

Ladislav Mlynařík¹

Model dvanáctipulzního usměrňovače

Klíčová slova: *primární proud trakčního usměrňovače, vyšší harmonická, usměrňovač, dvanáctipulzní zapojení usměrňovače, model transformátoru*

1 Úvod

V současné době jsou na Katedře elektrotechniky elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě DFJP Univerzity Pardubice vyučovány předměty „Napájení elektrických drah“ a „Elektromagnetická kompatibilita v dopravě“ pouze v teoretické rovině. V těchto předmětech se mimo jiné velmi často mluví o dvanáctipulzním usměrňovači, který je používán ve všech stejnosměrných napájecích stanicích české železnice. Pro možnost rozšíření uvedených předmětů o praktickou výuku byl požádán Fond rozvoje vysokých škol o prostředky na vybudování měřícího pracoviště pro studenty. Pracoviště umožňující laboratorní měření studentů na dvanáctipulzním usměrňovači bude vybudováno v tomto roce na základě grantu G1 č.864/2010.

Cílem bude vytvořit model usměrňovače napájecí stanice, na kterém bude možné měřit obsah vyšších harmonických emitovaných do trakčního vedení, simulovat chování usměrňovače při poruchových stavech polovodičových prvků, ukazovat vliv úhlu překrytí na průběh zatěžovací charakteristiky usměrňovače a na komutaci diod.

Tento příspěvek ukazuje budovaný dvanáctipulzní usměrňovač pomocí počítačové simulace programem Pspice.

2 Popis dvanáctipulzního usměrňovače

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

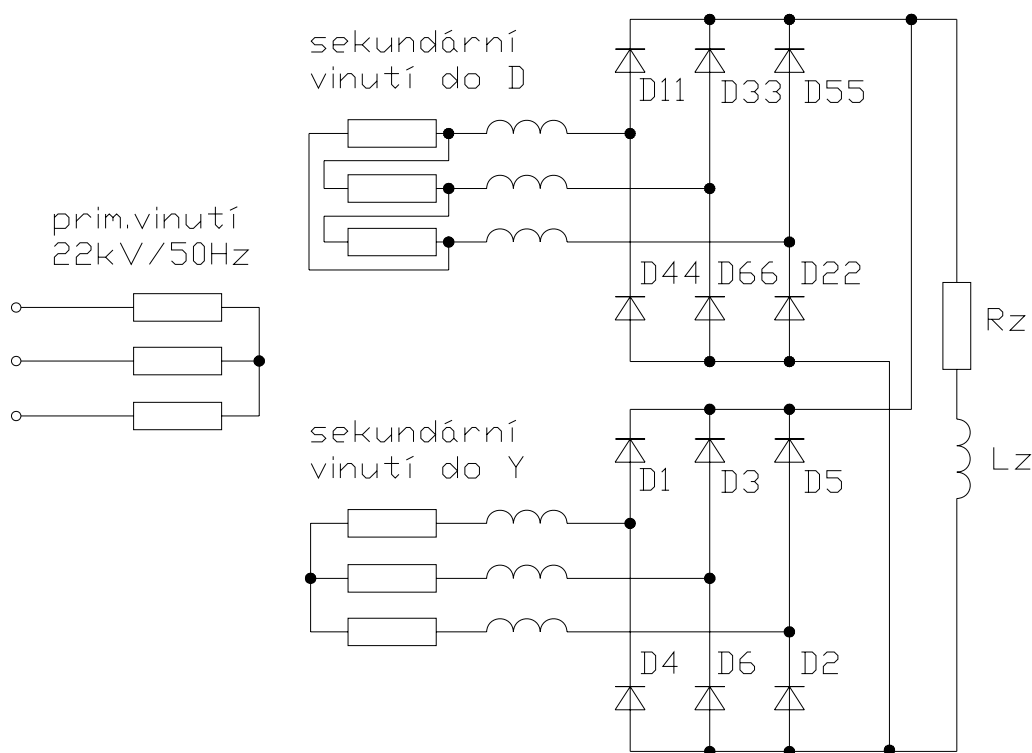
Dvanáctipulzní usměrňování je výhodné pro menší zvlnění výstupního napětí oproti usměrňování šestipulznímu a také kvůli lepšímu využití sekundárního vinutí transformátoru, kde oběma sekcemi sekundárního vinutí protéká proud dvakrát za periodu napájecího napětí. Velkou výhodou dvanáctipulzního zapojení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

¹ Ing. Ladislav MLYNAŘÍK, 1984, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice 2008. Asistent na Katedře elektrotechniky elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě DFJP.

na těchto frekvencích a nejnižší harmonická frekvence na primární straně transformátoru je 550Hz, jak popisuje kapitola 3.

Dvanáctipulzní usměrňovač (obr. 2.1) je tvořen dvěma paralelně pracujícími trojfázovými můstky, z nichž jeden je napájen sekundárním vinutím transformátoru zapojeným do hvězdy a druhý vinutím zapojeným do trojúhelníku. Oba můstky byly v počátcích elektrizace odděleny ještě tzv. nulovou tlumivkou, která zajišťovala oddělení obou částí usměrňovače v době komutace.

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. 2.1: zapojení dvanáctipulzního usměrňovače

2.1 Náhradní schéma pro simulaci v PSpice

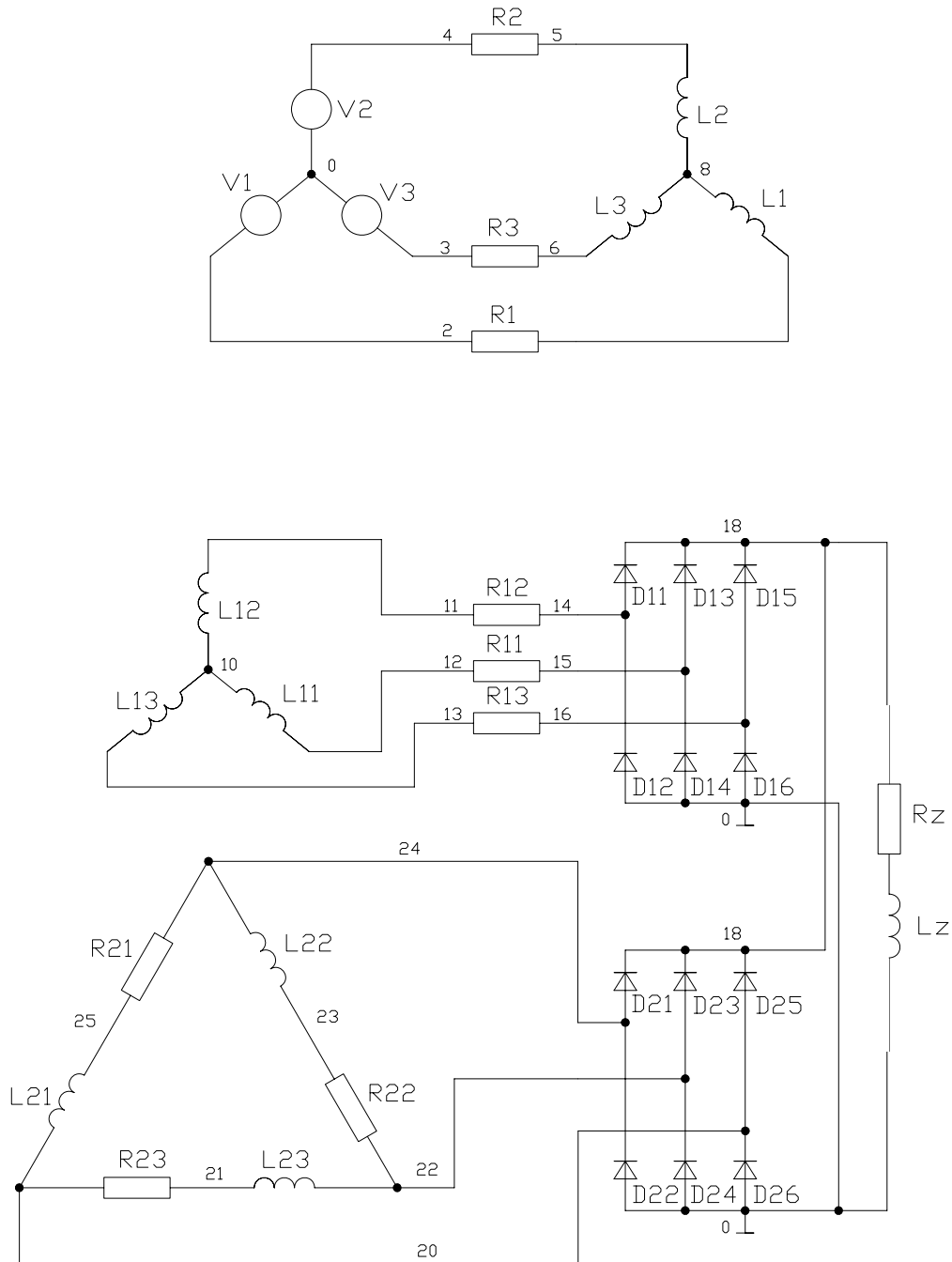
Pro simulace programem PSpice je nutné schéma dvanáctipulzního usměrňovače upravit. Jedná se zejména o doplnění schématu o odpory R1 – R23 které jsou voleny v řádech miliohmů a jsou nezbytné pro běh simulace.

Primární vinutí transformátoru jsou zapojena do hvězdy a napájena zdroji V1-V3, které jsou vzájemně posunuty o 120°el. Jejich amplituda je 325 V, což odpovídá zamýšlenému napájení modelu z trojfázové sítě.

V sekundární části je počet závitů v trojúhelníku a ve hvězdě volen v poměru $\sqrt{3}$, aby bylo dosaženo stejných výstupních napětí.

Usměrňovací můstky jsou sestaveny z výkonových diod běžně dostupných v knihovně programu PSpice.

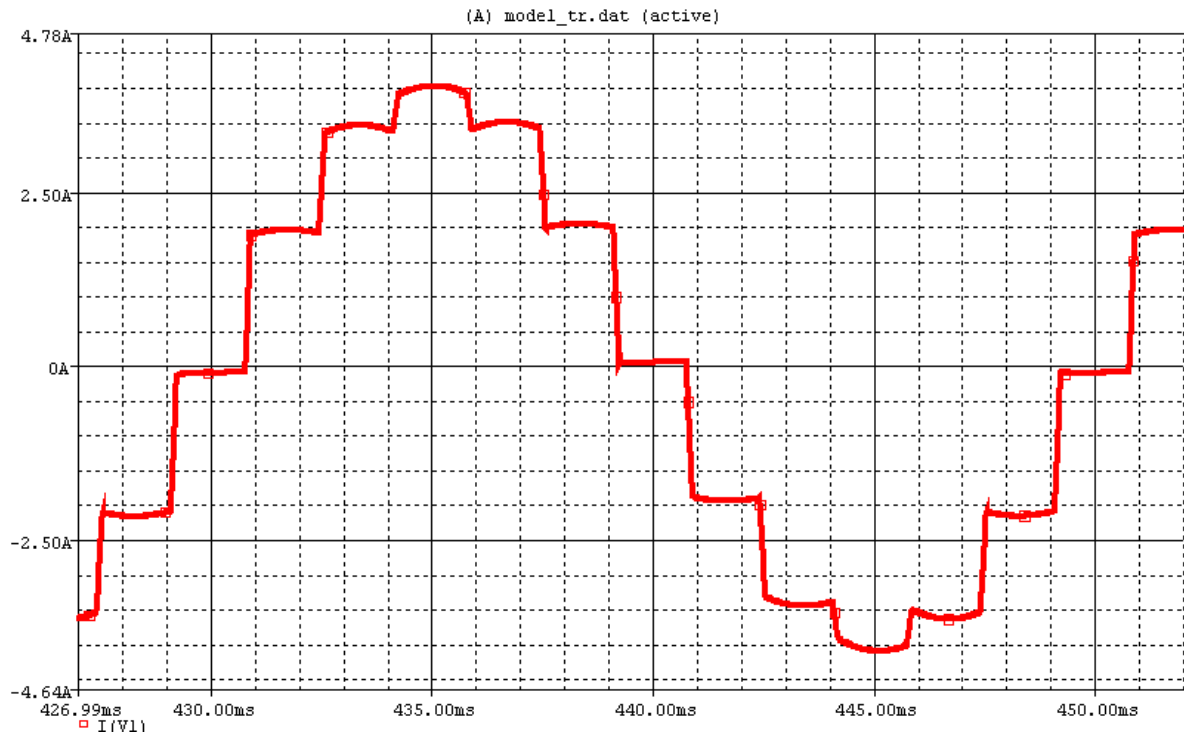
Popsané náhradní schéma je uvedeno na následujícím obrázku 2.2.



Obr. 2.2: náhradní schéma dvanáctipulzní jednotky zadané do programu PSpice

3 Primární proud dvanáctipulzního usměrňovače

Jak bylo uvedeno výše, velká výhoda dvanáctipulzního zapojení usměrňovače je ve značném přiblížení tvaru primárního proudu k sinusovce, což dobře dokumentuje obrázek 3.1. Díky eliminaci 5., 7., 17. a 19. harmonické v primárním proudu vzájemným působením sekundárních vinutí do Y a D zůstávají ve spektru primárního proudu zastoupeny pouze harmonické řádů 11., 13., 23. a 25.



Obr. 3.1: jedna perioda primárního proudu dvanáctipulzního usměrňovače

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

Obě části dvanáctipulzního usměrňovače se na primární straně 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 šestipulzního usměrňovače (pouze část schématu z obrázku 2.2) programem PSpice 10 demo. Součástí simulace bylo také provedení Fourierovy analýzy proudu označeného jako I(V1), a to až do 25. harmonické.

Podobná simulace byla provedena také pouze se sekundárním vinutím zapojeným do trojúhelníka.

Okamžité hodnoty celkového primárního proudu dvanáctipulzního usměrňovače I_{celk} jsou dány součtem I_Y a I_D . $I_{\text{celk}} = I_Y + I_D$.

Všechny simulace byly prováděny na schématu z obrázku 2.2 při zátěži 50Ω, což odpovídá velikosti usměrněného proudu 5,7A.

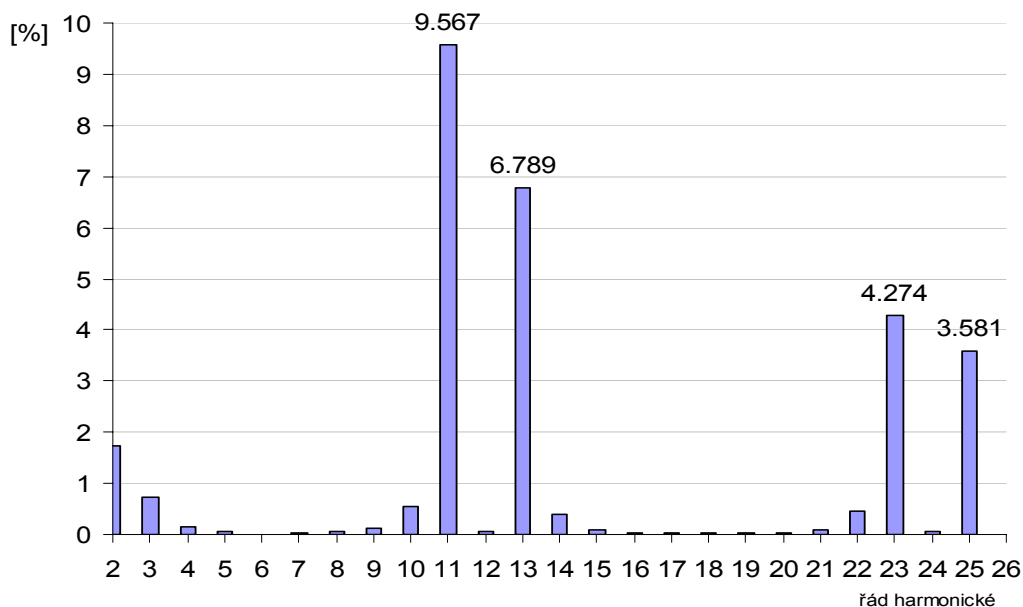
V tabulce 3.1 jsou přehledně uvedeny amplitudy a fáze jednotlivých harmonických získaných výše popsanými simulacemi. Dále je uveden výsledek výpočtu obsahu těchto harmonických v celkovém primárním proudu dvanáctipulzního usměrňovače podle vztahu $I_{\text{celk}} = I_Y + I_D = [I_{L1Y} (\cos I_{L1Y} + j \sin I_{L1Y})] + [I_{L1D} (\cos I_{L1D} + j \sin I_{L1D})]$.

Tab. 3.1: složky spektra primárních proudů Y a D sekce dvanáctipulzního usměrňovače

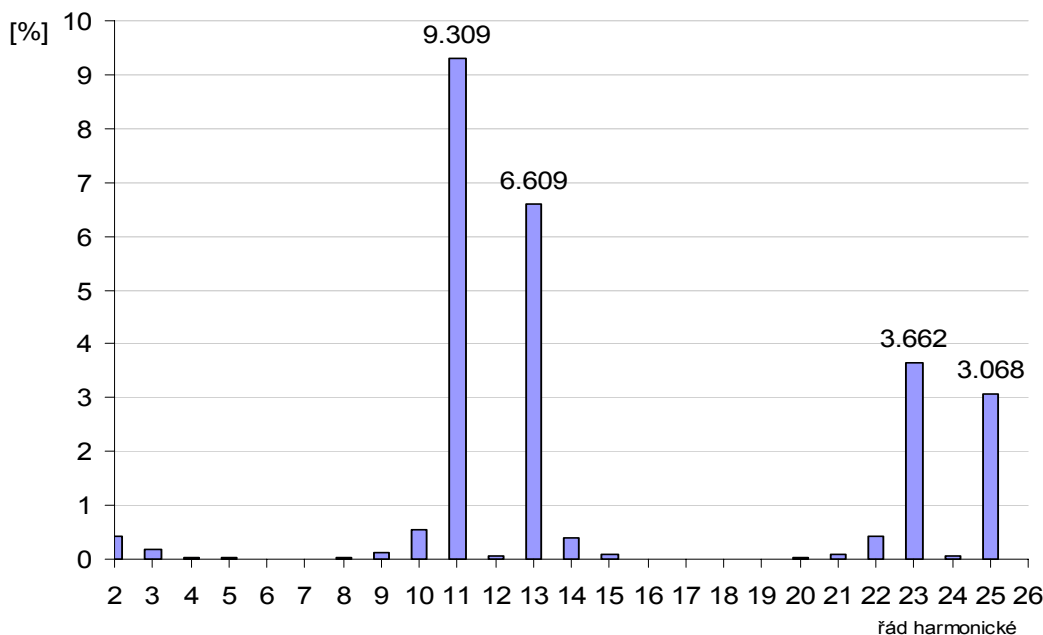
harmonická č.	I_{L1Y}		I_{L1D}		výsledek
	velikost	úhel	velikost	úhel	
1	3.69E+00	1.80E+02	3.71E+00	1.79E+02	-7.3922 + 0.0969 j ≠ 0
2	2.38E-03	-4.61E+01	1.79E-02	1.68E+01	0.0188 + 0.0035 j ⇒ 0
3	2.20E-03	-8.60E+01	6.55E-03	-7.28E+01	0.0021 - 0.0085 j ⇒ 0
4	1.59E-02	-1.77E+02	1.34E-02	-3.39E+00	-0.0025 - 0.0015 j ⇒ 0
5	8.29E-01	3.14E-01	8.30E-01	-1.80E+02	-0.0001 + 0.0002 j ⇒ 0
6	6.68E-04	-3.71E+01	1.38E-03	9.33E+01	0.0005 + 0.0010 j ⇒ 0
7	4.14E-01	3.50E-01	4.13E-01	-1.80E+02	0.0010 - 0.0011 j ⇒ 0
8	7.30E-03	-2.04E+00	6.98E-03	1.80E+02	0.0003 - 0.0002 j ⇒ 0
9	1.30E-03	4.73E+01	3.13E-03	1.04E+02	0.0001 + 0.0040 j ⇒ 0
10	1.20E-02	2.34E+00	1.18E-02	6.76E+00	0.0237 + 0.0019 j ⇒ 0
11	3.26E-01	-1.79E+02	3.27E-01	-1.79E+02	-0.6529 - 0.0085 j ≠ 0
12	5.62E-04	1.09E+02	1.35E-03	1.00E+02	-0.0004 + 0.0019 j ⇒ 0
13	2.34E-01	-1.79E+02	2.33E-01	-1.79E+02	-0.4664 - 0.0069 j ≠ 0
14	8.29E-03	1.79E+02	8.75E-03	-1.79E+02	-0.0170 + 0.0000 j ⇒ 0
15	9.73E-04	-1.49E+02	3.49E-03	1.04E+02	-0.0017 + 0.0029 j ⇒ 0
16	1.10E-02	-1.77E+02	1.12E-02	5.68E+00	0.0002 + 0.0006 j ⇒ 0
17	1.99E-01	9.68E-01	1.99E-01	-1.79E+02	-0.0006 - 0.0015 j ⇒ 0
18	5.16E-04	-8.31E+01	1.42E-03	9.98E+01	-0.0002 + 0.0009 j ⇒ 0
19	1.60E-01	9.92E-01	1.59E-01	-1.79E+02	0.0006 - 0.0014 j ⇒ 0
20	8.53E-03	-4.09E-01	8.96E-03	-1.80E+02	-0.0004 - 0.0001 j ⇒ 0
21	8.62E-04	1.87E+01	3.45E-03	1.04E+02	0.0000 + 0.0036 j ⇒ 0
22	1.02E-02	3.17E+00	1.04E-02	6.06E+00	0.0206 + 0.0017 j ⇒ 0
23	1.39E-01	-1.79E+02	1.40E-01	-1.78E+02	-0.2793 - 0.0076 j ≠ 0
24	5.00E-04	8.71E+01	1.39E-03	1.00E+02	-0.0002 + 0.0019 j ⇒ 0
25	1.19E-01	-1.79E+02	1.18E-01	-1.78E+02	-0.2366 - 0.0066 j ≠ 0

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

To se potvrdilo i po odsimulování dvanáctipulzního schématu podle obrázku 2.2 jako celku. Procentní zastoupení vyšších harmonických v primárním proudu je vidět na následujících dvou grafech.



Obr. 3.2: obsah vyšších harmonických v primárním proudu při proudu zátěží 3,9A (80Ω)



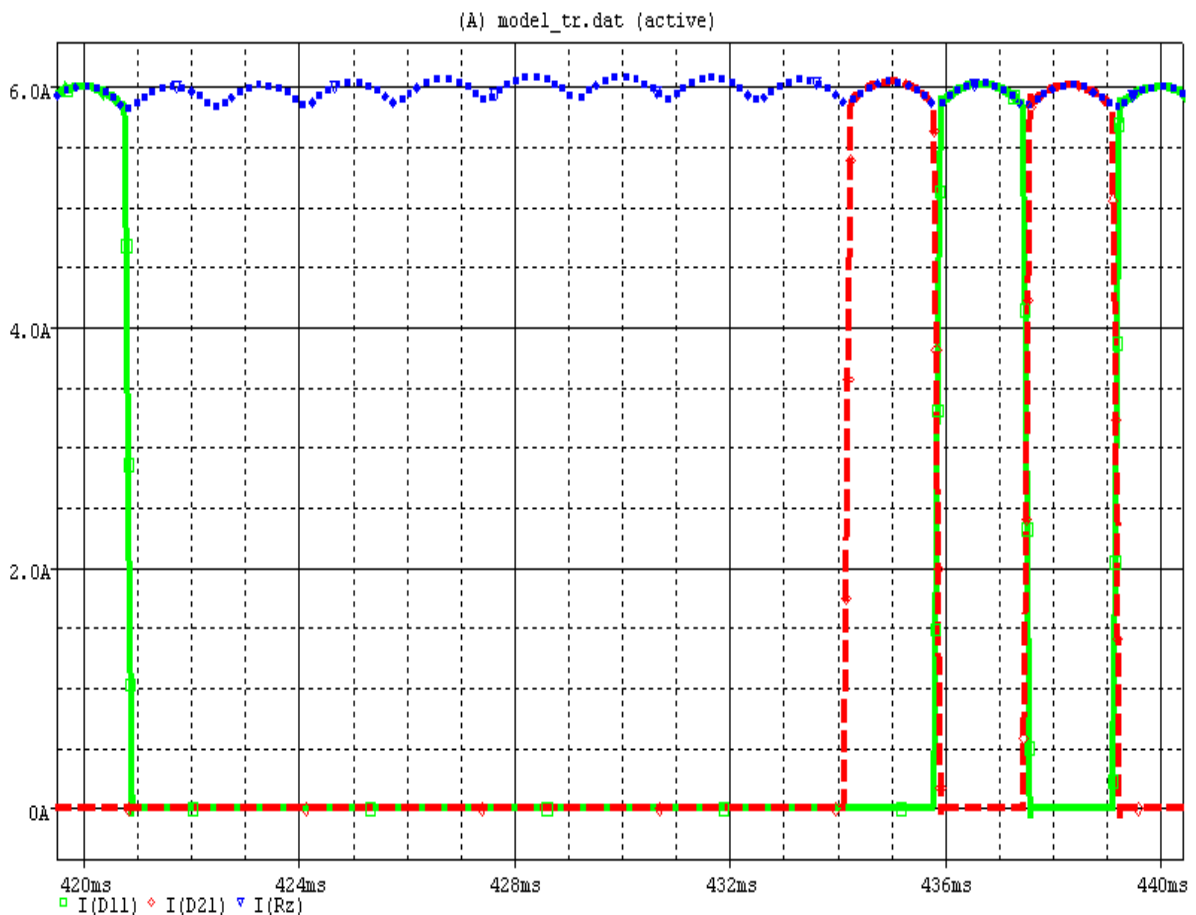
Obr. 3.3: obsah vyšších harmonických v primárním proudu při proudu zátěží 13A (20Ω)

Na obrázcích 3.2. a 3.3 je mimo jiné dobře vidět, jak poměrný obsah vyšších harmonických s rostoucí zátěží klesá. To je způsobeno tzv. úhlem překrytí. Úhel překrytí je přímo úměrný součinu rozptylové reaktance transformátoru usměrňovače a usměrněného proudu. V případě, že by došlo k zanedbání rozptylové reaktance transformátoru, byl by 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.

4 Průběhy proudů jednotlivými diodami

Oba šestipulzní usměrňovací můstky budou konstrukčně provedeny tak, aby bylo možné pomocí klešťových sond měřit proudy jednotlivými diodami. Příklad proudů diodami D11 a D21 uvádí obrázek 4.1.



Obr. 4.1: proud diodami D11 a D21 při proudu zátěží 5,9A

5 Závěr

Na modelu usměrňovačové jednotky budou v rámci laboratorních cvičení probírány všechny výše uvedené skutečnosti. Především bude ukázán tvar primárního proudu a pomocí FFT analýzy také spektrum tohoto proudu. Dalšími důležitými zobrazovanými veličinami budou proudy jednotlivými diodami.

Pomocí tlumivek připojených na vstupy usměrňovače bude uměle měněna rozptylová indukčnost transformátoru. Tyto tlumivky budou mít pro možnost nastavení několik odboček. Pomocí změny rozptylové indukčnosti bude možné ukázat její vliv na tzv. úhel překrytí diodových proudů a spektrum výstupního napětí usměrňovače.

Celé uvedené měřicí pracoviště bude sestaveno do konce roku 2010.

Literatura

- [1] HLAVA K. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. Univerzita Pardubice, 2004. 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
- [2] ČEŘOVSKÝ Z., GRIC R., PAVELKA J. *Výkonová elektronika I*. ČVUT, 1996. 196 stran. ISBN 80-01-00723-5.
- [3] MLYNAŘÍK L. EMC trakční měnirny vůči napájecí síti při paralelním provozu trakčních usměrňovačů. *Diplomová práce*. Univerzita Pardubice 2008.
- [4] ČERNÝ O., DOLEČEK R. Úvod do programu PSPICE. Univerzita Pardubice, 2008. 100 stran. ISBN 978-80-7395-115-3.
- [5] HELLER B. Návrh transformátorů pro usměrňovače. *Elektrotechnický obzor*. č.1/1954. strana 3.-10.

Pardubice, březen 2010

Lektoroval: Doc. Ing. Karel Hlava, CSc.

UP, DFJP