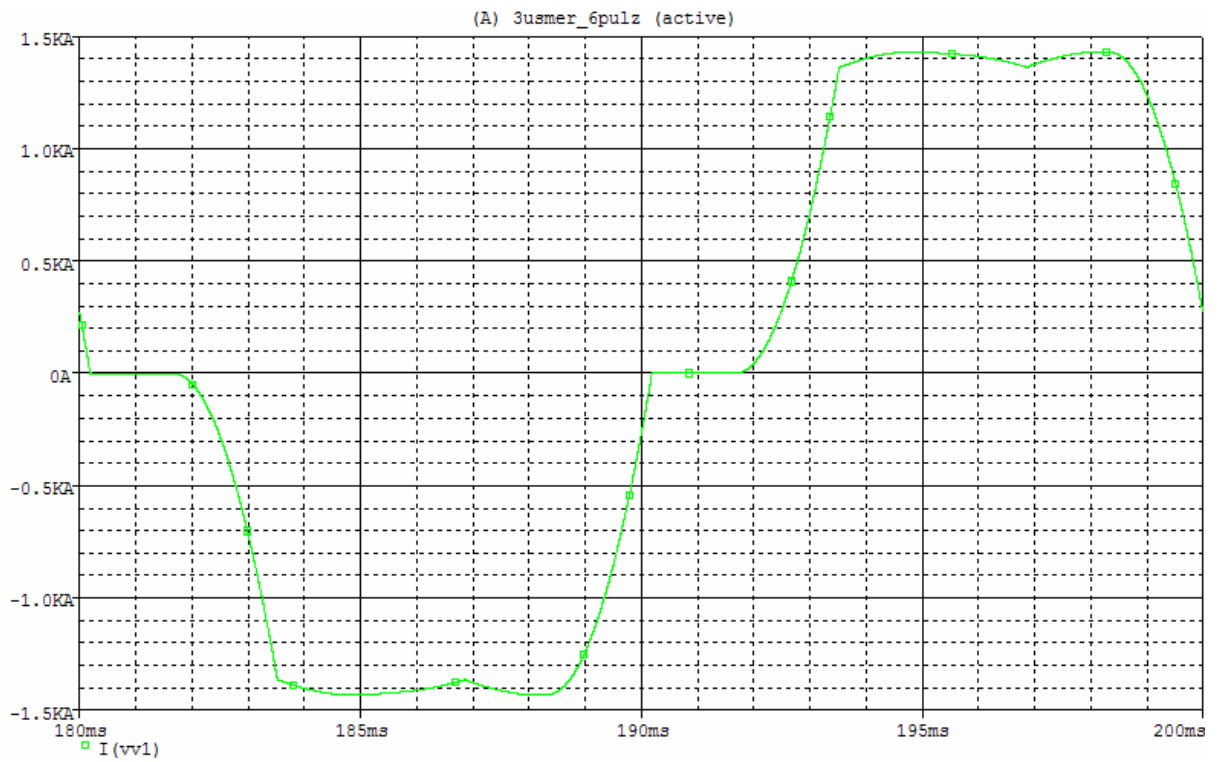
obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu tří jednotek při zátěži $5,8\Omega$, $11,6mH$ ($1,84MW$)



průběh primárního proudu tří jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži $5,8\Omega$, $11,6mH$ ($1,84MW$)



obsah jednotlivých harmonických v primárním proudu tří jednotek při zátěži 2,2Ω, 4,4mH (4,38MW)

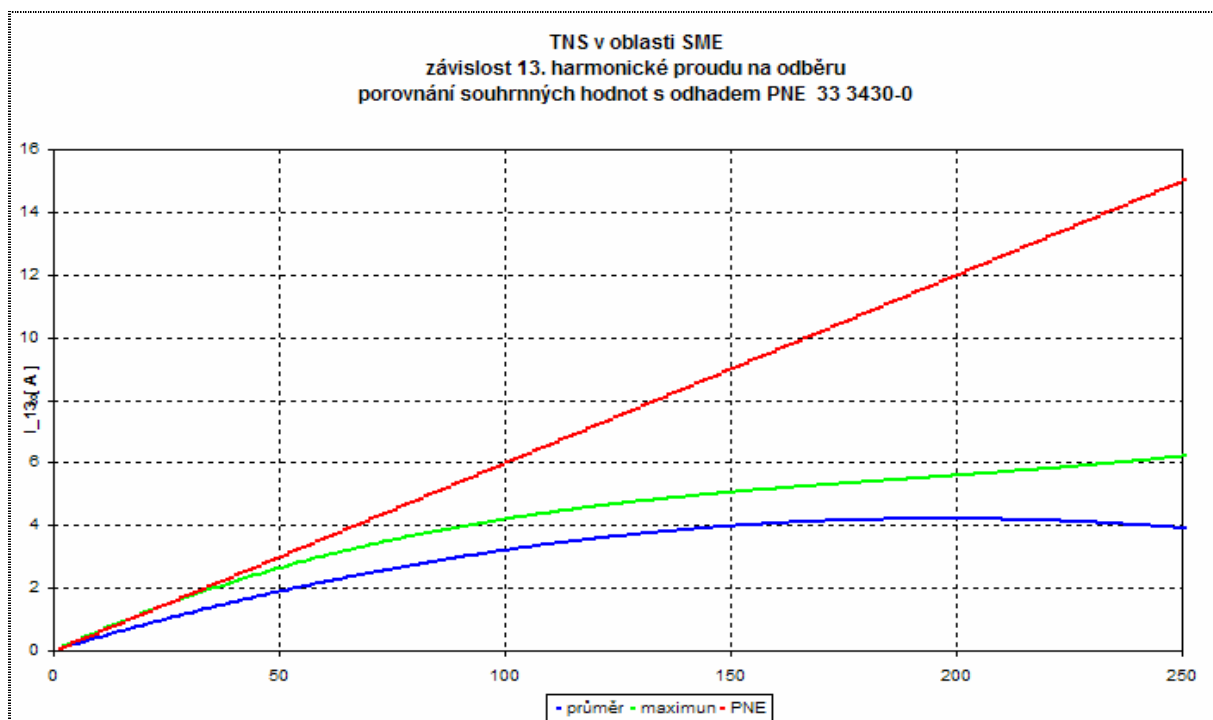


průběh primárního proudu tří jednotek šestipulzního usměrňovače při zátěži 2,2Ω, 4,4mH (4,38MW)

PŘÍLOHA {4}

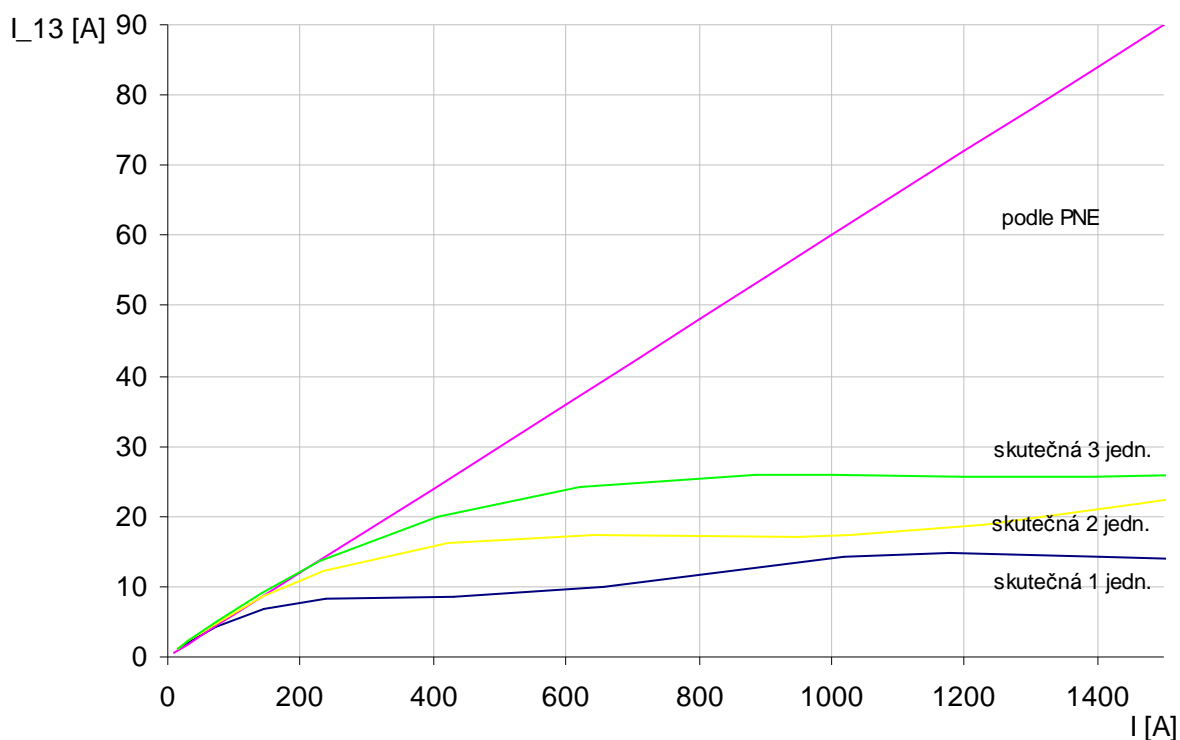
Porovnání průběhů naměřených a simulací získaných hodnot 13., 23., a 25. harmonické

Porovnání naměřených a simulací získaných hodnot 11.harmonické je uvedeno v kapitole 5.2.

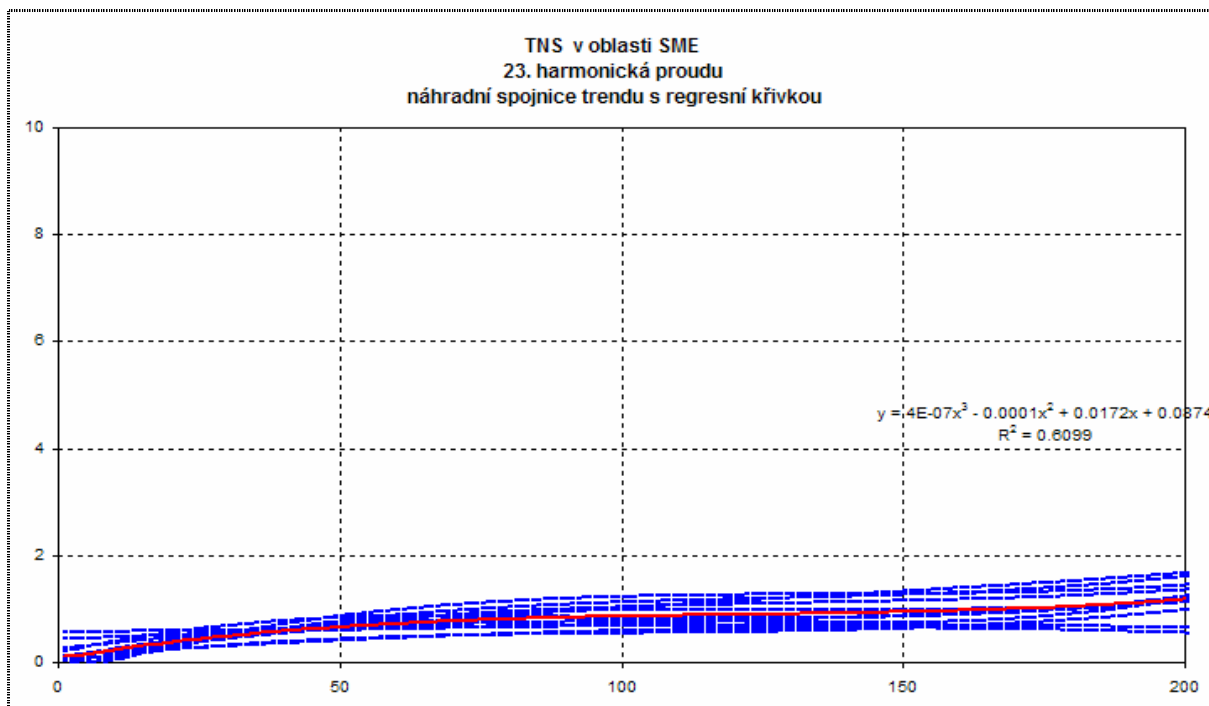


závislost průběhů 13.harmonické na odebíraném proudu (převzato ze zprávy TÚDC)

13.harmonická

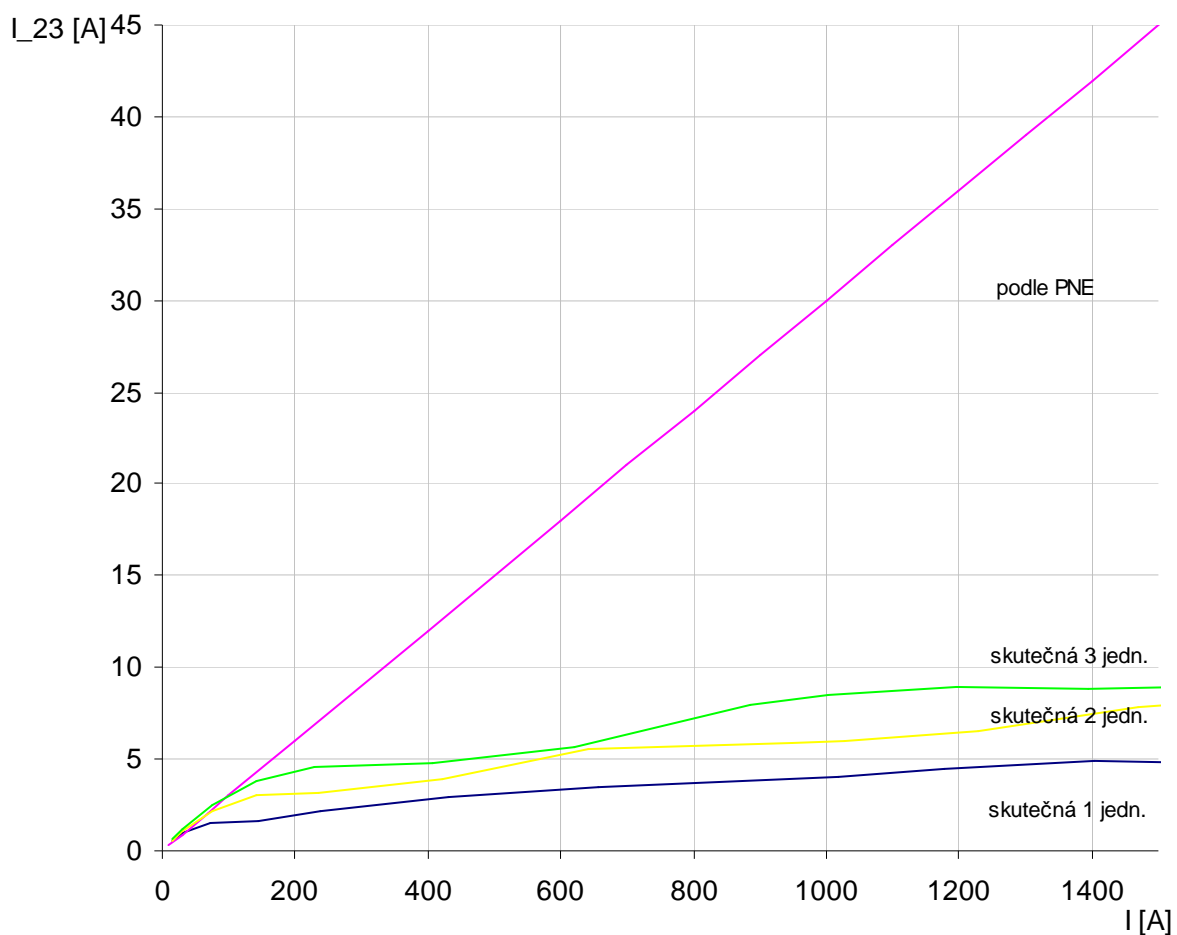


závislost obsahu 13.harmonické prim.proudu na odběru

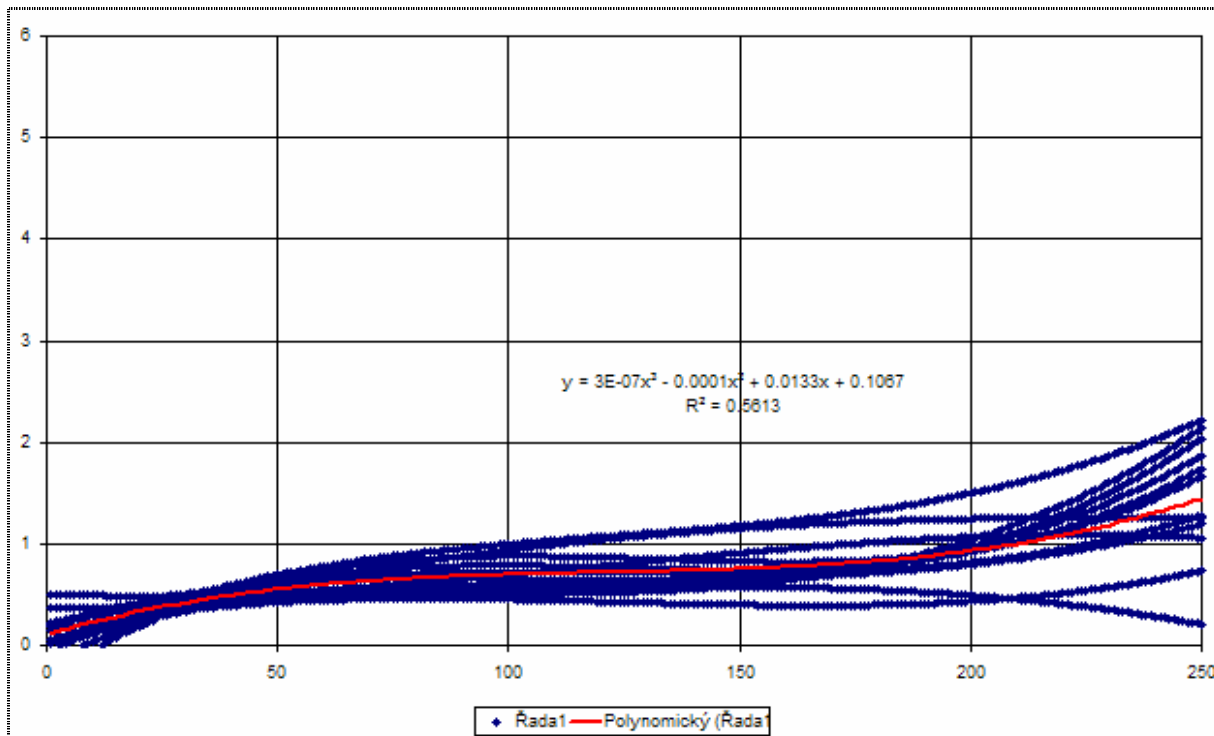


závislost průběhů 23.harmonické na odebíraném proudu (převzato ze zprávy TÚDC)

23.harmonická

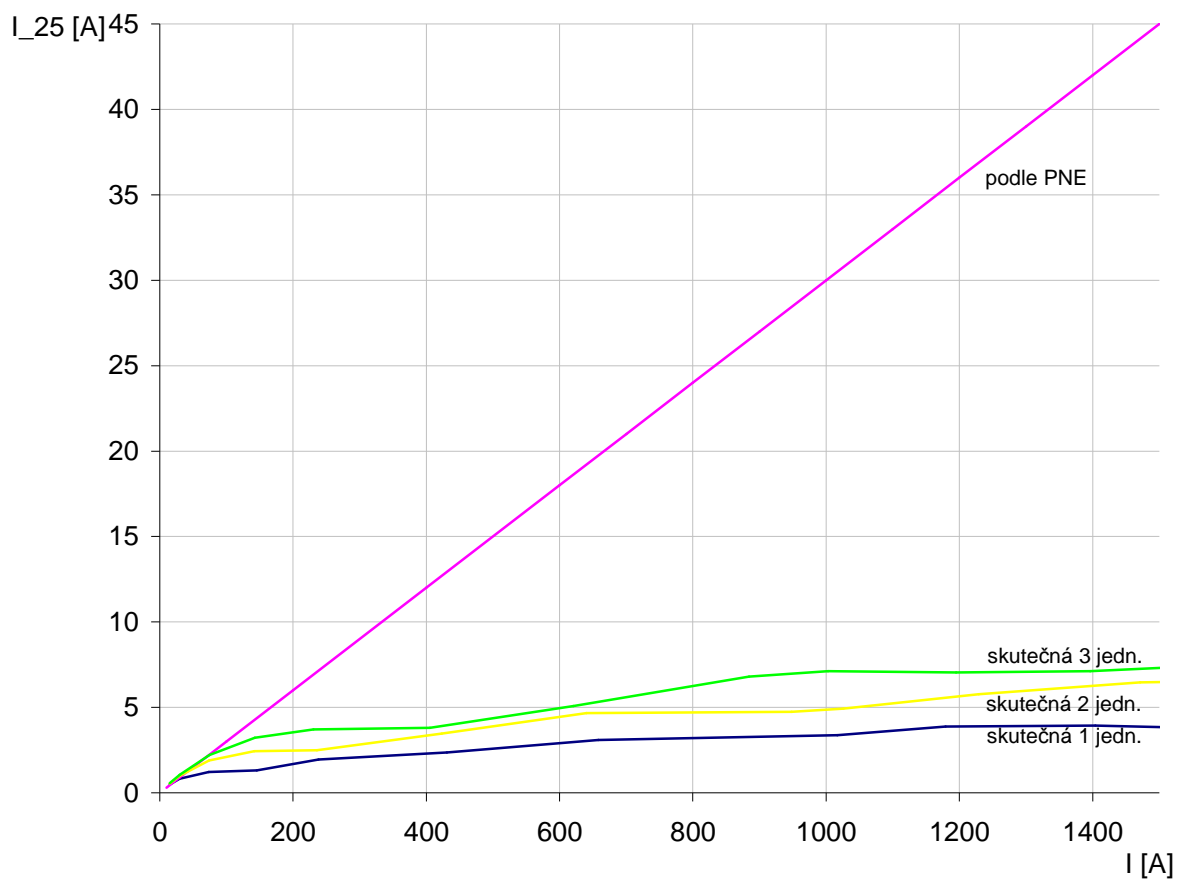


závislost obsahu 23.harmonické prim.proudu na odběru



závislost průběhů 25.harmonické na odebíraném proudu (převzato ze zprávy TÚDC)

25.harmonická



závislost obsahu 23.harmonické prim.proudu na odběru