

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Monitoring harmonických v rozvodné síti

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef BREJŠA**
Osobní číslo: **E14B0045K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Monitoring harmonických v rozvodné síti**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Provozem nelineárních spotřebičů malých výkonů, určených pro domácnosti, se objevují ve veřejných sítích harmonické proudy vyšších řádů. Tím dochází ke zkreslení napájecího napětí.

1. Popište vznik harmonických proudů malých domácích spotřebičů a jejich působení v rozvodné soustavě.
2. Proveďte měření harmonických napětí a proudů v jednom objektu (rodinný dům, byt) po dobu jednoho týdne a výsledky analyzujte.
3. Navrhněte způsoby pro snížení harmonických proudů těchto spotřebičů nebo jejich vlivu v napájecí soustavě.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

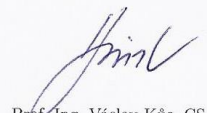
1. Kůs, V., Hammerbauer, J., Skála, J.: Elektromagnetická kompatibilita výkonových polovodičových systémů. Kniha BEN, Praha, 2013.
2. Kůs, V.: Nízkofrekvenční rušení. (ZČU Plzeň, FEL, 5/2003).
3. Norma ČSN EN 50160.

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na měření harmonických napětí a proudů vyšších řádů v rozvodné síti a jejich eliminace. V první části se práce věnuje teorii harmonických průběhů a jejich vzniku, dále pak možnému způsobu provedení měření emisí s porovnáním naměřených hodnot vůči normám. Závěr práce se zabývá možnými způsoby eliminací nežádoucích složek.

Klíčová slova

Harmonické složky vyšších řádů, harmonická napětí vyšších řádů, harmonické proudy vyšších řádů, celkové harmonické zkreslení, norma

Abstract

This Bachelor Thesis focuses on measuring harmonic voltages and currents of higher levels in power grid and their elimination as well. First part of thesis explains theory of harmonic processes and their formation. Next comes possible way of measuring of emissions comparing measured values to standards. End of the thesis deals with possible ways of elimination of these undesirable components.

Key words

Harmonic components of higher levels, harmonic voltages of higher levels, harmonic currents of higher levels, total harmonic distortion, standard

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí bakalářské práce. Dále prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této bakalářské práce je legální.

V Plzni dne 31.5.2016

Josef Brejša

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 HARMONICKÉ SLOŽKY V DISTRIBUČNÍ SOUSTAVĚ	13
1.1 KMITOČET SÍTĚ	13
1.2 ZÁKLADNÍ HARMONICKÁ	13
1.3 HARMONICKÉ PRŮBĚHY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	14
1.4 FOURIEROVA ŘADA	15
1.4.1 Vyjádření funkce Fourierovou řadou	15
1.5 PŮVOD HARMONICKÝCH SLOŽEK V ROZVODNÉ SÍTI	18
1.5.1 Zdroje generující rušení	21
1.5.2 Jednofázové zátěže generující harmonické proudy vyšších řádů	21
1.5.3 Třífázové zátěže generující harmonické proudy vyšších řádů	22
1.6 PROBLÉMY ZPŮSOBENÉ HARMONICKÝMI PRŮBĚHY VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	23
1.6.1 Zatížení středního vodiče	23
1.6.2 Vliv harmonických na transformátory	23
1.6.3 Skinefekt	24
1.7 PŘEDPISY A NORMY V OBLASTI NÍZKOFREKVENČNÍHO RUŠENÍ	24
1.7.1 Základní zákony a nařízení o EMC	24
1.7.2 Normy v EMC oblasti nízkofrekvenčního rušení	24
2 MĚŘENÍ HARMONICKÝCH PRŮBĚHŮ V NÍZKOFREKVENČNÍ OBLASTI	29
2.1 TEORIE MĚŘENÍ HARMONICKÝCH VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	29
2.1.1 Měření pomocí A/D převodníků	29
2.1.2 Využití za pomoci osciloskopu	29
2.1.3 Měření pomocí speciálních analyzátorů	29
2.2 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	30
2.2.1 Popis analyzátoru sítě BK ELCOM ENA 330	30
2.2.2 Připojení přístroje	31
2.2.3 Nastavení přístroje pro měření	32
2.2.4 Popis zvoleného objektu	34
3 MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ NA JEDNOTLIVÝCH SPOTŘEBIČÍCH	36
3.1. Měření na jednotlivých spotřebičích	36
3.2 Vyhodnocení naměřených hodnot jednotlivých spotřebičů	43
4 MĚŘENÍ NA OBJEKTU	44
4.1 Krátkodobé měření v délce 1 hodiny	44
4.2 Měření v délce trvání 24 hodin	46
4.3 Měření v intervalu 7 dní	49
4.4 Analýza naměřených hodnot	53
5 OPATŘENÍ KE SNÍŽENÍ HARMONICKÝCH PROUDŮ VYŠŠÍCH ŘÁDŮ	59
5.1 Omezení harmonických bez pomoci přidavných zařízení	59
5.2 Omezení harmonických pomocí přidavných zařízení	59
5.3 Omezení harmonických pomocí aktivních filtrů	59
ZÁVĚR	62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63
SEZNAM PŘÍLOH	65

Seznam symbolů a zkratk

A/D.....	Analogově digitální převodník
a_0	Fourierovy koeficienty
a_h	Fourierovy koeficienty
b_h	Fourierovy koeficienty
cos.....	Goniometrická funkce
D_h	Fourierovy koeficienty pro h-tou harmonickou
ČSN.....	Česká státní norma
EN.....	Evropská norma
EU.....	Evropská unie
f.....[Hz]	Frekvence
f(t).....	Funkce spojitého průběhu
G..... [V]	Zdroj napětí
h..... [-]	Řád harmonické
I.....[A]	Elektrický proud
i_{af}	Proud aktivního filtru
I_d	Usměrněný proud
I_f [A]	Fázový proud
I_h [A]	Proud h-té harmonické vyskytující se v soustavě
I_h [%]	Poměrná hodnota h-té harmonické proudu
i_{ns}	Proud nelineárního spotřebiče
i_s [A]	Proud sítě
IT	Informační technologie
IEC.....	Mezinárodní elektrotechnická komise
LED.....	Dioda emitující světlo
L_{ss}[H]	Indukčnost stejnosměrného meziobvodu
L1,L2,L3.....	Fázové vodiče napájecí soustavy
NN.....	Rozvod nízkého napětí
NP.....	Nadzemní podlaží
P.....[W]	Výkon činný
PEN.....	Ochranný vodič v síti TN-C
PE.....	Ochranný vodič v síti TN-S
Q..... [VAr]	Výkon jalový

R.....[Ω]	Činný odpor
RD.....	Rozvaděč domovní
sin.....	Goniometrická funkce
T.....[s]	Perioda
t.....[s]	Čas
THD _I[%]	Celkové harmonické zkreslení proudu
THD _U[%]	Celkové harmonické zkreslení napětí
TN-C.....	Trojfázová síť s uzemněným nulovým bodem
TN-S.....	Trojfázová síť s uzemněným středním bodem se samostatným vodičem
U.....[V]	Elektrické napětí
U _d[V]	Napětí na diodách
U _f[V]	Fázové napětí
U _h[V]	Napětí h-té harmonické vyskytující se v soustavě
u _h[%]	Poměrná hodnota h-té harmonické napětí
U _i[V]	Indukované napětí motoru
UPS.....	Záložní zdroj nepřetržitého napájení
1f,3f.....	Počet fází
φ[$^{\circ}$,rad]	Úhel
φ_h[$^{\circ}$,rad]	Fázový posun h-té harmonické
ω[rad*s ⁻¹]	Úhlový kmitočet
Σ	Suma

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na výskyt harmonických napětí a proudů vyšších řádů, které vznikají nelinearitou běžných domácích spotřebičů a ovlivňují distribuční část rozvodné soustavy.

Podle několika nezávislých studií, které jsou prezentovány v médiích, se očekává, že celosvětově spotřeba elektrické energie vzroste do 20. let řádově o 30 %. Jedná se o důsledek jednak vzrůstající životní úrovně rozvojových zemí a nepochybně také rozmach nových technologií např. u energeticky úsporných budov. Příkladem je vytápění vzduch-voda nebo také vzrůstající teploty v letních obdobích, což vede k nárůstu instalací klimatizací. Splnění těchto požadavků bude vyžadovat vyšší výrobu, včetně dodávek elektrických energií. Vzhledem ale k současnému stavu životního prostředí je nutné tuto energii hledat v obnovitelných zdrojích nebo také v úsporách energie.

Cesta k úspoře elektrické energie vede řízení otáček motorů čerpadla systémů topení, ventilace a klimatizace. Také lze ušetřit rozumným způsobem obrovské množství energie zvýšeným využíváním zářivkového osvětlení, používající elektronické předřadníky a LED svítidla. [11]

Velká část elektrických zřízení, která přispívají k úsporám energie, však vykazuje vedlejší nepříznivý jev spočívající ve zkreslení sinusového průběhu proudu.

Elektrickou energii lze v podstatě brát jako výrobek, který musí splňovat určité parametry, jako jsou jmenovité napětí, jmenovitá frekvence, sinusový průběh křivky napětí a proudu, nulový fázový posuv napětí a proudu, souměrnost a vyváženost trojfázové soustavy. Veškeré hodnoty jsou uváděny v ČSN. [1]

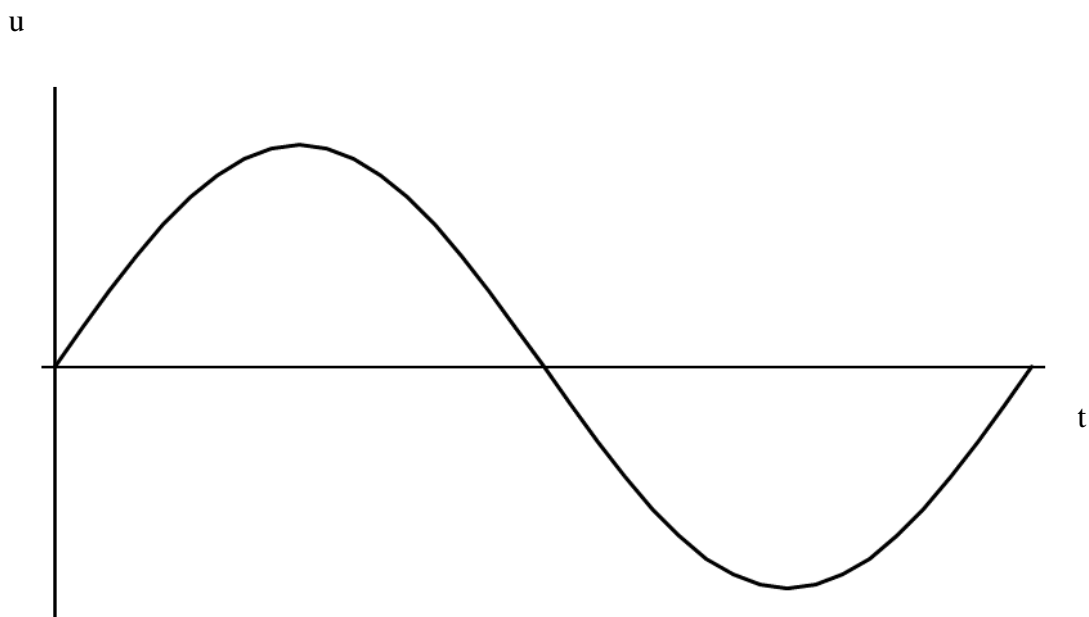
Bakalářská práce je rozdělena do pěti částí, přičemž první část seznamuje se základními pojmy a vztahy, vznikem harmonických složek. Druhá část je zaměřena na teoretickou a praktickou část měření včetně norem, které hodnotí míru emisí v distribuční soustavě. Ve třetí části je již prováděno samotné měření a vyhodnocení jednotlivých spotřebičů. Čtvrtá část je věnována měření vybraného objektu a závěrečná část se zabývá možným opatřením proti harmonickým vyšších řádů.

1 Harmonické složky v distribuční soustavě

1.1 Kmitočet sítě

Kmitočet neboli frekvence v síti uvádíme v Hz. Hertz je jednotka, která nám udává počet pravidelných opakujících se dějů za jednotku času, v našem případě jednu sekundu $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$.

Základní perioda je znázorněna na Obr. 1.1. V České republice je jmenovitý kmitočet sítě 50 Hz.



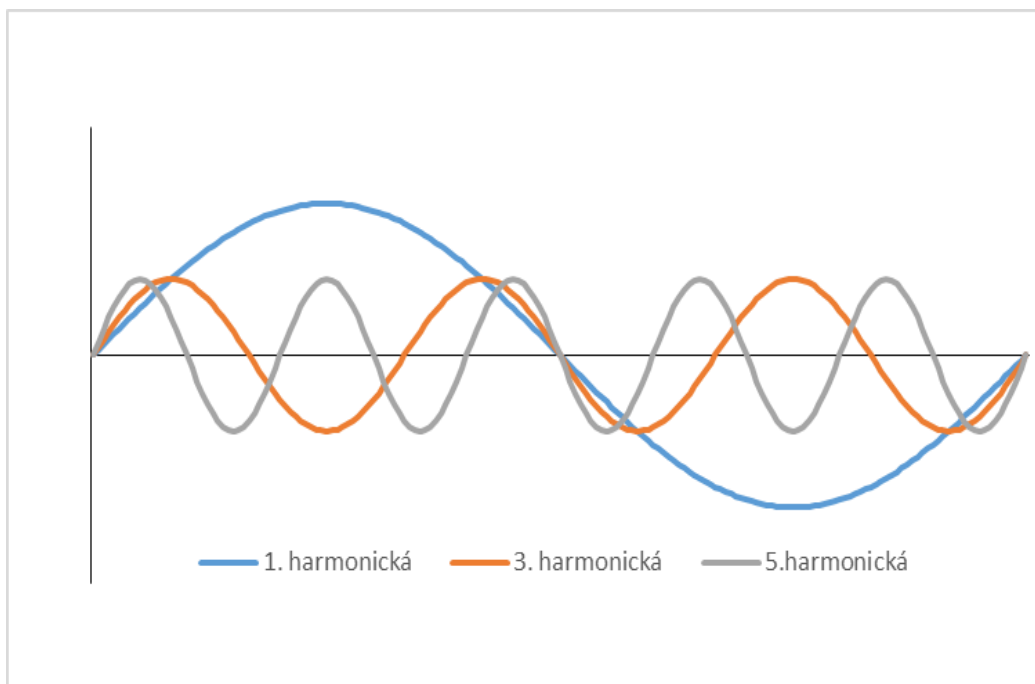
Obr. 1.1 Průběh sinusového napětí

1.2 Základní harmonická

Jedná se o sinusové napětí (proud) s kmitočtem rovným celému násobku základního kmitočtu. Tuto frekvenci nazýváme též první harmonická. Průběh periody první harmonické je zároveň na Obr. 1.1.

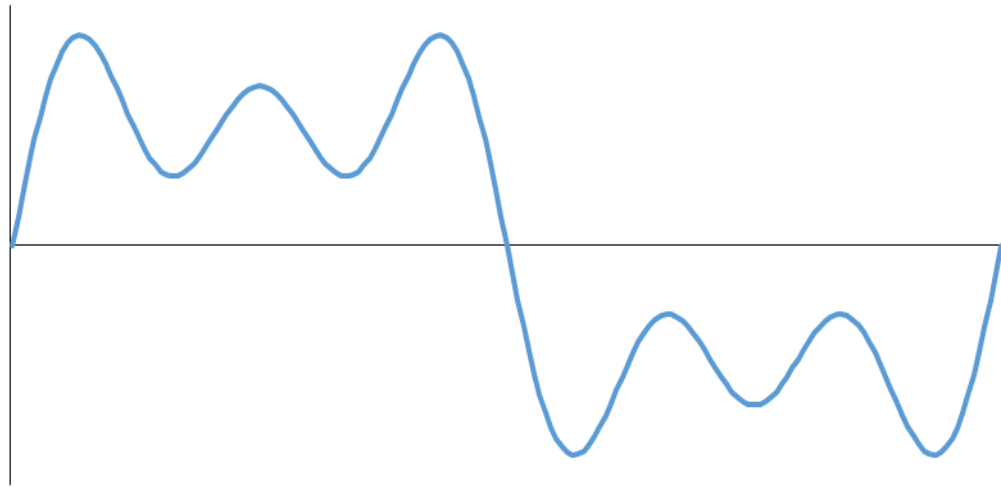
1.3 Harmonické průběhy vyšších řádů

V napájecí síti se vlivem rušení mohou a také objevují daleko vyšší frekvence, než je frekvence základní, které nazýváme harmonické vyšších řádů. Harmonické vyšších řádů jsou násobky základní harmonické. Například druhá harmonická je 100 Hz, třetí harmonická 150 Hz, čtvrtá harmonická je 200 Hz, pátá harmonická je 250 Hz atd. Průběh harmonických vyšších řádů je zobrazen na Obr. 1.2. Pro harmonické vyšších řádů je zavedena značka malé h.



Obr. 1.2 Průběh 1, 3, 5 – harmonické složky

Vlivem průběhu harmonických o vyšších řádech dochází ve výsledku k deformaci sinusového průběhu základního. Na Obr. 1.3 je zobrazen výsledný deformovaný průběh.



Obr. 1.3 Deformovaný průběh základní harmonické

1.4 Fourierova řada

Aby bylo možné dále pracovat s takovými průběhy elektrických veličin, které mají periodický průběh, alespoň v určitém časovém intervalu a tento průběh je neharmonický, je výhodné je rozložit na průběhy harmonické. Dále je požadováno vyjádřit periodickou veličinu jako nekonečnou řadu složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech rovnajících se přirozeným násobkům kmitočtu základního. Výsledkem rozkladu je harmonická analýza, ze které je nekonečná řada, která se nazývá Fourierova řada. [2]

1.4.1 Vyjádření funkce Fourierovou řadou

Funkci $f(t)$ nazveme periodickou, pokud bude platit pro všechna t :

$$f(t) = f(t+T) \quad (1.1)$$

Funkce $f(t)$ s periodou, která musí být v intervalu $\langle 0; T \rangle$ po částech spojitá a má také v tomto intervalu po částech spojitou derivaci, musí mít konečný počet maxim a minim, který lze vyjádřit pomocí trigonometrické Fourierovy řady: [2]

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(h\omega_1 t) + b_h \sin \omega_1 t] \quad (1.2)$$

Úhlová frekvence se vypočte:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} \quad (1.3)$$

kde a_0 , a_h , b_h jsou tzv. Fourierovy koeficienty funkce $f(t)$ pro interval $\langle 0; T \rangle$, výpočet se provede podle vztahu: [2]

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.4)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(h\omega_1 t) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.5)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(h\omega_1 t) dt, h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.6)$$

v praxi se velmi často využívá tzv. spektrální tvar Fourierovy řady ve tvaru:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum D_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h), h = 1, 2, 3.. \quad (1.7)$$

Dále se provede výpočet posloupnosti amplitud ve tvaru:

$$D_h = \sqrt{(a_h^2 + b_h^2)} \varphi_h = \arctan \frac{b_h}{a_h} \quad (1.8)$$

Posloupnost amplitud D_h jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$ se nazývá amplitudové spektrum. Podobně se posloupnost počátečních fází φ_h nazývá

spektrum periodické funkce $f(t)$. [1]

Aby bylo možné posoudit velikost amplitudy jednotlivé harmonické, zavádí se pojem poměrná hodnota h -té harmonické. Ta vyjadřuje poměr efektivní hodnoty h -té harmonické ku efektivní hodnotě základní harmonické. Tyto vztahy platí jak pro proudové harmonické, tak také pro napěťové harmonické. Jednotky jsou udávány v procentech. [2]

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} [-], i_{h\%} = \frac{I_h}{I_1} * 100[\%] \quad (1.9)$$

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} [-], u_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} * 100[\%] \quad (1.10)$$

K vyjádření celkového obsahu harmonických zkreslení ve spektru je zaveden pojem celkové harmonické zkreslení (THD, total harmonic distortion), je to jeden z hlavních ukazatelů kvality elektrické energie. Vypočte se podle vztahů: [2]

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (1.11)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} \quad (1.12)$$

1.5 Původ harmonických složek v rozvodné síti

Původcem harmonických složek jsou dva faktory, jednak hlavně spotřebiče, které odebírají neharmonický proud, nebo také zdroje elektrické energie, které přímo generují neharmonické napětí. Dále se zde podílejí elektrické sítě svou vzájemnou vazbou a nelinearitou, kde se mohou vytvářet vlastní kmity nebo také zesilovat účinky těchto neharmonických zdrojů. [3]

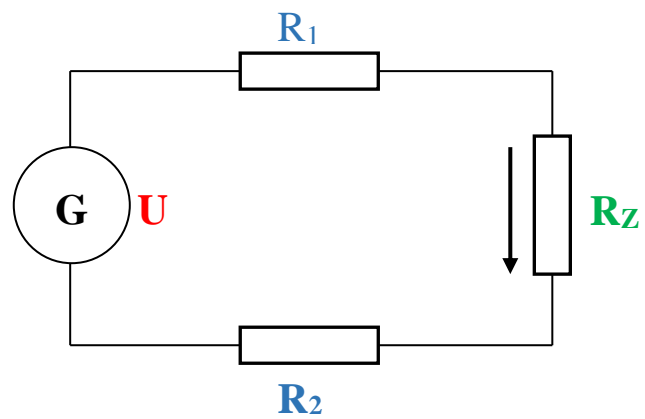
Zkreslení napětí v síti může být způsobeno:

- Jednak rotačními generátory: v důsledku nedokonalosti magnetických obvodů či statických budičů. Celkové harmonické zkreslení napětí generovaného synchronními generátory je od 0,5 % do 3 % (podle výkonu). V případě asynchronních generátorů je to i více.
- Nebo statickými střídači (PV systémy, větrné elektrárny se synchronním generátorem a polovodičovým měničem atd.) V důsledku zvlnění napájecího napětí na DC straně, pulsně-šířkové modulace výstupního napětí střídače, nelinearity výstupních filtrů či vazebního transformátoru. [3]

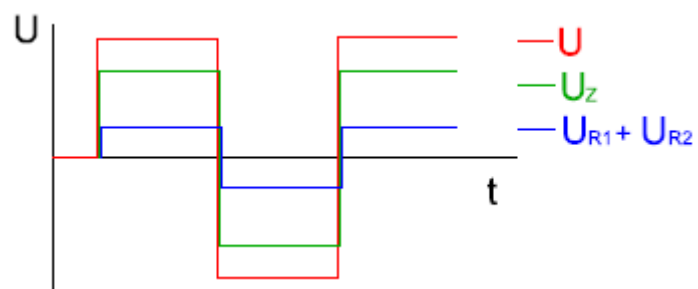
Největší zastoupení neharmonických úbytků napětí na impedancích sítě se vytvářejí v důsledku procházejícího neharmonického proudu. Pokud jsou elektrické obvody, jež obsahují pouze odpory, napájeny zdrojem, bude průběh proudu kopírovat napětí obvodu. Pro ilustraci je zaveden obvod, který je napájen generátorem, Obr. 1.4. V takovém obvodu bude průběh protékajícího proudu kopírovat průběh napětí. Zároveň také průběh napětí na jednotlivých prvcích bude podobný jako průběh napětí, které je dodáváno generátorem. Tento průběh napětí je znázorněn na Obr. 1. 5. [10]

Dnešní obvody však bohužel nejsou složeny jen z odporů, ale také z dalších prvků, které reagují na průběhy odlišným způsobem. Pokud bude takový obvod napájen harmonickým napětím, pak průběh okamžité hodnoty napětí na zátěži odebírající neharmonický proud bude roven harmonickému napětí zdroje mínus neharmonický úbytek napětí na odporu sítě a odebírán tudíž neharmonické. Deformace průběhů odebíraných proudů jsou dané nelinearitou vstupních obvodů zátěží. [3]

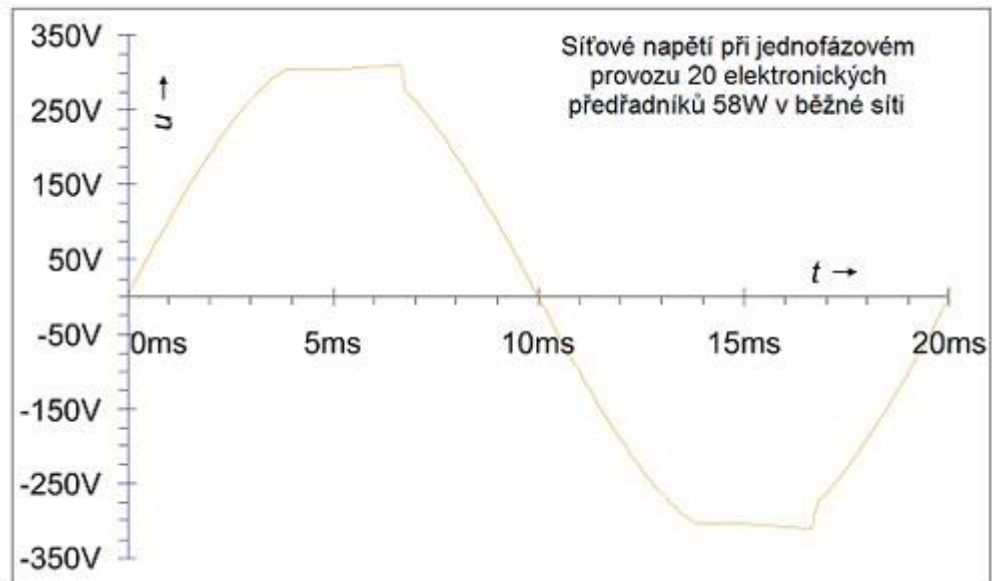
Příkladem deformovaného napětí vlivem nelineárních odběrů proudů jsou Obr. 1.6 a Obr. 1.7. Tento záznam měření byl pořízen ve velké administrativní budově. [10]



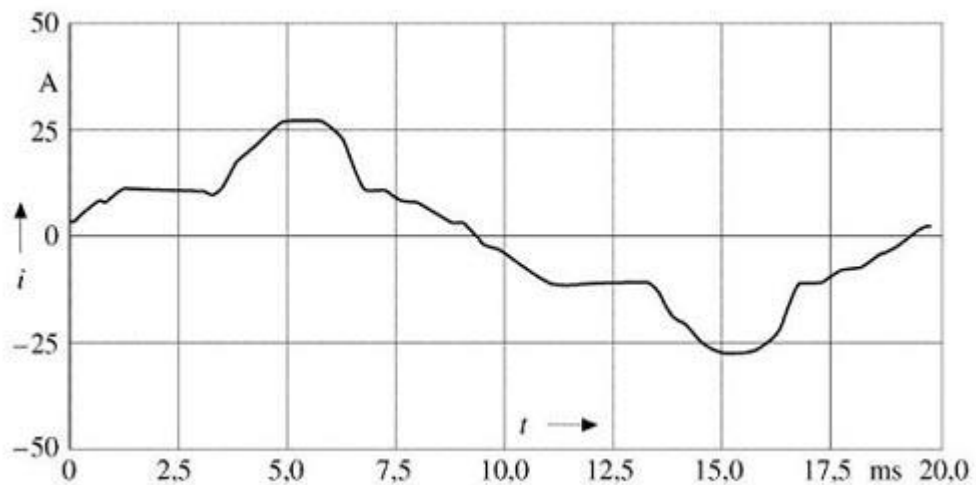
Obr. 1.4 Elektrický obvod složený z odporů (převzato [10])



Obr. 1.5 Průběh úbytků napětí na jednotlivých odporech (převzato [10])

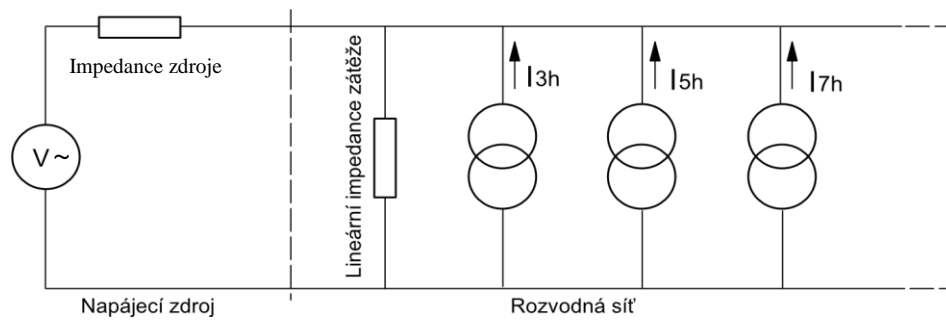


Obr. 1.6 Deformovaný průběh napětí vlivem odběru harmonických proudů (převzato [10])



Obr. 1.7 Průběh harmonického proudu (převzato [10])

Pro řešení harmonických průběhů je možné pro zjednodušení nahradit lineární zátěží představující odebíraný proud na základní harmonické frekvenci s paralelně řazenými proudovými zdroji. Tím si vytvoříme náhradní schéma viz Obr. 1.8. Výhodou je, že po takto zjednodušeném náhradním schématu je možné provést výpočet obvodu pomocí Theveninovy věty a principu superpozice. Jednotlivé harmonické proudy lze tedy počítat samostatně jako komplexní veličiny. [3]



Obr. 1.8 Náhradní obvod nelineární zátěže (převzato[13])

1.5.1 Zdroje generující rušení

Jak již bylo v odstavci 1.5 uvedeno, tak harmonické rušení se šíří po vedení. Nepříznivě tomu napomáhá také vývoj nových technických prostředků a technologií, který se projevil nárůstem různých spotřebičů (zejména napájecí pulzní zdroje počítačů, televizorů, dále kompaktní svítidla, pračky, myčky, trouby, kde jsou elektronické regulátory teploty). Zejména u odběratelů v distribuční soustavě dochází k nelineárním zatížením, která nepříznivě ovlivňují kvalitu síťového napětí a proudu. Tyto nepříznivé vlastnosti jsou násobeny hromadným používáním těchto spotřebičů. [13]

Druhy jednofázových zátěží generující harmonické průběhy lze rozdělit na:

- Spínané napájecí zdroje;
- Elektronické předřadníky kompaktních svítidel;
- Malé zdroje nepřerušitelného napájení.

Druhy třífázových zátěží generujících harmonické průběhy můžeme rozdělit na :

- Velké UPS jednotky
 - Elektronicky regulované pohony
- [13]

1.5.2 Jednofázové zátěže generující harmonické proudy vyšších řádů

V dnešních moderních zařízeních obsahujících elektronické jednotky jsou většinou použity k napájení spínané zdroje značené zkratkou SMPS. Klasické redukční transformátory a usměrňovače jsou dnes nahrazeny přímo řízenými usměrňovači. K předním výhodám patří cena a velikost zařízení, tím také dochází ke zmenšení váhy

daného zařízení. Spotřebič ale odebírá místo lineárního proudu proud nelineární, ten obsahuje značné množství harmonických vyšších řádů, kde převažují hlavně třetí, pátá a sedmá harmonická. [13]

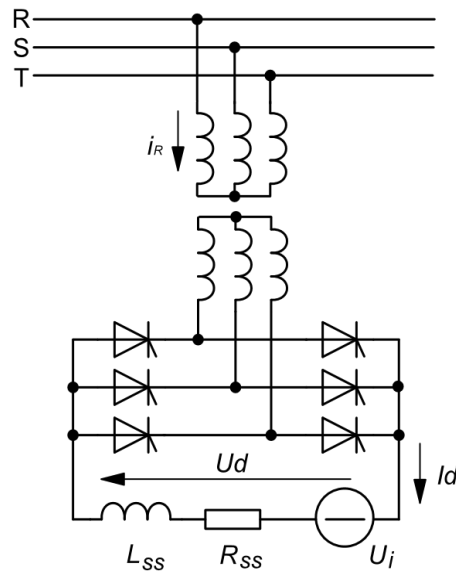
Veškeré světelné zdroje různých provedení mohou být zdrojem rušení na napájecí síť. Světelné zdroje jsou zapojovány do osvětlovacích soustav ve vyšších počtech soustředěných v jednom napájecím místě a následkem toho dochází k násobení harmonických složek vyšších řádů. [13]

Díky elektronickým předřadníkům, které pomohly vylepšit účinnost svítidel, se dnes hojně využívají kompaktní svítidla. Ty mají oproti obyčejným žárovkám při zachování stejné svítivosti potřebu činného výkonu zhruba 20 %, ale také prodlužují značně životnost svítidla. Toho dosahují pomocí zpětné regulace proudové vazby, ale v důsledku toho se generují harmonické proudy vyšších řádů.[2][13]

Malé zdroje nepřerušitelné ho napájení UPS- vykazují v podstatě stejnou charakteristiku jako spínané zdroje. [13]

1.5.3 Třífázové zátěže generující harmonické proudy vyšších řádů

Zde se využívají trojfázové můstky, které jsou známy jako šestipulzní můstek. Šestipulzní se nazývají podle toho, že se zde tvoří šest pulsů. Zapojení řízeného třífázového usměrňovače s využitím šestipulzního můstku je zázorněno na Obr. 1. 9. [13]



Obrázek 1. 9 Zapojení šestipulzního můstku (převzato [2])

1.6. Problémy způsobené harmonickými průběhy vyšších řádů

1.6.1 Zatížení středního vodiče

Tak jak bylo již několikrát v této práci zmíněno, dnešní průběh napětí a proudu není sinusový, ale upravený dle potřeby daného zařízení. Tyto průběhy ovlivňují také kabely, které je přenášejí. To znamená, že zvyšují tepelné účinky přenášeného proudu v kabelech, neboť se vychází z efektivní hodnoty proudu základní harmonické. Daleko větší nebezpečí je, že se třetí harmonické sčítají. To znamená, že proud nulovým (středním) vodičem může být daleko větší než ve vodičích fázových. Dříve se uplatňovalo pravidlo, že vodič střední (nulový) byl o polovinu slabší oproti vodiči fázovému. Dnes již na toto pamatuje norma ČSN 33 2000-5-523, která uvádí, jak postupovat při volbě průřezu s ohledem na obsah harmonických složek. [9]

1.6.2 Vliv harmonických na transformátory

Transformátory jsou ovlivňovány harmonickými velmi negativně. Ztráty vířivými proudy jsou za normálních okolností okolo 10 % při plném zatížení, rostou s kvadrátem řádu harmonických. U plně zatíženého transformátoru nelineární zátěží IT technologií budou celkové ztráty dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěží. Výsledkem je u takového transformátoru mnohem vyšší provozní teplota a kratší životnost. Prakticky za těchto

okolností může být snížena životnost transformátoru ze 40 let až na 40 dní. V praxi je jen málo transformátorů plně zatíženo, ale tento jev musí být projektanty také uvažován. [13]

1.6.3 Skinefekt

Střídavý proud má tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Tento jev, který se začíná projevovat na vyšších kmitočtech, se nazývá skinefekt. Při základním kmitočtu tento jev zanedbáváme, protože se projevuje jen velmi málo, ale u kmitočtu nad 350 Hz a výše se stává skinefekt významným, protože způsobuje střídavé ztráty a oteplení. Tam, kde jsou proudové harmonické vyšších řádů, musí být skinefekt uvažován při návrhu kabelů. [13]

1.7 Předpisy a normy v oblasti nízkofrekvenčního rušení

S narůstajícím počtem využití polovodičů v elektronice, které jsou připojeny k distribuční soustavě, rapidně narůstají emise v oblasti nízkofrekvenčního rušení. Tím se samozřejmě neustále vyvíjí ucelenější legislativa a soubor norem zabývající se tímto problémem. U nízkofrekvenčního rušení jsou důležitými aspekty zejména hodnocení kvality sítě, kvalita odebírané energie, filtračních a kompenzačních prostředků a robustnosti provozovaných zařízení při deformovaném síťovém napětí, při kolísání jeho velikosti, případně při výpadcích. [2]

1.7.1 Základní zákony a nařízení v oblasti EMC

Otevřením se trhu v Evropské unii bylo nutné zpracovat jednotné směrnice pro dodržování elektromagnetické kompatibility.

Jednou z nejvýznamnějších směrnic se staly:

1. Směrnice č. 91/263/EEC, č. 92/31/EEC a č. 93/68/EEC
2. Směrnice EU č. 2004/108/ES

V podstatě tyto směrnice řeší požadavky na zařízení a požadavky na provedení instalací. [2]

1.7.2 Normy v EMC oblasti nízkofrekvenčního rušení

Zde je uveden seznam nejdůležitějších norem v oblasti nízkofrekvenčního rušení:

ČSN IEC 1000-2-1 Popis prostředí – elektromagnetické prostředí pro nízkofrekvenční rušení šířené po vedení a signály ve veřejných rozvodných sítích.

ČSN EN 61000-2-2 Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí.

ČSN EN 61000-3-2 Elektromagnetická kompatibilita Část 3-2: Meze pro emise proudu harmonických zařízení se vstupním fázovým proudem $\leq 16\text{A}$.

Výtah normy ČSN EN 61000-3-2

Norma se zabývá stanovením mezí emisí, injektovaných do veřejné distribuční sítě u zařízení $\leq 16\text{A}$. Zde je provedeno zatřídění spotřebičů do čtyř kategorií A, B, C, D.

Třída A:

- symetrická trojfázová zařízení;
- domácí spotřebiče kromě zařízení identifikovaného jako zařízení třídy D;
- nářadí kromě přenosných nářadí;
- stmívače pro žárovky;
- zvuková zařízení.

Zařízení nespecifikované v jedné ze tří dalších tříd se musí považovat za zařízení třídy A.

Třída B:

- přenosná nářadí;
- obloukové svářečky, které nejsou profesionálním zařízením.

Třída C:

- světelné zařízení

Třída D

- osobní počítače a monitory osobních počítačů, televizní přijímače s příkonem do 600W.

[4]

Meze pro zařízení třídy A:

U zařízení třídy A nesmí harmonické vstupního proudu překročit hodnoty uvedené v Tab. 1.1 [4].

Tab. 1.1 Meze harmonických proudů třídy A dle ČSN EN 61000-3-2 (převzato [4])

Spotřebiče třídy A			
liché harmonické		sudé harmonické	
Řád harm.	Max proud [A]	Řád harm.	Max proud [A]
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,40	8-40	0,23*8/h
11	0,33		
13	0,21		
15-39	0,15*15/h		

Meze pro zařízení třídy B:

U zařízení třídy B nesmí vstupní proud harmonické překročit hodnoty uvedené v Tab. 1.2 násobené činitelem 1,5. [4]

Tab. 1.2 Meze harmonických proudů třídy B dle ČSN EN 61000-3-2. (převzato [4])

Spotřebiče třídy B			
liché harmonické		sudé harmonické	
Řád harm.	Max proud [A]	Řád harm.	Max proud [A]
3	3,45	2	1,62
5	1,71	4	0,645
7	1,155	6	0,45
9	0,60	8-40	0,345*8/n
11	0,495		
13	0,315		
15-39	0,225*15/h		

Meze pro zařízení třídy C

Pro světelná zařízení s činným příkonem větším než 25 W nesmí proud harmonické překročit relativní meze uvedené v tabulce 1.3.

U světelného zařízení, které má zabudované stmívače nebo obsahuje stmívače zabudované v krytu, se však aplikují meze uvedené v tabulce 1.1.

U výbojkového světelného zařízení, které má zabudované stmívače nebo se skládá z nezávislých stmívačů nebo stmívačů zabudovaných do krytu, platí následující podmínky.

- hodnoty proudu harmonických pro podmínku maximální zátěže odvozenou od procentních mezí uvedených v Tab. 1.3 se nesmí překročit.
- pro jakoukoliv stmívací polohu nesmí harmonické překročit hodnotu proudu povolenou při podmínce maximální zátěže.

Pro výbojková světelná zařízení s činným příkonem menším než 25 W a včetně musí být ve shodě s jedním z následujících dvou souborů požadavků:

- proud harmonické nesmí překročit meze vztažené k výkonu podle Tab. 1.4, sloupec 2, nebo
- proud třetí harmonické, vyjádřený jako procentní hodnota základní složky proudu, nesmí překročit 86 % a pátá nesmí překročit 61 %; mimoto tvar vlny vstupního proudu musí být takový, aby začínal protékat před nebo v 60° , měl poslední vrchol (je-li v půlperiodě více vrcholů) před nebo v 65° a průtok se neukončil před 90° , přičemž průchod nulou základní harmonické napájecího napětí se předpokládá, že je v 0° . [4]

Tab. 1.3- Meze pro zařízení třídy C (převzato [4])

Spotřebiče třídy C	
pouze liché harmonické	
Řád harm.	Max poměr mA/ W
2	2
3	30 x λ
5	10
7	7,00
9	5
11-39	3

Meze pro zařízení třídy D

U zařízení třídy D nesmí vstupní proud harmonické překročit hodnoty uvedené v Tab. 1.4 [4].

Tabulka 1.4 Meze pro zařízení třídy D (převzato [4])

Spotřebiče třídy D		
pouze liché harmonické		nejvyšší dovolený proud h
Řád harm.	Max poměr mA/ W	A
3	3,4	2,30
3	1,9	1,14
5	1,0	0,77
7	0,50	0,40
9	0,35	0,33
15-39	3,85/h	viz tabulka 1

Výtah normy ČSN EN 61000-2-2

Meze pro kompatibilní úrovně nízkofrekvenčního rušení pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nízkého napětí jsou uvedena v Tab. 1. 5. [5]

Tab. 1.5 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nízkého napětí (převzato [5])

Liché harmonické, jejichž řád není násobkem tří		Liché harmonické, jejichž řád je násobkem tří		Sudé harmonické	
Řád harm.	[%] U _N	Řád harm.	[%] U _N	Řád harm.	[%] U _N
5	6	3	5	2	5
7	5	9	1,5	4	1,5
11	3,5	15	0,4	6	0,4
13	3	21	0,3	8	0,3
17≤h≤49	2,27 x (17/h)-0,27	21≤h≤45	0,2	10≤h≤50	0,25 x (10/h) + 0,25

2 Měření harmonických průběhů v nízkofrekvenční oblasti

2.1 Teorie měření harmonických vyšších řádů

Velký význam při řešení problémů elektromagnetické kompatibility má znalost zdrojů rušení a charakter rušivých veličin. Vedle druhu zdroje rušení a charakteru jeho časového průběhu je též důležité znát jeho frekvenční spektrum. Rovněž je podstatné dělení signálů na periodické a neperiodické, dále také na signály s úzkým či širokým spektrem signálu.

Měření harmonických průběhů je možné zjistit trojím způsobem, a to:

- Pomocí A/D převodníků;
- Pomocí osciloskopu;
- Pomocí analyzátoru sítě.

[1]

2.1.1 Měření pomocí A/D převodníku.

Jedinou výhodou této metody je, že není zapotřebí drahých měřicích přístrojů. K měření stačí pouze obyčejný A/D převodník a počítač. Na trhu je dnes různá škála A/D převodníků, které jsou vhodné pro měření harmonických vyšších řádů. Dále je zapotřebí bezpodmínečné znalosti problematiky měření. V dnešní době je již tato metoda na ústupu, neboť s klesající cenou elektroniky jsou měřicí přístroje daleko dostupnější. [2]

2.1.2 Využití za pomoci osciloskopu

Zde se používají především digitální osciloskopy, ty se spojí s počítačem, což je výhodné pro další zpracování změřeného signálu. Velkou nevýhodou tohoto měření je ale velikost paměti pro ukládání dat v osciloskopu, což činí omezení analýzy v reálném čase. Pro měření spektrální analýzy, musí být osciloskop vybaven rychlou Fourierovou transformací a nejlépe čtyřkanálové. [2]

2.1.3 Měření za pomoci speciálních analyzátorů

Analyzátory umožňují monitorovat a zároveň také hned vyhodnocovat, měřit více fází současně přímo v reálném čase. Dále nabízí variabilitu hardwarových platforem, na kterých může být analyzátor provozován. To staví analyzátory do popředí, neboť měření pomocí nich je nejefektivnější. [2]

2.2. Praktické měření

Úkolem měření bylo na vybraném objektu (zvolen rodinný dům) změřit harmonická napětí a proudy v rozvodné síti. Pro samotné měření byl vybrán pro své přednosti a vhodnost analyzátor sítě BK ENA 330. Bylo provedeno měření, které se rozdělilo na tři části. První část měření byla provedena po dobu 24 hodin monitorování s periodou ukládání 3s. Druhá část se uskutečnila po dobu 7 dnů monitorování s periodou ukládání vzorku 10 min. Naposled bylo provedeno měření postupně na jednotlivých spotřebičích s periodou ukládání 200 ms. Pro všechna tři měření je pevně předdefinovaná vzorkovací frekvence 9600 Hz. Veškeré naměřené hodnoty jsou v efektivních hodnotách.

2.2.1 Popis analyzátoru sítě BK ELCOM ENA 330

ENA 330 je kompaktní měřicí přístroj, který analyzuje kvalitu elektrické energie, je v provedení bez displeje. Tento přístroj má čtyři napěťové vstupy a čtyři proudové vstupy.

Proudy se měří nepřímou a proudový rozsah je dán použitím proudových kleští. Používají se klasické s železným jádrem pro měření do 10 A nebo pro větší proudový rozsah flexibilní Rogovského cívky zvané AmpFLEX, pro které jsou v přístroji zabudované zesilovače vstupního signálu. Přesnost měření je lepší než $\pm 0,1\%$ pomocí kleští MN71. [6]

Rozsahy napěťových vstupních kanálů jsou 65, 110, 230, 450 V AC, přístroj měří do 600 V rms. Přesnost měření modulu je lepší než $\pm 0,1\%$.

Pro komunikaci a nastavení přístroje je analyzátor vybaven připojením rozhraní Ethernet a USB s externí konfigurací pomocí PC. [6]

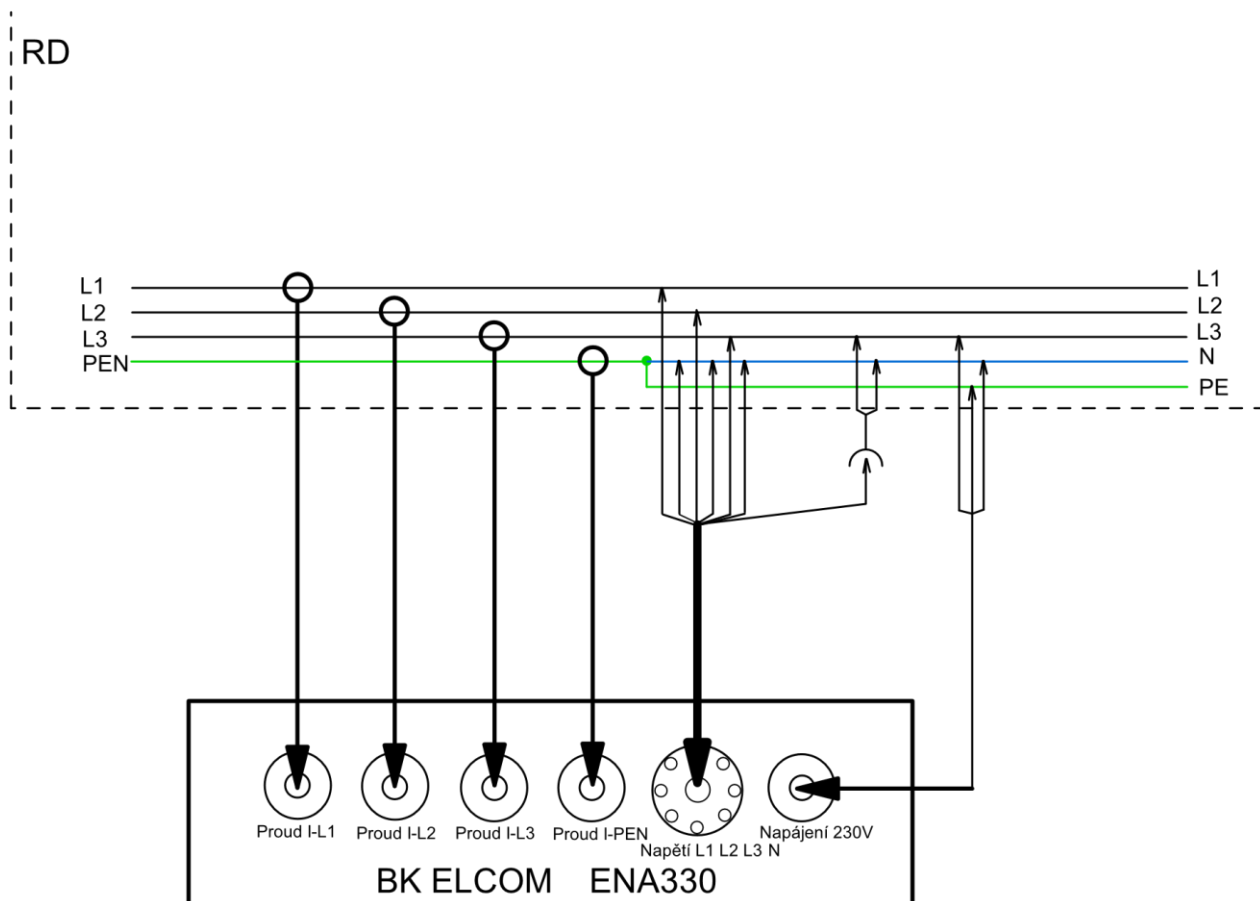


Obr. 2.1 Analyzátor ENA 330 (převzato [7])

2.2.2 Připojení přístroje

Nejprve bylo nutné připojit přístroj na analyzovanou síť, připojen byl k domovnímu rozvaděči dle schématu zapojení podle Obr. 2.2. Připojeny byly napěťové vstupy a čtyři proudové vstupy. $3xU_f + 3I_f + N$. Kleště byly použity klasické s železným jádrem.

Dále bylo nutné připojit přes zásuvku napěťový vstup 230 V pro zaznamenání napěťového vstupu v Transientu. Naposled se připojilo samotné napájení pro analyzátor, které je také 230 V.



Obr. 2.2 Schéma zapojení analyzátoru k měřené síti

2.2.3 Nastavení přístroje pro měření

Přístroj ELCOM ENA 330 je analyzátor, který je nutné pro samotné nastavení spojit s počítačem (notebookem) přes hardwarové rozhraní ethernetového portu. Po zapnutí se nám zobrazí základní panel analyzátoru (Obr. 2.3). Zde se nastavily základní informace o uživateli a názvu měření. Pokračuje tlačítko nastavení.

Po stisku tohoto tlačítka se objeví grafický panel se základními informacemi o nastavení analyzátoru jednotlivých módů:

Zapojení;

Nastavené napěťové a proudové rozsahy;

Přepočítací konstanty převodů měřicích transformátorů proudů a napětí;

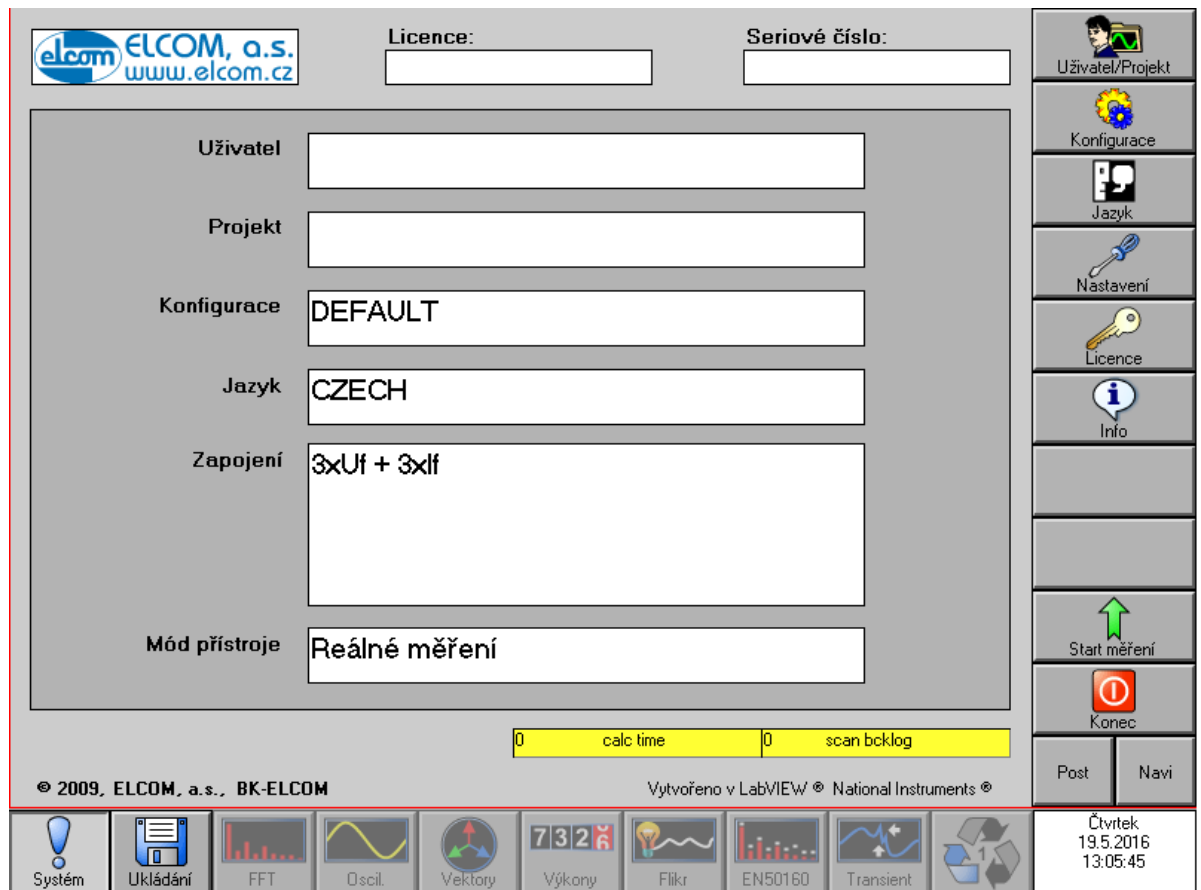
Vzorkovací frekvence pro transientní zapisovač;

Úroveň referenčního napětí pro monitor napětí podle ČSN EN 50160;

Jmenovitá frekvence (50 Hz – 60 Hz);

Krok pro analýzu spekter (harmonické – meziharmonické);

Mód analyzátoru (reálné měření – simulace).



Obrázek 2.3 Základní panel nastavení analyzátoru

Mód zapojení:

Zde se zvolila varianta zapojení 3xUf+3xIf+N.

Mód napěťových a proudových rozsahů:

U zvolené varianty 3xUf byl zvolen napěťový rozsah 230 V, dále u proudového rozsahu 3xIf byl zvolen rozsah do 10 A.

Mód přepočítací konstanty převodů měřicích transformátorů proudů: a napětí:

Zde byl ponechán rozsah násobku 1.

Mód vzorkovací frekvence pro transienční zapisovač:

Zůstává nastaveno 9600 Hz.

Mód úrovně referenčního napětí pro monitor napětí:

Zde jsou nastaveny hodnoty dovolených odchylek napětí, proudů, harmonických veličin, flikru apod. dle ČSN EN 50160. Zadané hodnoty byly v souladu s uvedenou normou, proto ponecháno beze změny.

Mód jmenovitá frekvence (50 Hz – 60 Hz):

Jmenovitá frekvence v ČR je 50 Hz.

Mód nastavení transientu:

Pro vyhodnocování sinusových průběhů v daný časový okamžik slouží transienční zapisovač. Vzhledem k tomu, že nebylo možné určit žádnou referenční hodnotu, při které by se měl transient automaticky spustit, bylo nutné ho spouštět ručně. Viz zapojení Obr. 2.2. Aby nedocházelo k zahlcení paměti analyzátoru ENA 330, byla zvolena tato varianta spouštění.

2.2.4 Popis zvoleného objektu

Měřený objekt je typický rodinný dům, který se nachází v rodinné zástavbě. Dům je rozdělen do dvou bytových jednotek přibližně stejné velikosti, 1. NP a 2. NP. Jsou zde užívány běžné spotřebiče, na ohřev vody plynový kotel, k přípravě pokrmů slouží indukční deska a el. trouba, myčka, pračka, televize, PC, osvětlovací soustavy skládající se z úsporných bodovek, kompaktních úsporných žárovek a klasické žárovkové osvětlení. V Tab. 2.1 je uveden celý seznam spotřebičů, včetně jejich příkonů a používání ve sledovaném období, a v pravé části stojí, na kterou fázi je instalace připojena.

Napěťové soustavy

Napájení 3+ PEN stř. 50 Hz, 400/230 V, TN-C

Instalace 3+N+PE stř. 50 Hz, 400/230 V, TN-S

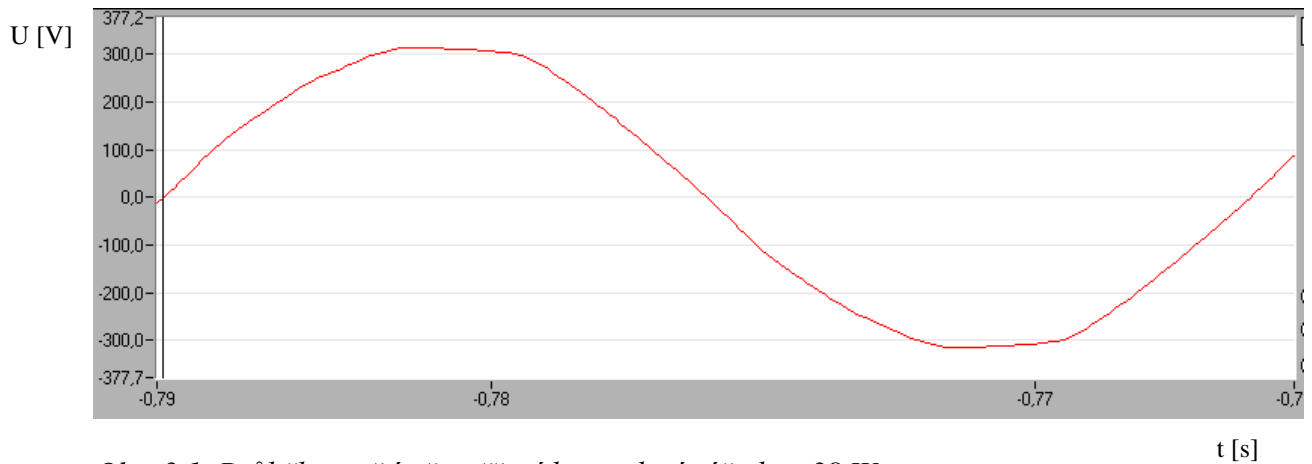
Tab. 2.1 Tabulka domácích spotřebičů s připojením na danou fázi:

Přístroj	příkon [W]	doba využívání za 24h		Připojeno na fázi		
		Po-Pá	So-Ne	L1	L2	L3
Lednice	100	6	6			X
Elektrická trouba	3400	0,5	3h		X	
Mikrovlnná trouba	1200	0,5	0,5			X
Indukční deska	7200	1	3	X		X
Myčka	2500	2	2			X
Pračka	2100	2	3	X		
Rychlovarná konvice	2000	0,2	0,3			X
Žehlička na vlasy	60	0,5	0,5	X		
Vysavač	1800	0,20	0,20	X		
LCD televizor LG	180	4	8			X
LCD televizor Samsung	48	0	2		X	
DVD - přehrávač	9	0	0			X
Notebook Packard bell	90	5	10	X		
Notebook Dell	65	5	7	X		
Tiskárna HP	50	1	1	X		
Nabíječka mob. Telefonu	6,5	1	1	X		
Osvětlení úsporné bodovky	25,4	4	8		X	X
Osvětlení kompaktní žárovky	72	4	6	X	X	
Osvětlení klasické žárovky	550	0,5	0,5	X		X
Nabíječka fotoaparátu	10	0	1	X		
Zdroj WIFI přístupový bod	6,5	6	12		X	
Zdroj Wifi router	12	6	12		X	
Připojené spotřebiče ve stand-by režimu						
Indukční deska	7200			X		X
Elektrická trouba	3400				X	

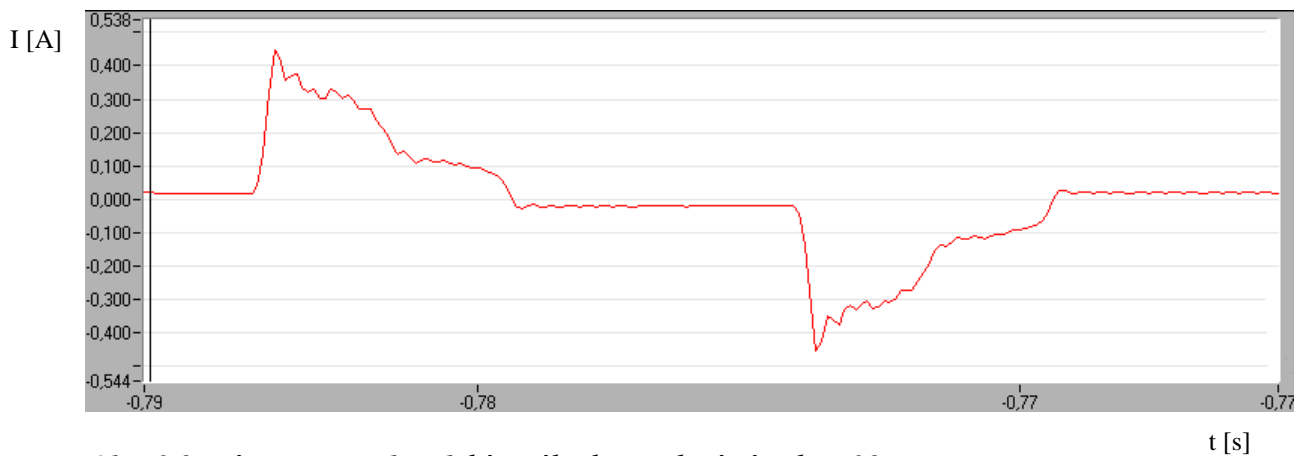
3 Měření a vyhodnocení jednotlivých domácích spotřebičů

3.1 Měření jednotlivých spotřebičů

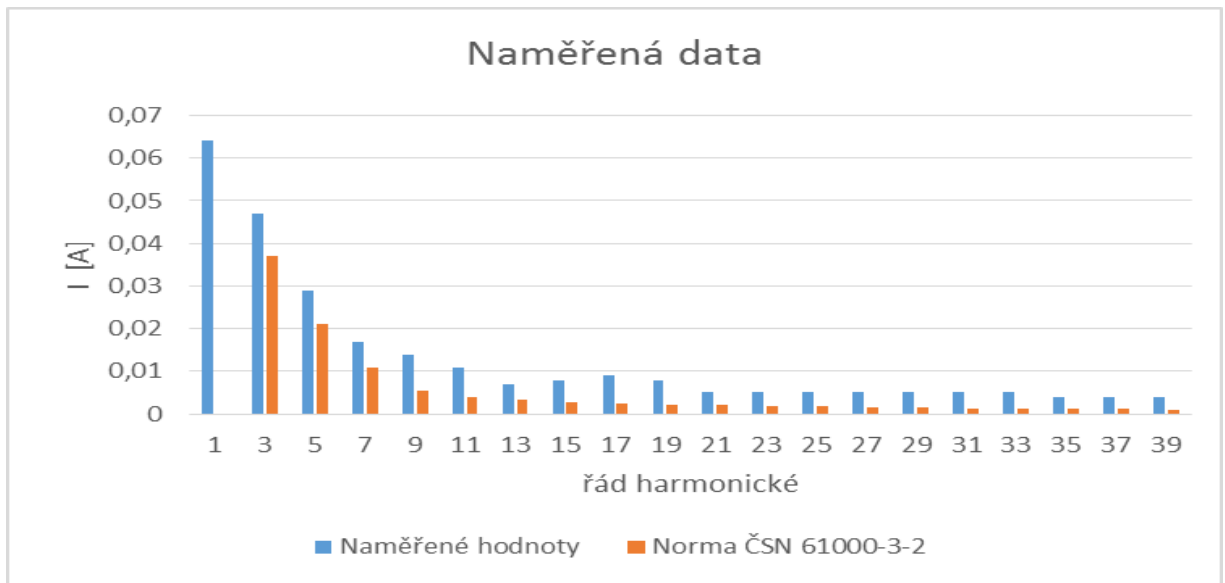
Pro toto měření byly zvoleny čtyři standartní představitele domácích spotřebičů - kompaktní zářivka, zdroj pro notebook, LCD televize a DVD přehrávač.



Obr. 3.1 Průběh napětí při měření kompaktní zářivkou 38 W



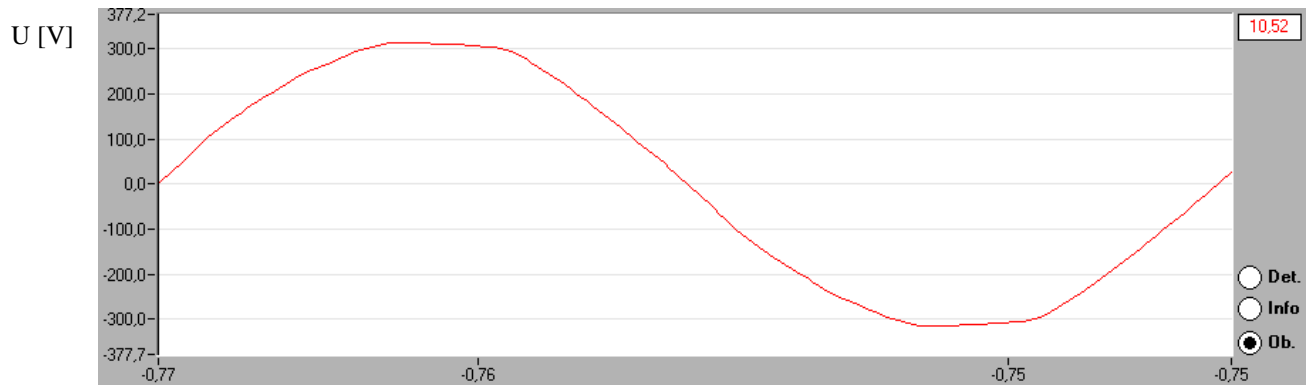
Obr. 3.2 Záznam proudu odebíraného kompaktní zářivkou 38 W



Obr. 3.3 Harmonické proudy odebírané kompaktní zářivkou 38 W

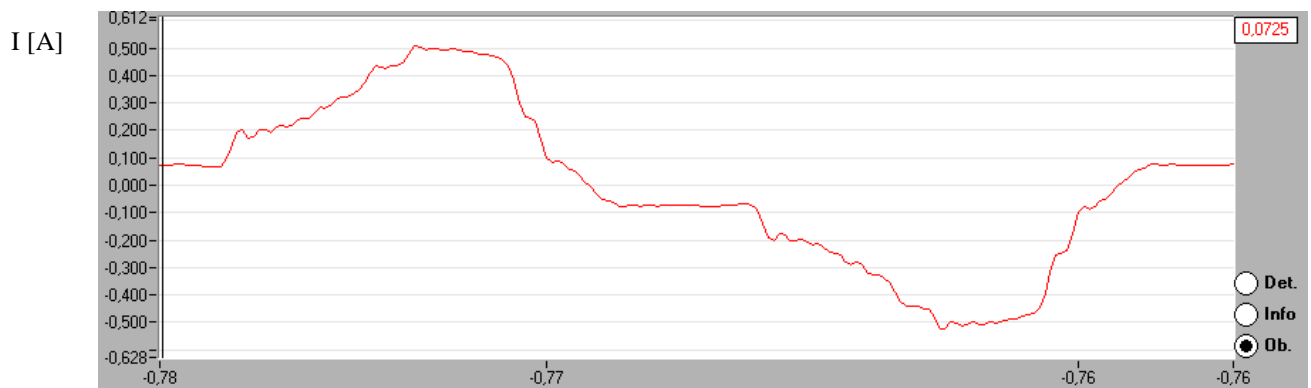
Tab. 3.1 Naměřené hodnoty proudu kompaktní zářivkou 38 W

Kompaktní zářivka 38 W		
Spotřebič třídy C		
THD-I= 73,77 % THD-U= 2,65 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,131	
3	0,073	0,037
5	0,037	0,013
7	0,031	0,009
9	0,010	0,006
11	0,021	0,004
13	0,015	0,004
15	0,015	0,004
17	0,010	0,004
19	0,010	0,004
21	0,011	0,004
23	0,007	0,004
25	0,008	0,004
27	0,005	0,004
29	0,007	0,004
31	0,005	0,004
33	0,006	0,004
35	0,005	0,004
37	0,006	0,004
39	0,005	0,004



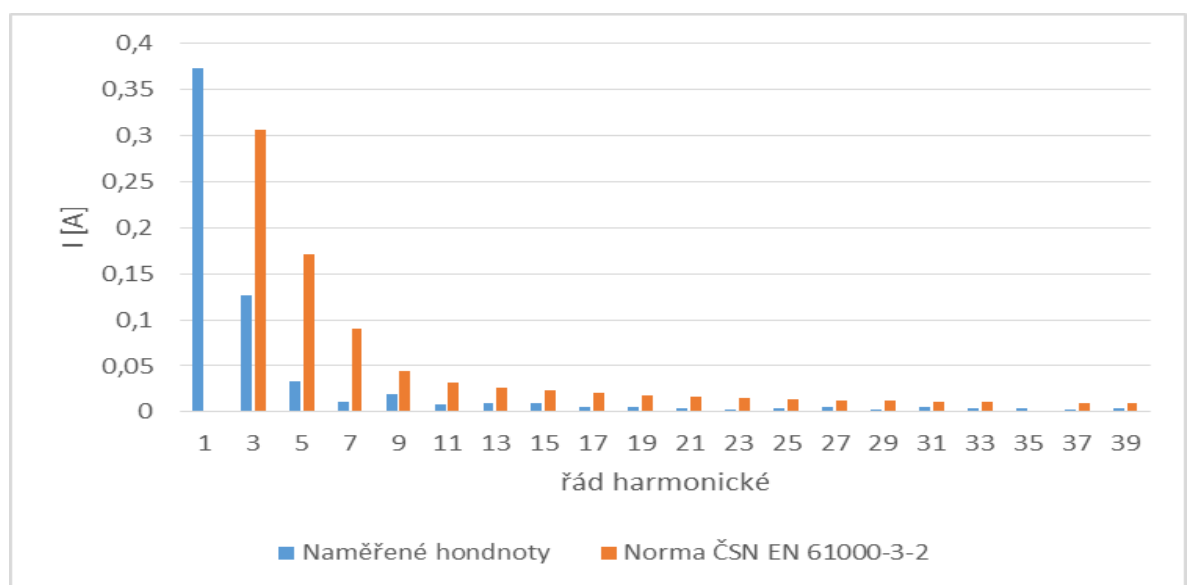
Obr. 3.4 Průběh napětí při měření zdroje k notebooku

t [s]



Obr. 3.5 Záznam proudu odebíraného zdrojem pro notebook

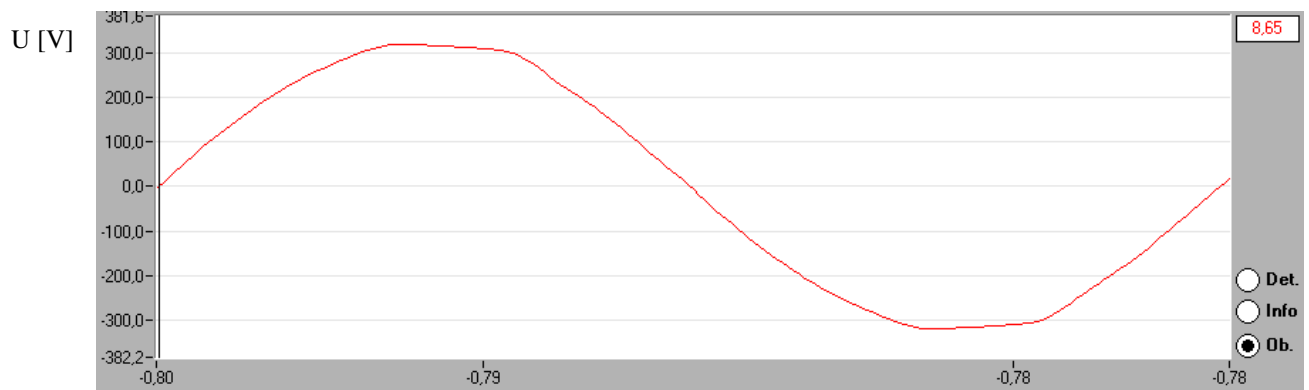
t [s]



Obr. 3.6 Harmonické proudy odebíraného zdrojem pro notebook

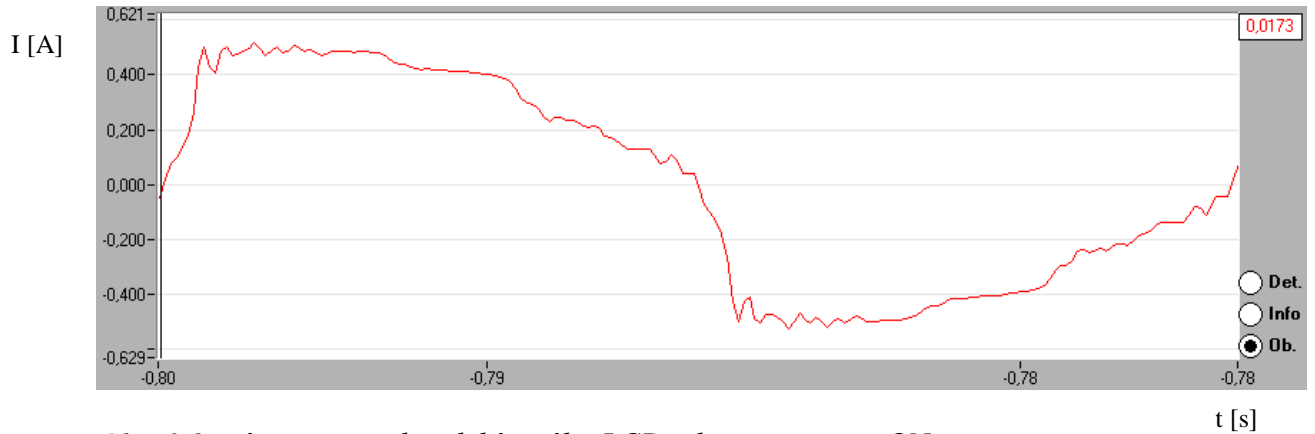
Tab. 3.2 Naměřené hodnoty proudu zdroje k notebooku

Zdroj k notebooku Packard Bell		
Spotřebič třídy D		
THD-I = 37,5 % THD-U = 2,6 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma [A]
1	0,374	
3	0,126	0,306
5	0,033	0,171
7	0,011	0,090
9	0,019	0,045
11	0,008	0,032
13	0,010	0,026
15	0,010	0,023
17	0,005	0,020
19	0,006	0,018
21	0,004	0,017
23	0,003	0,015
25	0,004	0,014
27	0,005	0,013
29	0,003	0,012
31	0,005	0,011
33	0,004	0,011
35	0,004	0,001
37	0,003	0,009
39	0,004	0,009

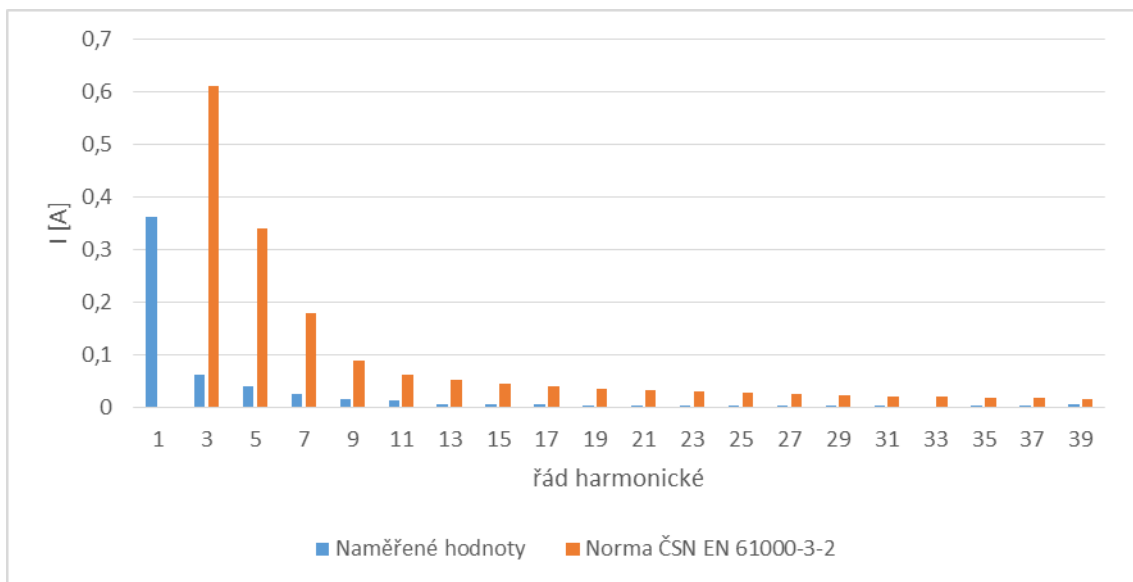


Obr. 3.7 Průběh napětí při měření pro LCD televizor

t [s]



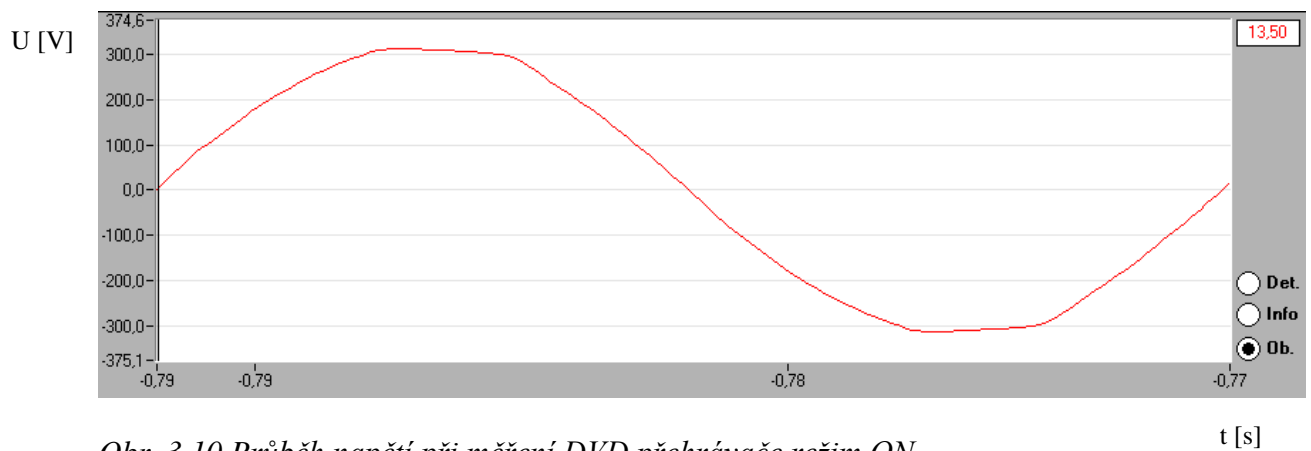
Obr. 3.8 Záznam proudu odebíraného LCD televizoru režim ON



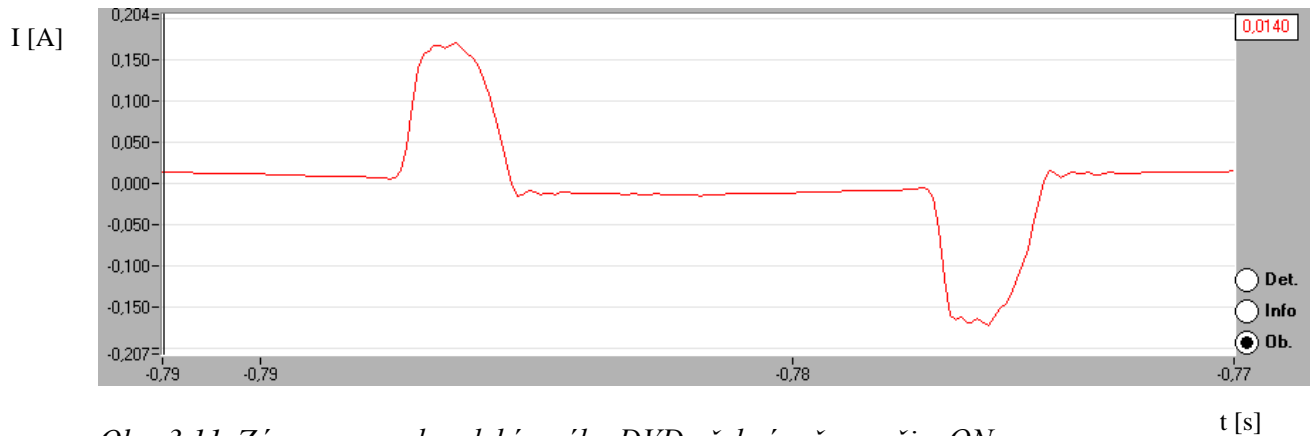
Obr. 3.9 Harmonické proudu odebíraného LCD televizi režim ON

Tabulka 3.3 Naměřené hodnoty proudu pro televizor LG režim ON

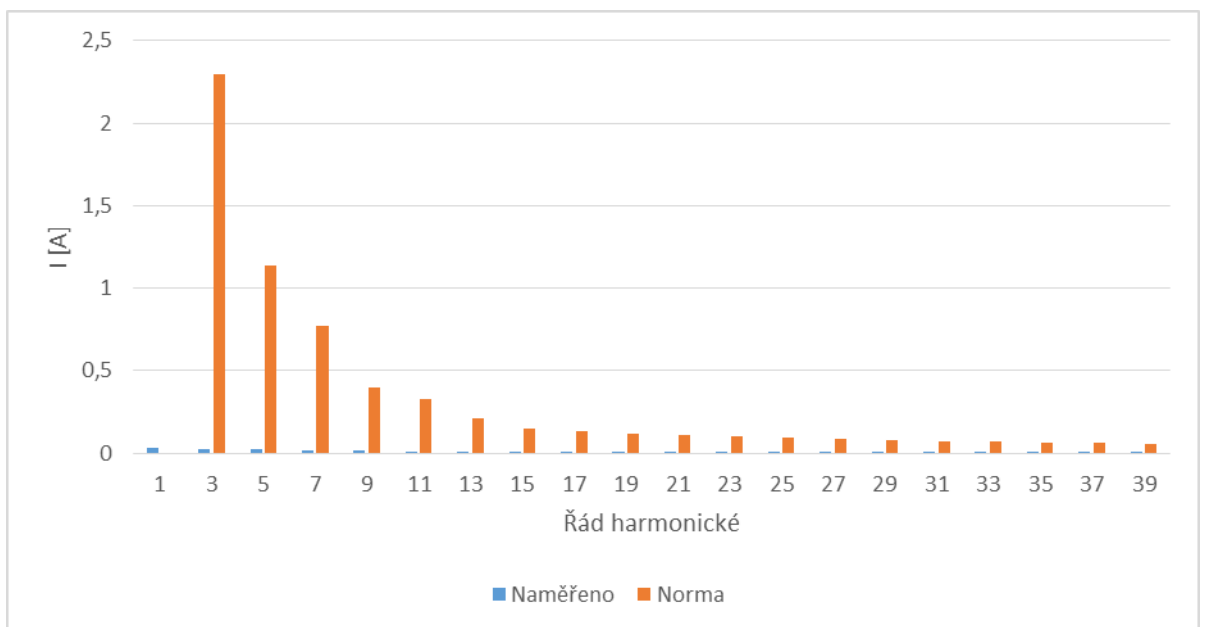
Televizor LG		
Třída spotřebiče: D		
THD-I = 23,56 % THD-U = 2,67 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,363	
3	0,064	0,612
5	0,042	0,342
7	0,027	0,180
9	0,016	0,090
11	0,014	0,063
13	0,007	0,053
15	0,007	0,046
17	0,006	0,041
19	0,004	0,037
21	0,005	0,033
23	0,004	0,030
25	0,005	0,028
27	0,004	0,027
29	0,004	0,024
31	0,004	0,022
33	0,002	0,021
35	0,004	0,019
37	0,004	0,019
39	0,006	0,018



Obr. 3.10 Průběh napětí při měření DVD přehrávače režim ON



Obr. 3.11 Záznam proudu odebíraného DVD přehrávačem režim ON



Obr. 3.12 Harmonické proudu odebíraného DVD přehrávačem režim ON

Tabulka 3.4 Naměřené hodnoty proudu pro DVD přehrávač režim ON

DVD LG		
Třída spotřebiče: A		
THD - I = 164, 14 % THD-U = 2,62 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma [A]
1	0,029	
3	0,027	2,300
5	0,023	1,140
7	0,017	0,770
9	0,012	0,400
11	0,009	0,330
13	0,005	0,210
15	0,003	0,150
17	0,003	0,132
19	0,003	0,118
21	0,002	0,107
23	0,002	0,098
25	0,002	0,090
27	0,001	0,083
29	0,001	0,078
31	0,001	0,073
33	0,001	0,068
35	0,001	0,064
37	0,001	0,061
39	0,001	0,057

3.2 Vyhodnocení naměřených hodnot jednotlivých spotřebičů

Porovnání naměřených hodnot bylo provedeno s normou ČSN EN 61000-3-2

Měření kompaktní zářivka 36W,

Na Obr. 3.1 je znázorněn průběh proudu kompaktní zářivkou, zdaleka nepřipomíná sinusový průběh. Je zde velká deformace základního průběhu. Parametry tohoto spotřebiče jsou překračovány ve všech řádech harmonických proudů. To je patrné z grafu na Obr. 3. 2. a Tab. 3.1. Lze konstatovat, že spotřebič normě nevyhovuje.

Dále byl zařazen k měření zdroj k notebooku. Při porovnání naměřených hodnot s normou v Tab. 3.2 nedochází ani u jedné hodnoty k překročení normy, avšak při pohledu na průběh proudu znázorněný na Obr. 3.5 je vidět vliv 3 a 5 harmonického proudu. Spotřebič normě vyhovuje.

Dalším spotřebičem je televize LG. Zde se lze říct, že průběh proudu znázorněný na Obr. 3.8 již vzdáleně připomíná sinusový průběh. Při srovnání naměřených dat dle Tab. 3.3 s normou nedochází k překračování jednotlivých naměřených hodnot harmonických proudů vyšších řádů Tab. 3.4.

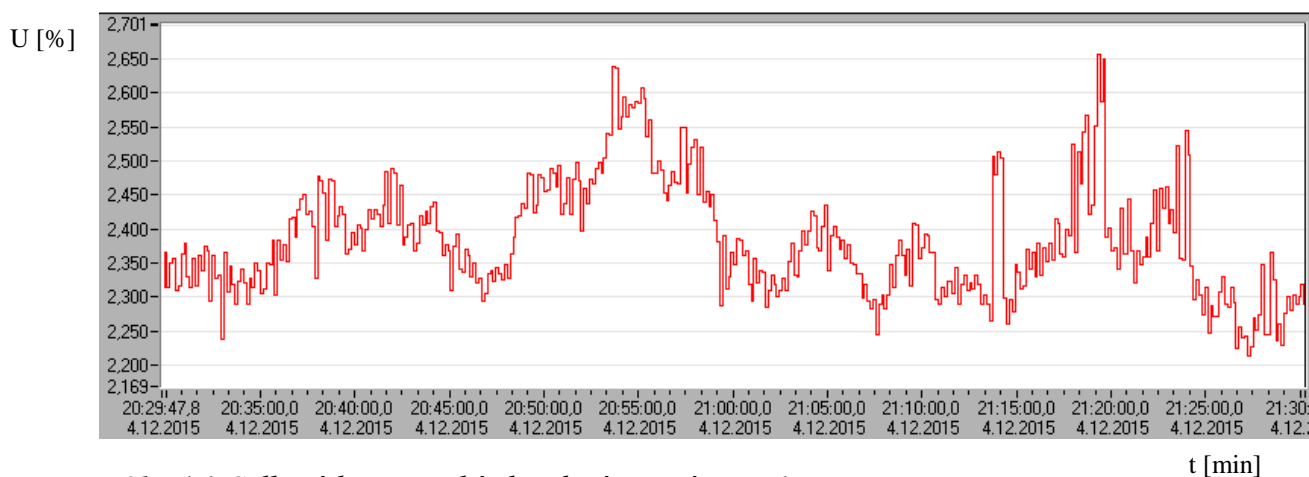
Jako poslední spotřebič byl vybrán DVD přehrávač. U tohoto spotřebiče také nedochází k překračování normy jednotlivých harmonických proudů vyšších řádů.

Průběh napětí je pro všechny spotřebiče stejný, je zde vidět drobné pokřivení způsobené harmonickým průběhem napětí vyšších řádů v distribuční síti.

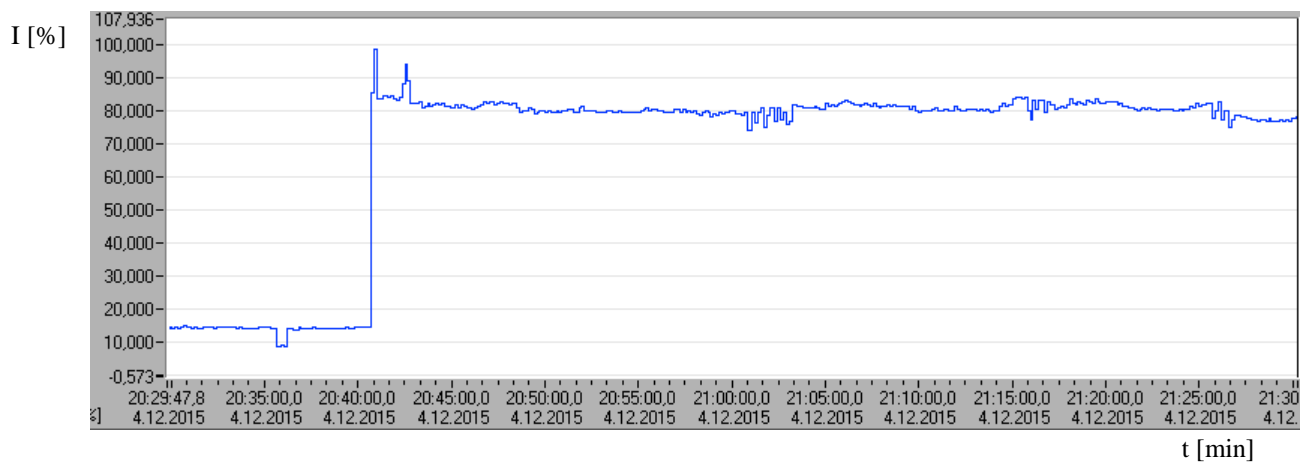
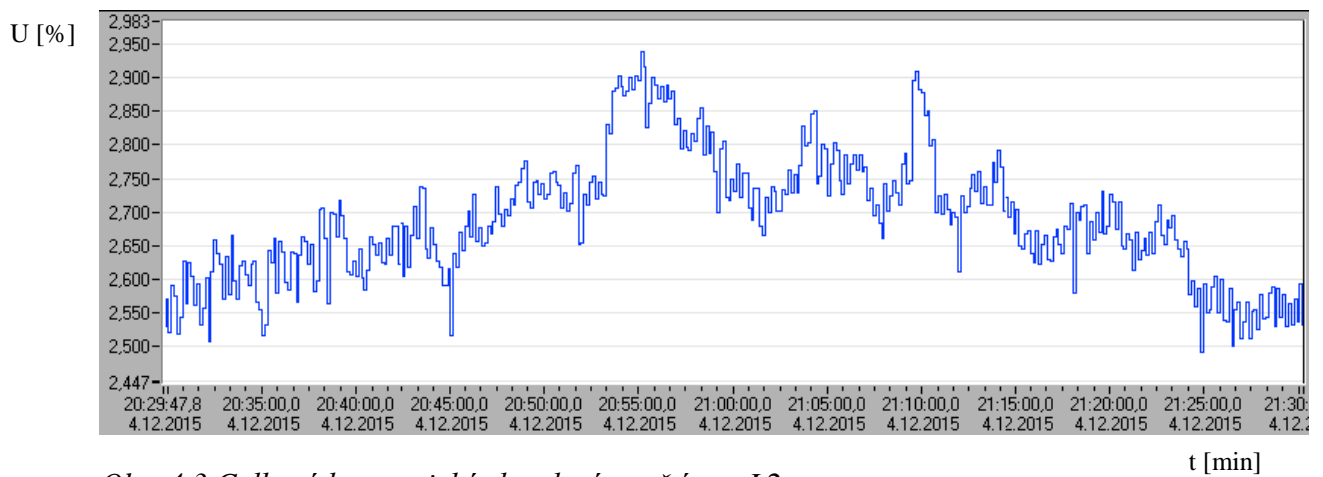
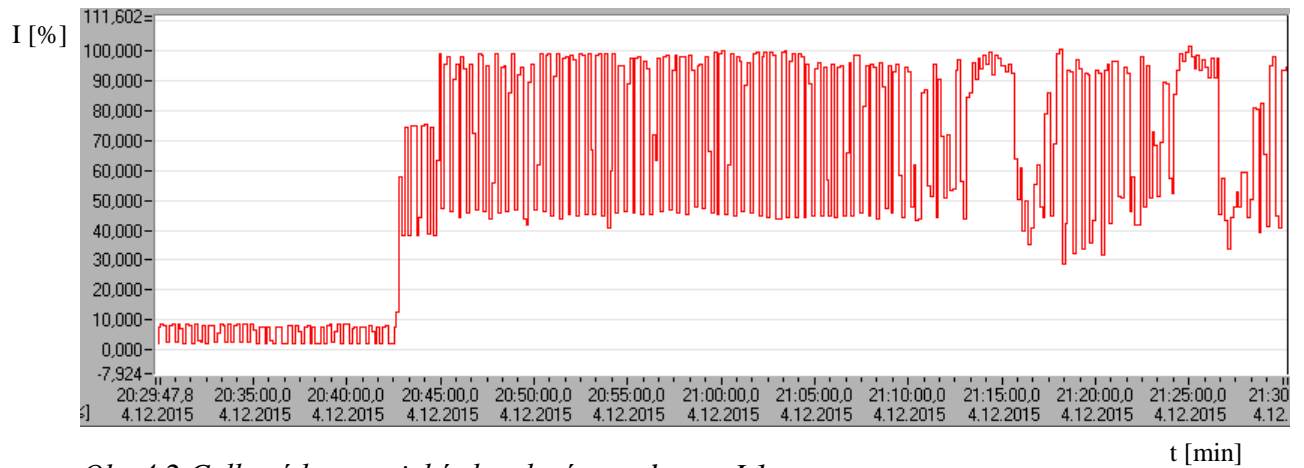
4 Měření na objektu

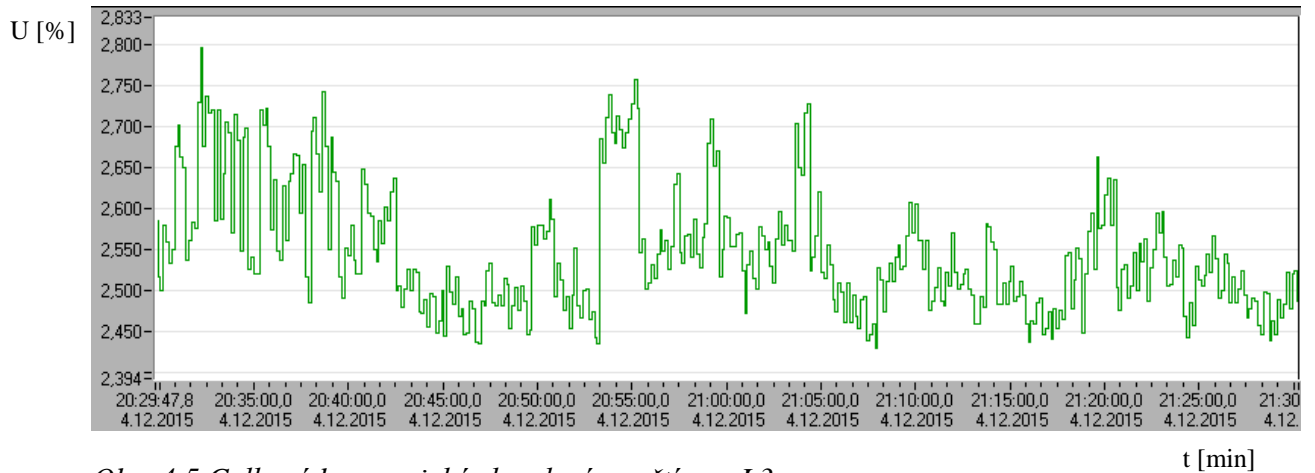
4.1. Krátkodobé měření v délce 1 hodiny

Měření bylo provedeno 4. 12. 2015

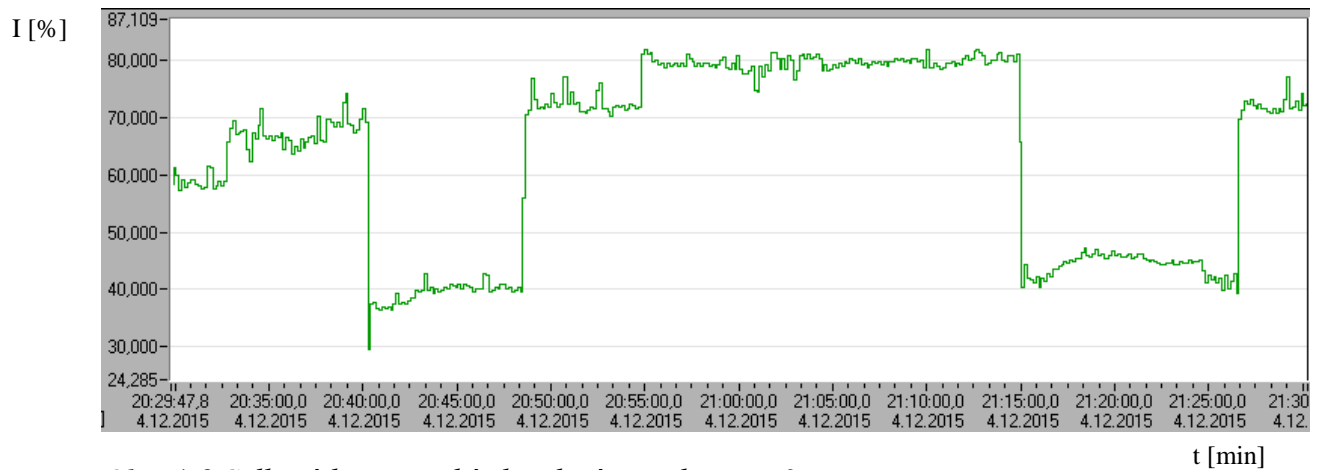


Obr 4.1 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L1





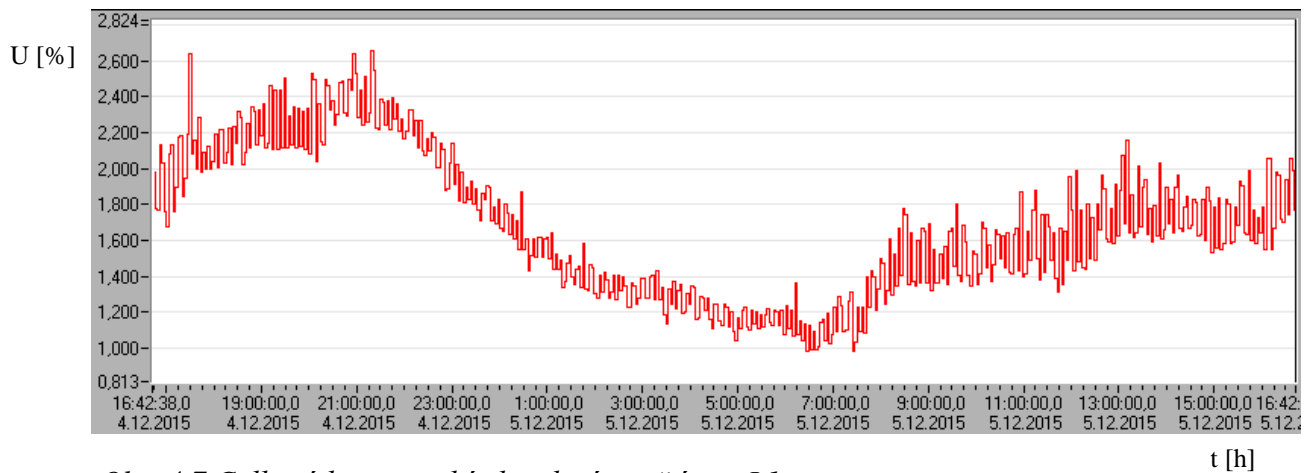
Obr. 4.5 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L3



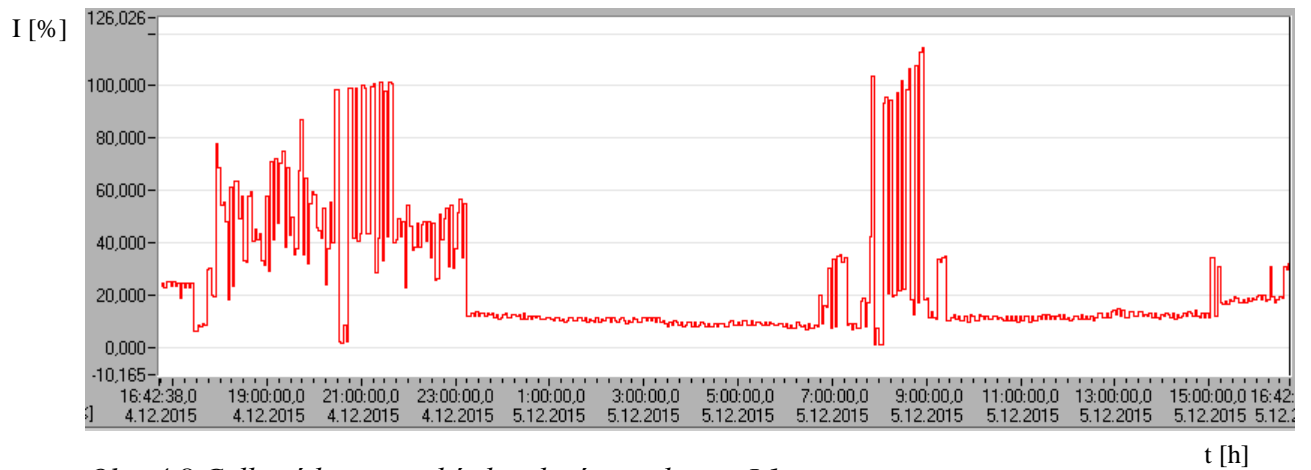
Obr. 4.6 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L3

4.2. Měření v délce trvání 24 hodin

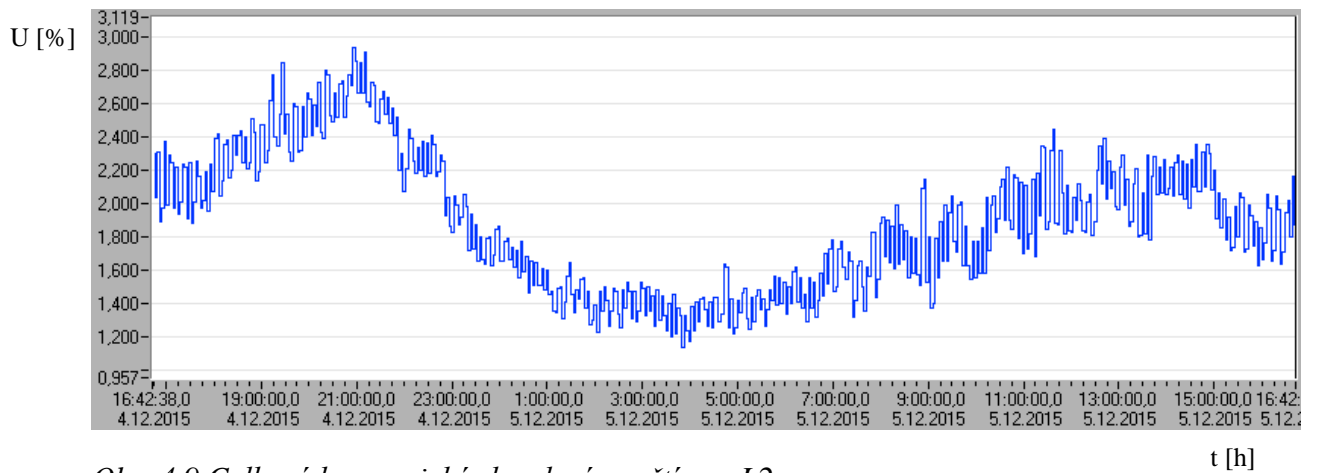
Měření v délce trvání 24 hodin bylo provedeno ve dnech od 4. 12. 2015 - 5. 12. 2015.



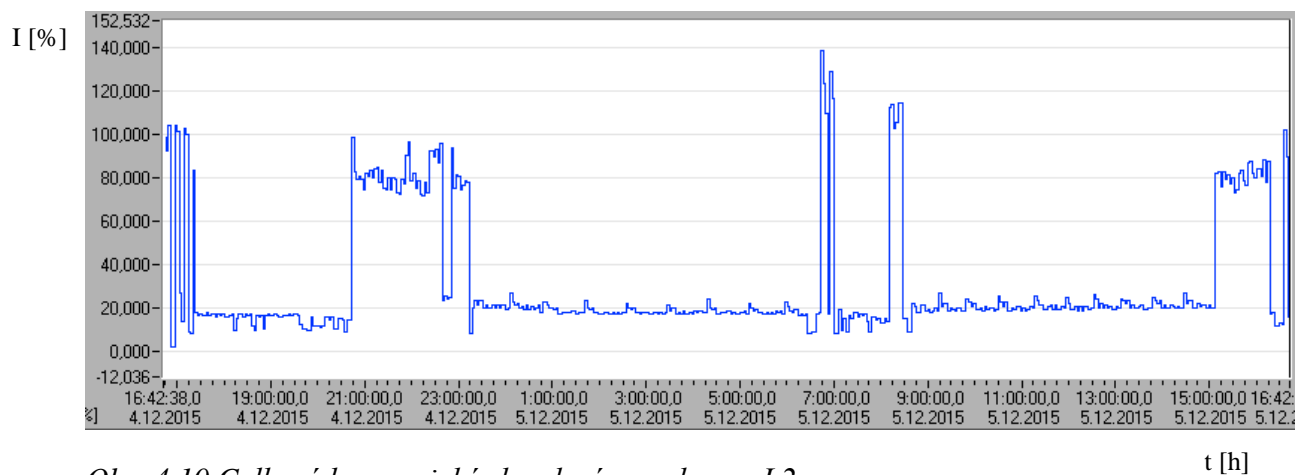
Obr. 4.7 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L1



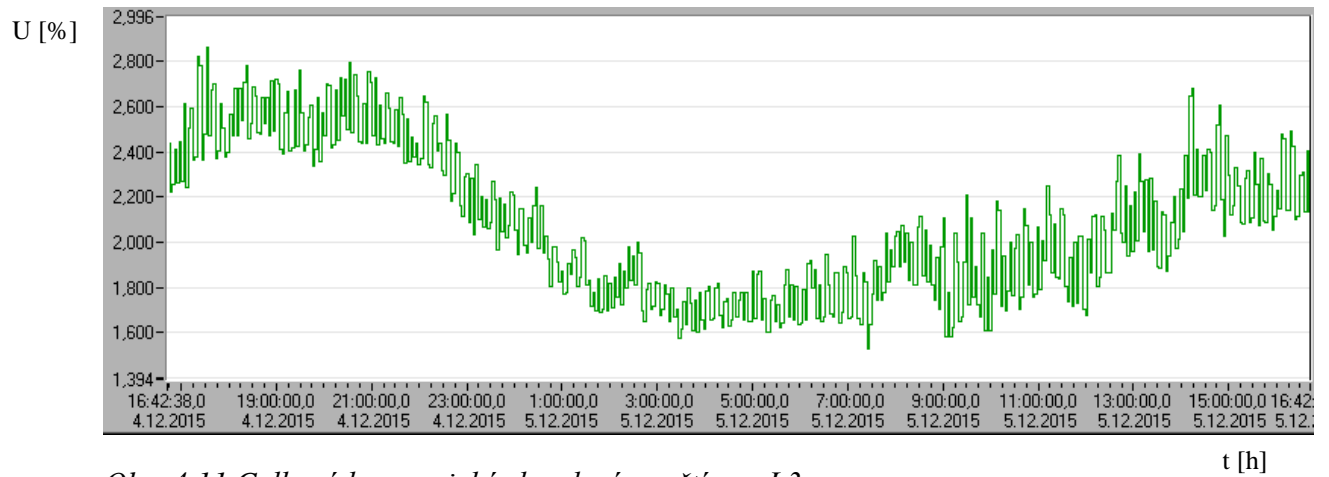
Obr. 4.8 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L1



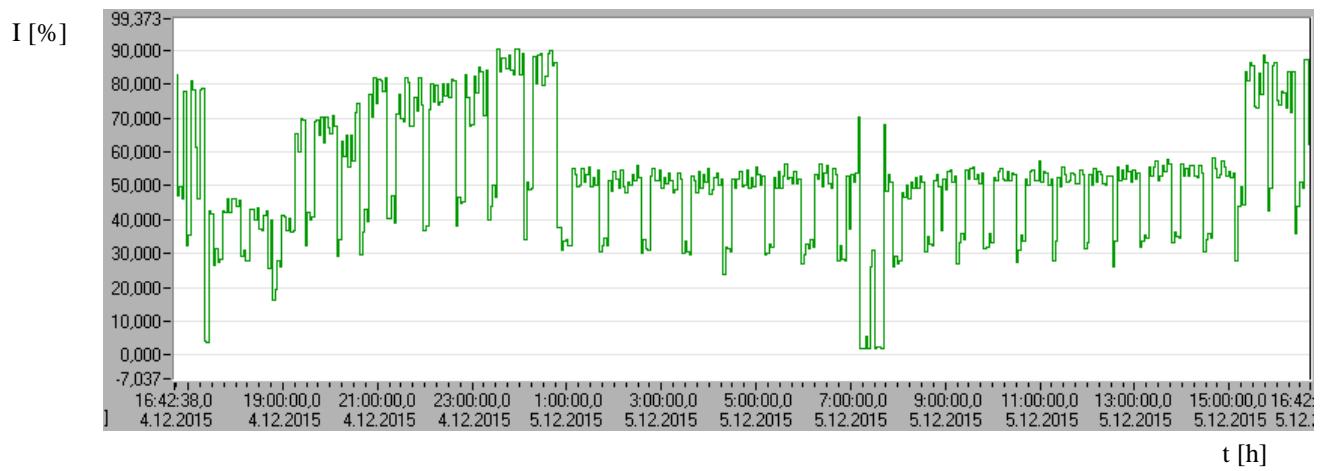
Obr. 4.9 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L2



Obr. 4.10 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L2



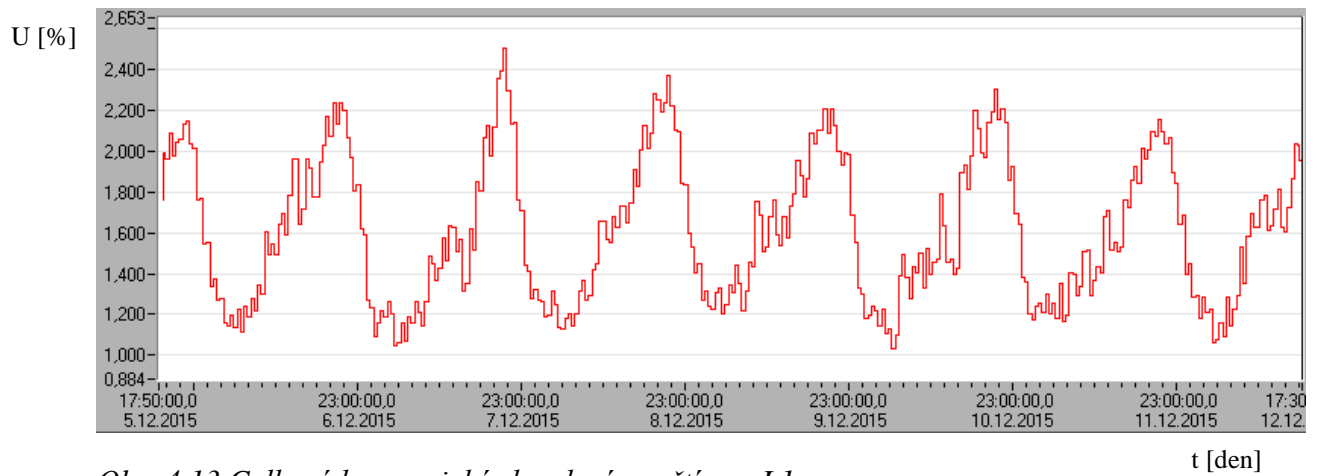
Obr. 4.11 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L3



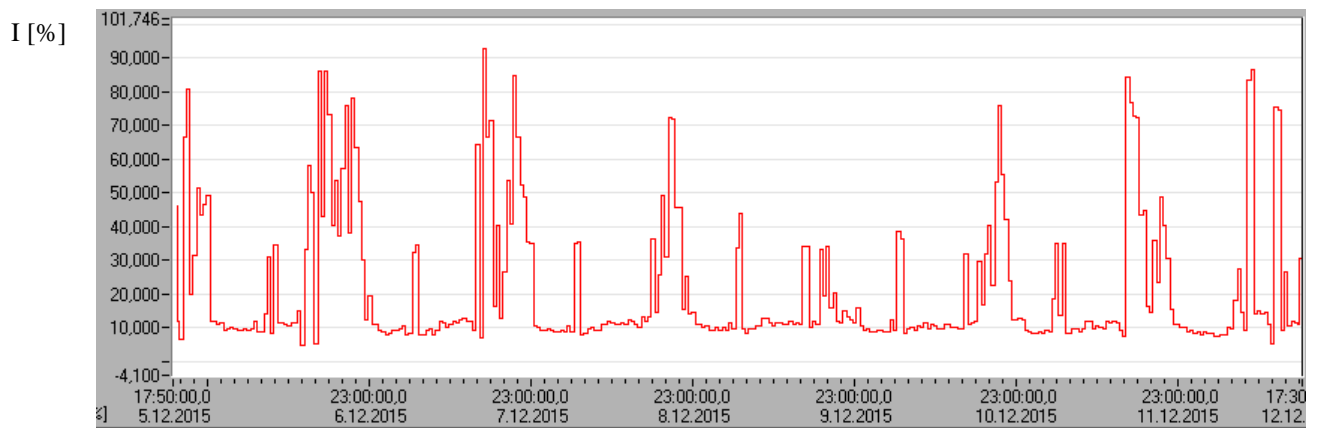
Obr. 4.12 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L3

4.3 Měření v intervalu 7 dní

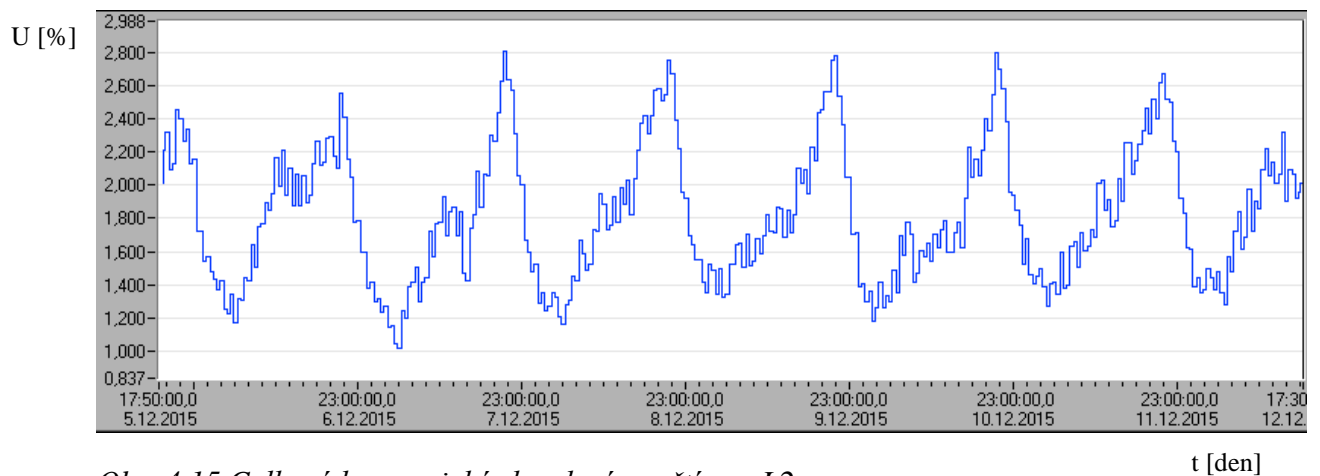
Měření bylo zahájeno 5. 12. 2015 a ukončeno 12. 12. 2015.



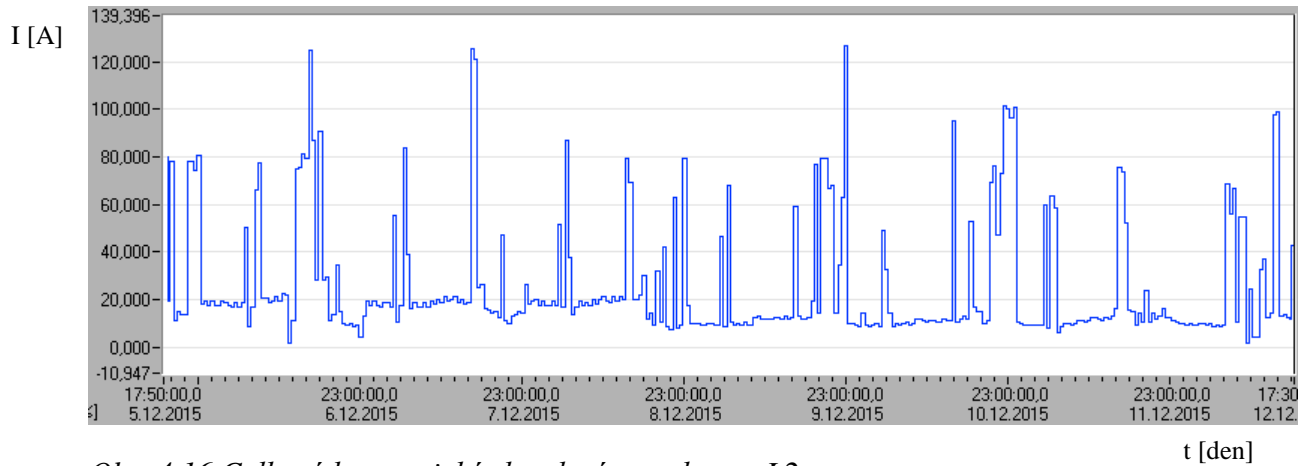
Obr. 4.13 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L1



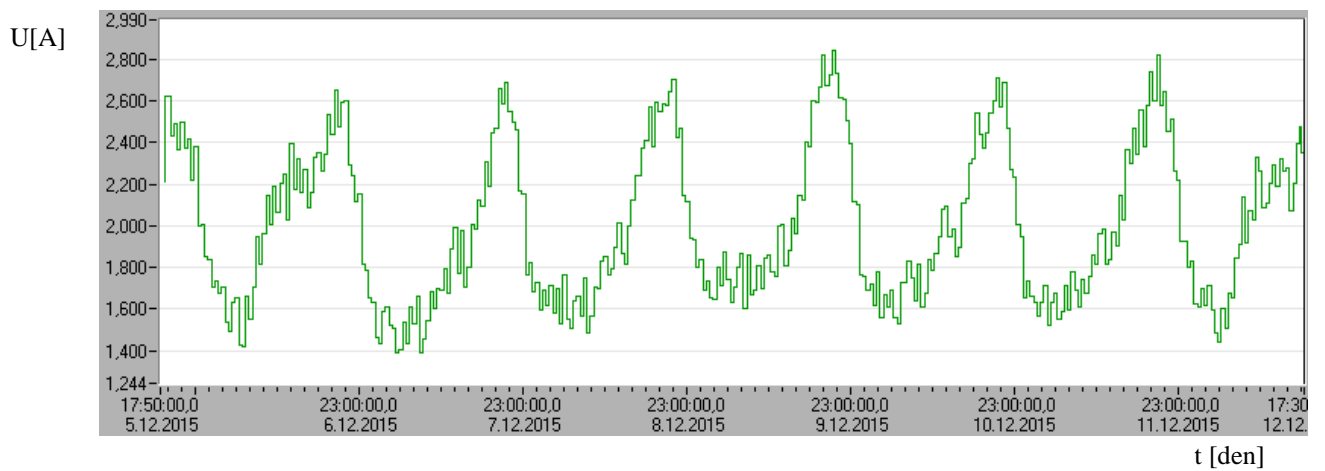
Obr. 4.14 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L1



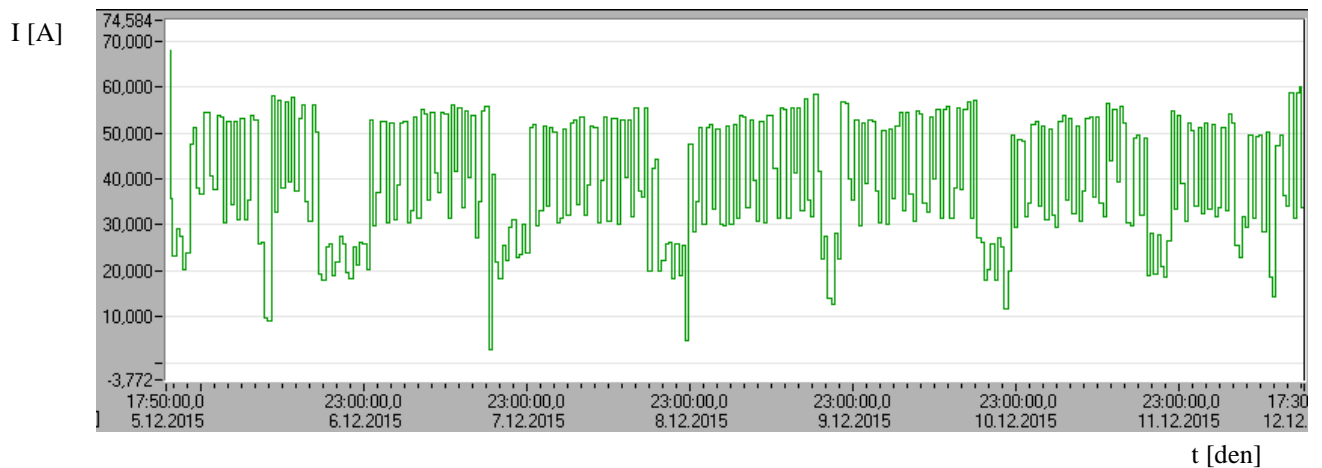
Obr. 4.15 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L2



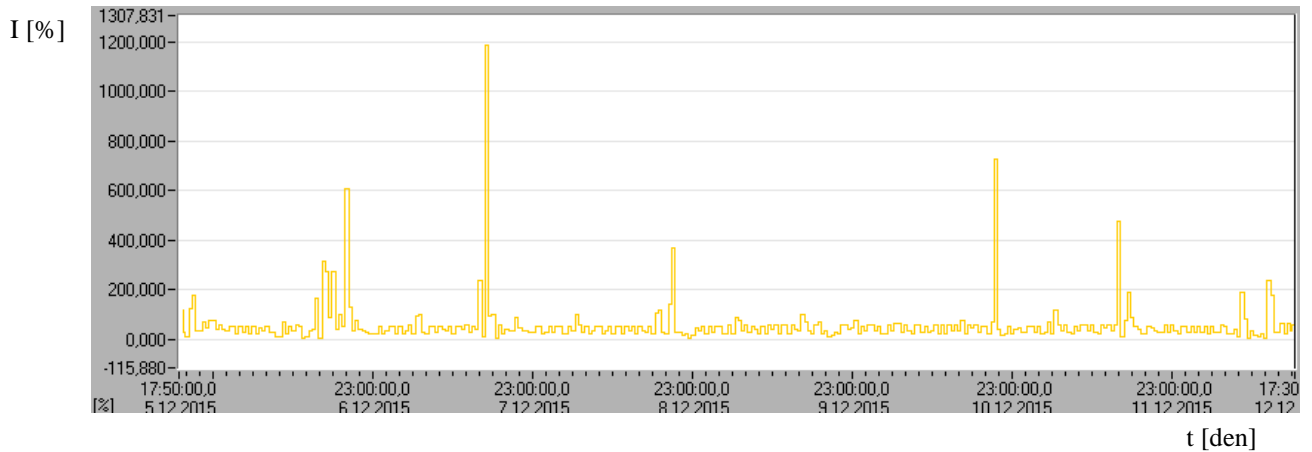
Obr. 4.16 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L2



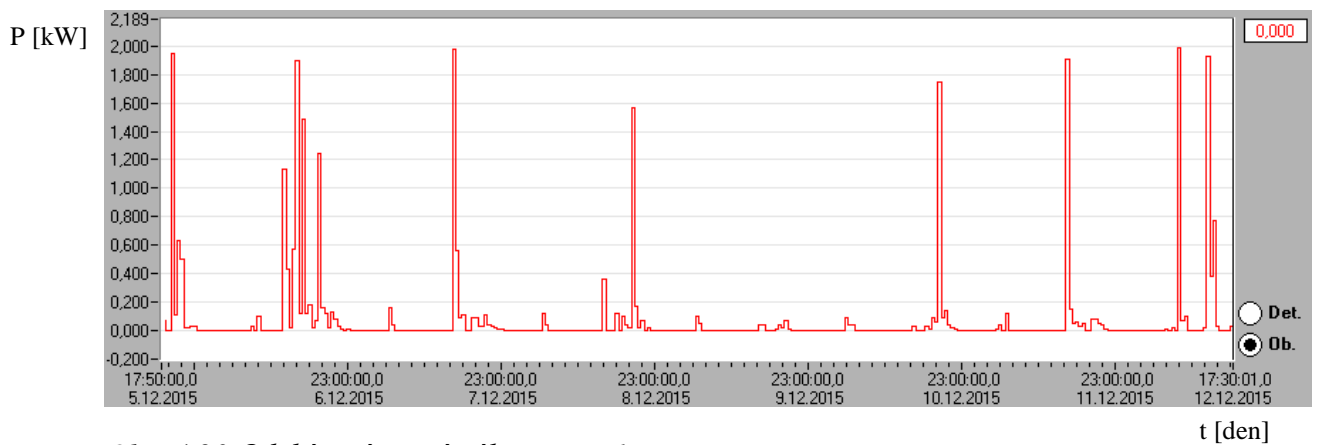
Obr. 4.17 Celkové harmonické zkreslení napětí pro L3



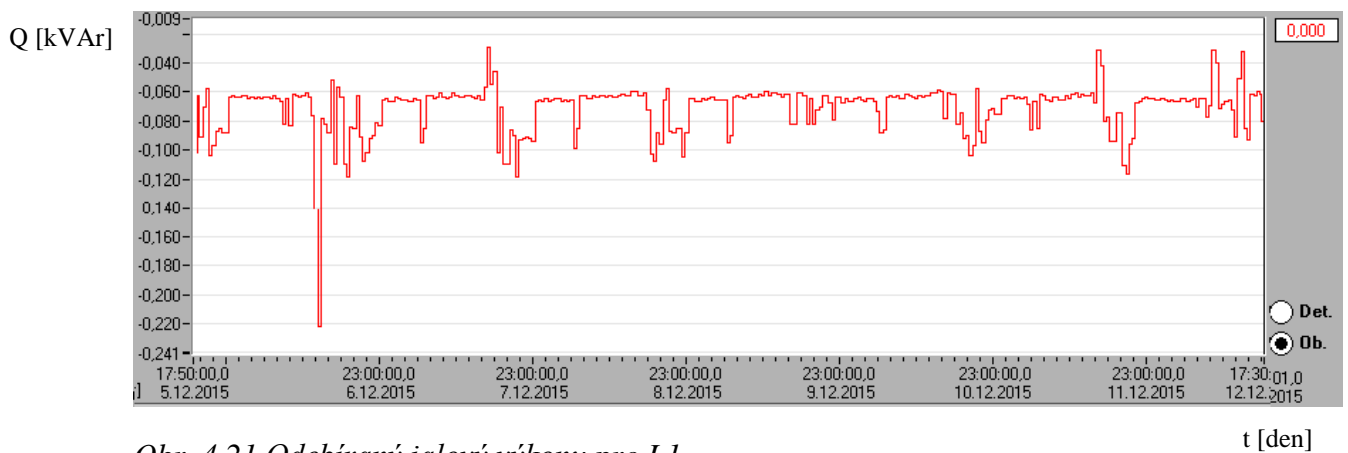
Obr. 4.18 Celkové harmonické zkreslení proudu pro L3



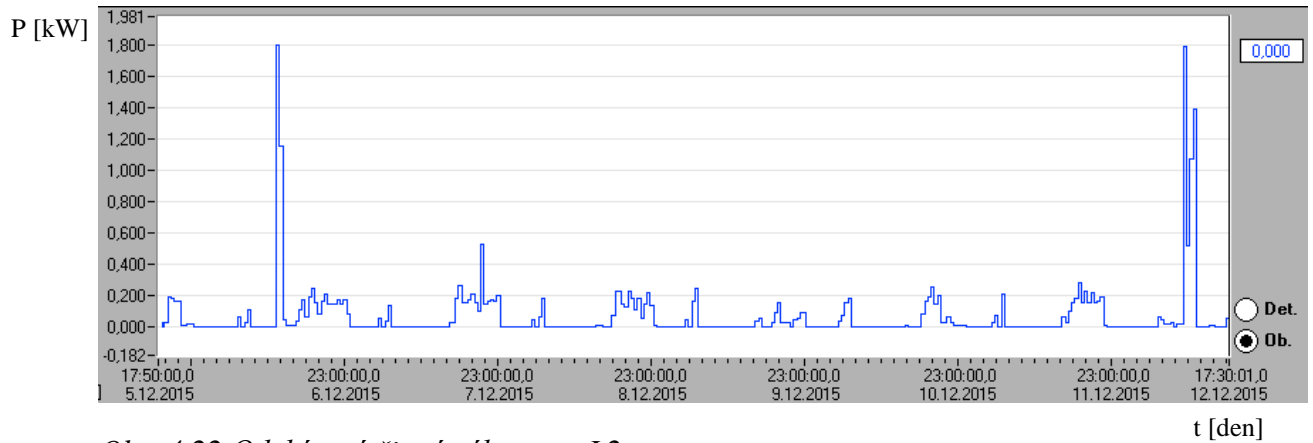
Obr. 4.19 Celkové harmonické zkreslení proudu pro N



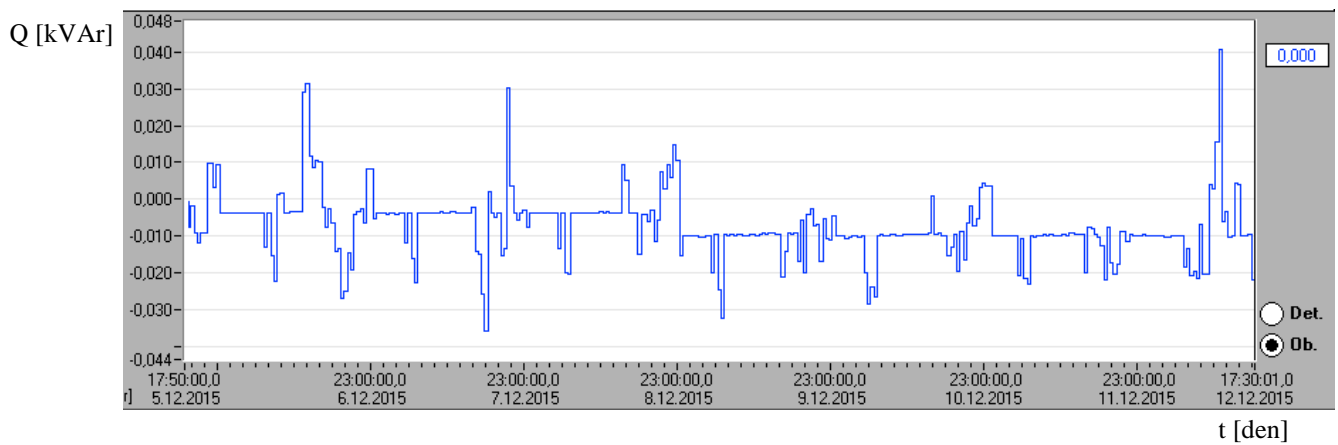
Obr. 4.20 Odebíraný činný výkon pro L1



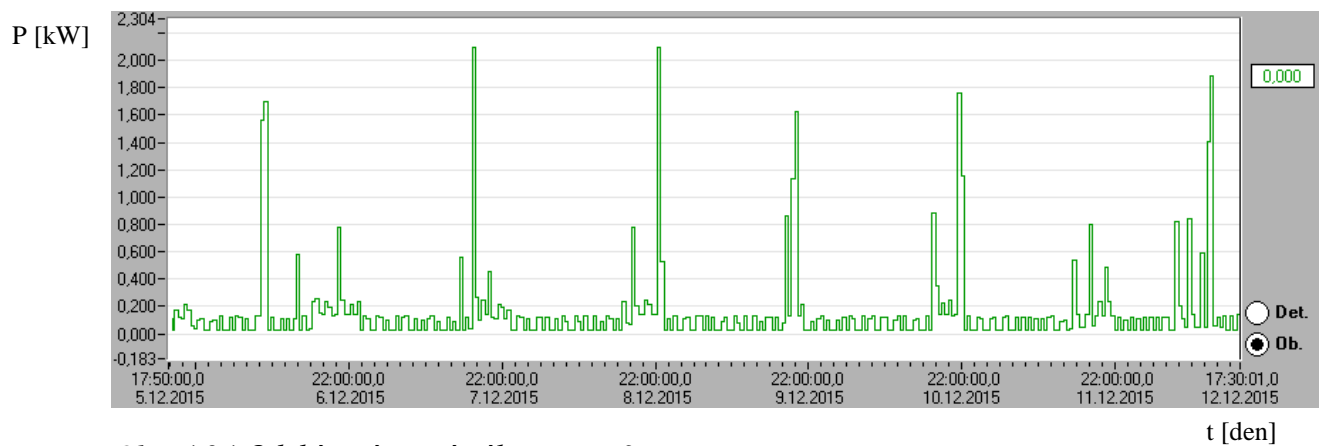
Obr. 4.21 Odebíraný jalový výkonu pro L1



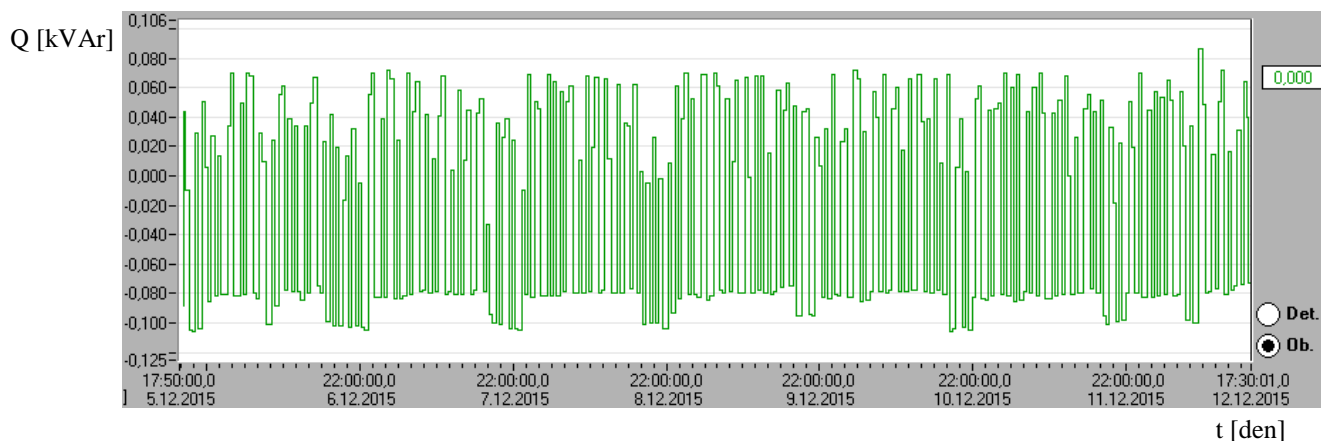
Obr. 4.22 Odebíraný činný výkon pro L2



Obr. 4.23 Odebíraný jalový výkon pro L2



Obr. 4.24 Odebíraný činný výkon pro L3



Obr. 4.25 Odebíraný jalový výkon pro L3

4.4 Analýza naměřených hodnot

Měření v délce 1 hodiny

Toto měření nebylo prováděno samostatně, ale byla použita data z provedeného měření v délce trvání 24 hodin. Protože pro obě měření bylo použito naprosto totožné nastavení analyzátoru, byla toto měření zahrnuta do jednoho, pouze s podrobnou analýzou zaměřenou na rozmezí dané hodiny.

Pro L1

Na obr. 4.1 je graf měření THD-U pro fázi L1. Hodnota THD-U zde dosahuje hodnoty 2,65 %, což je v normě. Naproti tomu hodnota THD-I v uvedené fázi na Obr. 4.2 dosahuje největší hodnoty 101 %. V tomto časovém intervalu jsou spuštěny spotřebiče pračka LG, osvětlení obsahující kompaktní zářivky a zdroj pro notebook. K nárůstu z 10 % na 101 % došlo po ukončení režimu praní, přičemž ze spotřebičů zůstaly v činnosti pouze osvětlení a notebook.

Po L2

Na Obr. 4.3 uvedený graf THD-U fáze L2 THD-U zde osahuje největší hodnotu 2,94 %, hodnota je v normě. Na Obr. 4.4 průběhu THD-I je hodnota ustálená na 80 %. V tomto čase je připojena el. trouba v režimu stand-by, osvětlení skládající se z LED úsporných bodovek a osvětlení kompaktní zářivkou.

Pro L3

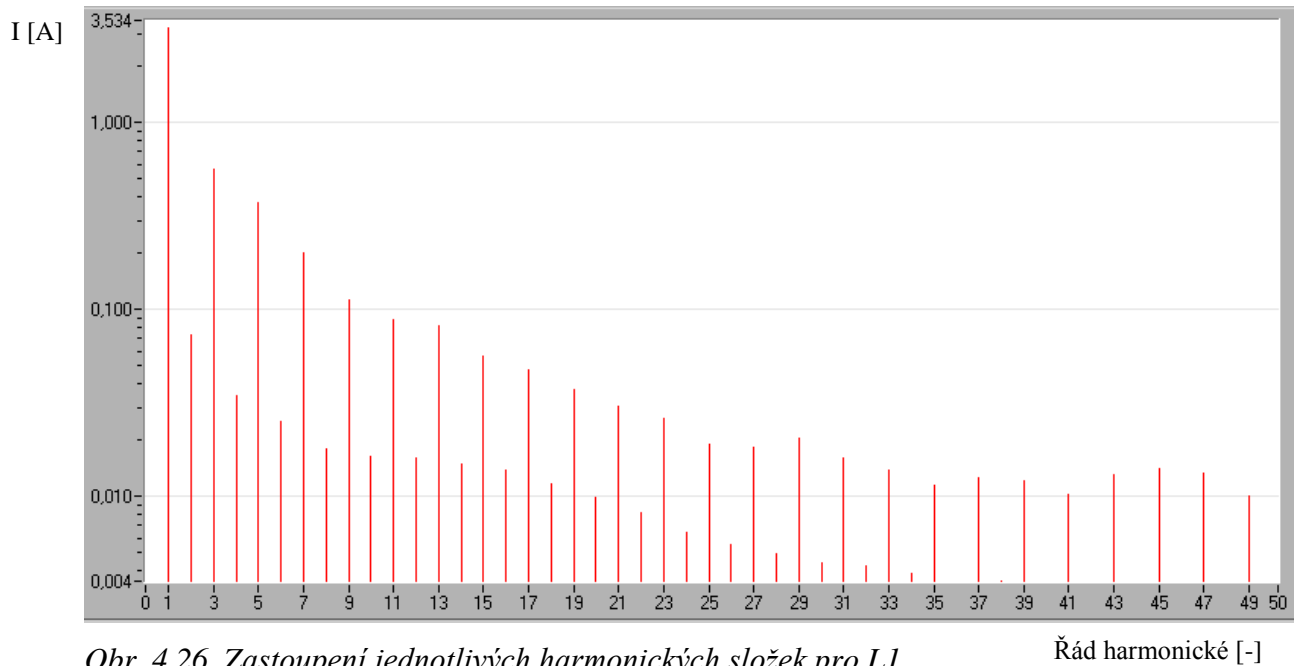
Toto měření představuje obrázek 4.5 graf THD-U pro fázi L3. Zde je naměřená hodnota rovna v rozmezí od 2,5 % do 2,8 % a je v normě. Na Obr. 4.6 graf naměřených hodnot THD-I má hodnoty k 80 %, což způsobuje osvětlovací soustava složená z úsporných bodovek. Při dvou viditelných poklesech THD-I k hodnotě 40, % dojde při zapnutí ledničky.

Měření v délce 24 hodin

Toto měření bylo provedeno 4. 12. 2015 od 16:42 hod. do 5.12.2015 16:42 hod. ve všech třech fázích a proudově navíc ve vodiči N. Při měření zde byla nastavena perioda ukládání 3 sekundy.

Pro L1

Na Obr. 4.7 graf THD-U je naměřená hodnota od 1,2 % do zhruba 2,6 % THD-U, které se zvyšuje k večerním hodinám a pozvolna se zmenšuje v závislosti na aktivitě domácnosti a s ránem naopak hodnoty narůstají. To samé platí pro THD-I Obr. 4.8. V časovém horizontu od 17:00 do 20:00 hodin jsou využívány spotřebiče: indukční deska, varná konev, zdroj pro notebook a osvětlení skládající se z kompaktních zářivek. Od 20:30 do 21.30 hodin jsou hodnoty největší, tento rozbor je uveden na straně 53, odstavci Měření v délce jedné hodiny pro fázi L1. S časem blížícím se k nočním hodinám zůstává připojena jen indukční deska v režimu vypnuto. K ránu, kdy dochází k postupné aktivitě v domácnosti a zapnutí spotřebičů, začíná opět THD-U a THD-I narůstat.

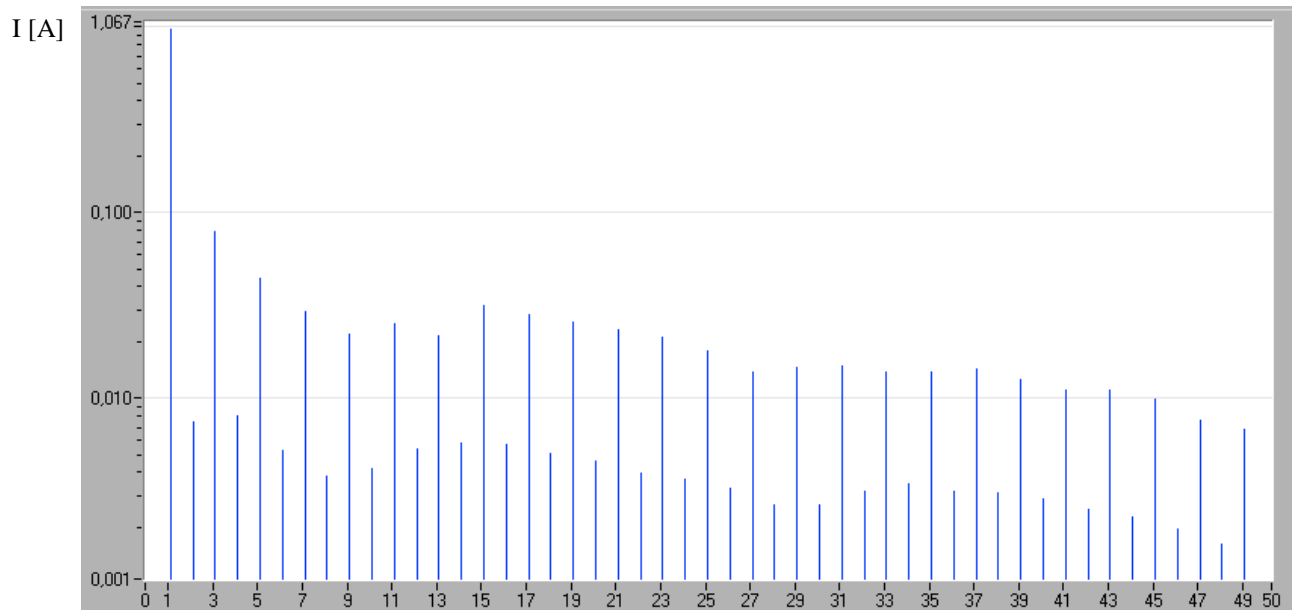


Obr. 4.26 Zastoupení jednotlivých harmonických složek pro L1

Řád harmonické [-]

Pro L2

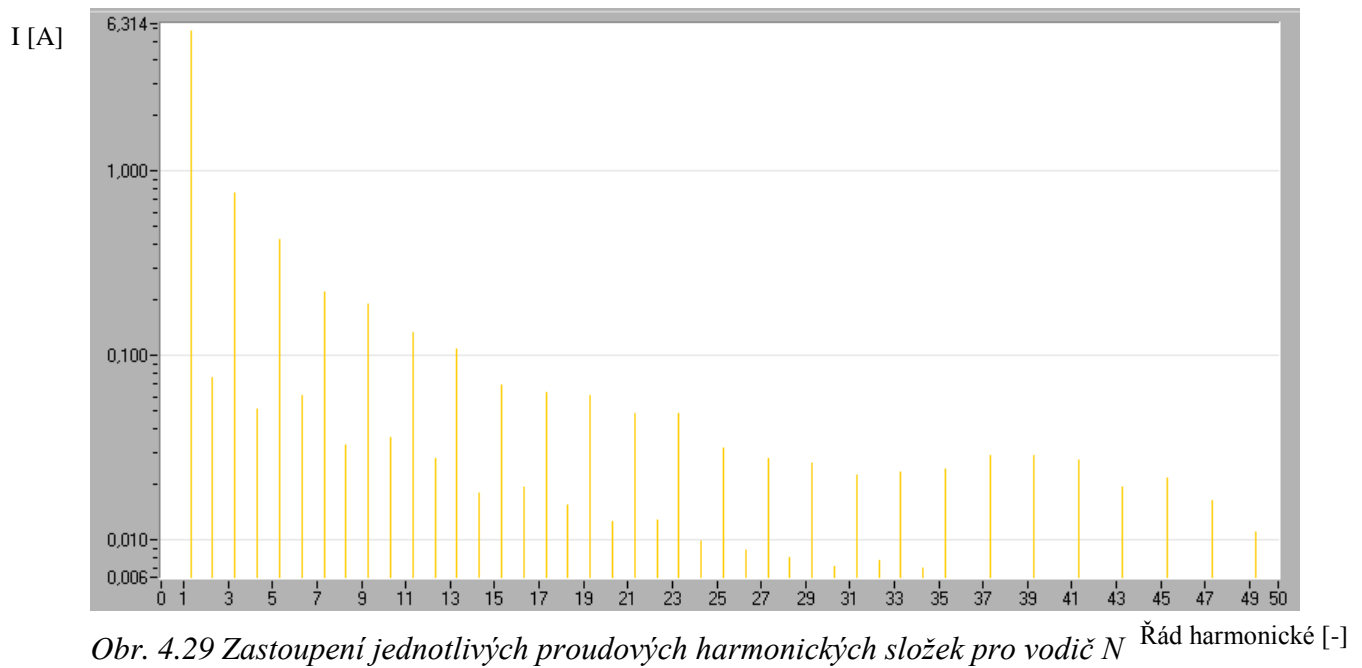
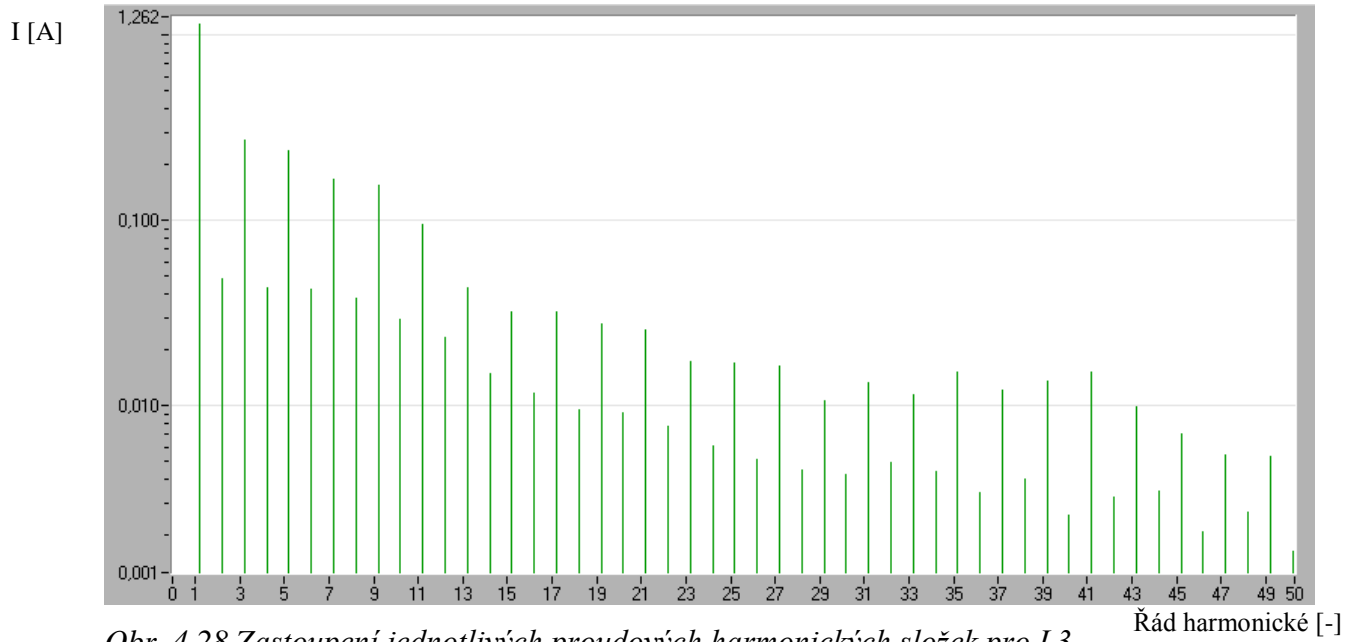
Na Obr. 4.9 grafu THD-U je znovu vidět průběh, který narůstá do pozdních večerních hodin na největší hodnotu 2,85 % a pomalu klesá přes noc na hodnotu 1,4 % a ráno zase začíná narůstat, což je spojeno s rostoucí aktivitou domácností. Graf THD-U na Obr. 4.9 má stejný průběh jako THD-I Obr. 4.10. Na záznamech s největší hodnotou emisí, zapříčiněnou aktivitou osvětlení, které soustřeďuje úsporné bodovky a kompaktní zářivky. Podrobná analýza je uvedena na straně 53 v odstavci Měření v délce jedné hodiny pro L2.



Obr. 4.27 Zastoupení jednotlivých proudových harmonických složek pro L2 Řád harmonické [-]

Pro L3

THD-U znázorňuje graf na Obr. 4.11. Zde dosahuje nejmenší hodnoty od 1,8 % v nočních hodinách a největší hodnoty 2,8 % ve večerních hodinách. Rozbor, kdy jsou dosahovány největší hodnoty, je uveden na straně 54, odstavec Měření v délce jedné hodiny pro L3. Graf THD-I pro fázi L3 je uveden na Obr. 4.12. Zde se hodnoty pohybují okolo 80 % - 90 %. Ty způsobuje soustava osvětlení obsahující úsporné LED diody. Na začátku grafu THD-I – je velký propad na hodnotu téměř k 0 %. To je způsobeno zapnutím indukční desky, která emise harmonických nevytváří, dále neustálé periodické nárůsty a propady THD-I jsou způsobeny zapínáním ledničky, ta rovněž harmonické emise nevytváří. Po zhasnutí soustavy osvětlení dále došlo k propadu THD-I na hodnotu 50 %, tuto stávající hodnotu způsoboval zdroj pro notebook.

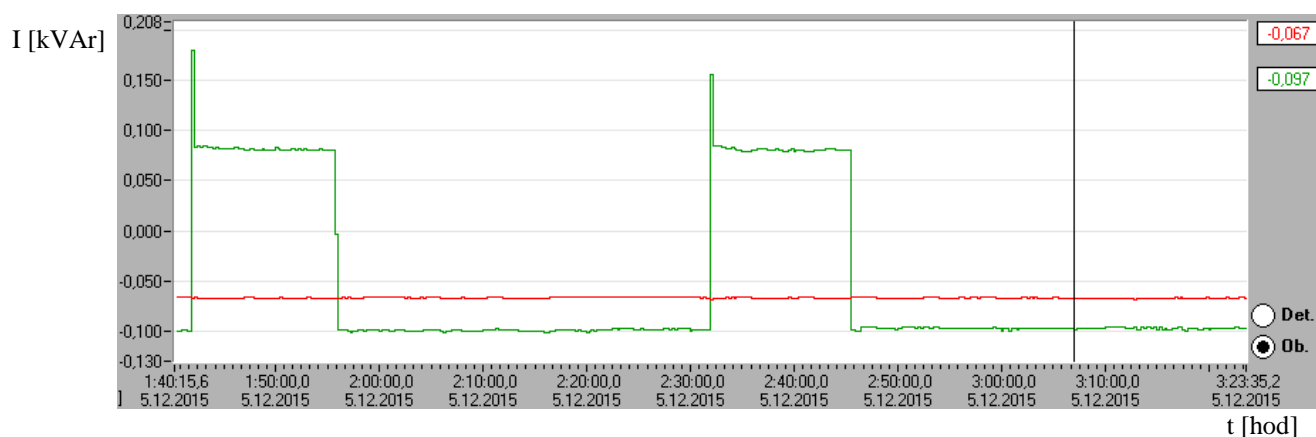


Měření v intervalu 7 dnů

Toto měření bylo provedeno od 5. 12. 2015 do 12. 12. 2015 ve všech třech fázích a proudově navíc ve vodiči N. Pro měření zde byla nastavena perioda ukládání 10 minut.

Z grafů THD-I a THD-U, které jsou zde uvedeny, je patrné, že průběh harmonických emisí se každý den periodicky opakuje, a to po celou dobu měření ve všech třech fázích stejně, hlavně ve večerních hodinách.

Dále jsou zde uvedeny grafy odebíraného výkonu, a to jak činného, tak také jalového. Měření bylo provedeno rovněž v rozsahu od 5. 12. 2015 do 12. 12. 2015 ve všech třech fázích. Zde je zajímavý graf na Obr. 4.25 - Odběr jalového výkonu pro L3. Dochází zde k neustálému kmitání z charakteru kapacitního do indukčního. Indukční charakter způsobuje neustálé spínání ledničky. Po vypnutí je opět charakter kapacitní. Tento stav způsobuje tzv. stan-by režim indukční desky. Deska je zapojena mezi fáze L1 a L3. Také na fázi L1 se tento kapacitní stav projevuje. Průběh odběru jalového výkonu indukční desky je na Obr. 4.30. Vzhledem k tomu, že se dnes na trhu objevují indukční desky pouze 1fázové, čímž se zpřístupnily hlavně obyvatelům panelových domů, kde zřítit třífázový odběr je problematické a počet uživatelů se začíná zvyšovat, bylo by zajímavé zrealizovat reálná měření, jak se násobným počtem budou projevovat v distribuční síti. Také úsporné LED bodovky způsobují kapacitní charakter. Zde se nabízí otázka, zda - pokud dnes předpokládáme odběry podobné v ostatních domácnostech - není síť dnes spíše naopak kapacitního charakteru a do budoucna se nebude řešit také její dekompenzace. Samozřejmě pro přesné stanovení charakteru sítě by bylo nutné realizovat měření u zdroje. Na Obr. 4.26, Obr. 4.27, Obr. 4.28 a Obr. 4.29 jsou znázorněny dosahované jednotlivé proudové harmonické složky. Dále došlo k porovnání odebrání jalových výkonů v první harmonické a celkovému odebrání při zahrnutí všech harmonických. Zde je rozdíl pouze v řádu jednotek.



Obr. 4.30 Odběr jalového výkonu pro fáze L1 znázorněn červeně a L3 znázorněn zeleně

5 Opatření ke snížení harmonických proudů vyšších řádů

Úplné zamezení vzniku harmonických složek vyšších řádů nebude nikdy proveditelné, ale snaha k jejím eliminacím možná je. K tomu je zapotřebí nejprve zjistit, k jakému zkreslení dochází, zda je nad povoleným limitem. Pokud tomu tak je, pak je nutné dále postupovat, a to [2]:

- a) určit oblast harmonického zkreslení;
- b) kontrolovat náhodné změny;
- c) určit, zda zkreslení vzniká provozem určitého zařízení nebo ve zdroji napětí;
- d) určit metodu minimalizace každého zkreslení;
- e) provést korekci;
- f) ověřit vhodnost prováděných zásahů.

[2]

5.1 Omezení harmonických bez pomoci přídavných zařízení

Jak již bylo zmíněno v části 1.6.1 lze provést jedno z možných opatření zvětšením průřezu středního vodiče. Mělo by se uplatnit hlavně tam, kde lze předpokládat nelineární odběr. [9]

Dále je možné docílit snížení harmonických proudů jednak použitím optimálně zvolených parametrů kondenzátorů a indukčností v měničích, ale také použitím pulzních usměrňovačů. [2]

5.2 Omezení harmonických pomocí přídavných zařízení

Převyšují-li harmonické proudy vyšší hodnoty než připouští norma a nebo je-li hodnota harmonických taková, že není možný provoz u ostatních elektrických zařízení, které nedokáže eliminovat ani výrobce, pak je nutné použít přídavná zařízení, která sníží hladinu harmonických proudů vyšších řádů. Zde se používají především kondenzátory a tlumivky s vhodnou volbou zapojení. [2]

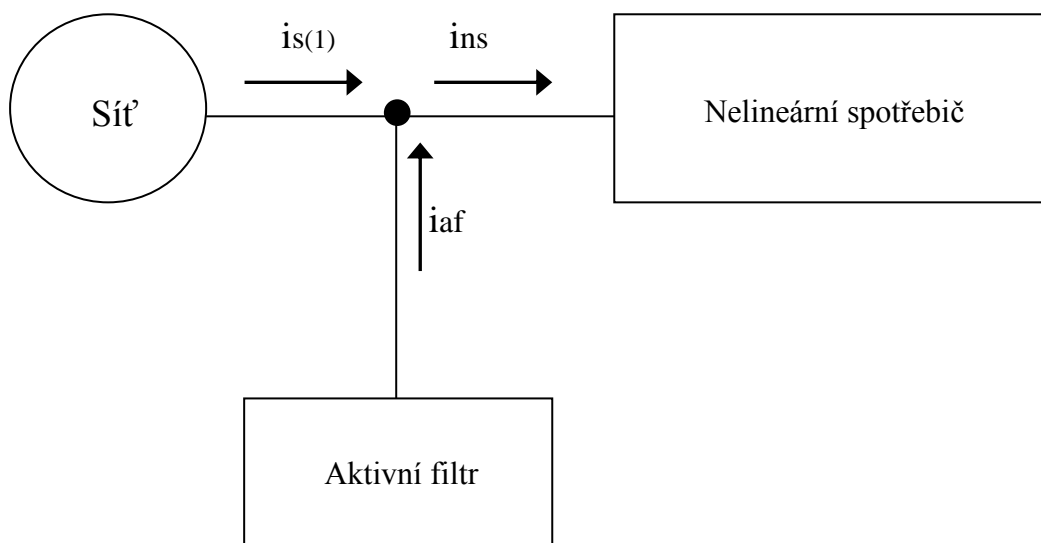
5.3 Omezení harmonických pomocí aktivních filtrů

Nejllepší způsob odstranění harmonických je pomocí aktivního filtru. Aktivní filtr vyrábí takzvané zbytkové křivky, které jsou inverzními křivkami proti zbytkovým křivkám vyskytujícím se v síti. Praktická realizace je velmi složitá, neboť je zapotřebí řízeného

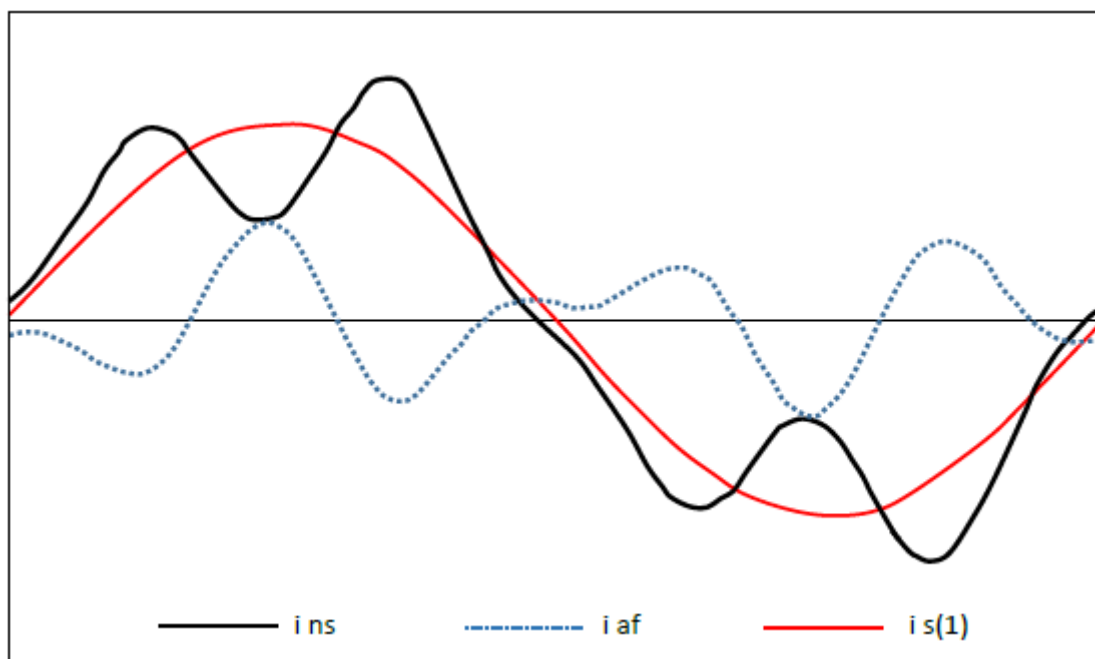
generátoru proudu velkého výkonu a řízení generátoru zbytkové křivky je nutné provádět v reálném čase. Generátor lze realizovat pomocí můstkového zapojení polovodičových spínačů. Rozdělit je lze dle zapojení na:

- paralelní aktivní filtry,
- sériové aktivní filtry,
- kombinované aktivní filtry.

[2]



Obr. 5.1 Blokové schéma aktivního filtru (převzato [2])



Obr. 5.2 Průběhy proudu aktivního filtru (převzato [2])

Závěr :

Bakalářská práce zahrnuje pouze úzkou oblast této problematiky a cílem provedeného měření bylo zaměřeni pouze na liché harmonické. Vzhledem k charakteru spotřebičů užívaných v domácnosti jsou sudé harmonické zanedbatelné.

Lze konstatovat, že si tato práce kladla za cíl realizovat reálné měření harmonických proudů a napětí o vyšších řádech, kdy se zároveň při provádění měření zaznamenával soupis aktivovaných domácích spotřebičů. Tím došlo k přesné analýze toho, co způsobovalo nárůst, nebo naopak pokles harmonických proudů (napětí) o vyšších řádech, jak se chovají spotřebiče ve skupině, kdy příkladem je soustava osvětlení skládající se z několika LED bodovek a úsporných žárovek. K tomu také může posloužit přiložené přílohy, kde je provedeno měření několika dalších spotřebičů porovnání s normami, zda emise harmonických vyhovuje, či nikoliv. Je zřejmé, že výskyt harmonických proudů a napětí o vyšších řádech nepůjde nikdy zcela potlačit, ale určitě půjde vhodně zvolenou technologií, správně navrženou instalací a použitím kvalitnější technologie potlačit, i když to nebude snadné vlivem otevřeného trhu a záplavou nekvalitních výrobků. K tomu by měla být nápomocna také přísnější legislativa.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-7082-976-1
- [2] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří HAMMERBAUER. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 372 s. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [3] CSIRIK, Vincent et al. *Sborník přednášek č. 58: Frekvenční složky ve výkonových systémech: Harmonické, jejich původ, šíření, důsledky a omezení*. č. 58. Brno: L. P. Elektro s.r.o., 2003, 179 s. 1. pololetí 2013. ISBN 978-80-87616-06-2.
- [4] ČSN EN 61000-3-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)-Část 3-2: Meze - Meze pro emise proudu harmonických (zařízení se vstupním fázovým proudem $\leq 16 A$)*. Listopad 2006. Praha:ed. 3, 2006.
- [5] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)-Část 2-2: Prostředí – Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Leden 2003. Praha, 2003.
- [6] Elcom a.s. Měřicí systémy. *elcom*. [online]. 2. 5. 2016 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://www.elcom.cz/cz/ke-stazeni/merici-systemy>
- [7] Úřad pro technickou normalizaci: *Technická normalizace - seznam ČSN* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://seznamcsn.unmz.cz/vyhledavani.aspx>
- [8] ELEKTRO: časopis pro elektrotechniku. *FCC PUBLIC s. r. o.: Nakladatelství technické literatury* [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nova-metoda-filtrace-treti-harmonicke-14555>
- [9] KŘÍŽ, Michal. *Co s vodičem N?* [online]. 7/2008. Praha 8: ELEKTRO, 2008 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/co-s-vodicem-n--12002>
- [10] KŘÍŽ, Michal: *Kompenzace jalového výkonu*. *Elektrika. CZ: Harmonické frekvence a kompenzace* [online]. LP Elektro [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/vyssi-harmonicke-jejich-vliv-na-instalace-a-rozvody-opatreni-proti-jejich-pusobeni>
- [11] *KBH Energy: Kompenzace jalového výkonu* [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://kbh.cz/kompenzace/zaklady-kompenzace>

- [12] KBH Energy: Kompenzace jalového výkonu. : *Harmonické frekvence a kompenzace* [online]. [cit. 2016-02-01]. Dostupné z: <http://kbh.cz/kompenzace/harmonicke-frekvence-a-kompenzace>
- [13] CHAPMAN, David. *Kvalita elektrické energie: Harmonické: Příčiny a účinky* [online]. 2001 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>

Seznam příloh:

V přílohách jsou provedeny rozbory dalších domácích spotřebičů s porovnáním naměřených hodnot a maximálních dovolených mezí uvedených v normě ČSN EN 61000-3-2.

Příloha č. 1 Tabulka naměřených hodnot pro úspornou žárovku Osram 11 W

Příloha č. 2 Tabulka naměřených hodnot pro úspornou žárovku Osram 12 W

Příloha č. 3 Tabulka naměřených hodnot pro LED bodovku SMD 3,2 W

Příloha č. 4 Tabulka naměřených hodnot pro LED bodovku SMD 2,8 W

Příloha č. 5 Tabulka naměřených hodnot pro Pračku LG

Příloha č. 6 Tabulka naměřených hodnot pro Elektrickou troubu Mora

Příloha č. 7 Tabulka naměřených hodnot Myčky Bosch

Příloha č. 8 Tabulka naměřených hodnot pro Tiskárnu HP

Příloha č. 9 Tabulka naměřených hodnot pro Nabíječka mobilního telefonu Nokie

Příloha č. 1

Žárovka úsporná Osram 11 W		
Třída spotřebiče: C		
THD-I = 105,04 % THDU-U = 0,35 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,064	
3	0,047	0,037
5	0,029	0,021
7	0,017	0,011
9	0,014	0,006
11	0,011	0,004
13	0,007	0,003
15	0,008	0,003
17	0,009	0,003
19	0,008	0,002
21	0,005	0,002
23	0,005	0,002
25	0,005	0,002
27	0,005	0,002
29	0,005	0,001
31	0,005	0,001
33	0,005	0,001
35	0,004	0,001
37	0,004	0,001
39	0,004	0,001

Příloha č. 2

Žárovka úsporná Osram 12 W		
Třída spotřebiče: C		
THD-I = 105 % THDU-U = 0,35 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,064	
3	0,047	0,041
5	0,029	0,023
7	0,017	0,012
9	0,014	0,006
11	0,011	0,004
13	0,007	0,004
15	0,008	0,003
17	0,009	0,002
19	0,008	0,002
21	0,005	0,002
23	0,005	0,002
25	0,005	0,002
27	0,005	0,002
29	0,005	0,002
31	0,005	0,002
33	0,005	0,001
35	0,004	0,001
37	0,004	0,001
39	0,004	0,001

Příloha č. 3

LED bodovka SMD 3,2 W		
Třída spotřebiče: C		
THD-I = 188,33 % THD-U = 0,34 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma [A]
1	0,015	
3	0,014	0,011
5	0,012	0,007
7	0,011	0,011
9	0,009	0,006
11	0,007	0,004
13	0,006	0,003
15	0,005	0,003
17	0,005	0,003
19	0,005	0,002
21	0,005	0,002
23	0,005	0,002
25	0,040	0,002
27	0,004	0,002
29	0,003	0,002
31	0,003	0,001
33	0,003	0,001
35	0,003	0,001
37	0,003	0,001
39	0,002	0,001

Příloha č. 4

LED bodovka SMD 2,8 W		
Třída spotřebiče: C		
THD-I = 15,53 % THD-U = 0,33 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,024	
3	0,002	0,0095
5	0,002	0,0053
7	0,001	0,0025
9	0,001	0,0014
11	0,001	0,0040
13	0,001	0,0008
15	0	0,0007
17	0	0,0006
19	0	0,0006
21	0,001	0,0005
23	0	0,0005
25	0	0,0004
27	0	0,0004
29	0	0,0004
31	0	0,0004
33	0	0,0003
35	0	0,0003
37	0	0,0003
39	0	0,0003

Příloha č. 5

Pračka LG		
Třída spotřebiče: A		
THD-I = 98,66 % THD-U = 2,6 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	8,753	
3	0,643	2,300
5	0,442	1,140
7	0,295	0,770
9	0,142	0,400
11	0,011	0,330
13	0,069	0,210
15	0,045	0,150
17	0,036	0,132
19	0,025	0,118
21	0,016	0,107
23	0,016	0,098
25	0,014	0,090
27	0,011	0,083
29	0,010	0,078
31	0,011	0,073
33	0,007	0,068
35	0,006	0,064
37	0,006	0,061
39	0,005	0,057

Příloha č. 6

Elektrická trouba Mora		
Třída spotřebiče: A		
THD -I = 2,29 % THD-U = 2,49 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	8,473	
3	0,158	2,300
5	0,067	1,140
7	0,106	0,770
9	0,028	0,400
11	0,04	0,330
13	0,013	0,210
15	0,012	0,150
17	0,009	0,132
19	0,004	0,118
21	0,005	0,107
23	0,003	0,098
25	0,003	0,090
27	0,001	0,083
29	0,002	0,078
31	0,001	0,073
33	0,002	0,068
35	0,003	0,064
37	0,002	0,061
39	0,003	0,057

Příloha č. 7

Myčka LG		
Třída spotřebiče: A		
THD-I = 12,7 % THD-U = 2,55 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	9,291	
3	0,195	2,300
5	0,070	1,140
7	0,106	0,770
9	0,033	0,400
11	0,045	0,330
13	0,012	0,210
15	0,015	0,150
17	0,010	0,132
19	0,007	0,118
21	0,009	0,107
23	0,003	0,098
25	0,005	0,090
27	0,004	0,083
29	0,002	0,078
31	0,004	0,073
33	0,003	0,068
35	0,003	0,064
37	0,003	0,061
39	0,003	0,057

Příloha č. 8

Tiskárna HP		
Třída spotřebiče: A		
THD-I = 166,96 % THD-U = 2,66 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma [A]
1	0,040	
3	0,028	2,300
5	0,026	1,140
7	0,026	0,770
9	0,023	0,400
11	0,022	0,330
13	0,018	0,210
15	0,016	0,150
17	0,013	0,132
19	0,011	0,118
21	0,009	0,107
23	0,008	0,098
25	0,005	0,090
27	0,004	0,083
29	0,003	0,078
31	0,002	0,073
33	0,002	0,068
35	0,002	0,064
37	0,002	0,061
39	0,002	0,057

Příloha č. 9

Nabíječka mobilního telefonu Nokie		
Spotřebič třídy: A		
THD- I = 143 % THD-U = 2,67 %		
Řád harm.	Naměřeno I [A]	Norma I [A]
1	0,026	
3	0,023	2,300
5	0,019	1,140
7	0,013	0,770
9	0,008	0,400
11	0,006	0,330
13	0,006	0,210
15	0,006	0,150
17	0,006	0,132
19	0,005	0,118
21	0,004	0,107
23	0,004	0,098
25	0,004	0,090
27	0,004	0,083
29	0,003	0,078
31	0,003	0,073
33	0,003	0,068
35	0,003	0,064
37	0,002	0,061
39	0,002	0,057