

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Hromadné zpracování dat při měření polovodičových
měničů**

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na hledání nových pohledů na vlastnosti soustavy zatížené harmonickými proudy a způsobu jejich zpracování. V úvodu jsou popsány vztahy pro metody záznamu dat a základní definiční vztahy pro oblast nízkofrekvenčního elektromagnetického rušení. Dále jsou zde uvedeny možnosti vzniku harmonických proudů jako důsledek činnosti polovodičových měničů, nejrozšířenější zdroje charakteristických harmonických proudů a možnosti stanovení přibližné velikosti těchto proudů. V další části práce je pozornost věnována způsobu měření a zpracování efektivních hodnot harmonických proudů z hlediska norem. V poslední a zároveň hlavní části práce je provedeno statistické zpracování dat, změřených katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL ZČU, dle platné normy ČSN EN 61000-4-7 ed. 2 a následné porovnání s jinými metodami zpracování.

Výsledkem práce je aplikace různých způsobů zpracování dat pro přehledné posouzení vlastností napájecí sítě se zdroji harmonických proudů. Zpracování harmonických je provedeno nejdříve v závislosti na počtu měření, tedy v čase, kdy každé měření odpovídá třiceti sekundovému intervalu. Zde byla upozorováno a následně dokázáno nestandardní rozdělení efektivních hodnot harmonických proudů spolu s popisem jednotlivých harmonických pro různá období. Dalším výsledkem a tedy možným hlediskem práce je vyjádření četností harmonických. Zde lze posoudit odběr z hlediska nejčastěji odebíraných velikostí zmiňovaných harmonických. Přínos této práce spočívá v ukázce možných způsobů zobrazení měřených dat a jejich praktická aplikace, jenž je vhodná k dalšímu posouzení vlastností zkoumané soustavy.

Klíčová slova

Harmonické proudy, nepřímý měnič kmitočtu, Fourierova řada, hromadné zpracování dat, normální (Gaussovo) rozdělení.

Abstrakt

Presented thesis focuses on the search for new perspectives on the properties of the system loaded with harmonic currents and the ways to process them. In the introduction, describes the relation for the methods for recording data and a basic definitional relationship for the low frequency of electromagnetic interference. Below are listed the possibility of harmonic currents as a result of the activities of semiconductor converters, the most prevalent source of harmonic currents and the possibility of establishing an approximate size of these currents. In the next part of the work is attention focused on how measurement and processing of effective value of harmonic current in terms of standards. In the last part which is the most important part of the work is done by the statistical processing of data, measured by the Department of electromechanics and power electronics of the Faculty of Electrical Engineering of the University of West Bohemia (FEL ZČU), according to official standards ČSN EN 61000-4-2 and compare with other methods of processing.

The result of the thesis is application of different methods of data processing for easy assessment of the properties of the power network with the source of harmonic currents. Processing of the harmonics firstly depends on the number of measurements, i.e. at a time when each measurement corresponds to the thirty second interval. There is mentioned and proved abnormality of harmonic distribution together with a description of the individual harmonics for various periods. Another result, and thus the potential aspect of the work is an expression of the frequency harmonics. It can be assessed in terms of the most commonly collected sizes of harmonics. The benefits of this thesis lies in the possible ways of how to display the measured data and their practical application, that is suitable for further assessment of the properties of the researched system.

Keywords

Harmonic currents, indirect frequency converter, Fourier series, mass data processing, normal (Gauss) distribution.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 2.6.2015

David Vokál

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za metodické vedení práce a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Olze Tůmové, CSc. za pomoc při zpracování statistiky pro změřená data. V neposlední řadě bych též rád vzdal dík Ing. Haně Kopincové, Ph.D. za odbornou podporu při zpracování numerických metod pro záznam dat a RNDr. Zdeňku Kobedovi za rady z oblasti statistiky.

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	1
1 PROBLEMATIKA NESINUSOVÉHO ODBĚRU PROUDU	2
1.1 VÝKONY OBVODŮ S NEHARMONICKÝMI ZDROJI	2
1.2 ZÁKLADY PROBLEMATIKY HARMONICKÝCH	3
1.2.1 <i>Amplitudový zákon</i>	6
1.3 USMĚRŇOVAČE	8
1.3.1 <i>Usměrňovač jako proudový zdroj harmonických</i>	9
1.3.2 <i>Usměrňovač jako proudový zdroj harmonických při uvažování reálných parametrů</i>	11
1.4 NEPŘÍMÉ MĚNIČE KMITOČTU S NAPĚŤOVÝM STRÍDAČEM	13
1.5 HARMONICKÉ PROUDY NEPŘÍMÝCH MĚNIČŮ KMITOČTU S NAPĚŤOVÝM STRÍDAČEM	14
1.5.1 <i>Harmonické proudy nepřímé měniče kmitočtu se zařazenou indukčností</i>	17
1.6 OSTATNÍ POLOVODIČOVÉ MĚNIČE JAKO ZDROJE HARMONICKÝCH	18
1.6.1 <i>Střídavé měniče napětí</i>	18
1.6.2 <i>Přímé měniče kmitočtu</i>	19
1.6.3 <i>Nepřímé měniče kmitočtu s proudovým střídačem</i>	20
1.6.4 <i>Pulzní usměrňovače</i>	20
2 ZPRACOVÁNÍ A ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	21
2.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY MĚŘENÍ HARMONICKÝCH	21
2.2 ZPRACOVÁNÍ DAT Z HLEDISKA PLATNÉ NORMY.....	22
2.2.1 <i>Třídy přesnosti</i>	22
2.2.2 <i>Intervaly měření</i>	22
2.2.3 <i>Zpracování výsledků analýzy</i>	23
3 ZÁKLADNÍ STATISTIKA MĚŘENÝCH DAT	25
3.1 ZÁZNAM ZMĚŘENÝCH EFEKTIVNÍCH HODNOT HARMONICKÝCH PROUDŮ V ČASE	25
3.2 POROVNÁNÍ VELIKOSTÍ EFEKTIVNÍCH HODNOT HARMONICKÝCH PROUDŮ PRO RŮZNÉ ČASOVÉ OKAMŽIKY.....	30
3.3 ROZDĚLENÍ ABSOLUTNÍ ČETNOSTI EFEKTIVNÍCH HODNOT HARMONICKÝCH PROUDŮ ODEBÍRANÝCH Z TRAFOSTANICE MĚSTSKÉHO ROZVODU	35
4 ZÁVĚR	41

Úvod

Předkládaná práce se zabývá nalezením možností pro zhodnocení velkého množství měření z hlediska harmonických proudů.

Díky své dynamické volt-ampérové charakteristice často dochází u polovodičových součástek k deformaci sinusového průběhu odebíraného proudu. Ze stejného důvodu mnohdy nedochází k plynulým změnám odebíraného proudu společně s napájecím napětím a měnič složen z polovodičových součástek tak pro napájecí síť představuje nelineární zátěž. Chová se tedy jako zdroj vyšších harmonických proudů. Protože dochází k masivnímu šíření zmíněných měničů nejen v průmyslu, ale také domácnostech, roste s jejich počtem též jejich vliv na napájecí síť. Z toho důvodu je třeba se zaměřit na jejich konkrétní působení a s tím přímo souvisí potřeba jejich rozboru, měření a zpracování. V případě, že jde o tak vysoký počet elektronických zařízení, s jakým se dnes setkáváme, nelze řešit jejich vliv na síť individuálně. Proto je třeba se zabývat způsoby zhodnocení obsahu harmonických a představě o celkovém zkruslení odebíraného proudu, s náhledem na soustavu zatíženou zdroji vyšších harmonických proudů jako na ucelený blok, jehož odběr harmonických proudů se dle provozu jednotlivých zařízení mění. Ztohoplyne též požadavek na měření dlouhých časových úseků v krátkých intervalech, umožňující přehledné zpracování s možností vyloučení případných abnormalit. Záměrem této práce je utvoření přehledného způsobu znázornění velkého počtu naměřených údajů, poskytnutých katedrou KEV ZČU v Plzni. Zobrazení údajů měření je provedeno nejdříve v čase s příslušnou statistickou analýzou, následně pak pomocí rozdělení absolutní četnosti.

1 Problematika nesinusového odběru proudu

Společným jmenovatelem všech moderních spotřebičů je použití elektronických zařízení. Společnou vlastností takových spotřebičů je pak odběr nesinusového proudu z napájecí sítě, což způsobuje řadu problémů, které mají dopad na funkci a provoz všech prvků soustavy.

Jedním ze zmíněných neblahých projevů může být například zvýšení ztrát v systému, či nárůst spotřeby elektrické energie. Neharmonický průběh proudu také ovlivňuje průběh napětí, čímž dochází k jeho zkreslení.

Harmonické v souladu s normou rozdělujeme na charakteristické, necharakteristické a tzv. meziharmonické. Jestliže hodnoty harmonických vyhovují rovnici 1.2.15, kde k je celé číslo, bavíme se o charakteristických harmonických. Necharakteristické harmonické a meziharmonické již zmíněnému vztahu nevyhovují, přičemž pro meziharmonické platí, že k není celé číslo. Odlišnost těchto druhů harmonických je tedy dána závislostí na platnosti rovnice 1.2.15 a velikosti jejich koeficientů.

S ohledem na zadání práce a zejména na dominantní velikost charakteristických harmonických bude v této práci věnována pozornost pouze charakteristickým harmonickým.

1.1 Výkony obvodů s neharmonickými zdroji

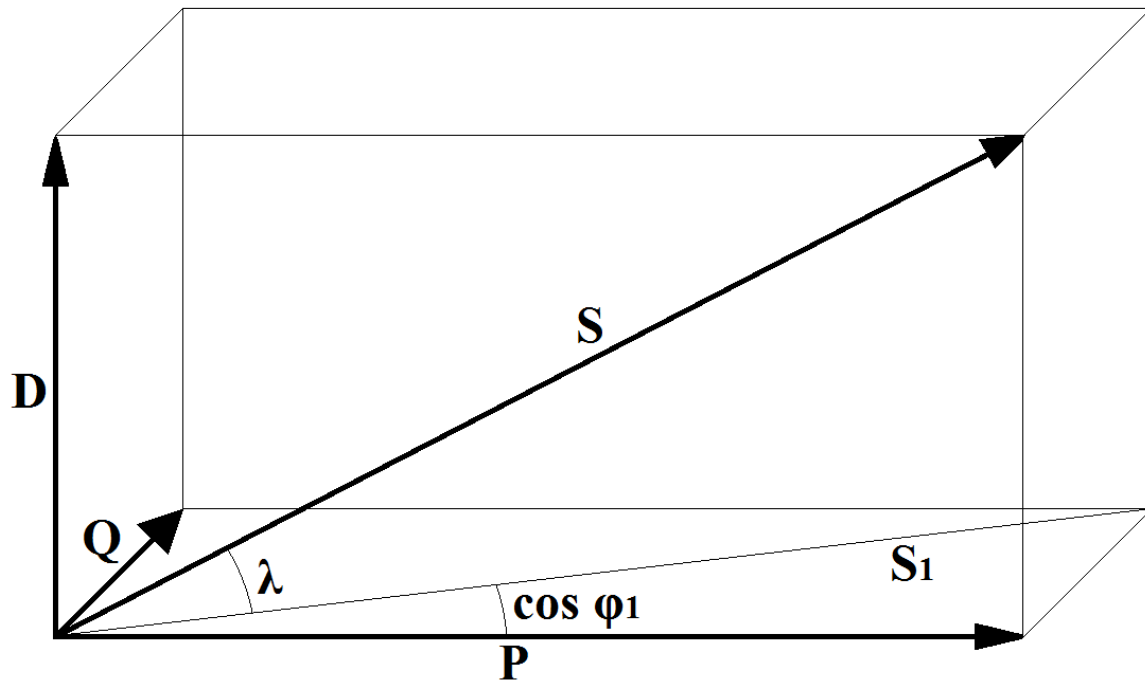
Přítomnost zdroje vyšších harmonických v soustavě mimo jiné způsobuje nerovnost, dle vztahu 1.1.1, z čehož plyne přítomnost jiné neúčinné složky zdánlivého výkonu, než pouze jalové. Zmíněnou složkou je výkon označován jako deformační (vztah 1.1.2), který takměří trojúhelník výkonů na kvádr, tedy prostorový útvar dle obr. 1.1 [4].

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad 1.1.1$$

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad 1.1.2$$

Z uvedených faktů přirozeně plyne nejednoznačnost účinníku $\cos \varphi$, proto byl zaveden skutečný účinník λ , definován vztahem 1.1.3.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad 1.1.3$$



Zdroj: [4]. Obr. 1.1 Kvádr výkonů

Zdánlivý výkon S lze získat pomocí vztahu 1.1.4, tedy jako součin celkových efektivních hodnot napětí a proudu. Pro stanovení velikosti činného a jalového výkonu je zapotřebí provést jejich výpočet pro každou harmonickou zvlášť a v závěru výpočtu jednotlivé složky sečíst (viz. vztahy 1.1.5, 1.1.6)[4].

$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} = U_{ef\ celk.} \cdot I_{ef\ celk.} \quad 1.1.4$$

$$P = P_0 + \sum_{h=0}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) = P_0 + P_1 + P_2 \dots \quad 1.1.5$$

$$Q = Q_0 + \sum_{h=0}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin(\varphi_h) = Q_0 + Q_1 + Q_2 \dots \quad 1.1.6$$

Z uvedených vztahů lze odvodit, že jestliže je například přítomna pouze určitá harmonická proudů, ovšem odpovídající harmonická napětí nikoliv, bude výkon dané harmonické roven nule.

1.2 Základy problematiky harmonických

Za určitých zjednodušujících podmínek, jako je periodičnost, či předpoklad ustáleného stavu, lze po částech spojitý průběh s periodou T rozložit na sadu harmonických funkcí, tedy základní harmonickou a řadou sinusových složek vyšších řádů o frekvencích, které jsou celistvým násobkem frekvence základní harmonické. Výsledná řada se nazývá

Fourierova řada, která tak stanovuje vzájemný vztah mezi funkcí v časové a frekvenční oblasti a slouží k číslcovému vyjádření naprosté většiny průběhů [1]. Vyjádření zmíněné řady lze následujícím způsobem:

$$s(t) = \frac{a_{(0)}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)] \quad 1.2.1$$

přičemž

$$a_{(h)} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(h\omega t) dt \quad a \quad b_{(h)} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(h\omega t) dt$$

1.2.2

Různé druhy popisovaných funkcí lze následně rozdělit na sudé (obsahující členy s funkcí cosinus), liché (obsahující členy s funkcí sinus) a antiperiodické, složené pouze z lichých koeficientů (obsahujících funkce sinus a cosinus). Kombinace liché a antiperiodické funkce jev literatuře [4] popisována jako nejčastěji používaným teoretickým předpokladem pro analýzu polovodičových měničů.

Fourierovu transformaci lze převést také na tvar složený ze spektrálních koeficientů tvořících amplitudové nebo případně fázové spektrum sledovaného průběhu (1.2.10). Těmito koeficienty jsou C_n a φ_n , jež jsou definovány vztahy 1.2.3 a 1.2.4 [13].

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad 1.2.3$$

$$\varphi_h = \arctg\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \quad 1.2.4$$

$$s(t) = \frac{a_{(0)}}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \cdot \cos(h\omega t - \varphi_h) \quad 1.2.5$$

Pro uvedené koeficienty lze případně také užít komplexního tvaru Fourierovy řady zavedením komplexních čísel v klasickém vyjádření řady a použitím Eulerova pravidla získat následně tento tvar:

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{+\infty} c_n e^{jh\omega t} \quad 1.2.6$$

přičemž

$$c_h = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) \cdot e^{-jh\omega t} dt \quad 1.2.7$$

Základem rozkladu funkce v časové oblasti a jejím přenesením do oblasti kmitočtové, tedy její spektrální analýzou, je dle předpokladů vycházejících z použitých skript [3] přímá Fourierova transformace definována takto:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad 1.2.8$$

Zpětná Fourierova transformace je pak vyjádřena takto:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) e^{j\omega t} dt \quad 1.2.9$$

Protože je však vzhledem k nutnosti záznamu a zpracování velkého množství dat využívána výpočetní technika, je třeba řešit zmíněné Fourierovy koeficienty pro časově diskretizované průběhy. K tomuto účelu slouží diskrétní Fourierova transformace.

$$F(f_h) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) e^{-jn \frac{2\pi}{N} h} \quad \text{pro } n=1,2,\dots,N-1 \quad 1.2.10$$

Pro převod zpět z kmitočtové do časové oblasti je zde uvedena inverzní diskrétní Fourierova transformace:

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) e^{jn \frac{2\pi}{N} h} \quad \text{pro } n=1,2,\dots,N-1 \quad 1.2.11$$

V případě DFT analýzy je počet operací násobení roven kvadrátu počítaných koeficientů, tedy N^2 . Složitost algoritmu má za následek dlouhou dobu výpočtu a je tedy třeba jeho zjednodušení. Z toho důvodu je využíváno FFT, tedy rychlé Fourierovi transformace, vycházející z maticového tvaru DFT dle obr. 1.2, kdy vhodnou permutací s_k v bitově reverzním pořadí lze získat N triviálních DFT s délkou 1. Ze kterých je následně možné určit celkový DFT signál o délce N . Velkou výhodou metody, popsané vztahem 1.2.12, je tedy výrazná úspora prováděných operací, kdy místo N^2 lze soustavu vyřešit pomocí $(N/2) \log_2(N)$ operací [4; 13].

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \hat{s}_0 \\ \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \\ \vdots \\ \hat{s}_{N-1} \end{pmatrix}}_{\text{výstup}} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & \dots & W^{N-1} \\ 1 & W^2 & W^4 & \dots & W^{2(N-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & W^{2(N-1)} & \dots & W^{(N-1)(N-1)} \end{pmatrix}}_W \underbrace{\begin{pmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{N-1} \end{pmatrix}}_{\text{vstup}}$$

Zdroj: [13]. Obr. 1.2 Přepis DTF v maticovém tvaru

Pro $W = e^{-j2\pi/N}$ lze FFT a FFT inverzní vyjádřit dle literatury [4; 13] následujícím způsobem:

$$F(f_h) = \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \cdot W^{hn} \quad 1.2.12$$

$$f(t_n) = \sum_{h=0}^{N-1} F(f_h) \cdot W^{-hn} \quad 1.2.13$$

1.2.1 Amplitudový zákon

Provedeme-li nyní analýzu průběhu z obrázku 1.3, který představuje idealizovaný průběh proudu třífázovým můstkovým usměrňovačem s transformátorem v zapojení Y/y, lze v souladu s použitou literaturou [3] získat po provedení Fourierovy analýzy následující vztah:

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} i_s(h\omega t) d\omega t = \pm \frac{2I_m}{\pi h} \sqrt{3} \quad 1.2.14$$

$$\text{pro který platí, že } h = kp \pm 1 \quad 1.2.15$$

Kde p je pulznost usměrňovače a k celé číslo. Vztah 1.2.14 je pro $h=1$ zároveň hodnotou první harmonické. Vzniklá Fourierova řada vypadá následovně:

$$i_s = \frac{2}{\pi} \sqrt{3} I_m \left(\frac{1}{1} \sin(\omega_1 t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega_1 t) - \frac{1}{7} \sin(\omega_1 t) \dots \right) \quad 1.2.16$$

Z uvedené řady lze odvodit obecný vztah pro výpočet harmonických vyšších řádů na

základě znalosti amplitudy harmonické první. Tento vztah je literaturou [3] popisován jako amplitudový zákon, jehož podoba je následující:

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \quad \text{pro } h = kp \pm 1 \quad 1.2.17$$

V případě, že bude při stejných podmínkách délka pulzu, kdy je zkoumaný proud roven amplitudě, libovolně dlouhá a označena jako d , je dle závěrů literatury [3] výsledný vztah vyjádřen takto:

$$I_h = \frac{1}{h} \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}} I_1 = \frac{1}{h} k_d I_1 \quad 1.2.18$$

Tento vztah je ve skriptech [4] popisován jako obecný amplitudový zákon, který lze běžně využít pro výpočet charakteristických harmonických vyšších řádů za zjednodušujících podmínek uvedených v kapitole 1.3.1. Efektivní hodnotu ideální harmonické funkce lze při znalosti amplitudy určit dle definice podělení příslušnou odmocninou, přičemž celková efektivní hodnota je rovna odmocnině ze sumy kvadrátů jednotlivých harmonických [1].

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{h=0}^H I_h^2} \quad 1.2.19$$

Dalším důležitým matematickým aparátem, užívaným pro hodnocení deformovaných průběhů harmonických proudů je možnost zavedení poměrných hodnot. Zmíněné hodnoty jsou zavedeny jako podíl zkoumané harmonické vůči harmonické základní vyjádřených v procentech, či případně bezrozměrně.

Používání poměrných hodnot může však být v případě harmonických proudů zavádějící, protože se pro různé zatížení mohou jednotlivé harmonické vzhledem k harmonické základní lišit. Pro zjištění celkového obsahu harmonických, či míře zkreslení je proto normou zavedeno poměrně velký počet dalších činitelů [3].

Celkové harmonické zkreslení (total harmonic distortion) je určen poměrem součtu efektivních hodnot do řádu h (normou doporučený řád je 50) vůči harmonické základní. Zde Q_h představuje zmiňovanou efektivní hodnotu h -té harmonické.

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H Q_h^2}}{Q_1} \quad 1.2.20$$

Vztažením celkového součtu harmonických od řádu $h=2$, jako je tomu v případě THD, vzhledem k celkové efektivní hodnotě harmonických lze získat Celkový činitel harmonických (THF, total harmonic factor).

$$THF = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{Q_h}{Q}\right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H Q_h^2}}{Q} \quad 1.2.21$$

V následujících částech se bude na základě porady s vedoucím práce týkat pouze usměrňovače, pracujícího do kapacitní zátěže a nepřímých měničů kmitočtu s napěťovým střídačem.

1.3 Usměrňovače

Trendem posledních několika let je provoz moderních domácích spotřebičů, k jejich funkci je zapotřebí zdroj stejnosměrného napětí a tedy i jeho odběr ze sítě nízkého napětí. Jako zdroj napětí jsou jejich součástí právě usměrňovače [3].

Usměrňovač je druh výkonového měniče užívaného pro přeměnu střídavého elektrického proudu na stejnosměrný. Podle počtu fází se napájecího zdroje se usměrňovače dělí na jednofázové a třífázové.

V průmyslu jsou využívány jako napájení budících vinutí pro stejnosměrné a synchronní pohony, či také jako zdroje pro trakční pohony, například v měnících pro napájení troleje. V energetice umožňují přeměnu střídavé energie na stejnosměrnou a tím i její snadnější přenos na velké vzdálenosti. Jejich významná část se také využívá pro pohonářské aplikace při výkonech až jednotek MW [11].

Dle druhu napájecího zdroje se usměrňovače dělí na jednofázové a třífázové, dle samotného provedení pak na jednocestné a dvoucestné, které lze realizovat jako usměrňovače uzlové, či můstkové. V případě nahrazení některých diod tyristory lze mluvit o polořízeném, případně plně řízeném můstku. Poměrně novým trendem jsou z hlediska vlivu na síť pulzní usměrňovače. Jejich zapojení se od těch diodových nijak neliší, jsou však tvořeny kromě usměrňovacích diod též bipolárními tranzistory, jež jsou k diodám antiparalelně připojeny.

1.3.1 Usměrňovač jako proudový zdroj harmonických

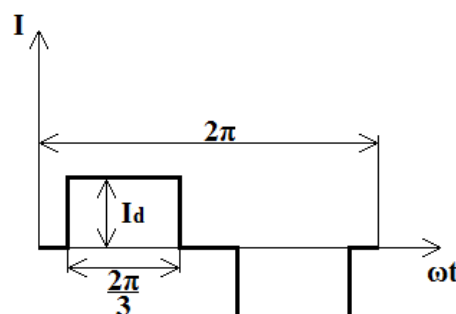
Díky dynamické VA-charakteristice polovodičových součástek se vstupní proud nemění plynule se změnou okamžité hodnoty vstupního napětí, čímž pro napájecí síť představuje nelineární zátěž a chová se tedy jako proudový zdroj harmonických.

Na charakter odebíraného proudu ze sítě má vliv hned několik parametrů. Jedná se nejen o druh zátěže a její vlastnosti, ale také o vlastnosti napájecí sítě, hodnotu indukčnosti stejnosměrného obvodu, nebo zapojení samotného usměrňovače.

Popis deformovaných časových průběhů okamžitých hodnot proudů je velmi obtížný. Pro jednodušší analýzu chování těchto proudů se tedy zavádí idealizované podmínky, díky nimž se lze přiblížit reálným hodnotám velikostí vyšších harmonických proudů [3]. V použité literatuře [3] jsou zmíněné podmínky definovány následovně:

- symetrická napájecí soustava
- sinusové napětí na vstupu usměrňovače
- indukčnost ve stejnosměrném obvodu limitně se blíží nekonečnu ($L_{ss} \rightarrow \infty$)
- téměř nekonečný zkratový výkon napájecí soustavy ($S_{ks}'' \rightarrow \infty$)
- nulové ztráty usměrňovače

Dalším uvedeným předpokladem je třífázové můstkové zapojení usměrňovače připojené k transformátoru Y/y, z čehož dostáváme jednoduchý obdélníkový průběh proudu vyšších harmonických (obr 1.3). Hodnota I_d představuje velikost vyhlazeného proudu stejnosměrným obvodem usměrňovače [3].



Zdroj: [3]. Obr. 1.3 Idealizovaný průběh proudu usměrňovačem

V praxi se přirozeně nevyskytuje pouze jediné zapojení měničových transformátorů. Pro různá zapojení samotných měničů mohou být využity různé kombinace zapojení

primární a sekundární strany měničových transformátorů, vykazujících odlišné vlastnosti a velikosti amplitudy základní harmonické. Průběhy pro různá zapojení a kombinace transformátorů jsou uvedeny na obr 1.4 [3].

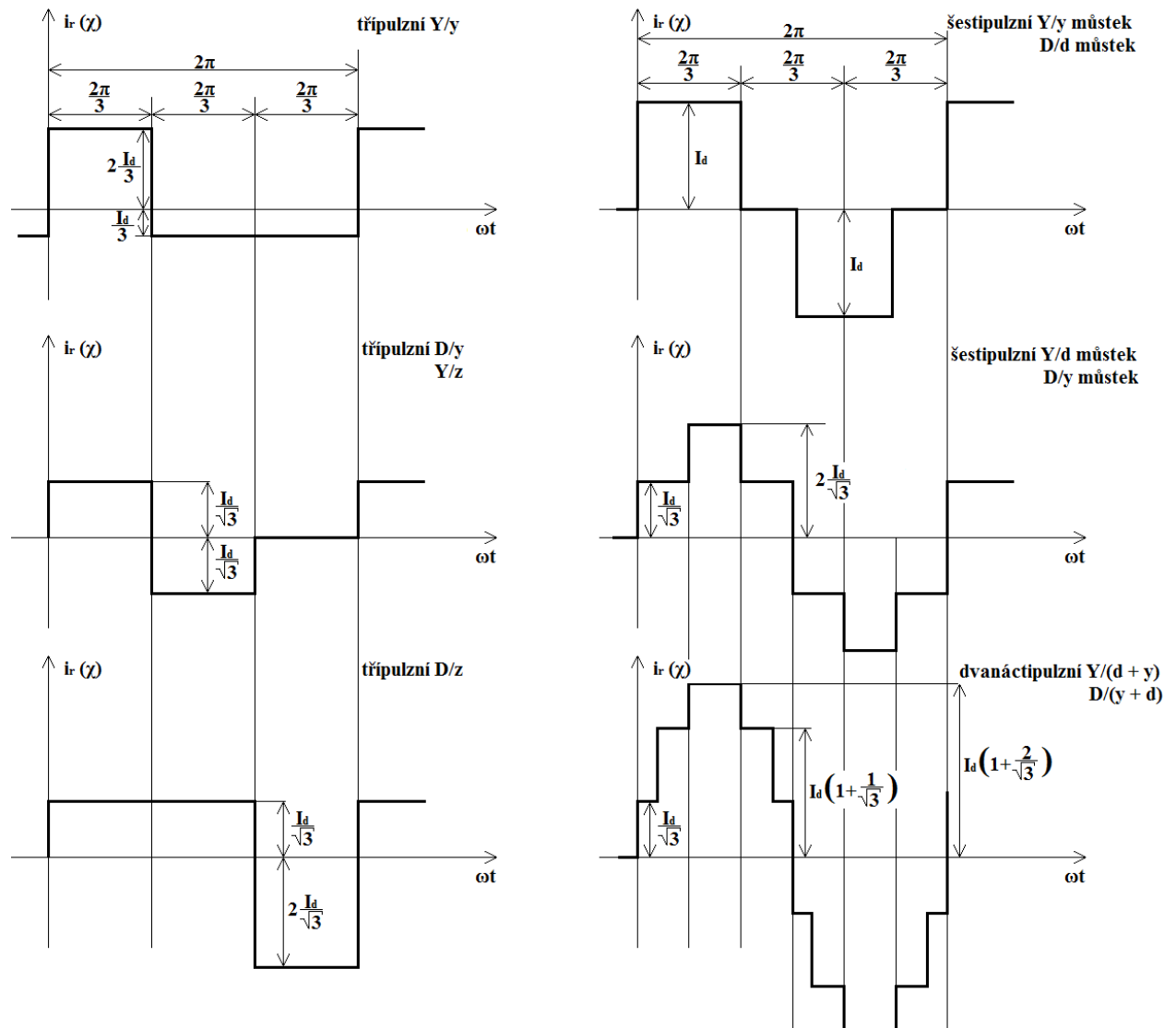
$$I_{1max} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \dots \text{pro třípulzní zapojení} \quad 1.3.1$$

$$I_{1max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \dots \text{pro šestipulzní zapojení} \quad 1.3.2$$

$$I_{1max} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \quad \dots \text{pro dvanáctipulzní zapojení} \quad 1.3.3$$

Zdroj: [3]. Velikosti amplitud základní harmonické pro různá zapojení

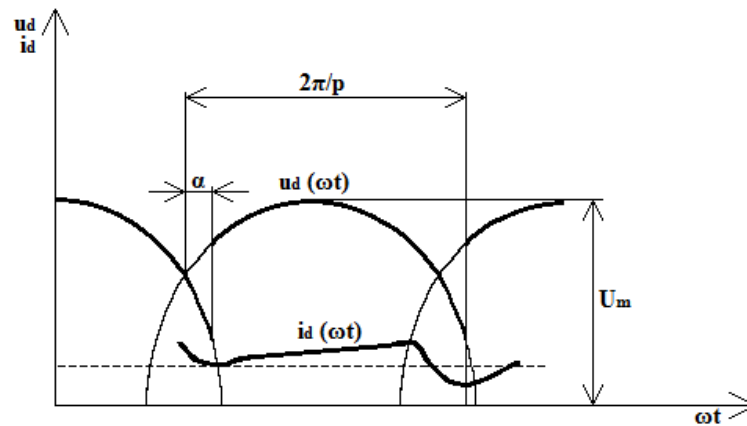
Průběhy proudu odebíraného ze sítě pro jednotlivá zapojení



Zdroj: [3]. Obr. 1.4 Průběhy proudu odebíraného ze sítě pro jednotlivá zapojení transformátorů

1.3.2 Usměrňovač jako proudový zdroj harmonických při uvažování reálných parametrů

Zahrneme-li do analýzy usměrňovače také vliv reálných hodnot R_s , L_s a U_i , nebude mít již odebíraný proud obdélníkový tvar, ale tvar dle obr. 1.5. Výpočet takto zdeformovaného proudu nelze provést analyticky a je třeba jej provést složením diferenciální rovnice [3].



Zdroj: [3]. Obr. 1.5 Průběh napětí a proudu trojimpulzního řízeného usměrňovače

Průběh proudu odebíraného usměrňovačem závisí na mnoha faktorech. Těmito faktory jsou vlastní zapojení usměrňovače, velikosti napájecího napětí, velikosti řídicího úhlu α a vlastnostech zátěže. Z hlediska těchto parametrů lze průběhy proudu rozdělit do čtyř skupin a na základě těchto skupin určit způsob jejich analýzy [3].

Idealizovaná průběh - Vzhledem k nárokům na velikost indukčnosti praxi nere realizovatelný průběh. Lze popsat amplitudovým zákonem, přičemž výpočet základní harmonické se provádí dle zapojení transformátoru a samotného měniče využitím rovnic 1.3.1, 1.3.2 a 1.3.3 [3].

Zvlněný průběh - V praxi nejčastěji se vyskytující průběh. Jedná se o průběh s mírným zvlněním a můžeme tedy při jeho výpočtu postupovat stejně jako v případě idealizovaného průběhu s drobnými, v praxi zanedbatelnými nepřesnostmi [3].

Přerušovaný proud - Jedná se o nehorší variantu z hlediska velikosti harmonických proudů u měničů velkých výkonů. Pro odhad velikosti tohoto proudu lze použít zobecněného amplitudového zákona (1.2.18). V oblasti malých výkonů budou malé též absolutní hodnoty harmonických a je tak třeba zhodnotit, zda je použití přesnějšího výpočtu skutečně nezbytné [3].

Mez přerušovaného proudu - Při velkém zvlnění proudu může dojít k tomu, že okamžitá hodnota proudu je v určitých okamžicích téměř nulová. Jedná se tedy o stav na hraně mezi přerušovaným a nepřerušovaným stavem, který lze dle závěrů v literatuře [3] popsat použitím zobecněného amplitudového zákona.

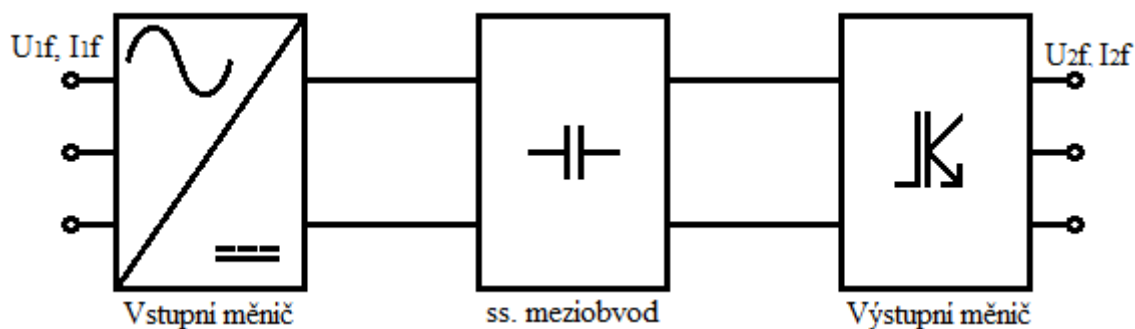
1.4 Nepřímé měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem

Díky rozvoji vypínatelných součástek nad verzí s proudovým střídačem se dnes v drtivé většině využívá nepřímých měničů kmitočtu. Dvojitou změnou elektrické energie dochází ke změně velikosti frekvence a napětí sítě na požadovanou hodnotu. Jedná se o nejdůležitější měniče pro pohony, jakými jsou především asynchronní a synchronní motory [2, 12].

Nepřímé měniče kmitočtu se skládají ze třech základních částí. Těmito částmi jsou vstupní měnič a napět'ový střídač odděleny stejnosměrným meziobvodem, což umožňuje řízení výstupní frekvence nezávisle na vstupní [3].

Tyto části mohou být případně doplněny vstupním filtrem, zlepšujícími stabilitu napětí stejnosměrného meziobvodu a výstupním filtrem pro úpravu průběhů výstupního napětí [2].

Při analýze průběhů proudu odebíraného měničem, si lze na základě závěrů použitého materiálu [3] měnič představit jako usměrňovač pracující do kapacitní zátěže, což způsobuje velké hodnoty harmonických proudů, které měnič ze sítě odebírá.



Zdroj: [3]. Obr. 1.6 Struktura nepřímého měniče kmitočtu s napět'ovým střídačem

Vstupní měnič

Jako vstupní měnič je používán třífázový můstkový usměrňovač. Může být proveden jako neřízený (diodový), nebo řízený. Nejčastěji je měnič na vstupu realizován jako neřízený diodový usměrňovač. Důvodem je lepší účinnost první harmonické (fázový úhel je shodný s úhlem řídicím) a ekonomické hledisko návrhu měniče. Nevýhodou neřízeného usměrňovače je možnost práce pouze v jednom kvadrantu bez možnosti rekuperace energie. Rekuperaci energie a zároveň odběr proudu s $\cos(\varphi)$ rovným jedné, umožňuje pulzní usměrňovač řízen pomocí PWM, ovšem jeho nevýhodou je větší složitost a tedy i cena [2; 12].

Stejnoseměrný meziobvod

Hlavní funkcí meziobvodu je vyhlazení zvlněného výstupního napětí z usměrňovače. To zajišťuje příčná kapacita. Indukčnost je pak zapotřebí pro vyhlazení střídavé složky proudu a také omezení proudových špiček během přechodových dějů, přičemž u měničů malých výkonů její úlohu plní rozptylová indukčnost transformátoru napájecí sítě [2; 12].

V případě, že je vstupním měničem neřízený usměrňovač je meziobvod doplněn též brzdým (vybíjecím) odporem, aby při rekuperaci nedošlo k proražení dielektrika kondenzátoru. Brzdový odpor je spínán tranzistorem a vybíjen přes antiparalelně připojenou usměrňovací diodu. Díky velkým tepelným rázům je zmíněný odpor připojován vně měniče.

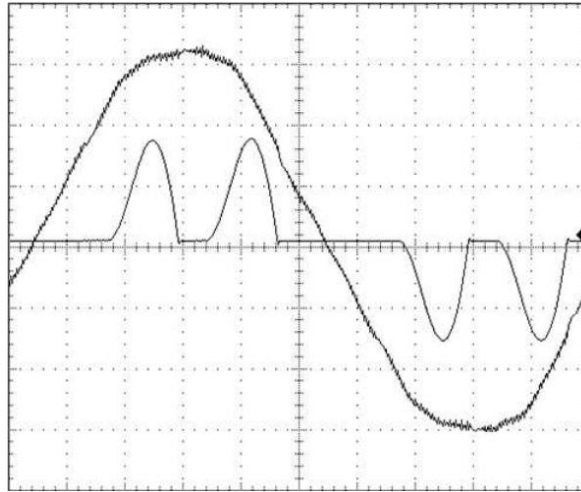
Střídač

Jedná se o rozhodující prvek měniče s ohledem na dodávané napětí a jeho frekvenci do zátěže, kterou ve většině případů představuje motor. Obvykle je proveden s vlastní komutací, může být ale také realizován jako napěťový střídač s vnější komutací, nebo bez komutace. Dle připojené zátěže lze střídač provést jako jednofázový, nebo třífázový. Řízení je nejčastěji šířkové pulsně modulované, ale lze se také setkat s řízením obdélníkovým [9].

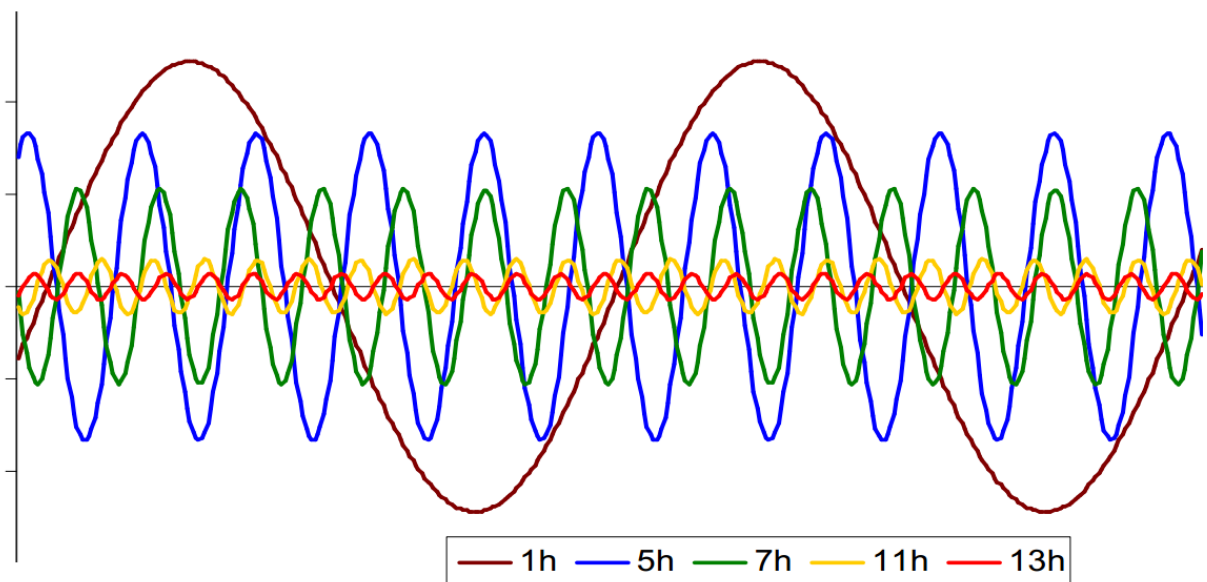
1.5 Harmonické proudy nepřímých měničů kmitočtu s napěťovým střídačem

Na deformaci odebíraného síťového proudu mají v případě nepřímých měničů kmitočtu rozhodující podíl usměrňovač a stejnosměrný meziobvod. Vliv střídače je v tomto případě minimální. Proto si lze průběh pro jeho analýzu představit z hlediska odběru harmonických proudů jako usměrňovač s připojenou kapacitní zátěží. Na příkladu průběhu proudu, který je odebírán třífázovým můstkovým usměrňovačem (viz. obr. 1.7) lze rozpoznat, že se jedná o proud neharmonický s velkou mírou zkreslení. Ve spektru tohoto

průběhu je nejen základní harmonická s kmitočtem 50Hz, ale též harmonické vyšších řádů (obr. 1.8). Rozklad jednotlivých složek harmonických je proveden do řádu 13 [6].



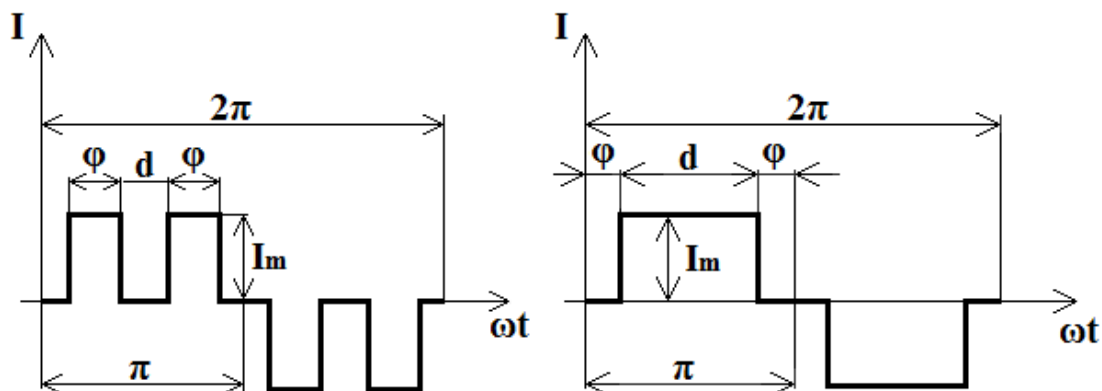
Zdroj: [6]. Obr. 1.7 Příklad proudu odebíraného třífázovým můstkovým usměrňovačem z napájecí sítě



Zdroj: [6]. Obr. 1.8 Rozklad proudu z obrázku 2.5

Požadujeme-li početně nenáročný vzorec pro zjištění velikosti vyšších harmonických ze skutečného proudu, či jistou paralelu k amplitudovému zákonu, dojdeme k závěru, že by takový způsob analýzy vedl k velice obtížnému postupu řešení. Z toho důvodu se provádí

zjednodušení průběhu skutečného průběhu proudu na průběh obdélníkový dle obr. 1.9, pro jednofázovou, či případně třífázovou variantu zapojení [3].



Zdroj: [3]. Obr. 1.9 Zjednodušený průběh proudu odebíraného ze sítě pro jednofázový a třífázový usměrňovač

Následné zjednodušení průběhu je tedy možné provést stejným způsobem jako v případě usměrňovače. Výsledkem uvedeným ve skriptech [3] je opět amplitudový zákon v obecném tvaru, přičemž základní harmonické jsou vyjádřeny následovně:

$$I_{1max} = \frac{4I_m}{\pi} \sin\left(\frac{d}{2}\right) \dots \text{pro jednofázové můstkové zapojení} \quad 1.5.1$$

$$I_{1max} = \frac{8I_m}{\pi} \sin\left(\frac{d}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \dots \text{pro třífázové můstkové zapojení} \quad 1.5.2$$

Zdroj: [3]. Vyjádření základní harmonické pro různá zapojení

Z obecného znění amplitudového zákona, kdy d představuje délku trvání pulzu, během něhož dochází k nabíjení kapacity, lze odvodit, že k dosažení co nejnižších hodnot harmonických proudů musí vedoucí dioda, případně vedoucí dvojice diod, vést co nejdéle. Toho lze snadno dosáhnout snížením kapacity kondenzátoru, což má ale za následek zvýšení zvlnění napětí stejnosměrného meziobvodu a kolísání jeho střední hodnoty [3].

Jestliže se je třeba zaměřit na chování měniče podrobněji, je třeba zvážit působení indukčnosti stejnosměrného meziobvodu. Důležitou vlastností cívky je schopnost udržovat svou energii hodnotu procházejícího proudu tak, aby nedocházelo k jejím skokovým změnám. Zahrneme-li do analýzy také indukčnost stejnosměrného obvodu, nemůže již

docházet k tak strmým změnám proudu, jako v případě obdélníkového průběhu.

1.5.1 Harmonické proudy nepřímé měniče kmitočtu se zařazenou indukčností

U dosud uvedených průběhů proudů lze počítat s okamžitou změnou velikosti proudu. Avšak již vlivem indukčnosti napájecí sítě, je třeba počítat s induktivním charakterem zátěže, nehledě na skutečnost, že je tlumivka často připojována stejnosměrného obvodu usměrňovače pro snížení zvlnění proudu [3].

Při úvaze nad chováním měniče se zařazenou indukčností je vhodné začít nejjednodušší variantou zapojení, kterou je jednofázový můstek s RLC zátěží. Výsledkem takové analýzy, popsané v literatuře [3], je diferenciální charakteristická rovnice 2. řádu. Charakter kořenů rovnice rozděluje řešení na 2 základní případy:

a) Aperiodický průběh

Je-li diskriminant charakteristické rovnice kladný, budou kořeny rovnice záporné různé reálné. Hodnota odporu zátěže je v takovém případě menší než hodnota kritického odporu a vlivem malého odporu je přechodný jev značně tlumený [3].

b) Kmitavý průběh

V tomto případě je diskriminant charakteristické diferenciální rovnice záporný a kořeny rovnice jsou přirozeně komplexně sdružené. Hodnota odporu zátěže je ve srovnání s velikostí kritického odporu větší a dle vlastních frekvence vzniklých kmitů se může průběh projevit jedním, či případně více kmity. V případě jednoho kmitu dojde k nabití kapacity a po zbytek periody je zmíněný proud nulový. Důvodem vzniku více kmitů je velká frekvence vlastních kmitů napětí na kondenzátoru, čímž dochází k jeho poklesu pod hodnotu napětí zátěže několikrát za periodu[3].

V případě, že bude diskriminant charakteristické rovnice nulový, budou kořeny rovnice stejné vícenásobné reálné a hodnota odporu zátěže bude shodná s hodnotou kritického odporu. V takovém případě se jedná o stav na mezi aperiodicity [3].

$$R_{krit.} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad 1.5.3$$

Pomocí závěrů a odvození pro jednofázové zapojení usměrňovače se zařazenou indukčností lze stejným způsobem analyzovat také častěji využívané třífázové můstkové zapojení. Na rozdíl od zapojení jednofázového je možné jednotlivé průběhy odebíraných proudů rozdělit do dvou podskupin. Jestliže během jednoho intervalu $2\pi/p$ nedojde k poklesu proudu odebíraného měničem k nule, jedná se o nepřerušovaný proud. Dojde-li k poklesu zmíněného proudu na nulovou hodnotu, hovoříme o proudu přerušovaném [3].

Na základě způsobu jakým se jednotlivé průběhy proudu projevují je v literatuře [3] provedeno rozdělení do následujících skupin:

- *Přerušovaný proud*
 - a) jeden kmit
 - b) více kmitů
- *Nepřerušovaný proud*
 - a) jeden kmit
 - b) více kmitů
 - c) aperiodický průběh

Nejčastěji se vyskytujícími průběhy odebíraného proudu měničem je průběh s přerušovaným proudem a jedním kmitem. Zmíněný průběh nastává pro velké hodnoty kapacity ve stejnosměrném obvodu měniče. Zařazením cívky o malé indukčnosti do stejnosměrného obvodu lze docílit kmitavého průběhu, případně vhodným navržením kondenzátoru a přidavné indukčnosti lze docílit nepřerušovaného proudu. Aperiodický průběh je z hlediska požadovaných hodnot kapacity a indukčnosti pouze teoretickým stavem [3].

1.6 Ostatní polovodičové měniče jako zdroje harmonických

Změn parametrů elektrické energie lze ovšem dosáhnout i s použitím jiných elektronických měničů než je usměrňovač, či nepřímý měnič kmitočtu s napětěvým střídačem. Z pohledu spotřebičů se silovými obvody zaměřenými na výkonovou elektroniku lze jako nejčastější zdroje harmonických proudů jmenovat následující měniče.

1.6.1 Střídavé měniče napětí

Střídavé měniče lze považovat za náhradu snižovacího transformátoru. Z hlediska výkonu se dále dělí na střídavé měniče napětí pro velký a malý výkon. U měničů velkých výkonů se jedná o ojedinělé dominantní případy v průmyslové síti, používané například pro

napájení elektrických pecí, nebo spouštění střídavých motorů velkých výkonů. V oblasti malých výkonů je zmíněných měničů využíváno zejména k regulaci svítidel, nebo tepelných spotřebičů [3].

Tvar proudu odebíraného měničem závisí především na úhlu řízení, dále na charakteru zátěže a v případě třífázového provedení také na jeho zapojení. Charakter proudu odebíraného měničem setedy může projevit jako přerušovaný, či naopak jako nepřerušovaný průběh. Přesná analýza měřených proudů odebíraných měničem je velice složitá. Z tohoto důvodu jsou k tomuto účelu v praxi využívány grafy, znázorňující závislost poměru procentuální velikostí harmonických vzhledem k harmonické základní, pro určitý typ zátěže. Tato zátěž je definována jako poměr R/Z , tedy činného odporu zátěže a celkové impedance [3; 4].

Protože však vlivem zvyšujícího se řídicího úhlu dochází k poklesu velikosti základní harmonické, procentní poměr vyšších harmonických se zvyšuje i v případě, že dochází ke snížení jejich absolutní velikosti. Proto jsou vyšší harmonické nejčastěji vyjadřovány v absolutní hodnotě, případně mohou také být vztaženy k celkové efektivní hodnotě proudu [3].

Při zjednodušení průběhů odebíraných proudů ze sítě, obdobně jako v případě usměrňovačů dle obr. 1.9 vpravo, lze pro určení základní harmonické proudu jednofázového zapojení použít vztah 1.5.1. Stejným způsobem bychom postupovali v případě třífázové varianty zapojení s nepřerušovaným proudem. V případě třífázového napětí přerušovaného proudu lze provést zjednodušení dle obr. 1.9 vlevo, přičemž velikost základní harmonické je určena vztahem 1.5.2. Hodnoty vyšších harmonických lze na základě znalosti harmonické základní určit pomocí obecného amplitudového zákona [3; 4].

1.6.2 Přímé měniče kmitočtu

Přímé měniče kmitočtu jsou užívány zřídka, především pro pohony velkých výkonů. Umožňují díky dvěma antiparalelně zapojeným střídavě pracujícím usměrňovačům vytvořit střídavé napětí na výstupu, s různou frekvencí vzhledem ke střídavému napětí vstupnímu, bez použití stejnosměrného meziobvodu [4].

Velikost charakteristických harmonických proudů lze za určitých zjednodušujících podmínek, jako je symetrická zátěž, výstupní sinusový proud, či nulové okruhové proudy zjistit pomocí amplitudového zákona. Hodnoty meziharmonických lze dle závěrů literatury

[4] zanedbat. Jestliže dochází k přeměně frekvence přímo, mohou se ve spektru odebíraného proudu vyskytovat nejen vstupní, ale též výstupní frekvence [4].

1.6.3 Nepřímé měniče kmitočtu s proudovým střídačem

Nepřímý měnič kmitočtu s proudovým střídačem je proveden takřka identicky, jako verze se střídačem napětí. Liší se pouze ve složení meziobvodu, který je tvořen obvykle tlumivkou, nikoli kondenzátorem. Proto se během komutace chová meziobvod jako proudový zdroj [4].

Při určování velikosti jednotlivých charakteristických harmonických proudů lze postupovat stejným způsobem jako v případě usměřovačů připojených k induktivní zátěži [4].

1.6.4 Pulzní usměřovače

Nevýhodou usměřovačů s vnější komutací je zhoršení účinnosti 1. harmonické, vlivem jejího fázového zpoždění a tedy vyšší odběr jalového výkonu. Navíc je proud odebíraný měničem neharmonický, což má za následek odběr deformačního výkonu [9].

Odběr jalového výkonu lze jednoduše omezit využitím usměřovače s vlastní komutací pomocí sektorového řízení, které sice umožňuje odběr 1. harmonické s dobrým účinností, avšak deformační výkon zůstává nepříjemně vysoký. Modernějším a také častěji používaným způsobem řízení je PWM, která umožňuje odběr téměř sinusový proud ve fázi se vstupním napětím. Pulzní usměřovače lze dle stejnosměrné zátěže rozdělit na proudové a napětíové [9].

Proudový pulzní usměřovač je obecně využíván pro napájení například stejnosměrných motorů a jiných běžných stejnosměrných zátěží, velký význam má také jeho jednofázová varianta v oblasti trakčních pohonů [9].

Napětíový pulzní usměřovač se často používá pro spojení s napětíovým střídačem, přičemž k jeho výstupním svorkám je připojen kondenzátor s téměř konstantním napětím. V takovémto zapojení jej lze využít například pro napájení asynchronního motoru. [9].

Z hlediska odběru harmonických proudů je dle závěrů použité literatury [4] uvedeno na základě provedených měření a simulací, že jde o měniče odebírající proud s dobrým účinností λ , přičemž dominantní velikost má 3. harmonická. Zmiňovanou nevýhodou v knize [4] je větší velikost charakteristických harmonických poblíž modulační frekvence. Co

se týče odkazu na samostatné normy, které by se pulzními usměrňovači zabývali, není v nich měnič individuálně popisován.

2 Zpracování a analýza naměřených dat

Jestliže roste počet měničů, je třeba počítat s nárůstem jejich vlivu na napájecí síť. Tato práce je zaměřena na rušení šířící se přímo napájecím vedením veřejné rozvodné sítě, tzn. nízkofrekvenční rušení [8].

Výchozím bodem pro tuto práci je tedy z hlediska zpracování a analýzy dat norma ČSN EN 61000-4-7ed. 2: Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-7: Zkušební a měřicí technika. Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich [8].

Nízkofrekvenční rušení definováno jako nepříznivé elektromagnetické působení s frekvencí nižší než 9 kHz. Protože je však měření prováděno do řádu harmonické $h=50$ definuje zmíněná norma prostředky pro měření složek napětí a proudu s frekvencí 0 až 2,5 kHz se zaměřením především na harmonické složky zmíněných veličin o násobcích síťového kmitočtu a jejich meziharmonické složky. Obvykle je ale s dostatečnou přesností prováděn rozbor pouze do řádu $h = 40$, tedy frekvence 2 kHz. Tato práce je však věnována výhradně problematice charakteristických harmonických v nízkofrekvenční oblasti. Proto zde nebude věnována pozornost měření nad rozsahem 2,5 kHz [4].

2.1 Úvod do problematiky měření harmonických

Jestliže je měřený průběh analogový, obsahuje nekonečné množství hodnot. Z důvodu dalšího zpracování měřených průběhů je nutno data nejdříve převést do digitální podoby, což obecně probíhá jejich diskretizací v čase, tedy vzorkováním. Toho lze dosáhnout hned několika způsoby. Pro vzorkování 2. druhu je to často metoda vzorkuj a podrž (sample and hold). Vždy je však nutno dodržet minimální vzorkovací frekvenci. Dle Nyquistova-Shannonova teorému musí být pro správnou rekonstrukci vzorkovací kmitočet roven minimálně dvojnásobku kmitočtu, jímž je vzorkovaný signál shora omezen [3].

Při nedodržení zmíněné podmínky dochází k tzv. aliasingu, tedy překrytí horní a dolní části spektra postranního pásma a původní signál již nelze obnovit. Jako opatření proti zmíněnému jevu je vstup vzorkovacího obvodu opatřen filtrem na bázi dolní propusti [5].

2.2 Zpracování dat z hlediska platné normy

Dle normy [7] a z ní vycházející literatury [4] lze na základě rozdílných charakteristik signálu rozlišovat jednotlivé průběhy dle jejich proměnlivosti na:

Kvazistacionární (pomalu proměnné) harmonické

Jsou typické pro neřízené usměrňovače s konstantním zatížením, či televizní přijímače. Měření účinků v rozvodné síti probíhá dlouhodobě. Doporučená šířka okna, uvnitř něhož probíhá analýza, odpovídá dle normy 16-32 násobku základní periody [4; 8].

Kolísající harmonické

Nejčastější typ, probíhá zejména u regulovaných pohonů, napájených řízenými usměrňovači. Kvůli rychlým změnám harmonických je nutná spojitá analýza signálu. Pro kolísající harmonické je v použité literatuře [4] doporučená šířka okna 16 period [4].

Rychle se měnící harmonické

Jde o změny nejen jednotlivých harmonických, ale též celých skupin. Jsou způsobeny zejména výkonovými měniči, či spínacími ději. Šířka okna doporučená normou je 4-8 násobek periody měřeného signálu [4; 8].

Signál se může případně také projevat v podobě meziharmonických, či jiných rušivých složek [4; 8].

Samotné měření a zpracování dat lze následovně provést využitím A/D převodníku a zpracovat pomocí odpovídajícího programového vybavení PC. Dalším způsobem je použití osciloskopu, ovšem s nutností další analýzy v případě, že není měřicí přístroj odpovídajícím způsobem vybaven. Poslední a zároveň nejnákladnější variantou je použití analyzátoru, jejichž podstatnou výhodou je možnost současného zpracování dat během měření [4].

2.2.1 Třídy přesnosti

Přístroje pro měření harmonických veličin jsou z hlediska normy ČSN EN 61000-4-30 rozděleny do třech tříd. Jedná se o třídy A, B a S. Pro určení shody s normou, či ověření platnosti smluvních závazků mezi odběratelem a dodavatelem je určena třída A. Jedná se o nejdůležitější třídu z hlediska přesnosti a spolehlivosti změřených výsledků. Třída B slouží díky značné benevolenci zmíněné normy především ke zjišťování orientačních výsledků bez větší spolehlivosti. Pro nově zavedenou třídu S, využívanou především pro statistické aplikace, jsou normou přesně definovány požadavky bez nejistot třídy B [3;10].

2.2.2 Intervaly měření

Pro rozlišení definovaných časových intervalu měření dle platné normy je třeba

zavést následující základními pojmy:

Efektivní měřicí čas:

Jde o dobu, po kterou je měřený signál skutečně zaznamenáván, tedy dobu do které nejsou započítány mezery mezi jednotlivými časovými okny [3].

Čas sledování:

Jedná se o časový úsek zahrnující efektivní měřicí čas včetně mezer mezi jednotlivými měřeními [3].

V použité literatuře [3; 4] jsou následně na základě normy doporučené intervaly, jenž jsou následně zpracovány nejčastěji pomocí uvedené DFT, případně FFT analýzy a tvoří jeden vzorek časové závislosti velikosti jednotlivých harmonických. Pro jednotlivé intervaly není striktně nařízena přesná doba měření a uvedené časy měření jsou doporučené orientační časové úseky. Používanými časovými intervaly jsou:

- velmi krátký časový interval (T_{vs}) : 3 s
- krátký časový interval (T_{sh}) : 10 min
- dlouhý interval (T_l) : 60 minut
- jednodenní interval (T_d) : 1 den
- jednotýdenní interval (T_{wk}) : 1 týden

Velmi krátký časový interval je důležité brát jako efektivní měřicí čas a měřit jej bez mezer. Zmíněný interval nesmí přesáhnout 10 s. V případě krátkého intervalu je třeba za uvedenou dobu měření získat minimálně 100 hodnot. Z měřících intervalů je pro další zpracování následně určena maximální, případně efektivní hodnota harmonické [3].

Z hlediska normy je nutno pro frekvenci 50Hz dodržet odpovídající šířku okna, v případě kolísajících harmonických se nejčastěji využívá délka odpovídající desetinásobku základní periody ($T_N \sim 200\text{ms}$) [7].

Při použití pravoúhlého okénka je nutností synchronizace vzhledem k základnímu kmitočtu napájecí soustavy. V případě ztráty synchronizace lze použít nejčastěji Hanningovo okénko, či případně jiné, jehož výběr vyplývá z nároků na přesnost, či potřeby rychlého zpracování dat [4].

2.2.3 Zpracování výsledků analýzy

Pro uvedených 10 period je provedena FFT, případně DFT analýza. V případě 3s intervalu je po provedení odpovídající analýzy docíleno patnácti hodnot. Z těchto hodnot je následně vyvozena průměrná hodnota měřené harmonické dle vztahu 2.2.1, kde M je počet

všech zaznamenaných hodnot a C_h hodnoty zaznamenaných velikostí měřené harmonické. Z tohoto pohledu lze tedy jednotlivé vzorky vnímat jako okamžité efektivní hodnoty, jejichž proměnlivost závisí na čase, případně také hodině, či ročním období [4].

$$C_{hvs} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M C_{hk}^2}{M}} \quad 2.2.1$$

Data a jejich následná analýza je měřena v krátkých intervalech, během dlouhé doby jejich pozorování (viz. kap. 2.2.2). Například v případě jednotýdenního intervalu může být pořízeno hned několik efektivních hodnot během jediné minuty. V takovém případě vede analýza jednotlivých harmonických v časové oblasti na desítky tisíc zaznamenaných hodnot, čímž se výsledná analýza stává velice nepřehlednou.

Používanými aparáty pro zpracování dat dle normy [7] a použité literatury [4] je ze statistického hlediska možné určit střední hodnotu harmonické (2.2.2) a její výběrovou směrodatnou odchylku (2.2.3). Jestliže budeme uvažovat normální rozložení naměřených velikostí harmonických, lze dokázat, že v rozmezí $\pm 3s$ bude ležet 99,73% naměřených vzorků [4].

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_k}{k} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \quad 2.2.2$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (x_i - x)^2} \quad 2.2.3$$

V souladu s použitou literaturou [4], vycházející z platné normy [7], je možné použít také 95% percentil. Toho lze dosáhnout tím, že pro vypočtenou střední hodnotu zvolíme horních a dolních 2,5% hodnot, které tak nebudou ve výsledku zahrnuty. Horní a dolní pásmo 95% percentilu je určeno koeficientem v tabulkách pro kvantily normovaného normálního rozdělení, či numericky v programu M. Excel. V případě normálního rozdělení se obě metody shodují a střední hodnota určena aritmetickým průměrem je shodná s mediánem. Součin odchylky a zmíněného koeficientu pro daný percentil je uveden ve vztahu 2.2.4, respektive 2.2.5.

$$x_{0,975} = \mu + \sigma \cdot (1,96) \quad 2.2.4$$

$$x_{0,025} = \mu + \sigma \cdot (-1,96) \quad 2.2.5$$

příčemž:

$$\mu \cong \bar{x}, \quad 2.2.6$$

$$\sigma \cong s$$

Z hlediska energetiky je uvedený percentil vnímán jako statistický aparát pro ověření, zda došlo k překročení stanovených mezí, či nikoli. Například pro síťové napětí 230 V (kde je určena toleranční mez +10 %, -6 %) je zkoumáno, zda právě 95% hodnot spadá do určeného pásma. V případě proudu je postup podobný, avšak s tím rozdílem, že je zjišťováno, zda 95% všech hodnot spadá pod normou stanovenou hranici. Otázkou však zůstává, zda 5% vyloučených z analýzy nemůže svou velikostí negativně ovlivňovat dění v síti. Cílem této práce však zkoumání zaběhlých standardních postupů, ale hledání nových pohledů na vlastnosti soustavy zatížené harmonickými proudy.

3 Základní statistika měřených dat

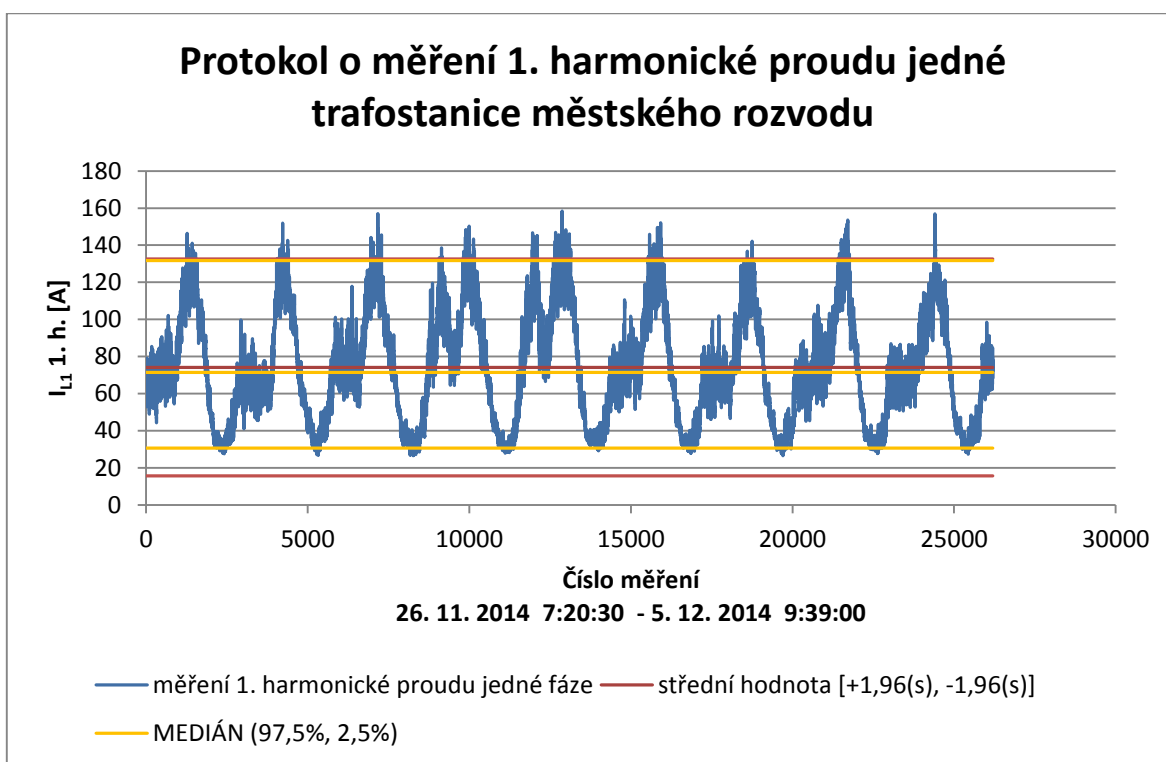
Tato kapitola je zaměřena na vyhledávání různých závislostí výsledků měření odběrů harmonických proudů. Data obdržena pro tuto práci byla pořízena katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni. Samotné měření probíhalo v rámci diplomové práce [14] od Bc. J. Pikouse. Doba měření byla přibližně 9 dní, přičemž záznam efektivních hodnot měřených veličin probíhal ve 30 sekundovém intervalu. Celkový počet zaznamenaných hodnot jednotlivých harmonických proto přesahuje 26 tisíc změřených vzorků. V takovém případě je třeba se zaměřit na vyhledávání metod pro zhodnocení takto velkého počtu výsledků měření. Vodorovná osa je vyjádřena v počtech jednotlivých hodnot, každá hodina měření přirozeně odpovídá 120 naměřeným hodnotám a každý den je tedy pořízeno 2880 hodnot.

3.1 Záznam změřených efektivních hodnot harmonických proudů v čase

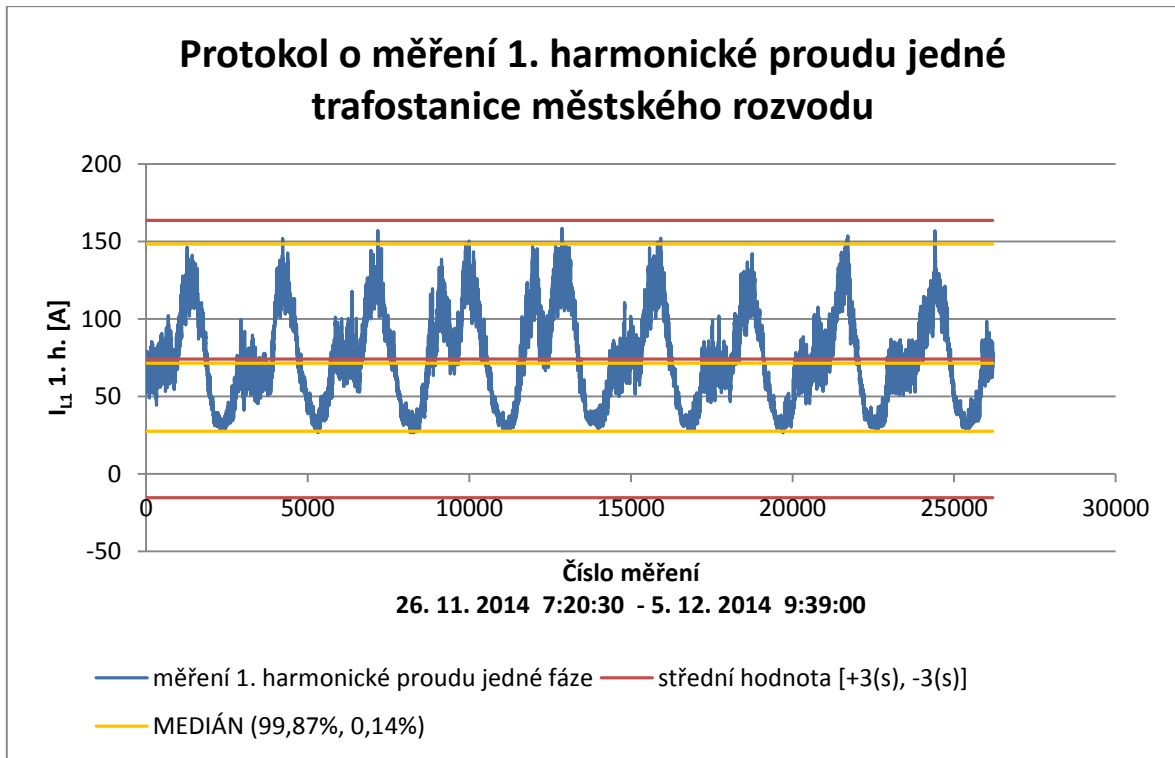
Na základě porady s vedoucím práce prof. Ing. Kůsem, CSc. a matematickým odborníkem v oblasti statistického zpracování dat Doc. Ing. Tůmovou, CSc., je nejdříve

proveden grafický rozbor jednotlivých složek výkonu a efektivních hodnot harmonických proudů jedné fáze v čase pro celé 9 denní měření.

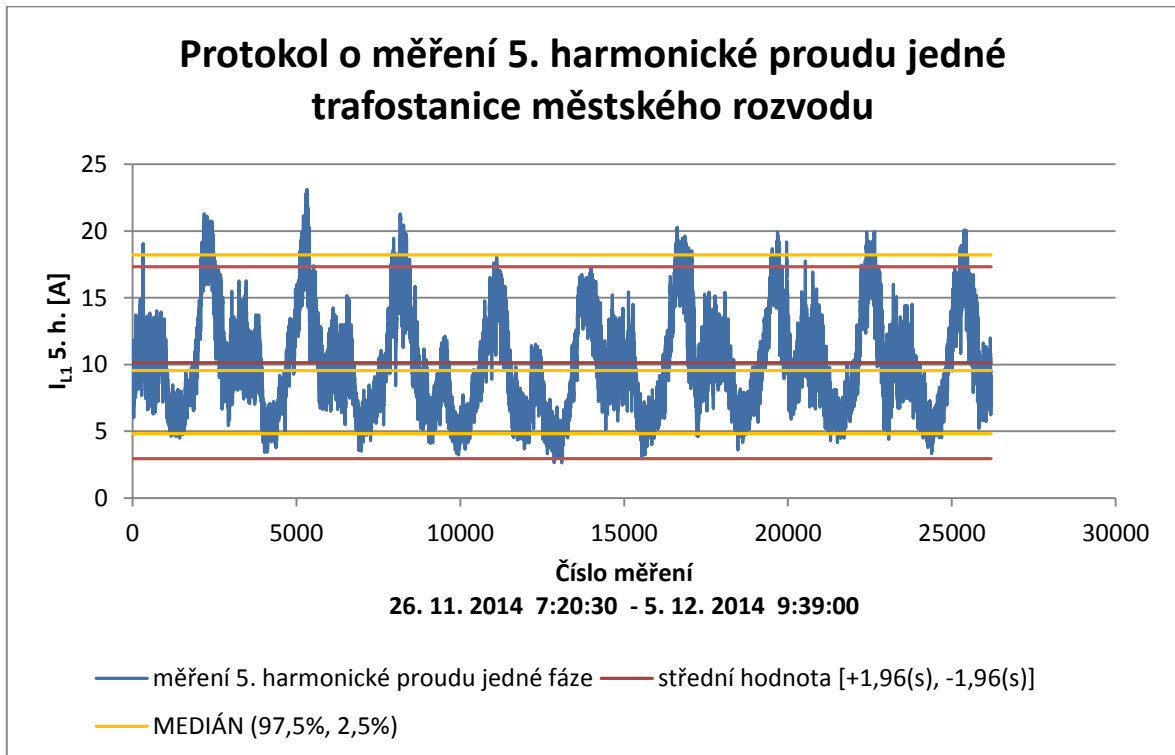
Jednotlivé hodnoty jsou zpracovány dle popisu uvedeném v kap. 2.2.3 katedrou KEV. Uvedené časové závislosti jsou provedeny pro 1., 5. a 15. harmonickou proudů jedné fáze, dále pro činný a deformační výkon stejné fáze. Pro zmíněné veličiny byl provedena střední hodnota určená aritmetickým průměrem, která slouží jako odhad oblasti hodnot s největší četností v případě normálního rozdělení. Dále je proveden 95% a 99,73% kvantil pomocí dle vzorce 2.2.4 a 2.2.5, kde μ představuje zmiňovanou střední hodnotu a σ rozptyl, který je určen střední kvadratickou odchylkou dle vztahu 2.2.3. Tyto kvantily jsou následně porovnávány s kvantily stejnými, provedenými numericky programem M. Excel, přičemž střední hodnota je porovnávána s numericky určeným mediánem. V rámci lepší přehlednosti je 99,73% kvantil uveden pouze pro 1. harmonickou proudů. Stejně percentily jsou pro ostatní měřené veličiny velice podobné.



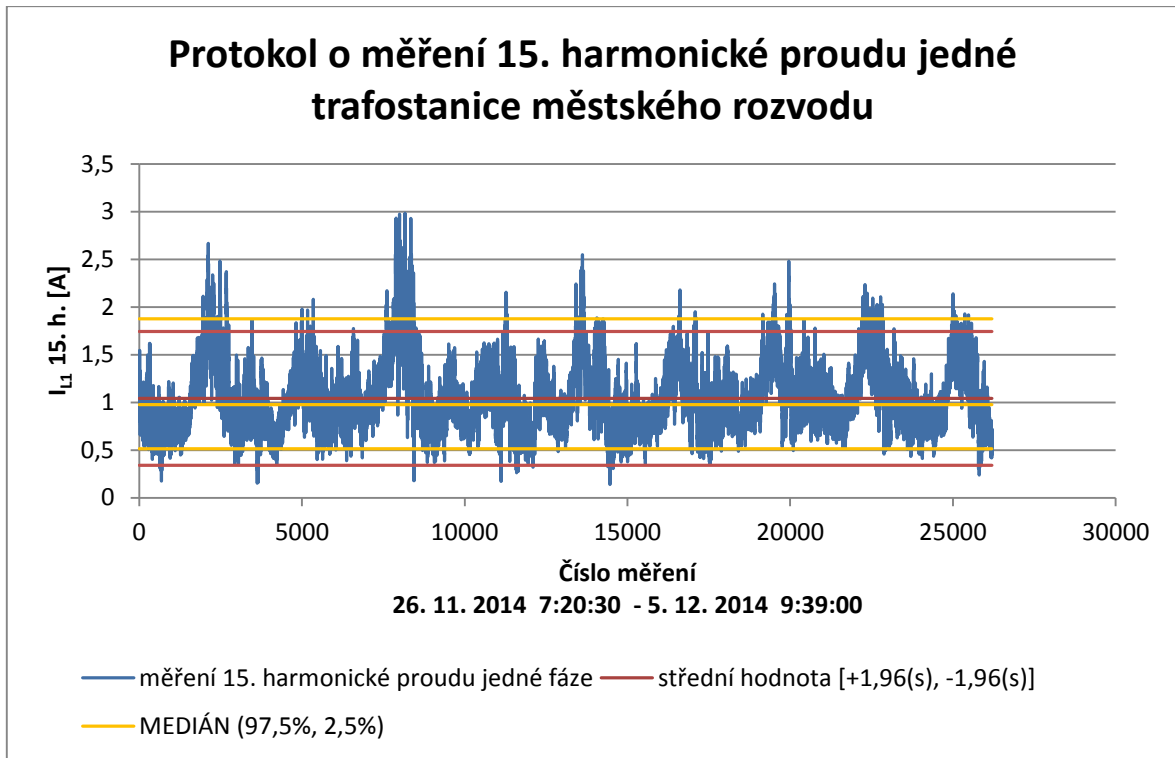
Obr. 3.1 Protokol o měření proudů 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



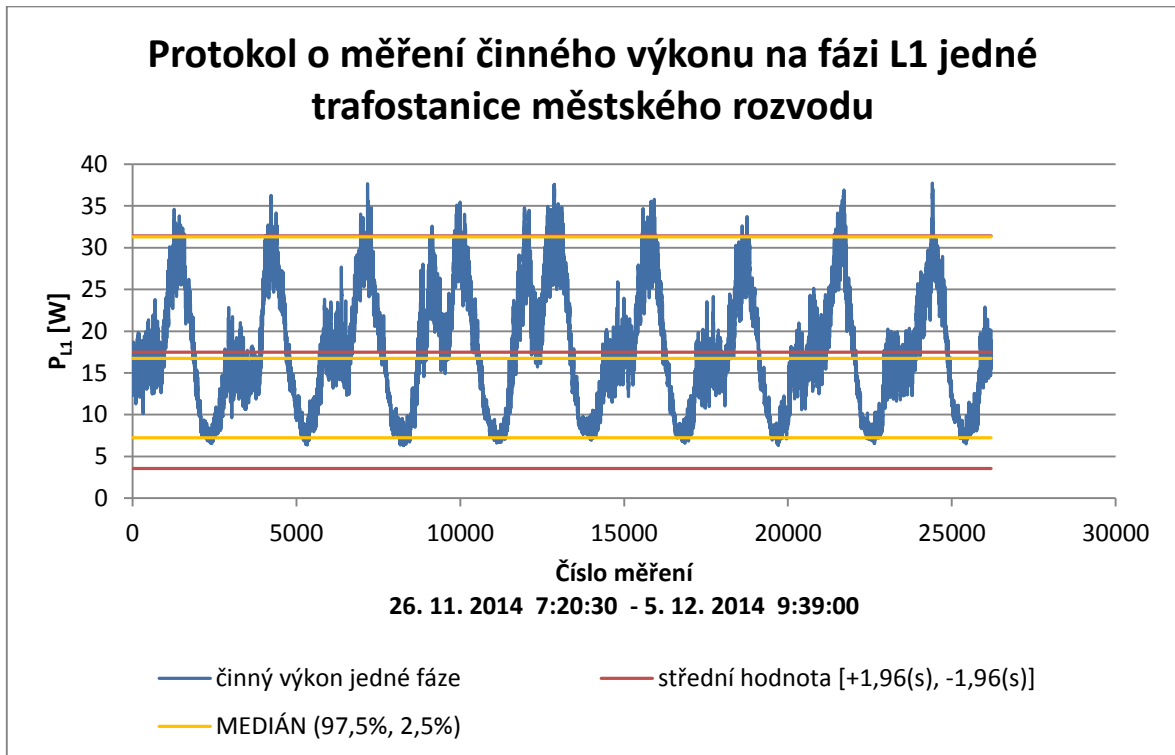
Obr. 3.2 Protokol o měření proudu 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 99,73% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



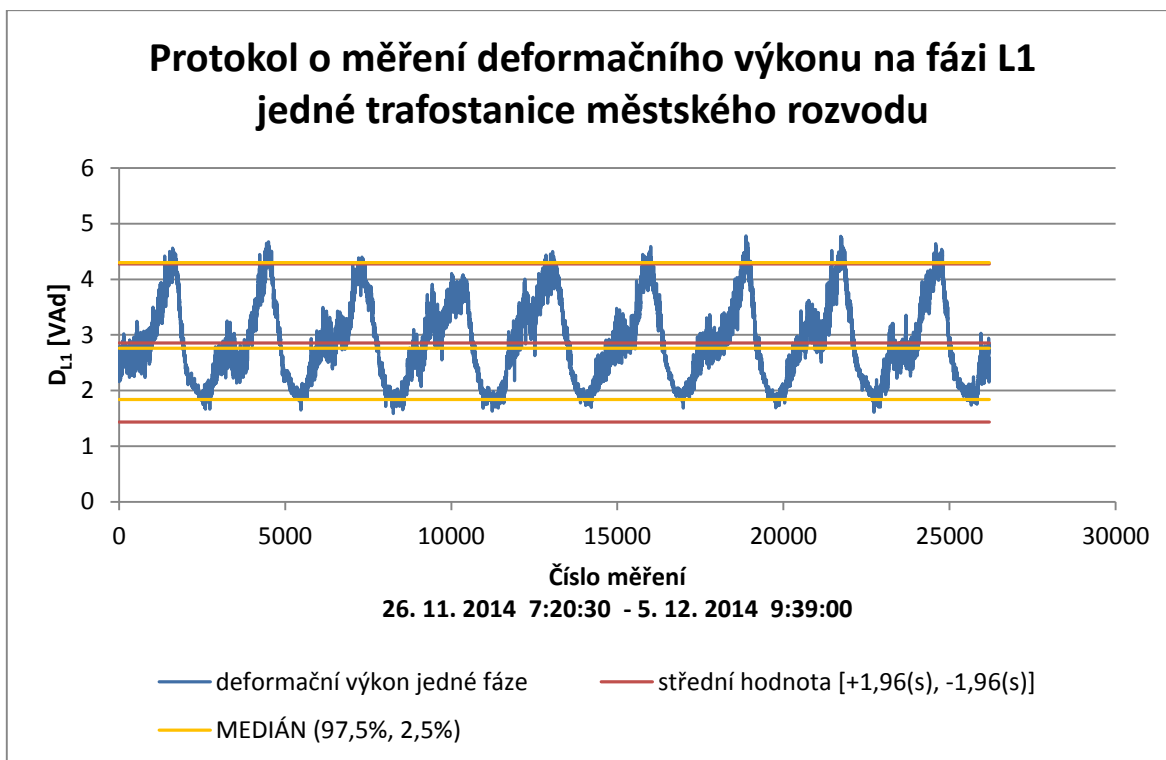
Obr. 3.3 Protokol o měření proudu 5. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



Obr. 3.4 Protokol o měření proudu 15. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



Obr. 3.5 Protokol o činného výkonu jedné fáze jedné trafostanice městského rozvodu (95% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



Obr. 3.6 Protokol o deformačního výkonu jedné fáze jedné trafostanice městského rozvodu (95% kvantil, 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)

Z celé série obrázků je na první pohled vidět proměnnost v odběru jednotlivých harmonických a výkonů v čase. Lze tedy již od pohledu rozpoznat jednotlivé dny a také denní dobu dle velikosti odběru. Zajímavostí je, že maxima jednotlivých harmonických nastávají v různý čas. Zatímco minima 1. harmonické pro jednotlivé dny nastávají zhruba v období mezi 1. a 4. ranní hodinou, minima 5. harmonické se projevují mezi 4. a 9. odpolední hodinou a mezi 1. a 4. ranní hodinou nastávají její maxima. Maxima průběhu 1. harmonické se projevují především v období od půl páté, do půl deváté večer, tedy v dobu kdy je odběr 5. harmonické minimální. Je tedy zřejmé, že odběr 5. harmonické se v čase mění opačně vzhledem k harmonické 1. Stejná situace nastává i v případě 15. harmonické, jejíž průběh je v čase proměnný podobným způsobem jako 5. harmonická.

Dalším zajímavým faktem je viditelná závislost činného výkonu na 1. harmonické proudu, tvar činného výkonu téměř přesně kopíruje tvar proudu 1. harmonické a doba jeho maxima a minima se s 1. harmonickou poměrně přesně shoduje. Velice podobně se s odběrem 1. harmonické mění též deformační výkon. Je tak možné sledovat dominantní vliv velikosti 1. harmonické na oba zmíněné výkony.

Velkým překvapením je nenormální rozdělení zpracovávaných hodnot, způsobené časovou nestálostí měřených veličin. Důkazů, že se nejedná o Gaussovo rozdělení, je

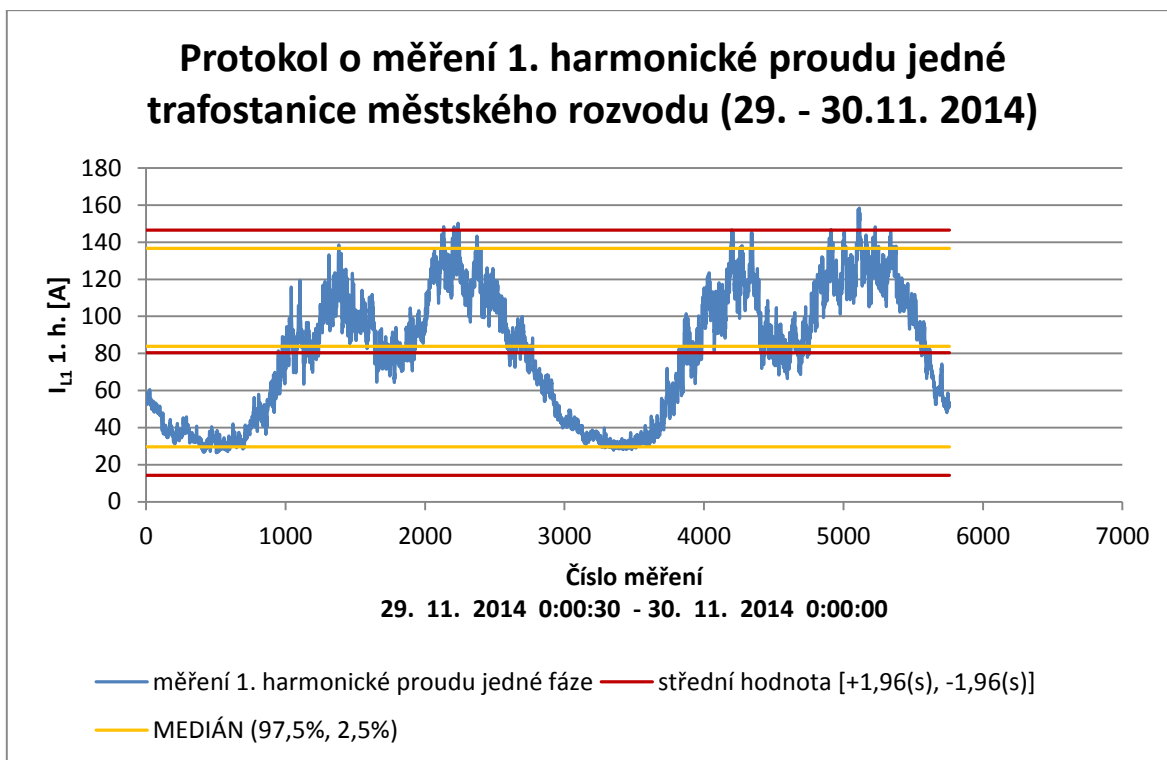
patrných hned několik. V případě normálního rozdělení by střední hodnota, dána aritmetickým průměrem odpovídala provedenému mediánu. Dále lze také pozorovat, že ani v případě kvantilů realizovaných pomocí střední hodnoty a rozptylu, nedochází ke shodě s kvantily provedenými numericky, zejména u spodního pásma. Z hlediska charakteristiky polohy tedy ve střední hodnotě určené aritmetickým průměrem nenastává poloha s největší četností. Stejně tak z hlediska charakteristiky variability nespadá 95% hodnot do pásma ohraničeném střední hodnotou $\pm 1,96s$. V případě realizace 99,73% kvantilu je spodních hranice 0,14% kvantilu pro normální rozdělení určena koeficientem $-3s$, avšak při dané kolísavosti hodnot v čase, je zmíněná spodní hranice v oblasti záporných hodnot, což je nesmysl a tedy jeden z důkazů nestandardního rozdělení hodnot.

S ohledem na rozsah bakalářské práce není cílem určit, o jaké rozdělení se jedná, pouze hledat nové způsoby pohledu na problematiku chování soustavy zatížené zdroji harmonických proudů.

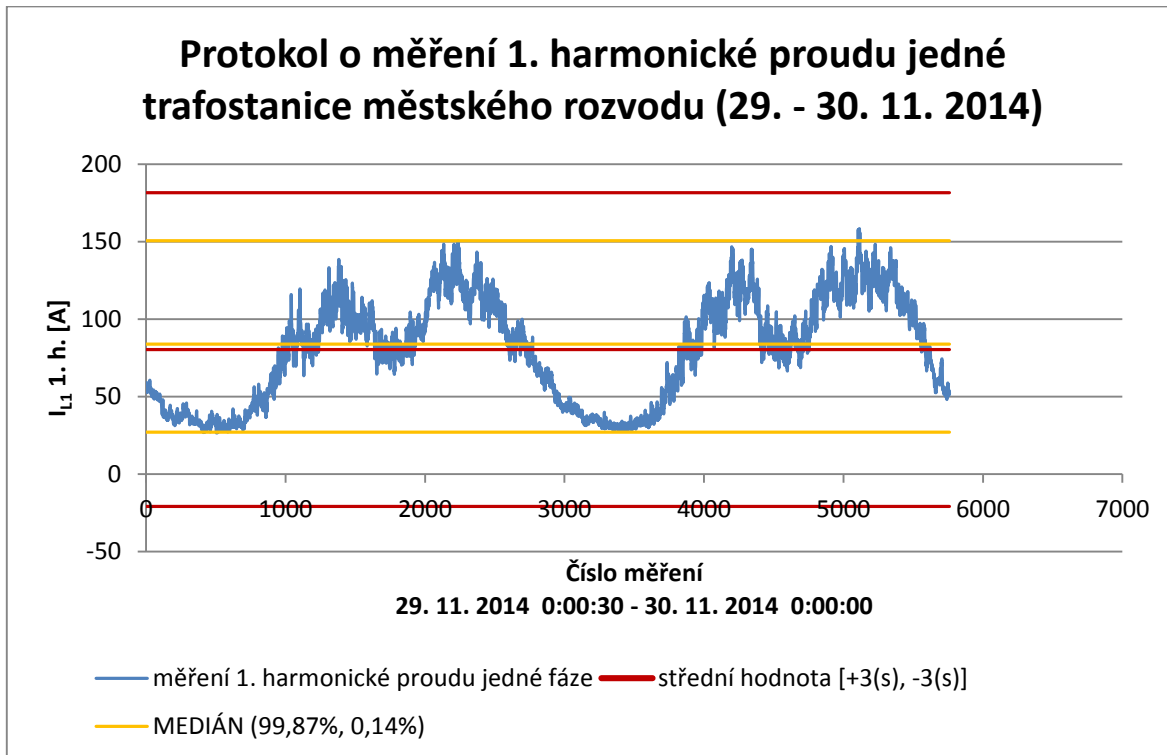
3.2 Porovnání velikostí efektivních hodnot harmonických proudů pro různé časové okamžiky

Odběr domácností závisí na mnoha okolnostech, nejvýznamnějšími faktory je čas, tedy konkrétní část dne, týdne a ročního období. S měnicím se odběrem elektrické energie dochází přirozeně také ke změnám velikosti odebíraných harmonických proudů. Jestliže probíhá měření v rámci celého týdne, či případně kratších časových úseku, lze dopad ročního období na proměnlivost dat zanedbat. Nabízí se však možnost srovnání naměřených dat během pracovního dne a dat pořízených během víkendu.

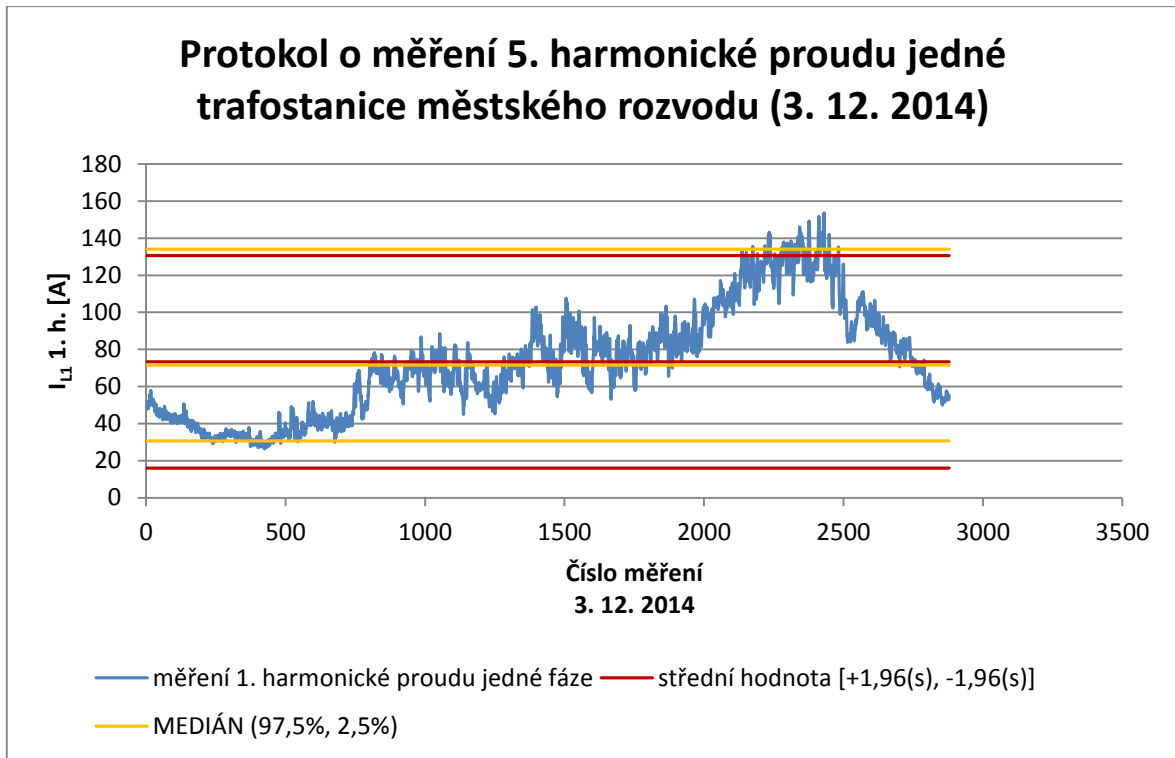
V následujících grafech jsou proto uvedeny efektivní hodnoty 1., 5. a 15. harmonické během víkendu a během jednoho pracovního dne. Dále jsou zde vyznačeny hodnoty příslušných kvantilů, stejně jako v kap. 3.1.



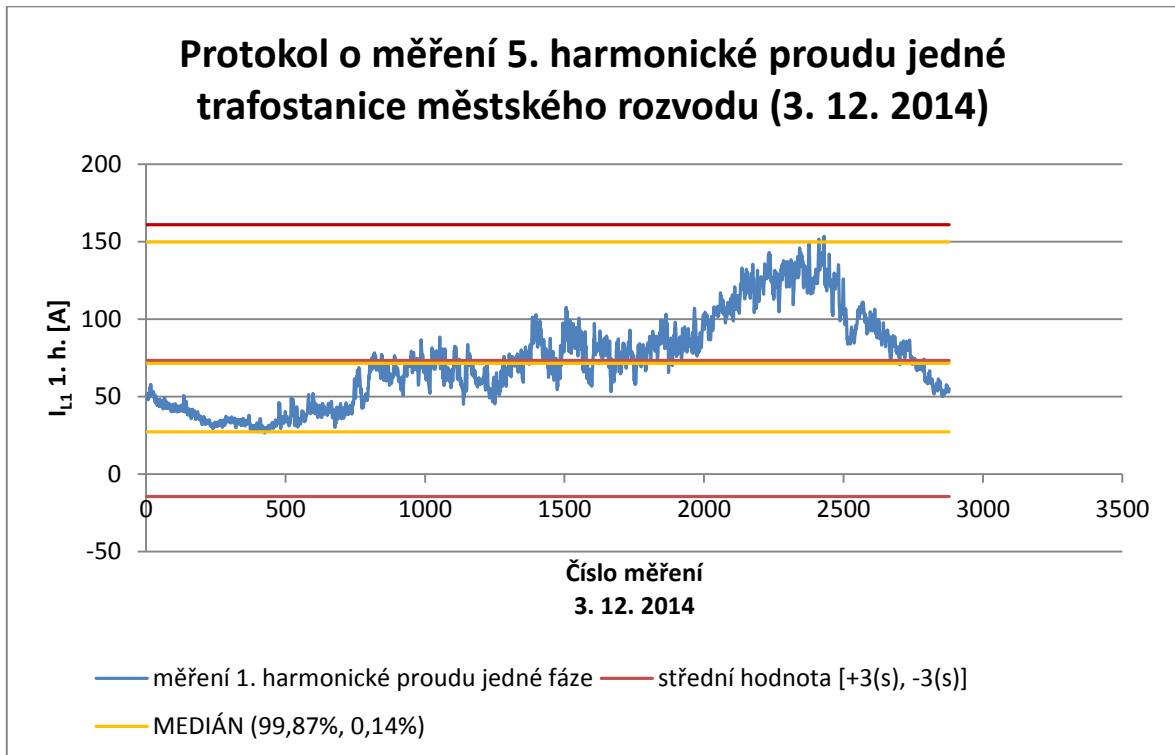
Obr. 3.7 Protokol o měření proudu 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, víkend 29. -30. 11. 2014)



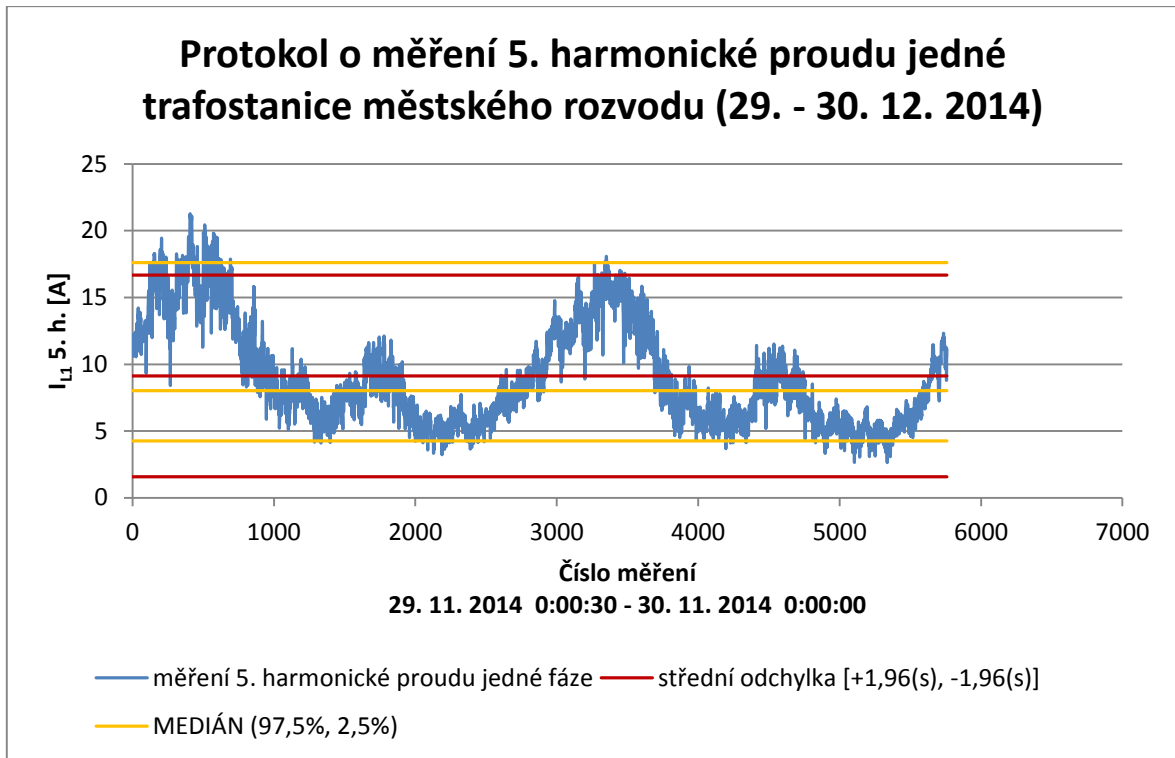
Obr. 3.8 Protokol o měření proudu 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 99,73% kvantil, víkend 29. - 30. 11. 2014)



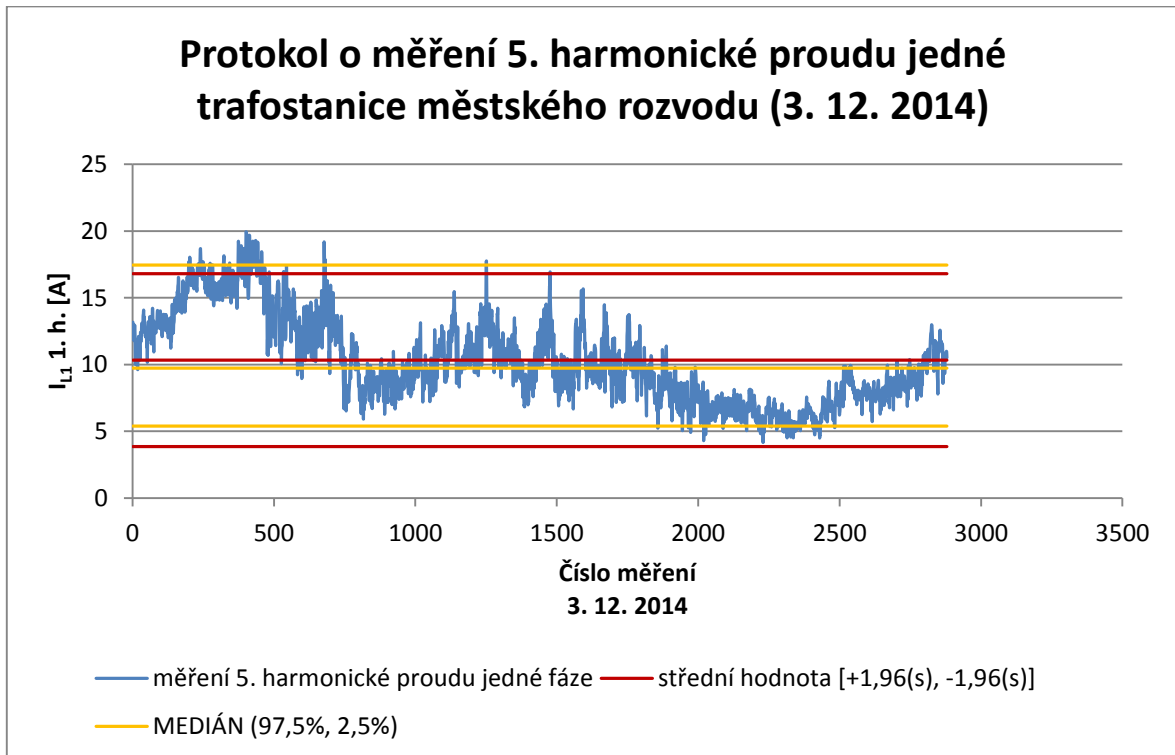
Obr. 3.8 Protokol o měření proudu 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, středa 3. 12. 2014)



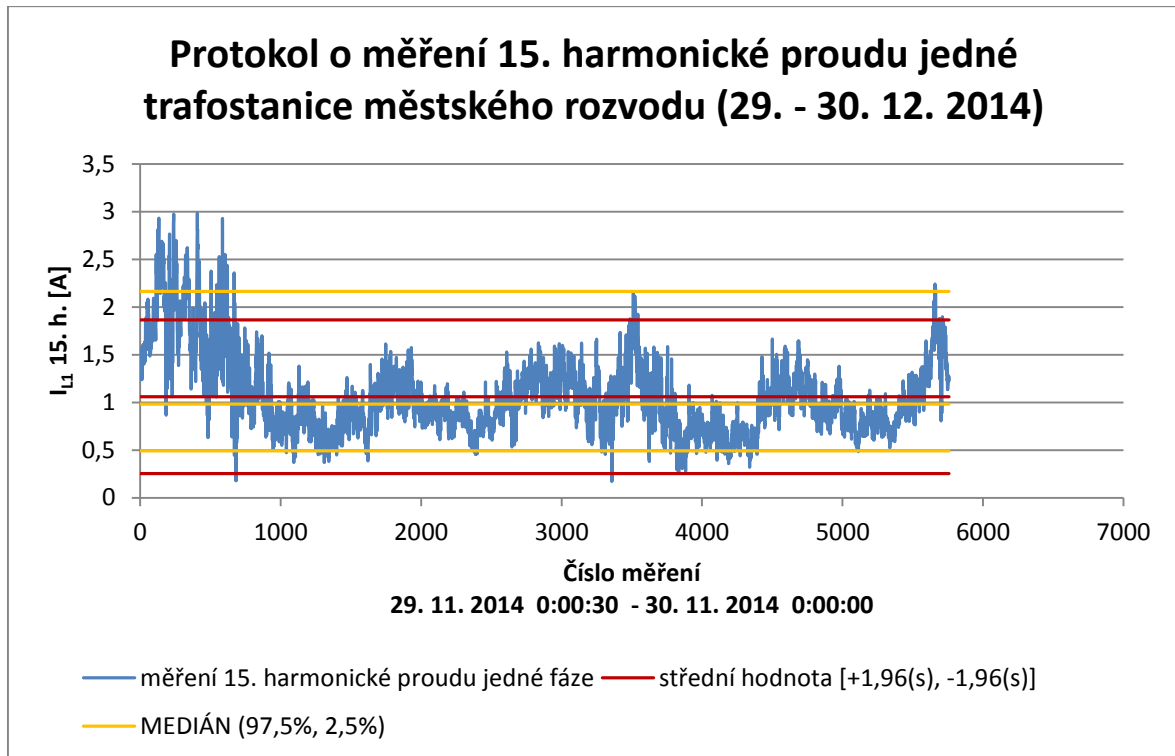
Obr. 3.10 Protokol o měření proudu 1. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 99,73% kvantil, středa 3. 12. 2014)



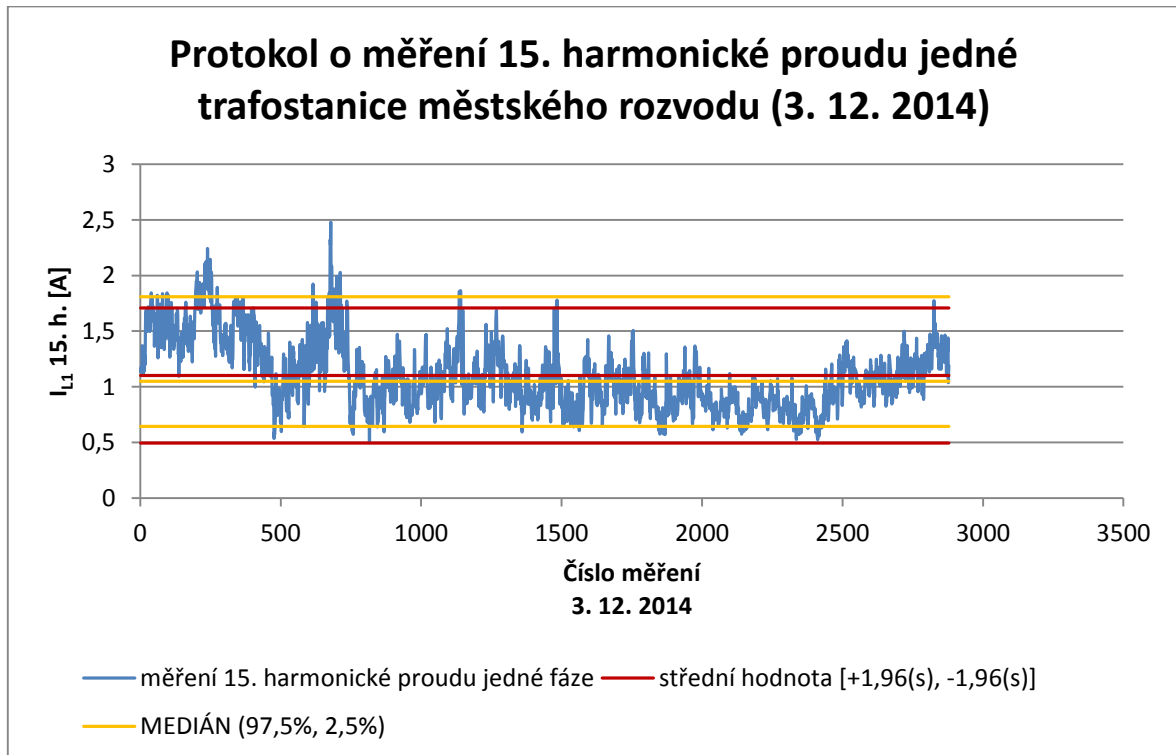
Obr. 3.11 Protokol o měření proudu 5. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, víkend 29. - 30. 11. 2014)



Obr. 3.12 Protokol o měření proudu 5. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, středa 3. 12. 2014)



Obr. 3.13 Protokol o měření proudu 15. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, víkend 29. - 30. 11. 2014)



Obr. 3.14 Protokol o měření proudu 15. harmonické jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , 95% kvantil, středa 3. 12. 2014)

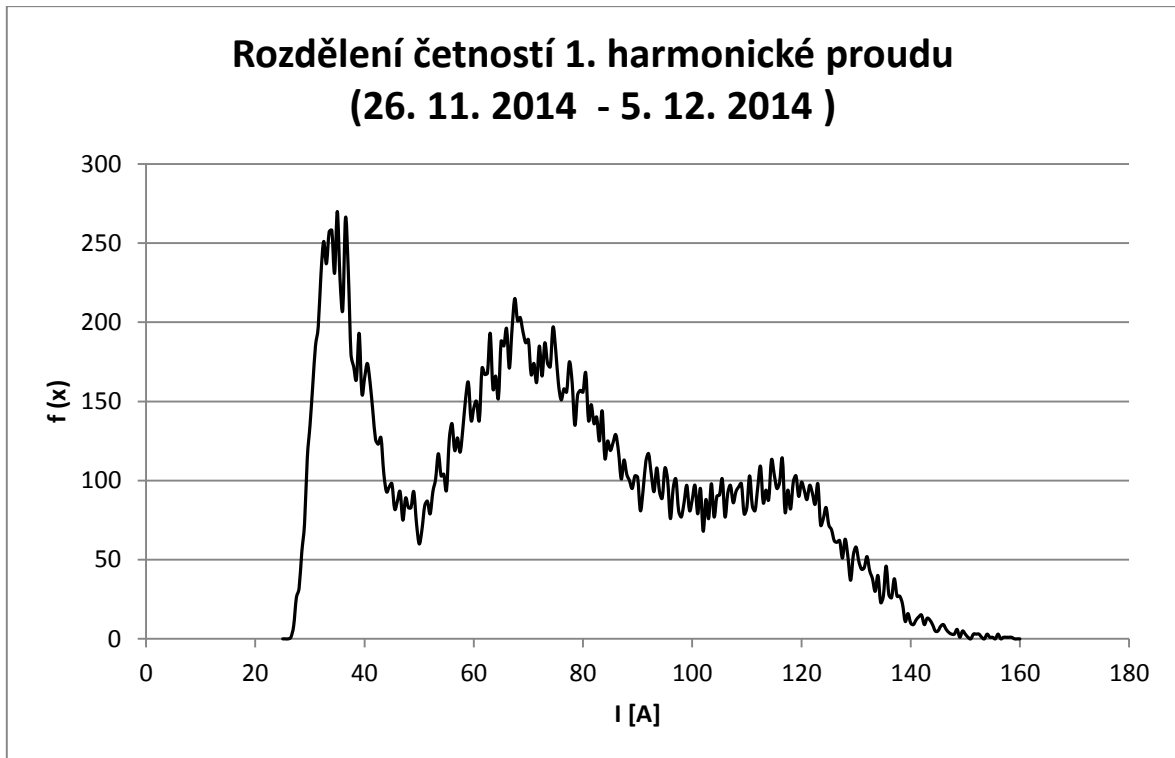
Z uvedených průběhu plyne, že též pro jednotlivé dny v týdnu nevykazují efektivní hodnoty harmonických v časežádným běžně používaným rozdělením. Kvantily určené koeficienty pro normální rozdělení se tedy s kvantily provedenými numericky opět neshodují a lze též pozorovat stejnou proměnlivost vyšších harmonických (5. a 15.) vůči harmonické 1. Čili v období maxima 5. a 15. harmonické přibližně nastává minimum harmonické první a naopak. Závěry uvedené v kap. 3.2 tedy platí pro všechny dny v týdnu.

Kvantily určené pro normální rozdělení jsou svou velikostí v oblasti horního pásma (95%, 99,73% u 1. harmonické) poměrně podobné kvantilům stanoveným numericky. Kvantily určující pásmo dolní (2,5%, 0,14% u 1. harmonické) vykazují již odlišnost podstatně větší. Z uvedených průběhu 1. harmonické pro stejné období, avšak různé kvantily, lze tedy s jistotou říci, že čím více se vzdalujeme mediánu, tím více rozstup zmíněných hodnot roste.

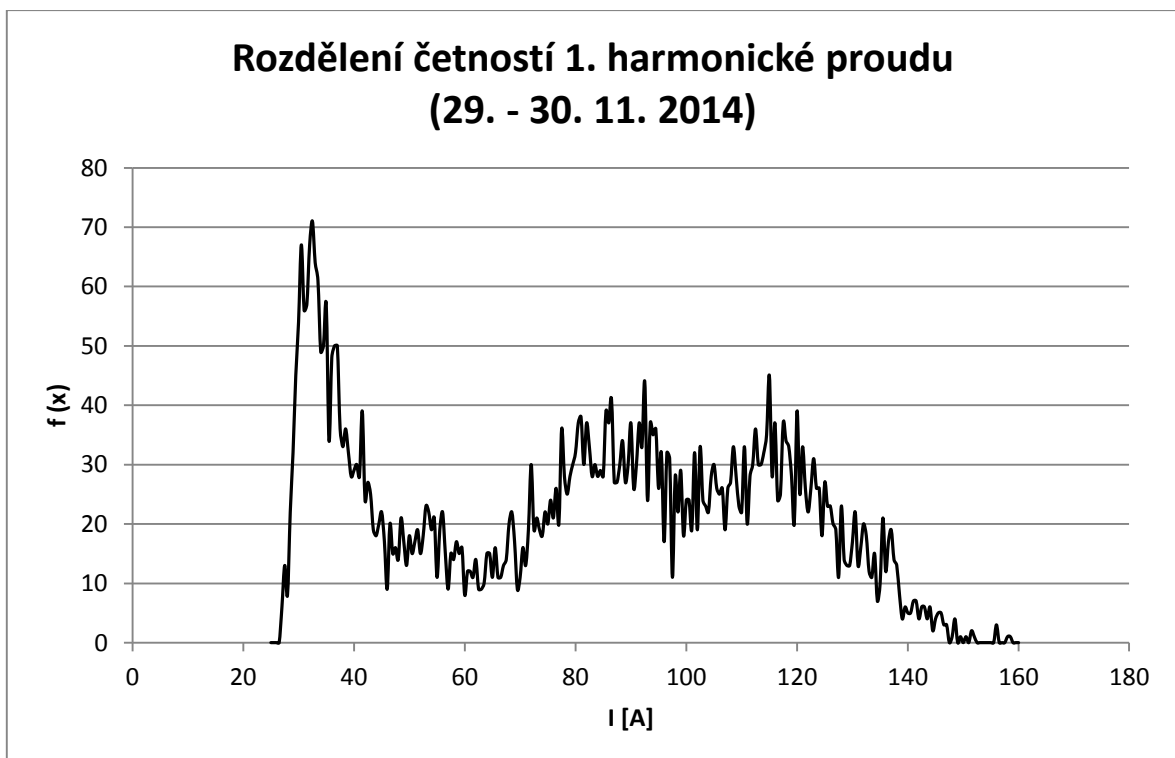
Při srovnání dvou různých období v týdnu je vidět, že na rozdíl od všedního dne nastávají v průběhu každého dne během víkendu dvě odběrová maxima. První maximum se projevuje u 1. harmonické přibližně okolo 12. hodiny, druhé pak nastává zhruba od 5do půl deváté večer. Maxima a minima 5. a 15. harmonické nastávají opět opačně vzhledem k 1. harmonické. Zmíněná minima a maxima jednotlivých harmonických jsou během různých dnů srovnatelná, jen v sobotu v období mezi 1. a 4. hodinou ráno výrazně vzrostl odběr 15. harmonické a dosáhl velikosti bezmála 3A.

3.3 Rozdělení absolutní četnosti efektivních hodnot harmonických proudů odebíraných z trafostanice městského rozvodu

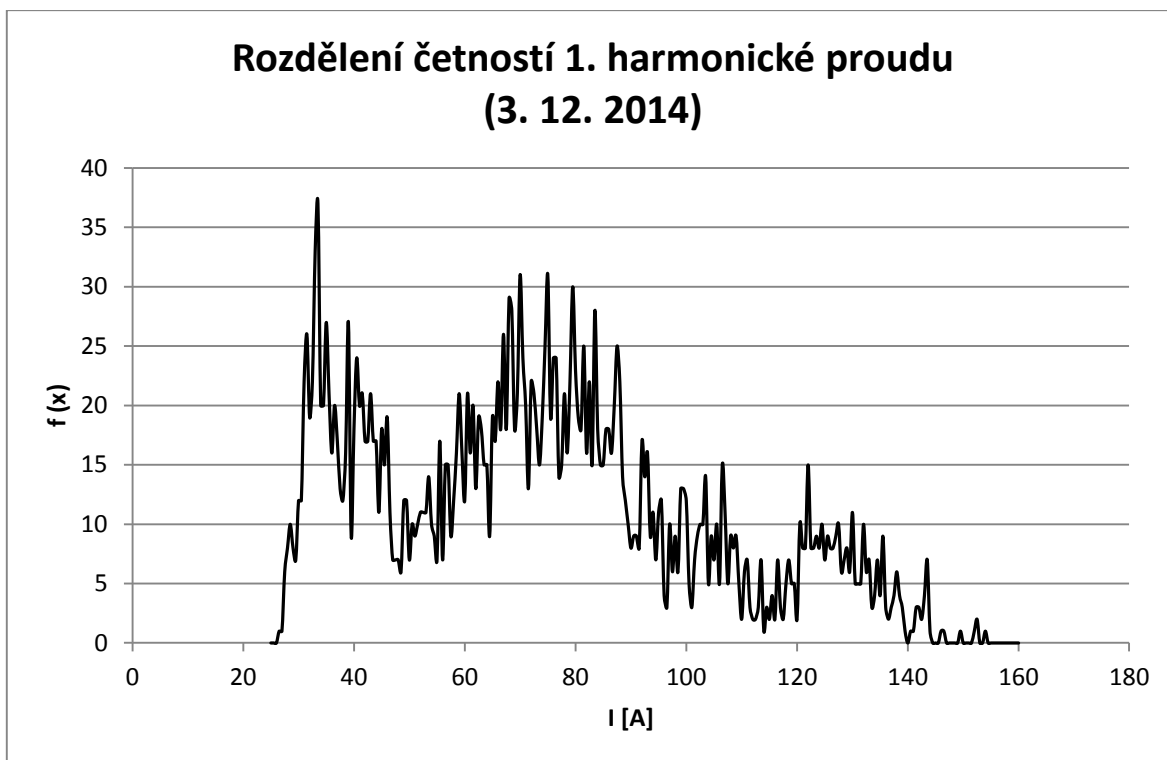
Dle dosud uvedených závěrů této práce plyne, že z pohledu rozdělení vykazují jednotlivé harmonické značnou anormalitu v průběhu celého měření, stejně jako během jeho jednotlivých částí. Po poradě s vedoucím bakalářské práce je zde za dohledu odborníka na statistické zpracování dat doc. Ing. Tůmovou, CSc. provedeno absolutní rozdělení četnosti pro jednotlivé harmonické během celé doby měření i jednotlivých vybraných období. Zmíněná četnost udává počet výskytů hodnot v určitém statistickém souboru, v tomto případě tříd hodnot. Dále je zde uvedena ukázka normálního (Gaussova) rozdělení. Tato ukázka je provedena uměle ze smyšlených hodnot a slouží pouze pro srovnání s rozdělením zpracovávaných dat. Rozdělení do jednotlivých tříd hodnot je pro každou harmonickou provedeno individuálně a velikosti četností jednotlivých harmonických se tedy přirozeně liší v závislosti na počtu hodnot a jejich rozpětí. Rozhodující je v tomto případě z hlediska dostatečné názornosti tvar rozdělení. Vodorovná osa udává velikost proudu, jenž je dle svislé osy odebírá s různou četností. Rozdělení všech uvedených četností je absolutní.



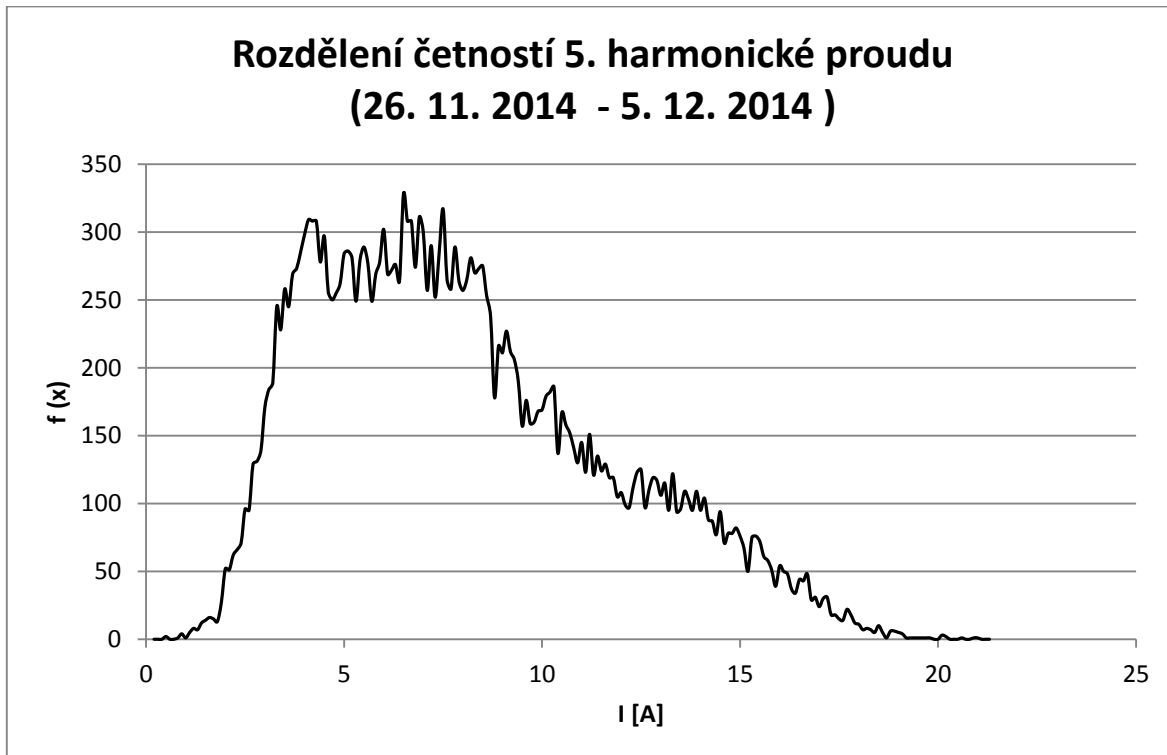
Obr. 3.15 Rozdělení četností 1. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



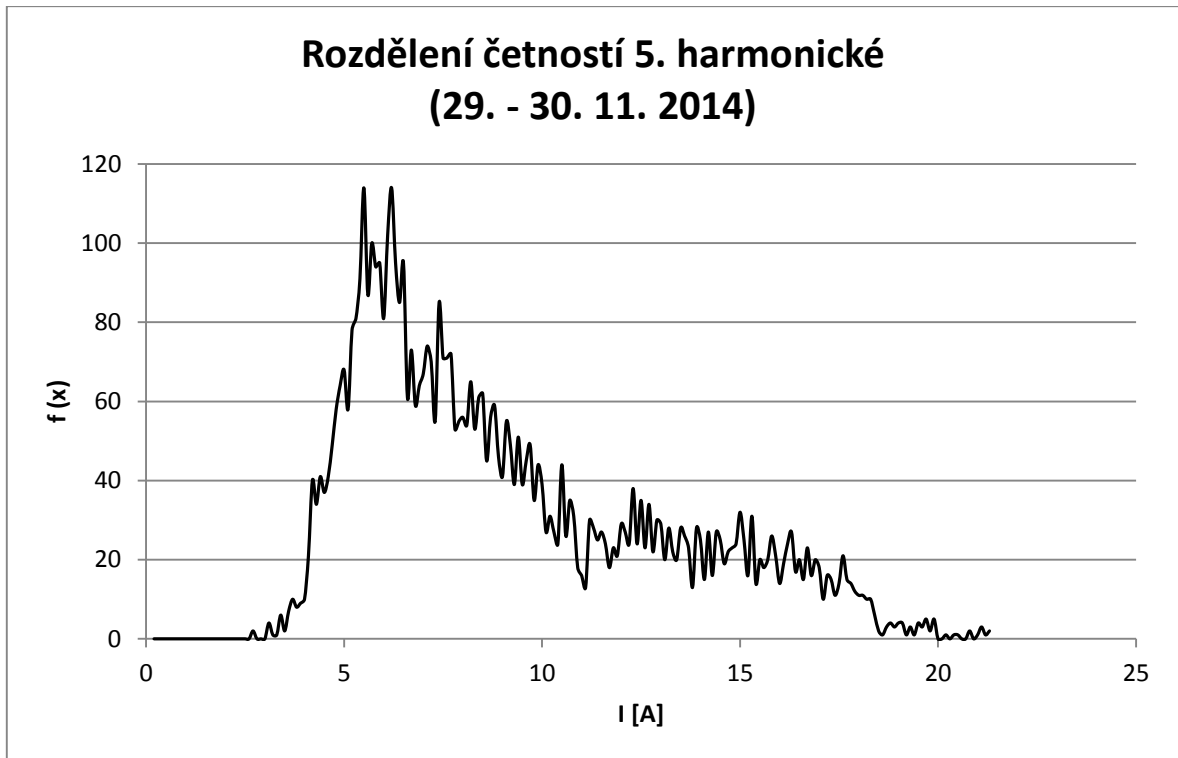
Obr. 3.16 Rozdělení četností 1. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , víkend 29. - 30. 11. 2014)



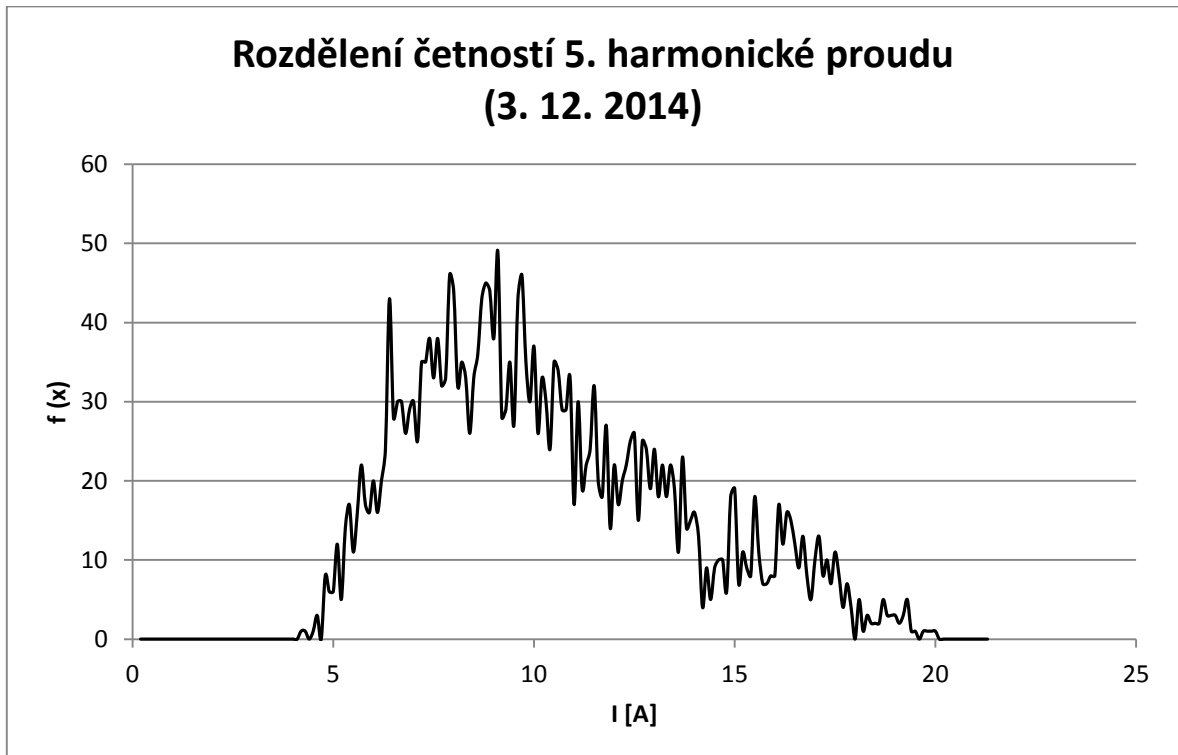
Obr. 3.17 Rozdělení četností 1. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , středa 3. 12. 2014)



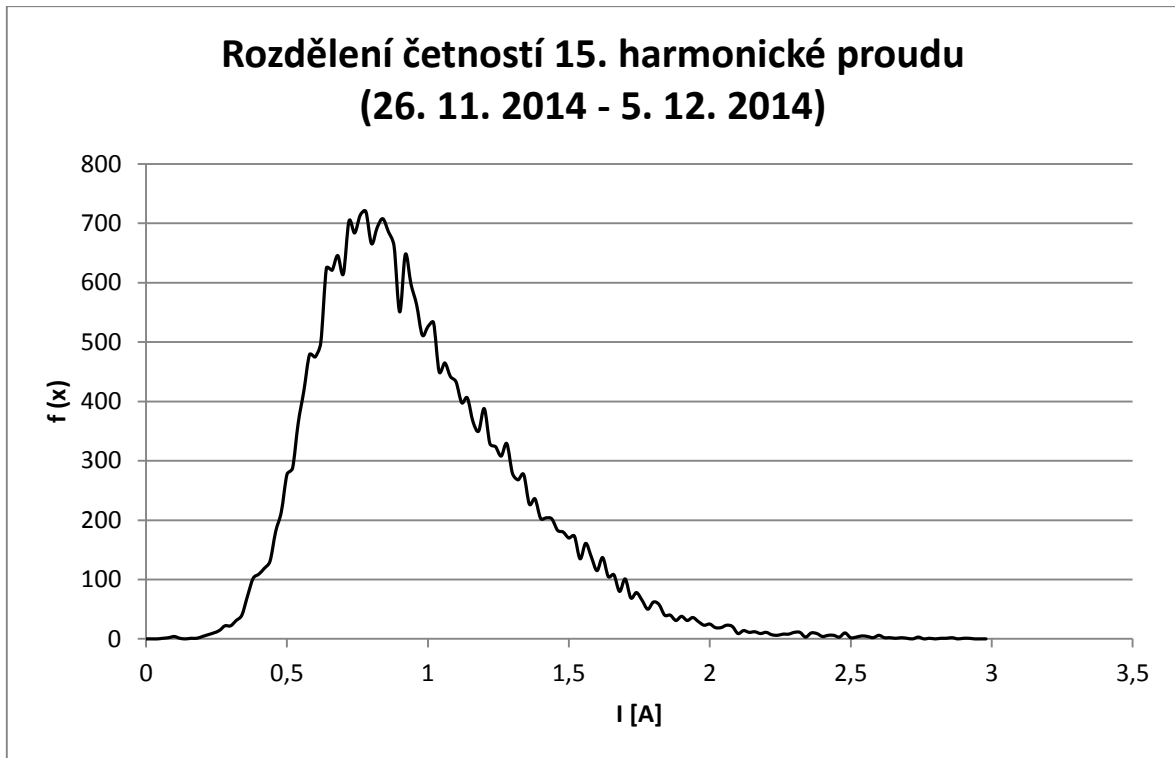
Obr. 3.18 Rozdělení četností 5. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



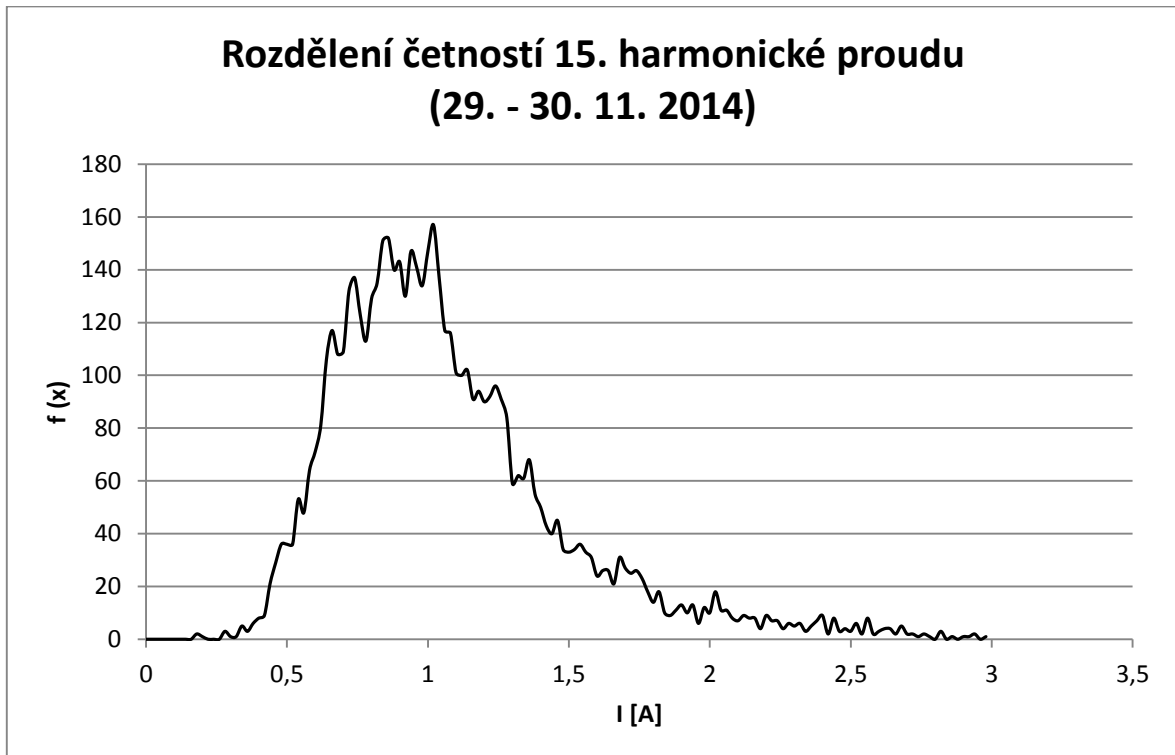
Obr. 3.19 Rozdělení četností 5. harmonické proudující trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , víkend 29. - 30. 11. 2014)



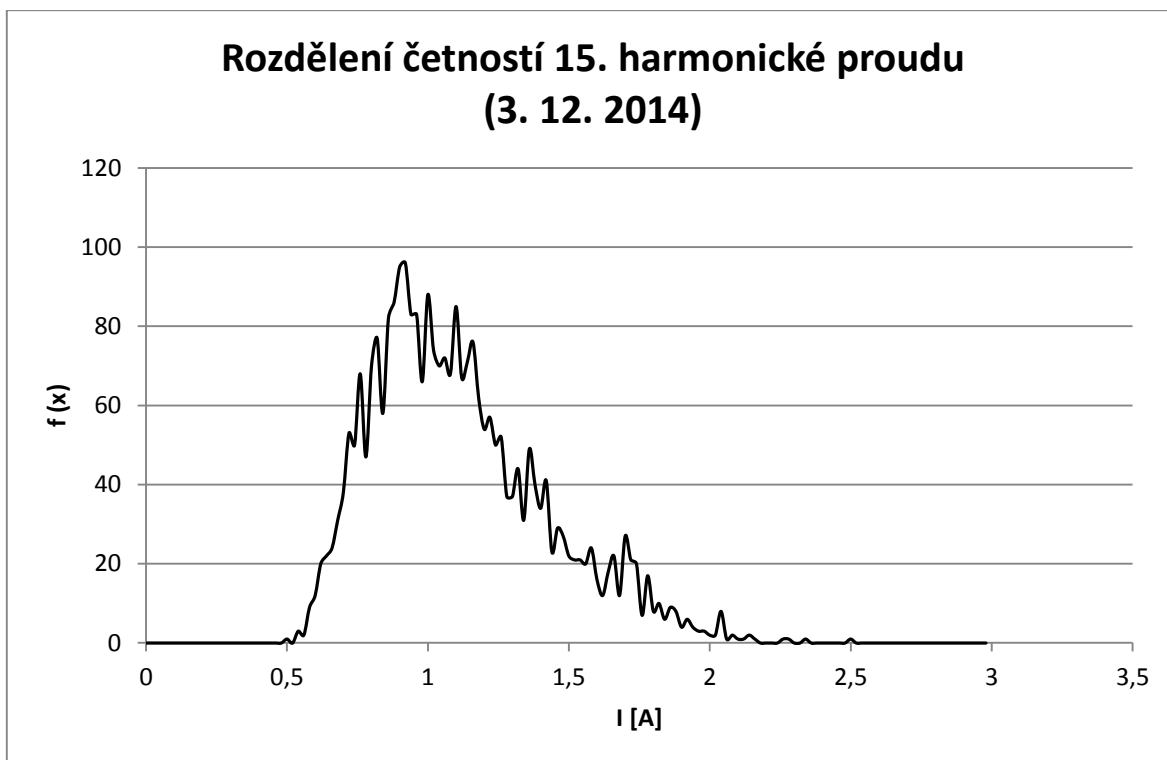
Obr. 3.20 Rozdělení četností 5. harmonické proudující trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , středa 3. 12. 2014)



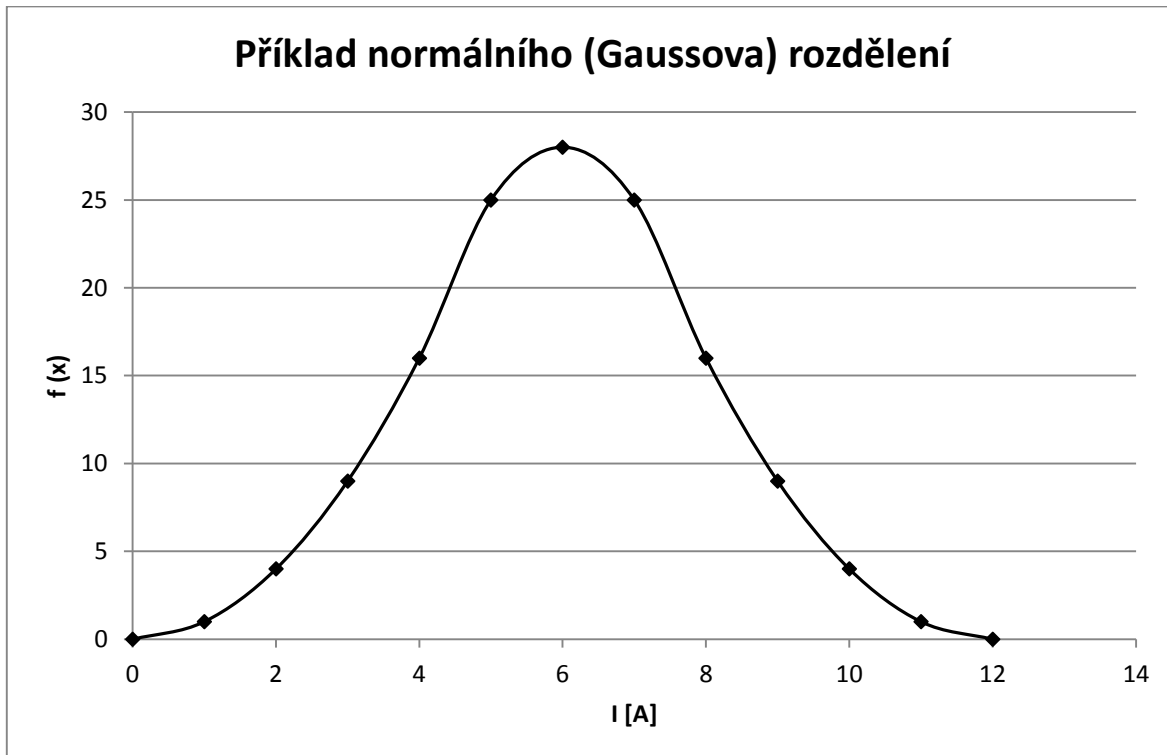
Obr. 3.21 Rozdělení četností 15. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , 26. 11. 2014 - 5. 12. 2014)



Obr. 3.22 Rozdělení četností 15. harmonické proudu jedné trafostanice městského rozvodu
(fáze L_1 , víkend 29. - 30. 11. 2014)



Obr. 3.23 Rozdělení četností 5. harmonické proudů u jedné trafostanice městského rozvodu (fáze L_1 , středa 3. 12. 2014)



Obr. 3.24 Ukázka normálního (Gaussova) rozdělení

Již při prvním pohledu na sadu provedených četností je dobře viditelné nestandardní rozdělení změřených dat. Vzhledem k faktu, že pro různé časové úseky měření je pořízen různý počet změřených hodnot, je srovnání těchto úseků poměrně obtížně proveditelné. Je třeba se tedy primárně zaměřit na tvar rozdělení a hodnoty vodorovné osy, udávající velikosti odebíraného proudu. Tvar rozdělení jednotlivých harmonických je pro zkoumaná období přibližně podobný. Při bližším srovnání rázu jednotlivých časových etap, lze však pozorovat podíl víkendu a vybraného všedního dne na celkovém rozdělení 9 denního měření.

Zajímavým zjištěním je nulová četnost nulových odběrů harmonických, což ukazuje na permanentní odběr domácností prostřednictvím zařízení v režimu *stand-by*.

Největší četnost první harmonické se pro celkový čas měření pohybuje okolo hodnoty 36,5 A. Zmíněná četnost následně rychle klesá a další vrchol lze pozorovat až okolo hodnoty 70 A, stejným způsobem jako během všedního dne. Během víkendu se projevuje druhý vrchol okolo 90 a 120 A. Lze tedy říci, že dominantní vliv na celkový tvar rozložení četnosti mají přirozeně všední dny, jejichž počet byl v období měření vyšší.

Zaměříme-li se na chování 5. harmonické, je zde opět patrný vliv všedních a víkendových dnů. Ve srovnání s 1. harmonickou je tvar rozdělení plošší a maxima tak nastávají v širší oblasti hodnot (asi okolo až 2,5 až 8 A).

Zcela nejblíže normálnímu rozdělení je rozdělení 15. harmonické. Stále se však o Gaussovo rozdělení rozhodně nejedná, každá strana zmíněného rozdělení má různou strmost a četnosti pro dané velikosti proudu poměrně hodně kolísají.

4 Závěr

V rámci této práce byly uvedeny dvě základní metody práce s údaji, získanými 9 denním měřením Katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky FEL ZČU v Plzni. Změřená data byla pořízena v rámci spolupráce s Bc. Janem Pikousem, který se ve své diplomové práci [14] soustředil zejména na harmonickou analýzu necharakteristických harmonických napětí a proudů. Předloženou práci je tedy nutno chápat jako doplněk k uvedené diplomové práci. Výsledky rozborů budou dále využívány na KEV v rámci vědecko-výzkumné činnosti. První metodou bylo prosté zobrazení veličin v čase, tedy v počtu změřených vzorků zaznamenávaných v půlminutovém intervalu. Uvedené závislosti byly doplněny příslušnými kvantily provedených v rámci normy ČSN EN 61000-4-7ed. 2. Pro tento způsob zpracování dat bylo zjištěno, že rozdělení efektivních hodnot zkoumaných proudů pro celkový čas měření i jeho dílčí části neodpovídá žádnému běžně používanému

rozdělení (Studentovo, Gaussovo). Důkazem zmíněného jevu je odlišnost kvantilů provedených numericky a kvantilů určených střední hodnotou a střední kvadratickou odchylkou, násobenou příslušnými koeficienty pro normální (Gaussovo) rozdělení. Fakt, že se střední hodnota neshoduje s mediánem je opět důkazem anormálního rozdělení.

Dalším závěrem vyvozeným z předchozích kapitol je proměnlivost velikosti efektivních hodnot změřených vyšších harmonických proudu vzhledem k efektivní hodnotě harmonické 1. Tuto vlastnost lze přisoudit proměnlivosti zatížení sítě. V době malého zatížení nastává minimální odběr 1. harmonické, avšak odběr 5. a 15. harmonické je v tuto dobu největší.

Druhou ze zmíněných metod pohlížení na vlastnosti sítě se zdroji vyšších harmonických proudů je prostřednictvím zobrazení absolutních četností v jednotlivých třídách hodnot. Díky tomuto způsobu lze tvar rozložení zpracovaných dat přímo vidět a tak zároveň pozorovat, jak často se v určitém období vyskytují konkrétní efektivní velikosti harmonických proudů. Prostřednictvím takového pohledu na danou problematiku bylo zjištěno, že při normálním provozu domácností nikdy nedochází k nulovému odběru (nulová četnost pro nulovou třídu hodnot). Tato vlastnost je připsána spotřebičům, pracujícím v režimu *stand-by* a spotřebičům s permanentním odběrem, např. ledničky, nebo zařízení pro napájení vysílacích a přijímacích zařízení.

Obě metody byly použity na různá období v týdnu, přičemž je z jednotlivých obrázků patrná rozdílnost odběru harmonických proudů během všedního dne a víkendu. Jelikož je z hlediska odběru harmonických proudů ze sítě rozhodujícím faktorem čas, lze tedy doporučit pro jejich měření roční období s nejvyšším odběrem. Vzhledem k tomu, že byla data poskytnuta pro tuto práci získána v období mezi 26. 11. 2014 a 5. 12. 2014, lze tuto podmínku považovat za splněnou. Pro zpracování dat bych tímto dále doporučil provést nejprve zobrazení průběhu proudu během jednotlivých dní a následně určit dobu (rozmezí několika hodin), ve které nastává nejčastěji špičkový odběr. Pro takto zvolenou dobu lze s určitou pravděpodobností očekávat normální rozdělení, nebo přinejmenším rozdělení podobné.

Použitá literatura:

- [1] Drápela J. (2013). Harmonické #1. *Profielektrika*. 20. 9. 2013 (<http://elektrika.cz/data/clanky/harmonicke>, 30. 11. 2014).
- [2] Kortan M. (2012). *Vstupní a výstupní filtry napěťových střídačů* [diplomová práce] (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni). (https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/5057/DP_M_Kortan.pdf?sequence=1)
- [3] Kůs V., Skála J., Hammerbauer J. (2013). *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů* (Praha: Technická literatura BEN).
- [4] Kůs V. (2003). *Nízkofrekvenční rušení* (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni).
- [5] Reichl, Jaroslav – Všeticka Martin (2012). Encyklopedie Fyziky: Vzorkování signálu. *Fyzika.jreichl.com*. 27. 2. 2012 (<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1356-vzorkovani-signalu#>, 21. 4. 2015).
- [6] VŠB (2015). Měření a vyhodnocení harmonických nelineárního trojfázového spotřebiče. *Fei1.vsb.cz*. (http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/navody/mereni_2_3f.pdf, 21. 4. 2015), s. 1–3.
- [7] ČSN 61000-4-7 ED. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí techniky. Díl 7: Všeobecný pokyn o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich*, ve znění pozdějších předpisů.
- [8] VŠB (2015). Měření harmonických. *Fei1.vsb.cz*. (http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/EMC/sylaby/4_Mereni_a_vyhodnoceni_harmonickych.pdf), s. 1–5.
- [9] Vondrášek F. (2003). *Výkonová elektrotechnika svazek 3: Měniče s vlastní komutací a bez komutace* (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni).
- [10] Bilík, Petr (2008). Monitorování kvality elektřiny. *Elektro* 2/2008 (<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36632.pdf>, 15. 4. 2015).
- [11] Lukeš, Pavel (2004). Zlepšení síťového proudu spínaných zdrojů. *Elektro*. 3. 9. 2004 (<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/zlepseni-sitoveho-proudu-spinanych-zdroju--14622>, 19. 4. 2015), s. 4–6.
- [12] Koblíček, Pavel (2015). Nepřímé frekvenční měniče [nepublikováno]. (dostupné online: <http://p.koblíček.sweb.cz/pohony/blok12.pdf>, 4. 5. 2015).

- [13] Hledík, Stanislav (2010). *Dodatek D. Fourierova transformace*. (dostupné online: http://nora.fpf.slu.cz/~hledik/pub/teach/classes/latex/output_samples/BryjovaI-AppsDEFG.pdf, 4. 5. 2015).
- [14] Pikous, Jan (2015). *Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů* [diplomová práce] (Plzeň:Západočeská univerzita v Plzni).