

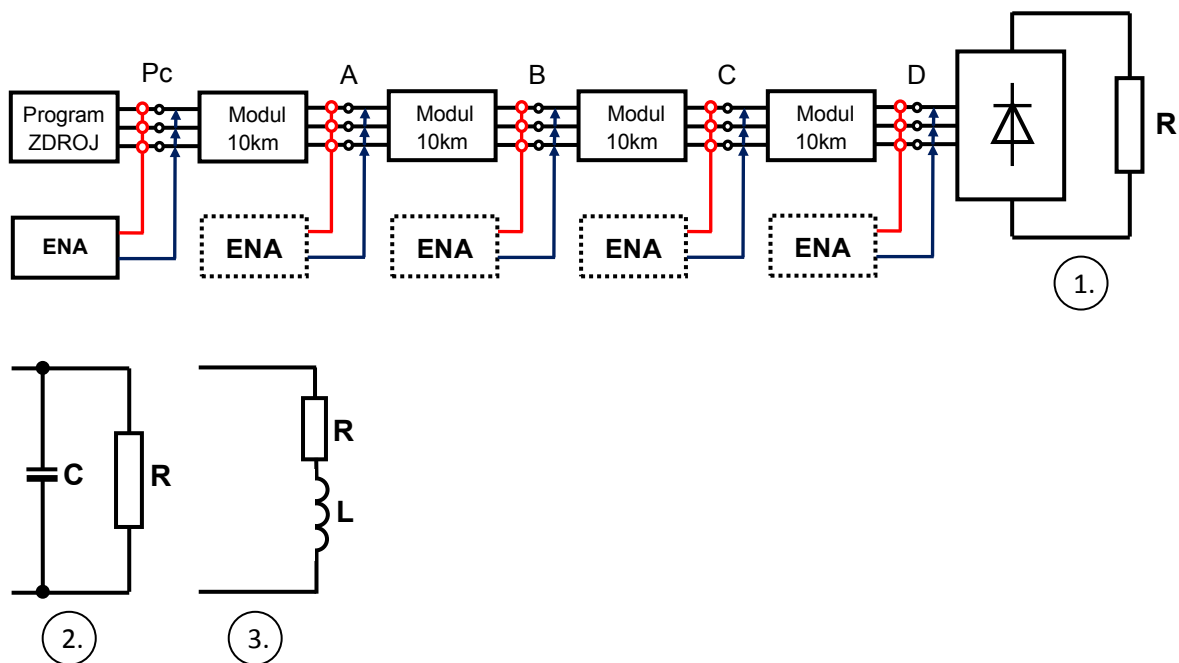
1. ZADANIE

Na modeli siete distribučného vedenia merajte a následne analyzujte šírenie okamžitých hodnôt harmonických zložiek vyšších rádov pre všetky merané uzly siete (Pcc, A, B, C, D). Toto meranie opakujte pre rôzne typy zaťaženia usmerňovača:

1. R – odporová záťaž,
2. RC – odporová záťaž s vyhladzovacím kondenzátorom,
3. RL – odporová záťaž s tlmiacou indukčnosťou.

Počas merania sledujte tvar odoberaného prúdu usmerňovačom, ktorý má priamy dopad na kvalitu napätia v danej sieti. Porovnajte parametre THD_U a THD_I vo všetkých uzloch sústavy a pre všetky typy zaťaženia. Taktiež porovnajte tvary odoberaného prúdu usmerňovačom pomocou osciloskopického záznamu, ako aj prúdové spektrum z rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) v mieste spotreby (usmerňovača). Parameter THD_U ako aj hodnoty napät'ových harmonických zložiek vyšších rádov (do 25. harmonickej) porovnajte aj s medznými hodnotami stanovenými v platnej norme. V závere zhodnoťte získané výsledky šírenia harmonických zložiek prúdu a napätia na modeli vedenia 22 kV a tiež vplyv typu záťaže na jednosmernej strane usmerňovača na tvar odoberaného prúdu na strane napájania (striedavej strane) usmerňovača. Na základe teoretických poznatkov a získaných výsledkov určte, aký typ usmerňovača (koľko impulzový) bol pri meraní použitý.

2. SCHÉMA ZAPOJENIA

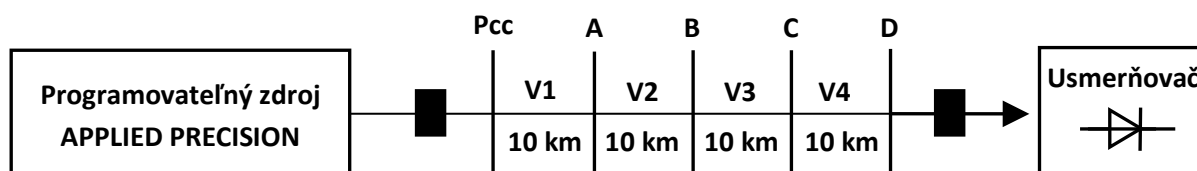


Obr. 2.1 Schéma zapojenia pre meranie

3. VŠEOBECNÝ POPIS PROBLEMATIKY

Harmonické zložky prúdu sa šíria od zdroja harmonických (napr. usmerňovača) vodivými cestami v súlade s ohmovým zákonom, čiže cestou najmenšieho odporu. Prúdové harmonické následne na impedanciách prenosovej cesty spôsobujú napät'ové harmonické, ktorých maximálna dovolená hodnota je daná normou, a preto je potrebné sledovať ich veľkosť. Na sledovanie šírenia harmonických v konkrétnej sieti slúži laboratórne zariadenie, ktorého všeobecná schéma je na obr. 2. Pozostáva z 3-fázového programovateľného napät'ového zdroja, 3-fázového modelu 22 kV vedenia, ktorého dĺžka sa dá meniť, nakoľko sa skladá z viacerých modulov s dĺžkou 10 km a záťaže, ktorú predstavuje diódový usmerňovač s možnosťou zmeny jeho záťaže.

Na sledovanie šírenia napät'ových a prúdových harmonických zložiek je potrebné použiť viaceré sieťové analyzátory kvality elektrickej energie, napr. ENA 330.



Obr. 3.1 Schéma zapojenia modelu vedenia 22 kV

4. NAMERANÉ HODNOTY A PRIEBEHY

4.1 Porovnanie parametrov THD_U a THD_I

4.1.1 Odporová záťaž

Tab. 4.1.1 Tabuľka nameraných prúdových harmonických pre odporovú záťaž

Záťaž odporová - R					
	Pcc	A	B	C	D
U_{RMS} (V)	21570	21110	20800	20390	20010
THD_I (%)	23,94	23,89	24,25	23,84	23,43
THD_U (%)	0,5932	3,842	7,166	10,27	13,19
I_{RMS} (A)	55,52	55,37	55,12	54,9	55,19
I_{1h} (A)	55,52	55,38	55,13	54,9	55,2
I_{5h} (A)	11,64	11,63	11,75	11,63	11,59
I_{7h} (A)	4,563	4,551	4,79	4,697	4,629
I_{11h} (A)	2,844	2,821	2,969	2,834	2,697
I_{13h} (A)	1,537	1,525	1,823	1,705	1,573
I_{17h} (A)	1,111	1,089	0,9162	0,808	0,6901
I_{19h} (A)	0,5177	0,5057	0,7054	0,6032	0,4844

I_{23h} (A)	0,9363	0,902	1,127	0,8619	0,5728
I_{25h} (A)	0,6196	0,6016	1,106	0,7687	0,3874

4.1.2 Odporová zát'az s vyhladzovacím kondenzátorom

Tab. 4.1.2 Tabuľka nameraných prúdových harmonických pre odporovú zát'az s vyhladzovacím kondenzátorom

Zát'az odporová - RC					
	Pcc	A	B	C	D
U_{RMS} (V)	22620	21190	20700	20340	19930
THD_I (%)	28,27	28,16	26,9	27,38	26,96
THD_U (%)	0,6708	4,389	8,072	11,49	14,68
I_{RMS} (A)	56,78	56,8	55,25	56,39	56,7
I_{1h} (A)	56,75	56,76	55,19	56,29	56,64
I_{5h} (A)	14,7	14,7	13,78	14,43	14,39
I_{7h} (A)	4,116	4,109	3,501	3,983	3,925
I_{11h} (A)	2,625	2,608	2,347	2,412	2,298
I_{13h} (A)	2,202	2,181	1,696	1,955	1,804
I_{17h} (A)	0,8644	0,8437	0,9525	0,6931	0,5941
I_{19h} (A)	1,192	1,166	0,7359	0,8961	0,7179
I_{23h} (A)	1,384	1,319	0,7493	0,8698	0,5639
I_{25h} (A)	1,696	1,598	0,6354	0,9069	0,4511

4.1.3 Odporová zát'az s tlmiacou indukčnosťou

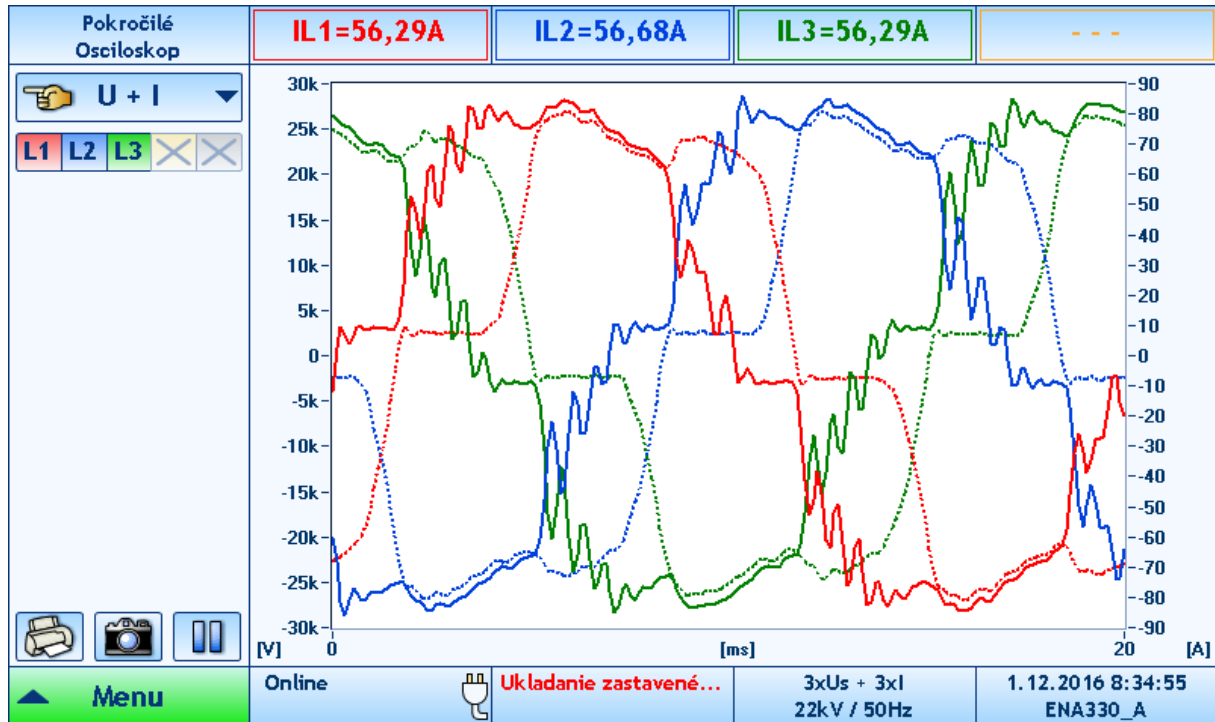
Tab. 4.1.3 Tabuľka nameraných prúdových harmonických pre odporovú zát'az s tlmiacou indukčnosťou

Zát'az odporová - RL					
	Pcc	A	B	C	D
U_{RMS} (V)	21640	21230	20830	20430	20050
THD_I (%)	23,87	23,76	23,46	23,03	22,59
THD_U (%)	0,577	3,741	7,158	10,30	13,22
I_{RMS} (A)	54,47	54,22	54,17	53,94	54,24
I_{1h} (A)	54,46	54,32	54,15	53,93	54,22
I_{5h} (A)	10,63	10,59	10,53	10,43	10,39
I_{7h} (A)	5,773	5,755	5,686	5,578	5,497
I_{11h} (A)	2,946	2,917	2,839	2,712	2,577
I_{13h} (A)	2,269	2,24	2,149	2,011	1,861

I_{17h} (A)	0,9941	0,9709	0,908	0,8023	0,6873
I_{19h} (A)	0,8909	0,8669	0,7852	0,6635	0,5311
I_{23h} (A)	1,231	1,167	1,011	0,774	0,5071
I_{25h} (A)	1,649	1,55	1,273	0,8804	0,4446

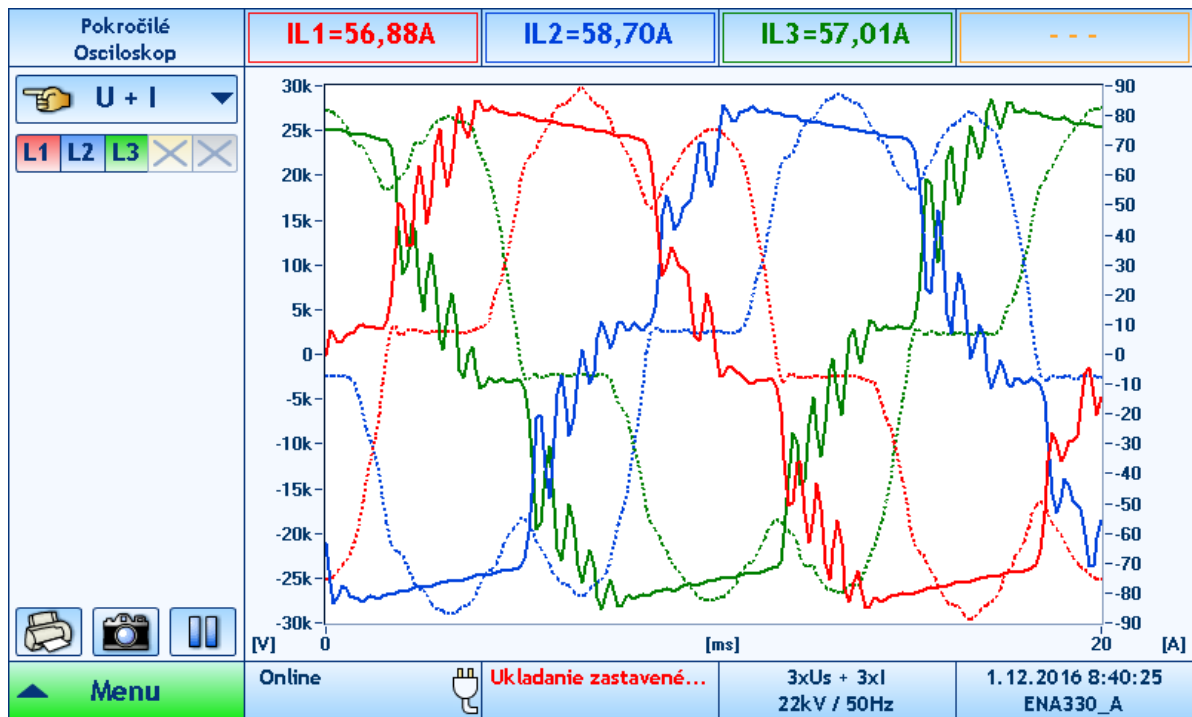
4.2 Tvary odoberaných prúdov a napätí v mieste spotreby

4.2.1 Odporová záťaž



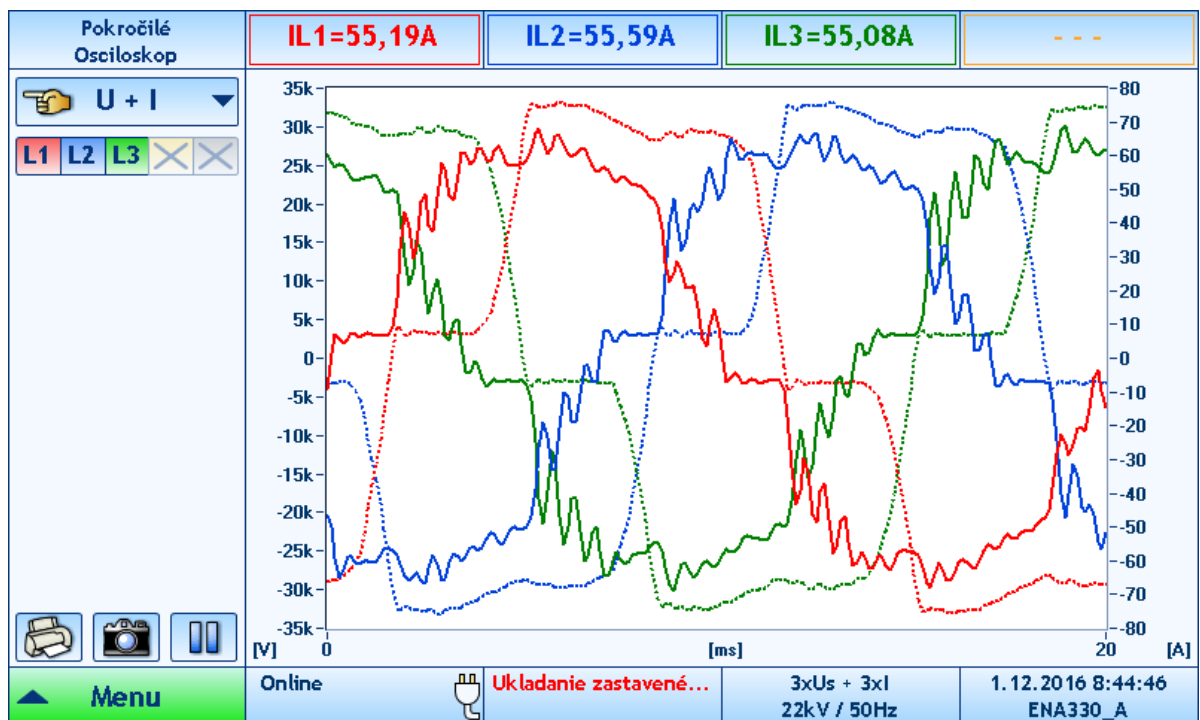
Obr. 4.2.1 Tvar odoberaného prúdu a napätia v mieste spotreby

4.2.2 Odporová zát'az s vyhladzovacím kondenzátorom



Obr. 4.2.2 Tvar odoberaného prúdu a napätia v mieste spotreby

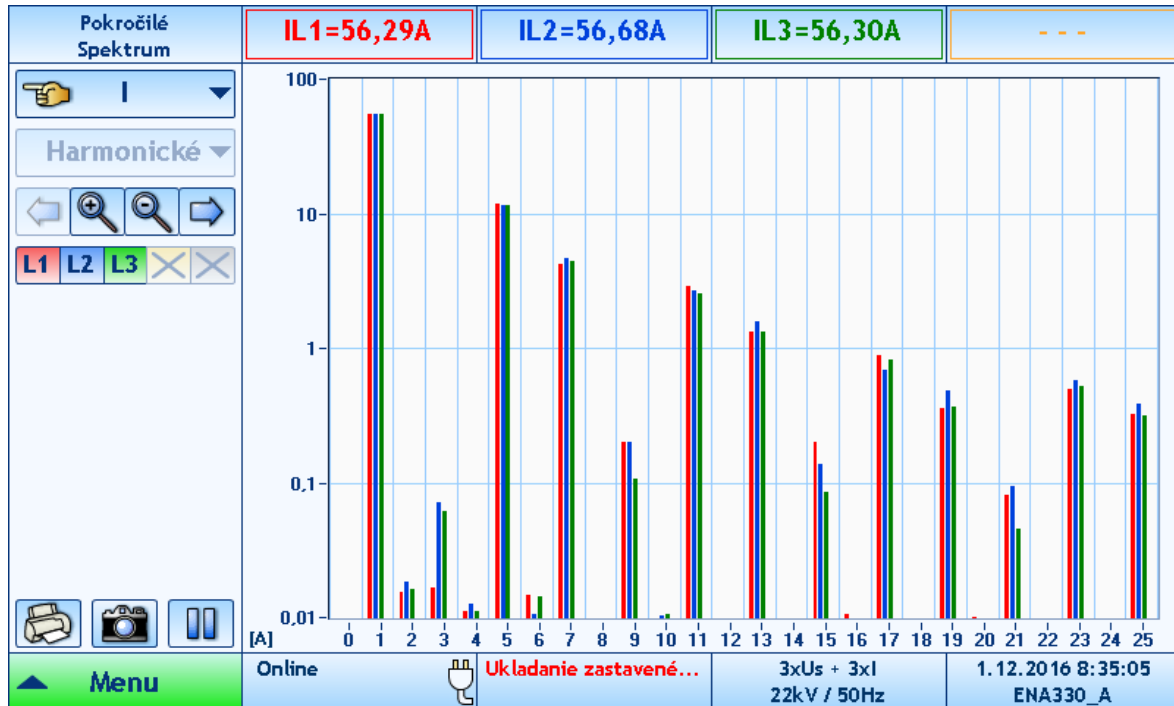
4.2.3 Odporová zát'az s tlmiacou indukčnosťou



Obr. 4.2.3 Tvar odoberaného prúdu a napätia v mieste spotreby

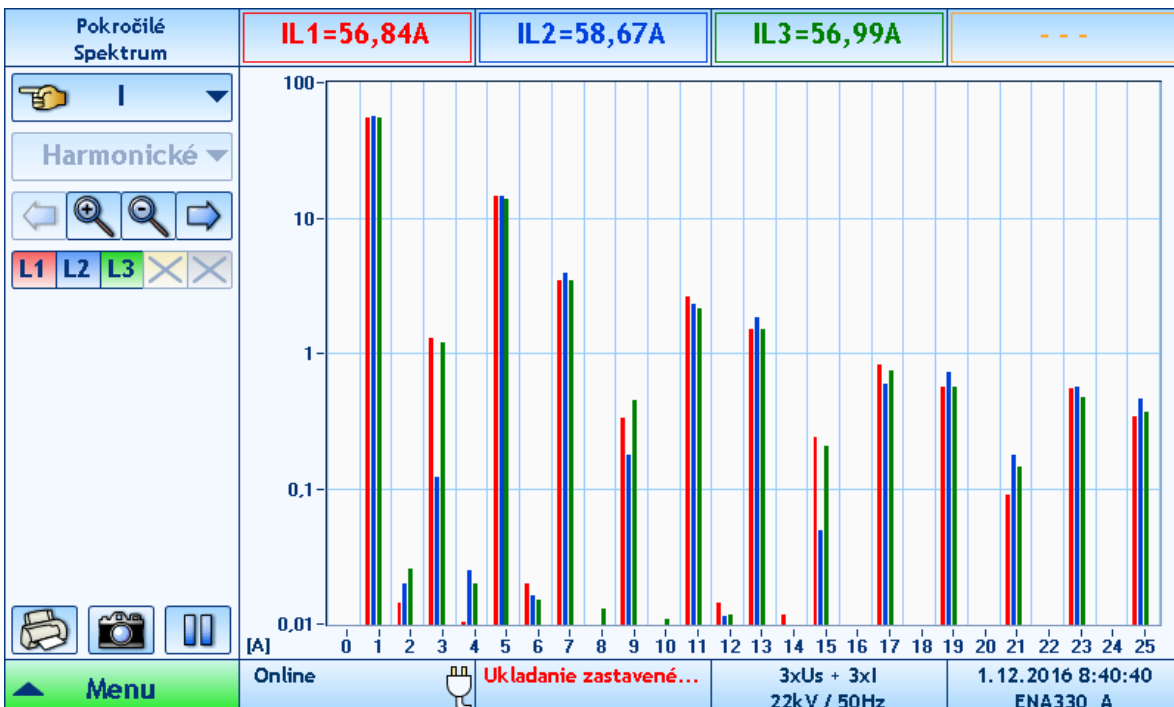
4.3 Prúdové spektrum z rýchlej Fourierovej transformácie v mieste spotreby

4.3.1 Odporová záťaž



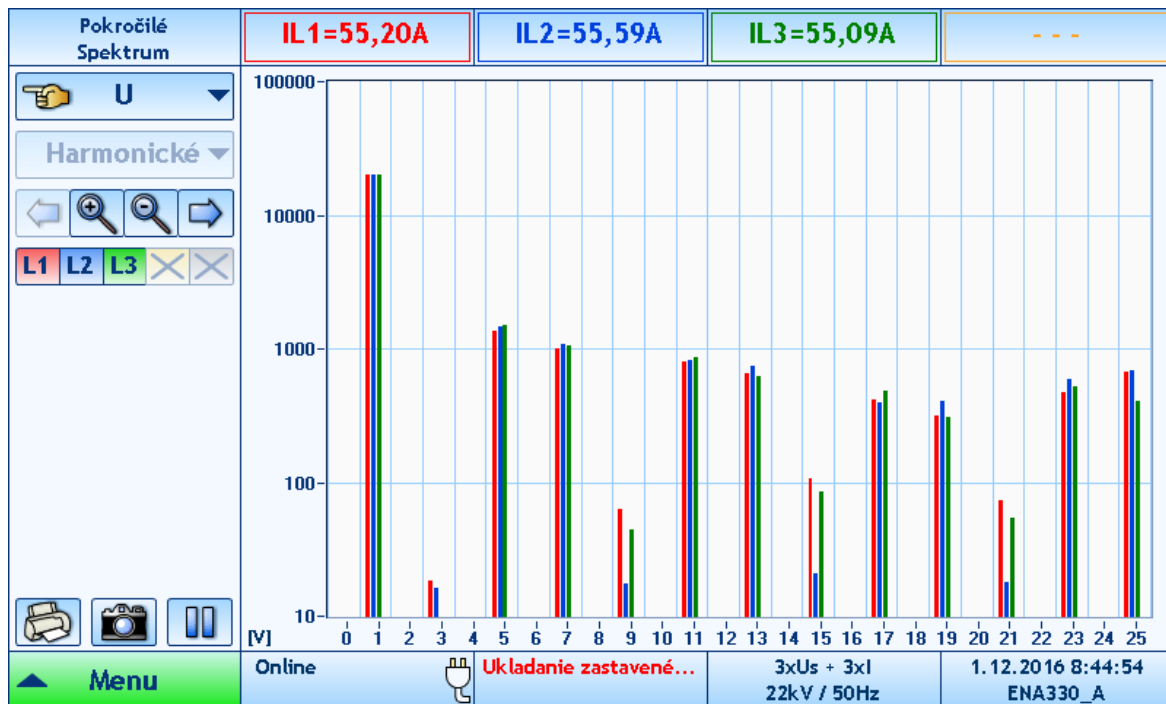
Obr. 4.3.1 Prúdové spektrum v mieste spotreby

4.3.2 Odporová záťaž s vyhladzovacím kondenzátorom



Obr. 4.3.2 Prúdové spektrum v mieste spotreby

4.3.3 Odporová zát'az s tmiacou indukčnosťou

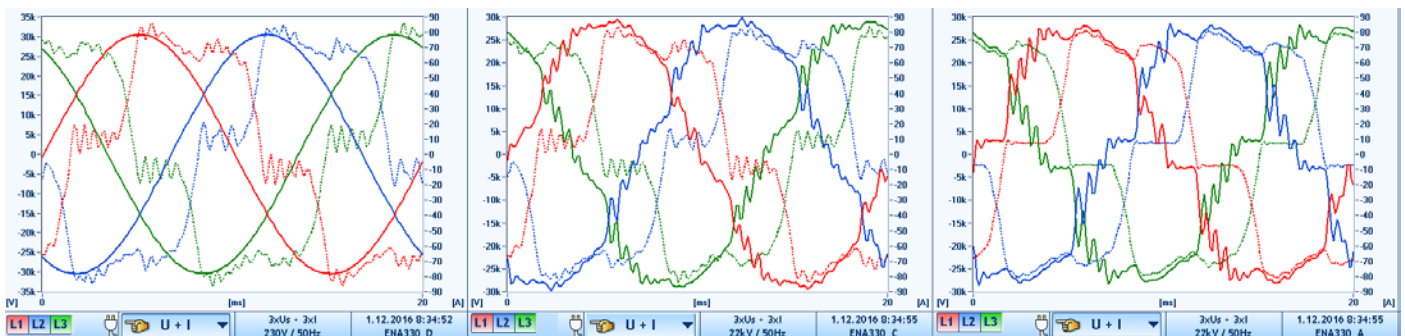


Obr. 4.3.3 Prúdové spektrum v mieste spotreby

4.4 Porovnanie zmeny prúdu vedením

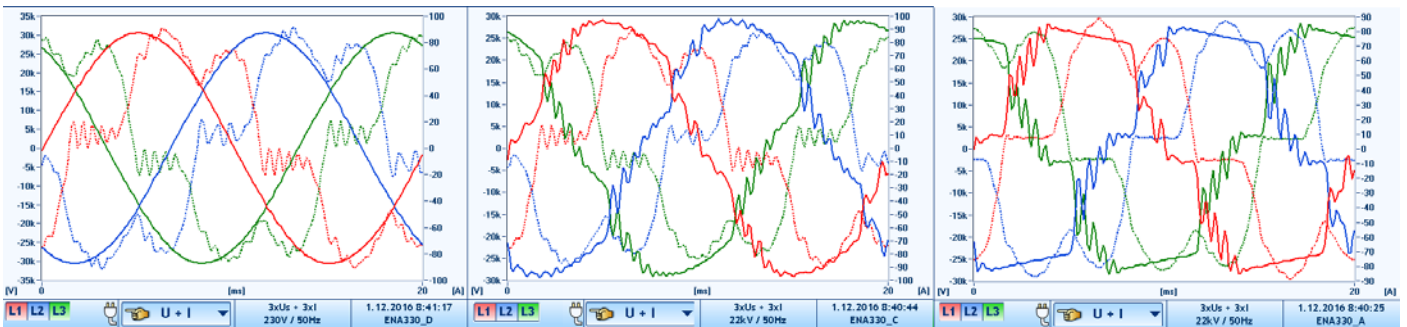
Pripojením usmerňovača na koniec modelu vedenia sme spôsobili, že vzniknuté harmonické vyšších rádov sa šíria po celej jeho dĺžke. Priebeh tejto zmeny si môžeme porovnať pre všetky 3 typy zát'aží. Priebehy osciloskopických záznamov sú vybrané pre začiatok vedenia (Pcc), stred vedenia (bod B) a miesto odberu (bod D).

4.4.1 Odporová zát'az



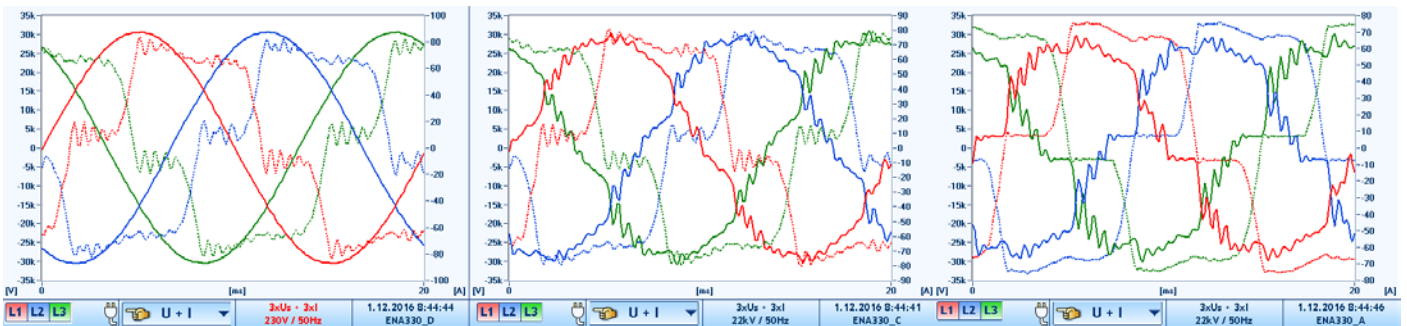
Obr. 4.4.1 Priebehy prúdu vedením body Pcc, B, D

4.4.2 Odporová zát'az s vyhladzovacím kondenzátorom



Obr. 4.4.2 Priebehy prúdu vedením body Pcc, B, D

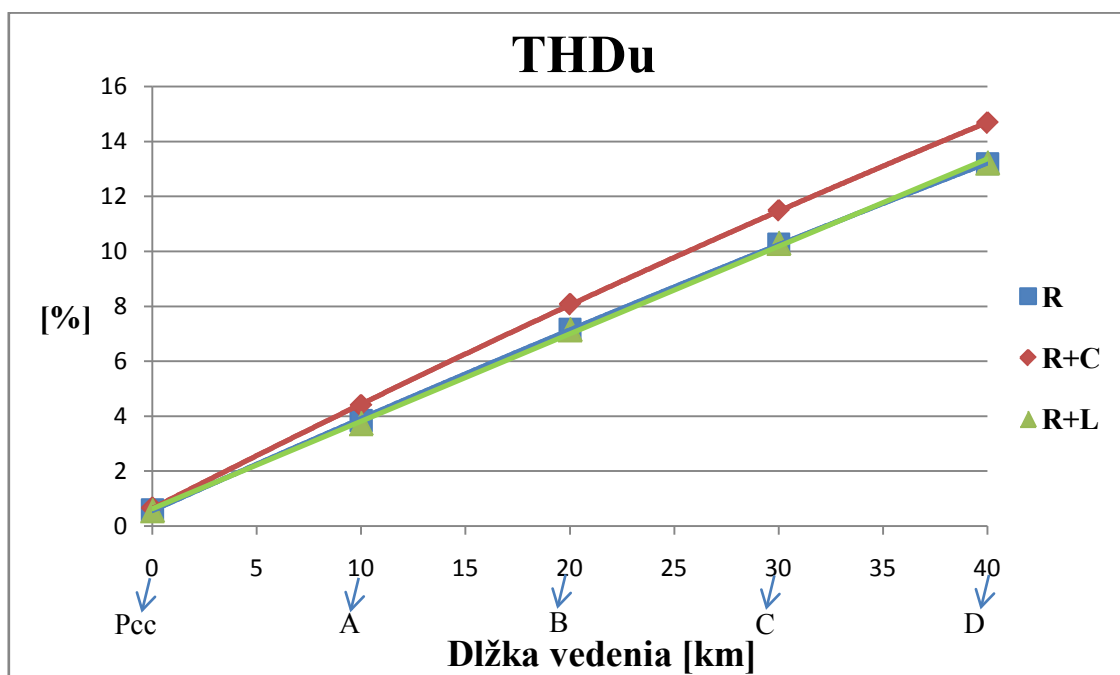
4.4.3 Odporová zát'az s tmiacou indukčnosťou



Obr. 4.4.3 Priebehy prúdu vedením body Pcc, B, D

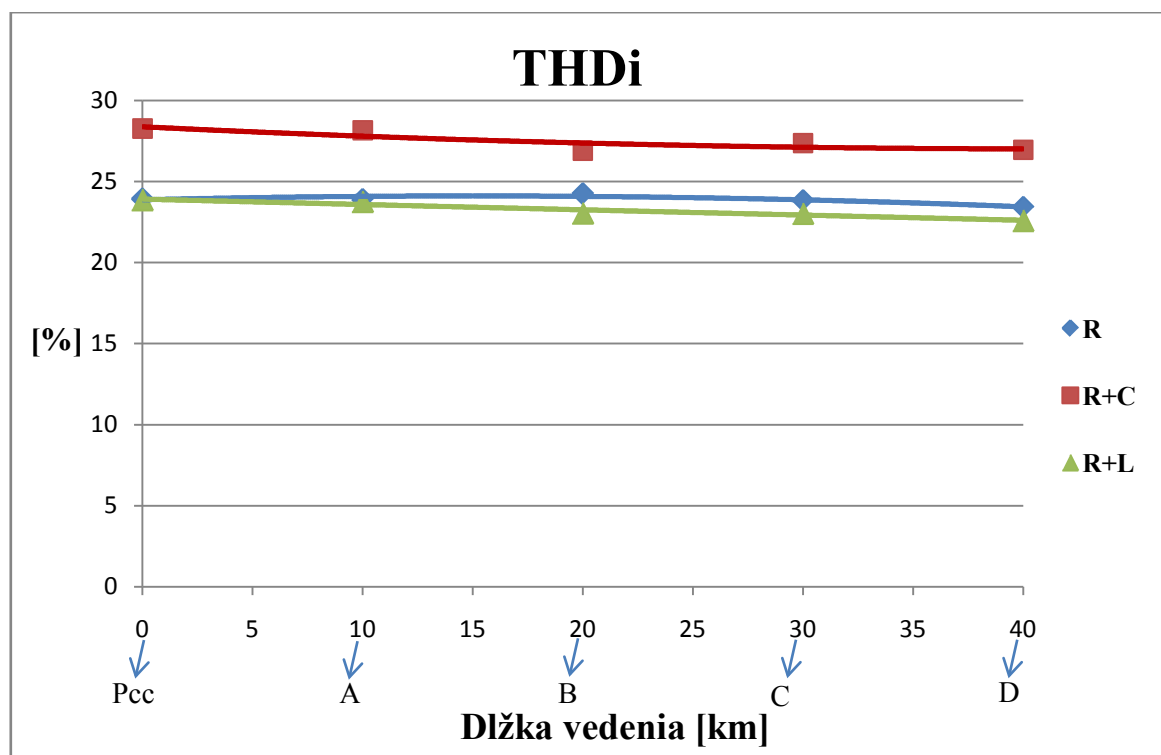
4.5 Grafická závislosť THD_U a THD_I od miesta pripojenia

4.5.1 Závislosť THD_U od miesta pripojenia pre jednotlivé typy zát'azí



Obr. 4.5.1 Závislosť THD_U od miesta pripojenia pre jednotlivé typy zátiaží

4.5.2 Závislosť THD_I od miesta pripojenia pre jednotlivé typy zátiaží



Obr. 4.5.2 Závislosť THD_I od miesta pripojenia pre jednotlivé typy zátiaží

4.6 Porovnanie THD_U a hodnôt napät'ových harmonických vyšších rádoov s normou

Tab. 4.6.1 Tabuľka nameraných hodnôt THD_U a napät'ových harmonických vyšších rádoov pre bod Pcc

	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [%]	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [V]	Odporová zátiaž		Odporová zátiaž + C		Odporová zátiaž + L	
			Pcc [V]	Pcc [%]	Pcc [V]	Pcc [%]	Pcc [V]	Pcc [%]
U_{RMS}	-	22000	21606,67	98,21	21610	98,23	21616,67	98,26
U_{1h}	-	-	-	-	-	-	-	-
THD_U (%)	8	-	-	0,59	-	0,67	-	0,58
U_{5h}	6	1320	90,18	6,83	109,2	8,27	79,92	6,05
U_{7h}	5	1100	39,86	3,62	32,08	2,92	47,09	4,28
U_{11h}	3,5	770	33,9	4,4	29,06	3,77	32,34	4,2

U_{13h}	3	660	21,07	3,19	24,03	3,64	25,22	3,82
U_{17h}	2	440	16,44	3,74	14,83	3,37	15,57	3,54
U_{19h}	1,5	330	10,1	3,06	15,4	4,67	12,21	3,7
U_{23h}	1,5	330	20,22	6,13	20,14	6,1	19,02	5,76
U_{25h}	1,5	330	18,55	5,62	21,39	6,48	20,99	6,36

Tab. 4.6.2 Tabuľka nameraných hodnôt THD_U a napätových harmonických vyšších rádov pre bod A

	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [%]	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [V]	Odporová záťaž		Odporová záťaž + C		Odporová záťaž + L	
			A [V]	A [%]	A [V]	A [%]	A [V]	A [%]
U_{RMS}	-	22000	21183,33	96,29	21183,33	96,29	21206,67	96,39
U_{1h}	-	-	-	-	-	-	-	-
THD_U (%)	8	-	-	3,82	-	4,37	-	3,72
U_{5h}	6	1320	397,63	30,12	480,53	36,4	356,73	27,03
U_{7h}	5	1100	213,47	19,41	172,43	15,68	253,2	23,02
U_{11h}	3,5	770	212,13	27,55	183,73	23,86	204,13	26,51
U_{13h}	3	660	142,13	21,53	163,5	24,77	171,33	25,96
U_{17h}	2	440	120,33	27,35	108,92	24,75	114	25,91
U_{19h}	1,5	330	82,35	24,95	125,85	38,14	99,6	30,18
U_{23h}	1,5	330	183,57	55,63	184,43	55,89	171,23	51,89
U_{25h}	1,5	330	198,3	60,09	235,73	71,43	227,93	69,07

Tab. 4.6.3 Tabuľka nameraných hodnôt THD_U a napätových harmonických vyšších rádov pre bod B

	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [%]	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [V]	Odporová záťaž		Odporová záťaž + C		Odporová záťaž + L	
			B [V]	B [%]	B [V]	B [%]	B [V]	B [%]
U_{RMS}	-	22000	20766,67	94,39	20750	94,32	20793,33	94,52
U_{1h}	-	-	-	-	-	-	-	-
THD_U (%)	8	-	-	7,15	-	8,05	-	7,14
U_{5h}	6	1320	804,73	60,96	975,87	73,93	722,6	54,74
U_{7h}	5	1100	439,63	39,97	353,3	32,12	521,43	47,4
U_{11h}	3,5	770	438,83	56,99	381,37	49,53	422,2	54,83
U_{13h}	3	660	288,87	43,77	330,43	50,07	347,1	52,59
U_{17h}	2	440	243,57	55,36	221,5	50,34	231,27	52,56
U_{19h}	1,5	330	157,57	47,75	241,2	73,09	189,73	57,49
U_{23h}	1,5	330	332,63	100,8	335,2	101,58	312,1	94,58
U_{25h}	1,5	330	331,03	100,31	390,33	118,28	377,8	114,48

Tab. 4.6.4 Tabuľka nameraných hodnôt THD_U a napätových harmonických vyšších rádov pre bod C

	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [%]	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [V]	Odporová záťaž		Odporová záťaž + C		Odporová záťaž + L	
			C [V]	C [%]	C [V]	C [%]	C [V]	C [%]
U_{RMS}	-	22000	20360	92,55	20333,33	92,42	20396,67	92,71
U_{1h}	-	-	-	-	-	-	-	-
THD_U (%)	8	-	-	10,25	-	11,47	-	10,27
U_{5h}	6	1320	1196,67	90,66	1451,67	109,98	1074,67	81,41
U_{7h}	5	1100	655,83	59,62	527,9	47,99	778,03	70,73
U_{11h}	3,5	770	648,27	84,19	564,2	73,27	624,33	81,08
U_{13h}	3	660	425,73	64,5	487,3	73,83	510,9	77,41
U_{17h}	2	440	351,3	79,84	320,2	72,77	334,3	75,98
U_{19h}	1,5	330	224,9	68,15	343,97	104,23	271,07	82,14
U_{23h}	1,5	330	457,53	138,65	457,6	138,67	430,63	130,49
U_{25h}	1,5	330	435,7	132,03	510,77	154,78	496,77	150,54

Tab. 4.6.5 Tabuľka nameraných hodnôt THD_U a napätových harmonických vyšších rádov pre bod D

	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [%]	STN EN 50160 kompatibilné úrovne [V]	Odporová záťaž		Odporová záťaž + C		Odporová záťaž + L	
			D [V]	D [%]	D [V]	D [%]	D [V]	D [%]
U_{RMS}	-	22000	19933,33	90,61	19890	90,41	19973,33	90,79
U_{1h}	-	-	-	-	-	-	-	-
THD_U (%)	8	-	-	13,17	-	14,66	-	13,19
U_{5h}	6	1320	1603	121,44	1946	147,42	1440,33	109,12
U_{7h}	5	1100	876,17	79,65	704,63	64,06	1040,33	94,58
U_{11h}	3,5	770	859,23	111,59	747,87	97,13	827,13	107,42
U_{13h}	3	660	557,73	84,5	638,73	96,78	669,77	101,48
U_{17h}	2	440	454,57	103,31	414,93	94,3	432,53	98,3
U_{19h}	1,5	330	283,93	86,04	433,57	131,38	342,83	103,89
U_{23h}	1,5	330	557,57	168,96	556,67	168,69	526,6	159,58
U_{25h}	1,5	330	512	155,15	597,83	181,16	582,43	176,49

4.7 Súpis prístrojov

Tab. 4.7 Zoznam a technické parametre použitých prístrojov

Por. Číslo	Názov	Typové označenie	Výrobca
1.	Analyzátor kvality siete	ENA 330	Elcom, a. s.
2.	Model vedenia 22kV	-	-
3.	Programovateľný zdroj napätia	Model 8325B	Applied Precision
4.	3 - fázový neriadený usmerňovač	-	-
5.	RLC prvky	-	-

5. ZÁVER

Celkového harmonické skreslenie THD_U a THD_I pre rôzne typy záťaží sa prejavuje rozdielne. Usmerňovač ako záťaž spôsobuje prúdové harmonické vyšších rádov, ktoré sa šíria vedením smerom k zdroju, preto je nameraná hodnota THD_I v mieste spotreby menšia ako pri zdroji. Prechod prúdových harmonických vyšších rádov cez impedancie vedenia spôsobí vznik napätových harmonických vyšších rádov. Napätové harmonické vyšších rádov

spôsobujú THD_U , ktoré sa na rozdiel od THD_I zvyšuje od začiatku vedenia smerom k usmerňovaču.

Z rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) dokážeme určiť typ pripojeného usmerňovača. V tomto meraní sa konkrétne jedná o 6 impulzový usmerňovač, preto lebo po jeho pripojení na sieť vznikla 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 harmonická, vid' obr. 4.3.1, obr. 4.3.2, obr. 4.3.3. Počet impulzov usmerňovača vieme určiť zo vzťahu $h = k \times p \pm 1$, kde h je rád harmonickej, k je celé číslo a p je počet impulzov usmerňovača.

Tvar odoberaného prúdu usmerňovačom sme zaznamenali osciloskopom pri rôznych typoch záťaží. V nameranom priebehu pre odporovú záťaž v mieste spotreby obr. 4.2.1 je vidieť výrazne zakmitanie v prvej polovici periódy napät'ovej vlny. Prúd má v tomto mieste nepravidelný priebeh s miernom špičkou. Toto zakmitanie napät'ového priebehu sa smerom k zdroju postupným prechodom cez impedancie znižuje, ako môžeme vidieť na obr. 4.4.1. Naopak priebeh prechádzajúceho prúdu sa smerom ku zdroji vyznačuje miernymi zákmitmi.

V druhom prípade pri pripojení odporovej záťaže s vyhladzovacím kondenzátorom v mieste záťaže obr. 4.2.2 je napät'ový priebeh v druhej perióde napät'ovej vlny mierne zrezaný. Zato priebeh prúdu sa vyznačuje veľkou špičkou, čo je možné odôvodniť tým, že kondenzátor sa po nabití vybíja, čo spôsobuje zrezanie napätia a vytvorenie prúdovej špičky. Opäť sa prejavuje jav, ktorý je opísaný v predchádzajúcom odseku.

Tretí skúmaný prípad je pri pripojení odporovej záťaže s tlmiacou indukčnosťou. Na osciloskopickom priebehu meraného prúdu v mieste záťaže obr. 4.2.3 môžeme vidieť mierne zrezanie a nižšiu amplitúdu prúdu. Priebeh napätia je však viac zvlnený v druhej perióde napät'ovej vlny. Túto skutočnosť spôsobuje cievka, ktorá vlastne akumuluje elektrickú energiu. Porovnanie zmeny odoberaného prúdu je zobrazené na obr.4.4.3. Zmeny sú vyobrazené pre meranie v mieste zdroja v poradí bod Pcc, bod B, a bod D v mieste záťaže.

Porovnanie THD_U a THD_I je realizované v kapitole 4.5., kde sú graficky znázornené závislosti týchto celkových harmonických skreslení napätia a prúdu od napájacích bodov vedenia. Vytvorili sme dva grafy pre už spomínané 3 typy zapojenia modelu vedenia.

Závislosť THD_U od miesta pripojenia je znázornená na obr. 4.5.1 a závislosť THD_I je zobrazená na obr. 4.5.2. Zistili sme, že pre všetky 3 prípady má THD_U stúpajúcu tendenciu od začiatku po koniec vedenia, kde je pripojená záťaž. V prípade so zapojeným kondenzátorom sú hodnoty THD_U mierne vyššie ako v ostatných 2 prípadoch, kde sa krivky prakticky zhodujú.

Krivka THD_I má v závislosti od bodu pripojenia mierne klesajúcu tendenciu od zdroja k spotrebiču. Pre prípad so zapojeným kondenzátorom sú hodnoty THD_I výraznejšie vyššie ako ostatných 2 prípadoch. V prípade so zapojenou tlmiacou indukčnosťou sú hodnoty THD_I najnižšie.

Najvyššia hodnota THD_U a THD_I sa teda objavuje v prípade, kedy k odporovej záťaži bol pridaný vyhladzovací kondenzátor. Hodnoty THD_U a THD_I pre prípad odporovej záťaže bez žiadnych kompenzačných prvkoch a pri pripojení tlmiacej indukčnosti boli prakticky rovnaké, len prípade so zapojenou tlmiacou indukčnosťou má krivka závislosti THD_I od miesta pripojenia strmšie klesanie na rozdiel od prípadu čisto odporovej záťaže.

V kapitole 4.6 sme porovnali namerané hodnoty jednotlivých harmonických pre všetky 3 prípady a jednotlivé miesta zapojenia s príslušnými harmonickými uvedenými v norme STN EN 50160.

Vytvorili sme 5 tabuliek, pričom v každej tabuľke sú zobrazené hodnoty príslušných harmonických napätia, hodnoty U_{RMS} a THD_U , všetkých troch prípadov zapojenia a ich percentuálne porovnanie s normou, práve pre jeden bod v merania.

V tab. 4.6.1 a tab. 4.6.2 sú zobrazené hodnoty pre bod Pcc, ktorý reprezentuje bod kde je pripojený zdroj, a bod A (10 km po vedení od zdroja). V týchto bodoch sú namerané hodnoty príslušných harmonických a hodnoty THD_U v súlade s normou STN EN 50160. V ostatných bodoch (tab. 4.6.3 – 4.6.5) stúpa počet hodnôt nevyhovujúcich norme s približovaním sa ku miestu spotreby. Nevyhovujúce hodnoty sú v tabuľkách zvýraznené červenou farbou. Ako vidieť (tab. 4.6.5), najviac prekročených hodnôt je v mieste spotreby, teda v bode D, a iba hodnota siedmej harmonickej vyhovuje norme STN EN 50160 vo všetkých prípadoch zapojenia a bodoch merania.