

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan PIKOUS**
Osobní číslo: **E13N0025P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

Přechodem žárovek na úsporné typy svítidel a připojováním dalších spotřebičů moderní elektroniky dochází v rozvodech na velkých sídlištích k vysokému odběru harmonických proudů, což vede ke značnému zkreslení napájecího napětí.

1. Popište průběhy proudů úsporných svítidel a dalších nelineárních domácích spotřebičů a proveďte harmonickou analýzu těchto proudů.
2. Proveďte reálný odhad připojení těchto spotřebičů v sídlišti, jejich rozdělení na jednotlivé transformátory a fáze.
3. Vytvořte modelové schéma reálné sítě sídliště s připojenými nelineárními zdroji, vypočítejte šíření harmonických proudů a vzniklá harmonická napětí ve vytipovaných částech rozvodu. Výsledky kontrolujte s platnými normami.
4. Navrhněte možné řešení pro omezení dopadu negativního vlivu těchto spotřebičů.

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

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Václav Kús, CSc.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá proudem odebíraným nelineárními domácími spotřebiči a jeho vlivem na zkreslení napětí v distribuční soustavě.

V první části jsou uvedeny základní vztahy a zákonitosti vzniku a šíření harmonických, negativní vlivy jejich výskytu v elektrizační soustavě a legislativní rámce vztahující se k této problematice. Následuje popis průběhů proudů úsporných svítidel a dalších nelineárních domácích spotřebičů na základě zapojení jejich vstupních obvodů.

Dále je v práci sestaven model reálné sítě sídliště, na kterém jsou simulovány vlivy současného zapojení velkého počtu nelineárních domácích spotřebičů do sítě. Výpočty jsou konfrontovány s platnými normami a s hodnotami získanými měřením provedeným na skutečném sídlišti, které bylo pro simulaci vzorem.

Klíčová slova

Nelineární domácí spotřebiče, harmonická analýza, harmonické zkreslení, kompatibilní úrovně, simulace elektrické sítě sídliště

Abstract

This diploma thesis deals with the current drawn by nonlinear household appliances and its influence on the voltage distortion in the distribution system.

The first section provides basic relationships and patterns of emergence and spread of harmonics, the negative effects of their occurrence in the power system and legislative frameworks related to this issue. The following is a description of the current waveform of saving lamps and other nonlinear home appliances based on their input circuits.

The study also creates a model of a real housing estate network, which simulates the effects of large numbers of nonlinear household appliances connected to the network simultaneously. Calculations are confronted with applicable standards and values obtained by measurements made on the actual housing estate, which was the model for simulation.

Key words

Nonlinear appliances, harmonic analysis, harmonic distortion, compatibility levels, simulation of distribution system in a housing estate

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.5.2015

Jan Pikous

Poděkování

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

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	12
1 DRUHY ZÁTĚŽE A VZNIK HARMONICKÝCH	14
1.1 LINEÁRNÍ ZÁTĚŽ	14
1.2 NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽ	15
1.3 HARMONICKÁ ANALÝZA	17
1.4 ZOBECNĚNÝ AMPLITUDOVÝ ZÁKON	19
1.5 VÝKONY V SÍTÍCH S NELINEÁRNÍMI SPOTŘEBIČI	20
1.6 IMPEDANCE SÍTĚ	23
1.7 CELKOVÉ HARMONICKÉ ZKRESLENÍ	24
1.8 NEGATIVNÍ VLIVY HARMONICKÝCH	24
1.8.1 Okamžité negativní důsledky harmonických	24
1.8.2 Střední a dlouhodobé negativní důsledky harmonických	25
1.9 KOMPATIBILNÍ MEZE NÍZKOFREKVENČNÍHO RUŠENÍ	28
2 PRŮBĚHY VSTUPNÍCH PROUDŮ DOMÁCÍCH SPOTŘEBIČŮ	29
2.1 POVOLENÉ ÚROVNĚ EMITOVANÝCH PROUDŮ	29
2.2 VSTUPNÍ PROUD NEŘÍZENÉHO MŮSTKOVÉHO USMĚRŇOVAČE	30
2.3 KOREKTORY ODEBÍRANÉHO PROUDU	32
2.3.1 Pasivní kapacitní PFC	32
2.3.2 Pasivní indukční PFC	33
2.3.3 Aktivní PFC typu boost	34
2.3.4 Aktivní filtr PFC typu bridgeless	36
2.3.5 Aktivní filtr PFC typu interleaved	36
2.4 TŘÍDA A	38
2.5 TŘÍDA B	38
2.6 TŘÍDA C	39
2.6.1 Teplotní světelné zdroje	40
2.6.2 Výbojky s indukčním předřadníkem	40
2.6.3 Výbojky s elektronickým předřadníkem	41
2.6.4 Kompaktní fluorescenční zářivky	41
2.6.5 LED svítidla	44
2.7 TŘÍDA D	46
3 MODEL REÁLNÉ SÍTĚ SÍDLIŠTĚ	48
3.1 VÝCHODISKA MODELU	48
3.2 PŘÍKLAD VÝPOČTU PRVKŮ MODELOVÉHO SCHÉMATU REÁLNÉ SÍTĚ SÍDLIŠTĚ	50
3.3 SIMULACE	51
3.4 VÝSLEDKY SIMULACE	52
4 REÁLNÁ SÍŤ	56
4.1 MĚŘENÍ V SÍTĚ	56
4.2 POROVNÁNÍ MĚŘENÍ A SIMULACÍ	60
4.3 ROZBOR PRŮMĚRNÉHO ODBĚRU BYTOVÉ JEDNOTKY	63
4.4 MOŽNOSTI OMEZENÍ DOPADU VLIVŮ NELINEÁRNÍCH SPOTŘEBIČŮ	64
ZÁVĚR	66
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	68
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

a_0, a_h, b_h	Fourierovy koeficienty
AC	Alternating current, střídavý proud
C.....	Kapacita [F]
CCM	Continuous conduction mode
C_{dc}	Kapacita kondenzátoru na stejnosměrné straně obvodu [F]
CFL	Compact fluorescent lamp, kompaktní zářivka
c_k	Kapacita vedení na 1 km délky [F]
CRM	Critical conduction mode
CRT	Cathode ray tube, klasická vakuová obrazovka
C_s	Kapacita sítě [F]
C_v	Kapacita vedení [F]
ČSN	Česká státní norma
D	Deformační výkon [VA]
d	Úhel úměrný vedení diody [$^\circ$, rad]
DC	Direct current, stejnosměrný proud
DCM	Discontinuous conduction mode
D_h	Amplitudové spektrum
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EN	Evropská norma
f	Frekvence [Hz]
h	Řád harmonické [-]
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HDS	Hlavní domovní pojistková skříň
i, I	Proud, okamžitá, efektivní hodnota [A]
I_0	Stejnoseměrná složka proudu [A]
I_1	Vstupní proud [A]
I_D	Proud procházející diodou [A]
I_h	Proud harmonické řádu h [A]
$i_h, i_{h\%}$	Poměrná hodnota proudu k 1. harmonické, procentní hodnota proudu [-, %]
I_l	L-tá harmonická střídavého proudu zdroje [A]
I_m	Amplituda proudu [A]

I_N	Proud středním vodičem [A]
i_s	Vstupní proud [A]
I_T	Proud procházející tranzistorem [A]
l	délka vedení [m]
L	Indukčnost [H]
L_1, L_2, L_3	Fázové vodiče napájecí soustavy
LCD	Liquid crystal display, zobrazovací zařízení na bázi tekutých krystalů
LED	Light emitting diode, svítivá dioda
L_k	Indukčnost kabelu [H]
l_k	Indukčnost kabelu na 1 km délky [H]
L_M	Indukčnost rušící zátěže [H]
L_s, L_{sys}	Indukčnost sítě [H]
L_{smpls}	Indukčnost vstupního obvodu spínaného zdroje [H]
L_T	Indukčnost transformátoru [H]
L_v	Indukčnost vedení [H]
L_Z	Indukčnost pasivní zátěže [H]
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect transistor, polem řízený tranzistor
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
NN	Nízké napětí
p, P	Činný výkon, okamžitá, střední hodnota [W]
PC	Personal computer, osobní počítač
PCC	Point of common coupling, společný napájecí bod
PFC	Power factor correction
Q	Jalový výkon [VA _r]
Q_1	Efektivní hodnota 1. harmonické střídavé veličiny
Q_h	Efektivní hodnota harmonické složky střídavé veličiny
R	Odpor [Ω]
R_{eq}	Ekvivalentní odpor zátěže usměrňovače [Ω]
r_k	Odpor kabelu na 1 km délky [Ω]
R_M	Odpor rušící zátěže [Ω]
R_s, R_{sys}	Odpor sítě [Ω]
R_{smpls}	Odpor termistoru omezujícího zapínací proud [Ω]
R_v, R_k	Odpor vedení, kabelu [Ω]
R_Z	Odpor pasivní zátěže [Ω]

S	.....	Zdánlivý výkon [VA]
S_k	.....	Zkratový výkon sítě [VA]
t	.....	čas [s]
T	.....	Perioda [s]
THD	.....	Total harmonic distortion, celkové harmonické zkreslení [-, %]
u, U	.....	Napětí, okamžitá, efektivní hodnota [V]
U_0	.....	Stejnoseměrná složka napětí [V]
U_h	.....	Napětí harmonické řádu h [V]
$u_h, u_{h\%}$	.....	Poměrná hodnota napětí k 1. harmonické, procentní hodnota napětí [-, %]
U_k	.....	K-tá harmonická střídavého napětí zdroje [V]
u_k	.....	Napětí nakrátko [-]
U_{usm}	.....	Usměrněné napětí [V]
U_v	.....	Vztažné napětí [V]
VN	.....	Vysoké napětí
X	.....	Reaktance [Ω]
Z_s	.....	Impedance sítě [Ω]
Z_{sh}	.....	Impedance sítě pro frekvenci h-té harmonické [Ω]
Z_T	.....	Impedance transformátoru [Ω]
δ	.....	Hloubka vniku [m]
ρ	.....	Rezistivita materiálu [$\Omega \cdot m$]
φ	.....	Úhel [$^\circ, rad$]
φ_h	.....	Fázové spektrum
φ_{1l}	.....	Úhel 1-té harmonické napětí [$^\circ, rad$]
φ_{uk}	.....	Úhel k-té harmonické napětí [$^\circ, rad$]
ω	.....	Úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]
μ	.....	Magnetická permeabilita [$H \cdot m^{-1}$]
1f, 3f	.....	Počet fází [-]

Úvod

Závislost člověka na využívání elektrické energie je zcela nepochybná. Elektrická zařízení pronikla již do všech oblastí lidského života a mají stále vyšší podíl elektroniky. Zároveň společenská poptávka a ekonomický tlak přinášející zmenšování rozměrů, hmotnosti a snižování ceny, a tím vyšší dostupnost jednotlivých součástí i celých zařízení. Vývoj a zařazování takovýchto elektrických zařízení s sebou nesou vzrůst nelineárních odběrů proudu, z toho vycházející zatěžování sítě harmonickými proudy a následné zkreslení napětí. U zařízení velkých výkonů, se kterými pracuje především průmysl, jsou dopady nelineárních odběrů dobře zmapovány, neboť to bylo nutnou podmínkou již pro jejich nasazení před desítkami let. U nelineárních spotřebičů, které jsou určeny pro domácnost, však dosud nebyla uvedena problematika tak zdůrazňována. Přitom kromě postupného nárůstu spotřebičů výpočetní techniky a audiovizuálních zařízení je v posledních letech do sítě připojováno stále větší množství úsporných svítidel. Tento trend nahrazování klasických žárovek lineárního charakteru úspornými zdroji světla, které jsou zdroji harmonických proudů, je dán jak důvody ekonomickými, tak legislativními.

Předkládaná práce je zaměřena na posouzení vlivu zvyšujících se počtů nelineárních domácích spotřebičů připojovaných do sítě nízkého napětí. Zejména na sídlištích dochází k vysoké koncentraci neharmonických odběrů, které mohou v závislosti na topologii sítě vytvářet nepřijatelné deformace napěťové křivky na určitých místech rozvodu.

V první části práce jsou uvedeny základní teoretické předpoklady vzniku harmonických a jejich vliv na distribuční soustavu.

Druhá část se věnuje popisu proudu odebíraného úspornými zdroji světla a dalšími nelineárními domácími spotřebiči. Touto problematikou se zabývá také literatura [6,8,10,12,17], ze které jsou převzaty některé naměřené průběhy a efektivní hodnoty zastoupených harmonických. Rešerší z literatury a provedenými simulacemi jsou v diplomové práci popsány průběhy spotřebičů používaných v domácnosti. Samostatně jsou demonstrována zapojení základních pasivních a aktivních obvodů zlepšujících účinník. Spotřebiče do 16 A jsou rozděleny dle normy ČSN EN 61000-3-2 do čtyř skupin. Každá je zpracována individuálně.

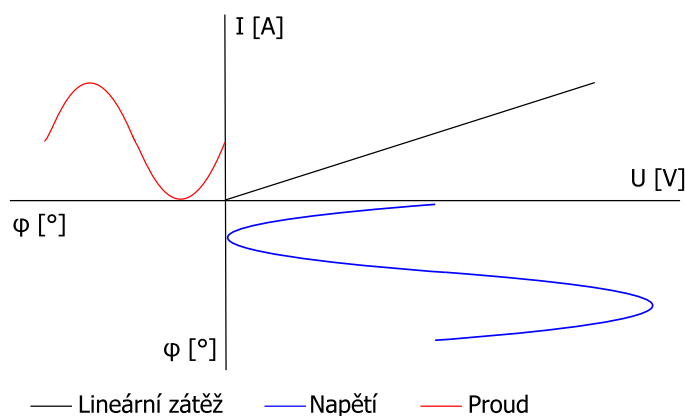
Ve třetí části je sestaven model reálného plzeňského sídliště, do kterého jsou umístěni virtuální spotřebitelé s mnoha nelineárními spotřebiči. Vhodně zvolit velikosti jednotlivých harmonických proudů, tak aby se pomocí získaného průběhu dala vypočítat harmonická napětí v jednotlivých místech rozvodu, je obtížné, neboť neexistuje nic jako univerzální průměrný domácí spotřebič. Navíc ve skutečné síti dochází k interakci harmonických jednotlivých spotřebičů, jejichž zatížení, a tedy křivka odebíraného proudu, je proměnné v čase. Pro simulaci byla z těchto důvodů použita naměřená data ze zahraničních studií [10,14], které zohledňují skupinový vliv domácích zařízení. Harmonické jsou v předkládané práci do sítě injektovány proudovými zdroji na úrovni domovních rozvaděčů.

V modelované části sídliště bylo následně ve vytipovaných místech provedeno měření. Simulací pro několik scénářů odběru a měřeními provedenými v několika bodech rozvodu byla získána data, jejichž porovnání a vyhodnocení se věnuje čtvrtá část této práce.

1 Druhy zátěže a vznik harmonických

1.1 Lineární zátěž

V elektrických obvodech, které obsahují jen ideální rezistory, induktory a kapacitory, po připojení harmonického zdroje napětí a ustání přechodových jevů dochází k odebrání harmonického proudu, jehož průběh lze vyjádřit sinusovou funkcí o konstantní frekvenci, kde parametrem je velikost amplitudy v souladu s Ohmovým zákonem a úhel fázového posunutí φ proudu za napětím v závislosti na charakteru zátěže.



Obr. 1.1 Průběh proudu lineární zátěží

- **Odporová**

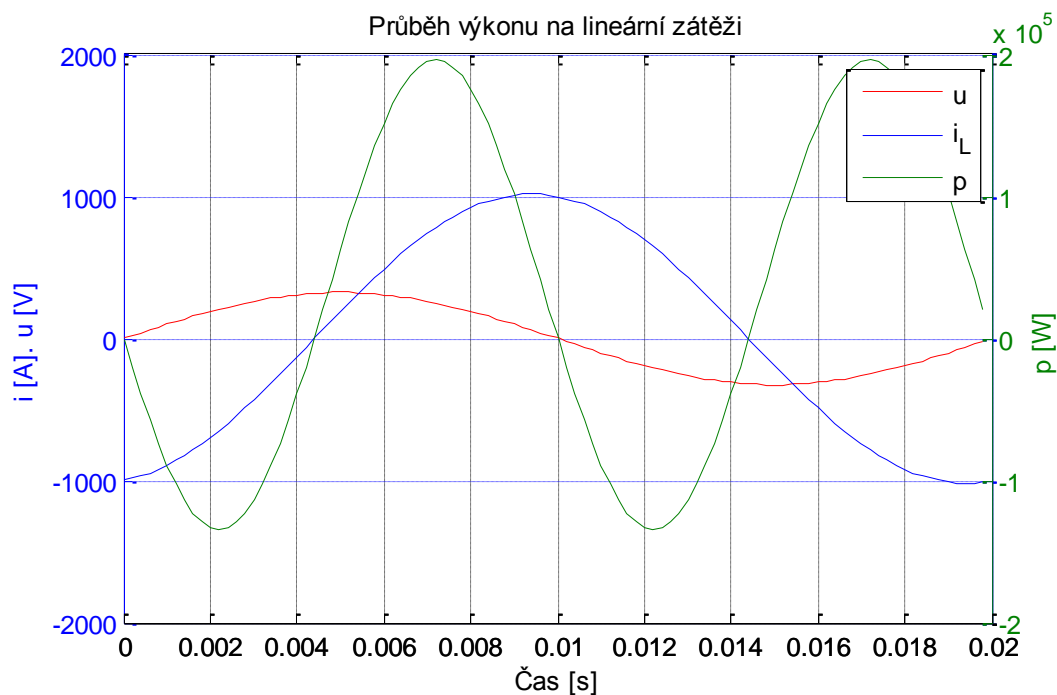
Proud protékající čistě odporovou zátěží je ve fázi napětí zdroje, který jej vyvolal. Mezi zařízení, která se vyznačují téměř čistě odporovým charakterem, patří tepelná zařízení a klasické žárovky.

- **Induktivní**

Induktivní zátěž způsobuje fázový posuv proudu, který se za napětím zpožďuje v čistě induktivním obvodu o 90° . K zařízením s převážně induktivním charakterem se řadí transformátory, asynchronní motory, reaktory. V oblasti elektrických pohonů je nejčastějším typem zátěže sériové spojení odporu vinutí, induktivní reaktance vinutí a protinapětí tzv. RLUI zátěž.

- **Kapacitní**

Prvek čistě kapacitního charakteru odebírá proud, který předbíhá napětí napájecího harmonického zdroje o 90° .

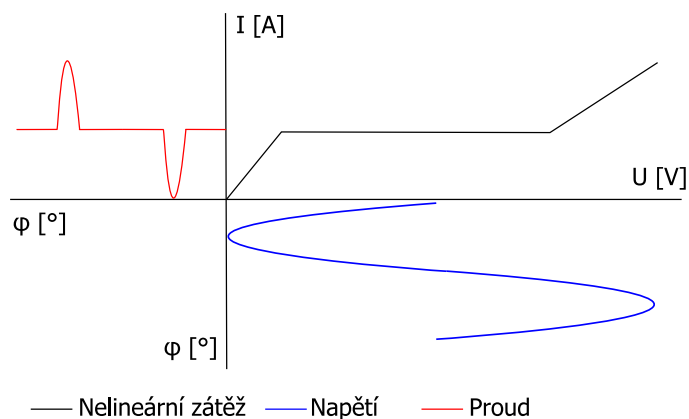


Obr. 1.2 Průběh okamžitého výkonu na lineární odporově induktivní zátěži

Reálný vodič vykazuje elektrický odpor, indukčnost a kapacitu. Všechny spotřebiče připojené na síť odebírají proud s určitým fázovým posunutím vůči zdrojovému napětí, proto spotřebič vedle činného výkonu odebírá ještě výkon jalový, který nekoná užitečnou práci ve spotřebiči, ale zatěžuje napájecí síť, na které způsobuje úbytky napětí a výkonové ztráty. Průběh okamžitých hodnot proudu, napětí a výkonu na obrázku 1.2 ilustruje, jak zařízení část výkonu vrací do sítě.

1.2 Nelineární zátěž

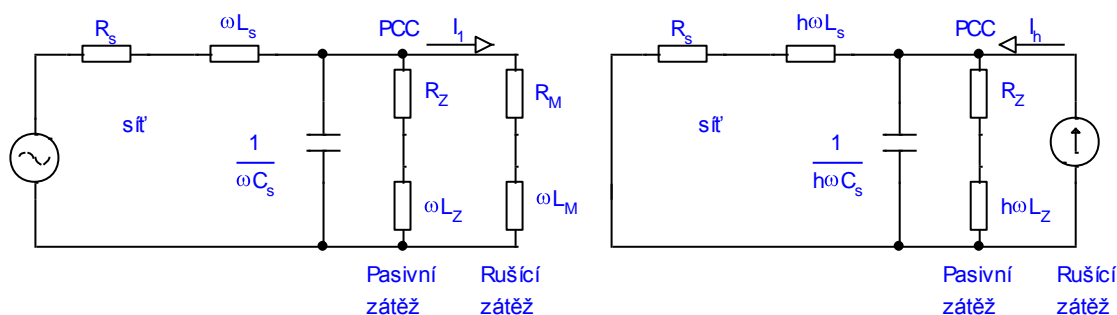
V případě nelineární zátěže není impedance prvku při dané frekvenci konstantní v celém rozsahu VA charakteristiky, jako tomu bylo v předešlém případě. Typickým příkladem může být dvojcestný usměrňovač, jehož diodami v propustném směru prochází proud až tehdy, je-li napětí zdroje vyšší než napětí na kondenzátoru na straně zátěže. Proud diodou v propustném směru prochází tehdy, je-li napětí na anodě vyšší než na katodě a je-li tento rozdíl větší než prahové napětí diody. Na následujícím grafickém zpracování je zachyceno, jak se deformuje křivka proudu obecného nelineárního spotřebiče.



Obr. 1.3 Vliv nelinearity zátěže na vstupní proud [5]

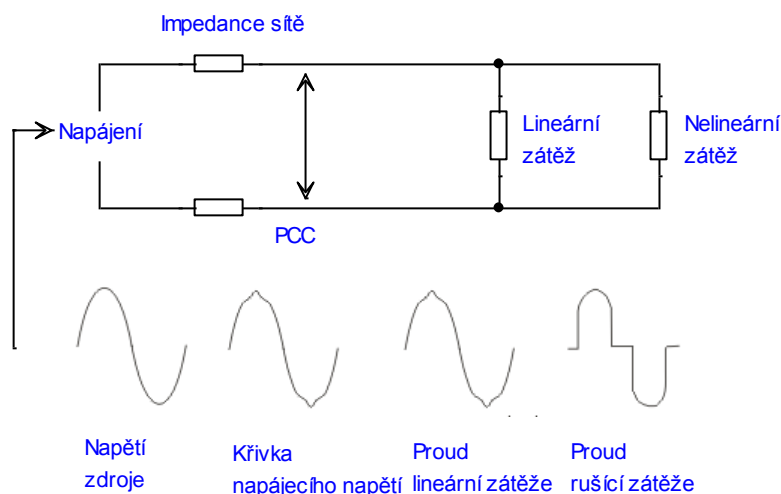
Tímto lze dovést, že nelineární spotřebiče se v praxi budou chovat jako proudové zdroje vyšších harmonických. Harmonické proudy postupují od rušícího zařízení do sítě, na jejíž impedanci vytvářejí takové úbytky napětí, které přísluší tomuto konkrétnímu řádu harmonické:

$$\overline{U}_h = \overline{Z}_{Sh} \cdot \overline{I}_h \quad (1.1)$$



Obr. 1.4 Náhradní schémata sítě pro základní a vyšší harmonické [4]

Superponováním vzniklých harmonických úbytků na průběh napětí základní harmonické dochází k deformacím síťového napětí. V místě připojení odběratele k rozvodné soustavě, tedy ve společném napájecím bodě PCC, může docházet v důsledku takto zkreslené křivky napájecího napětí k negativním vlivům na provoz ostatních připojených zařízení v síti. [4]



Obr. 1.5 Ovlivňování parametrů elektrické energie v distribuční soustavě nelineárními spotřebiči [4]

1.3 Harmonická analýza

Proud odebíraný nelineární zátěží může být značně odlišný od harmonického průběhu napětí zdroje, jak je ilustrováno na Obr. 1.3. Průběh však zůstává na určitém intervalu periodický, což znamená, že hodnota funkce v čase t je rovna hodnotě v čase $t + T$. Pokud je funkce $f(t)$ na intervalu $\langle 0, T \rangle$ konečná, po částech spojitá, jednoznačná a má konečný počet maxim a minim, pak lze vyjádřit tzv. Fourierovou řadou, kdy se původní funkce rozloží na nekonečnou řadu obsahující konstantu a harmonické veličiny s kmitočtem násobků základního kmitočtu. [1,2]

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

kde úhlová frekvence je

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

Pro Fourierovy koeficienty platí:

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

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

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

Spektrální tvar Fourierovy řady má tvar:

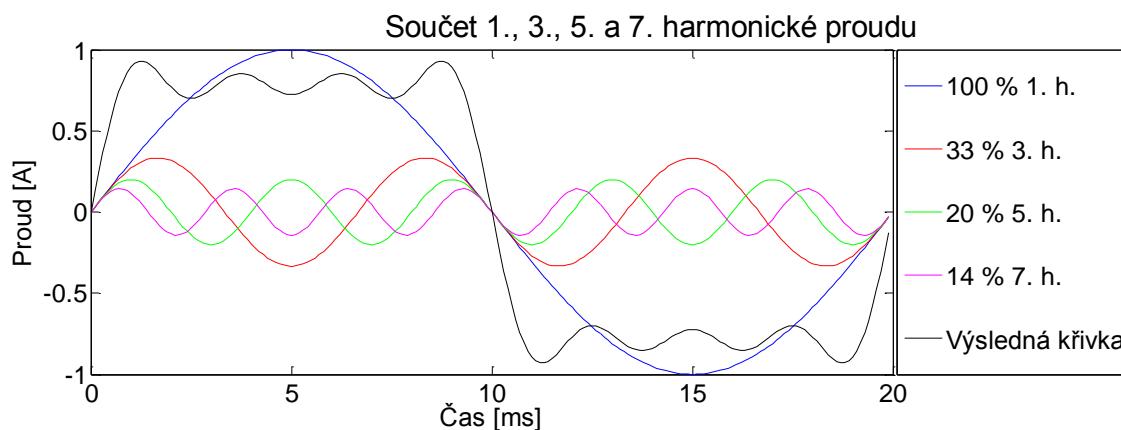
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} D_h \sin(h\omega_1 t + \varphi_h), \quad h = 1, 2, 3, \dots \quad (1.7)$$

Člen D_h se nazývá amplitudové spektrum a obdobně φ_h je označováno jako fázové spektrum.

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

V závislosti na vlastnostech analyzované funkce výsledná Fourierova řada obsahuje pouze některé členy. V případě sudé funkce, kde $f(-t) = f(t)$ a která je souměrná podle osy y, jsou ve Fourierově řadě obsaženy jen členy s funkcí cosinus. Ve Fourierově řadě popisující lichou funkci, pro kterou platí, že $f(-t) = -f(t)$, se vyskytnou členy s funkcí sinus. Antiperiodická funkce, pro kterou platí $f(t) = -f(t \pm T/2)$, je vyjádřena Fourierovou řadou obsahující členy s funkcemi sinus a cosinus s lichými indexy koeficientů a_h a b_h .

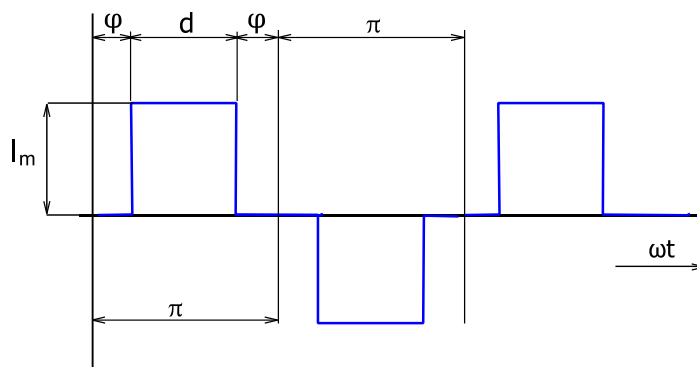
Ukázka aproximace obdélníkového průběhu proudu prvními čtyřmi lichými harmonickými je ilustrována níže.



Obr. 1.6 Součet základní a 3., 5., a 7. harmonické proudu

1.4 Zobecněný amplitudový zákon

Pro velkou náročnost analytického popisu křivky odebíraného proudu nelineárních spotřebičů se ve výpočtech používá popis pomocí zobecněného amplitudového zákona odvozeného např. v [1,2].



Obr. 1.7 Obecný idealizovaný obdélníkový průběh proud [2]

Při uvažování průběhu proudu podle obrázku (symetrická, lichá, antiperiodická funkce) lze interval $(0 - \pi)$ rozložit na tři podintervaly s následně definovaným proudem:

$$\begin{aligned} i_s(\omega t) &= 0, & \omega t &\in (0, \varphi) \\ i_s(\omega t) &= I_m, & \omega t &\in (\varphi, \pi - \varphi) \\ i_s(\omega t) &= 0, & \omega t &\in (\pi - \varphi, \pi) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Pro popis liché funkce se vyjádří Fourierův koeficient s funkcí sinus.

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i_s(\omega t) \cdot \sin(h\omega t) d\omega t = \frac{2}{\pi} \int_{\varphi}^{\pi - \varphi} I_m \cdot \sin(h\omega t) d\omega t = -\frac{2I_m}{\pi h} \cos(h\omega t)_{\varphi}^{\pi - \varphi} \quad (1.10)$$

Předcházející vztah se upraví na:

$$b_h = \frac{4I_m}{\pi h} \cos(h\varphi), \quad h \dots \text{liché} \quad (1.11)$$

Po dosazení za φ z doby trvání pulzu

$$\varphi = \frac{d - \pi}{2} \quad (1.12)$$

Fourierův koeficient přejde do tvaru:

$$b_h = \frac{4I_m}{\pi h} \sin \frac{hd}{2} \cdot \sin \frac{h\pi}{2} \quad (1.13)$$

Odebíraný proud lze Fourierovou řadou vyjádřit následovně:

$$i_s(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} \frac{4I_m}{\pi h} \sin \frac{hd}{2} \cdot \sin \frac{h\pi}{2} \cdot \sin(h\omega t) \quad (1.14)$$

První harmonická nabývá hodnoty

$$I_1 = \frac{4I_m}{\pi} \sin \frac{d}{2} = 1,273I_m \sin \frac{d}{2} \quad (1.15)$$

Pro další řády charakteristických harmonických platí:

$$I_h = \frac{1}{h} I_1 \cdot \frac{\sin \frac{hd}{2}}{\sin \frac{d}{2}} \quad (1.16)$$

První část uvedeného vzorce odpovídá amplitudovému zákonu. Zobecněný amplitudový zákon však zohledňuje i dobu (úhel), po kterou je proud na maximální hodnotě. Po dosazení úhlu $d = 2\pi/3$, pro kterou je odvozen amplitudový zákon, se oba vztahy rovnají.

1.5 Výkony v sítích s nelineárními spotřebiči

Okamžitý výkon je součinem okamžitých hodnot napětí a proudu.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (1.17)$$

Nelineární zátěž je připojena na napětí, které v důsledku úbytků napětí vlivem průchodu neharmonického proudu impedancí vedení není čistě harmonické. Lze vyjádřit Fourierovou řadou:

$$u_k(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sqrt{2}U_k \sin(k\omega t + \varphi_{uk}), \quad u_o(t) = U_0 \quad (1.18)$$

Obdobně pro procházející proud platí:

$$i_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}), \quad i_o(t) = I_0 \quad (1.19)$$

Dosazení do vztahu pro okamžitý výkon z rovnice 1.17.

$$p(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk}) \cdot \sum_{l=0}^{\infty} \sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \quad (1.20)$$

Pro střední hodnotu výkonu platí:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \left[\sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \cdot \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk}) \right] dt \quad (1.21)$$

Dvojitou sumaci lze přesunout před integraci, pak

$$P = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \int_0^T \left[\sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \cdot \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk}) \right] dt. \quad (1.22)$$

Z předchozího vztahu vyplývá, že pro $k=l=h=0$, tedy stejnosměrnou složku, platí:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_0(t) \cdot i_0(t) \cdot dt = \frac{U_0 \cdot I_0}{T} = U_0 \cdot I_0 = P_0 \quad (1.23)$$

Pro první a další harmonické platí:

V případě $k=l=h$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \cdot \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk}) \right] dt \quad (1.24)$$

$$P = \frac{1}{T} \sqrt{2} U_k \sqrt{2} I_l \int_0^T [\sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \cdot \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk})] dt \quad (1.25)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [\sqrt{2} I_l \sin(l\omega_1 t + \varphi_{il}) \cdot \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk})] dt \quad (1.26)$$

$$P = U_h I_h \cos \varphi_h \quad (1.27)$$

Pokud řády harmonických proudů a napětí nejsou totožné, pak je součin odpovídajících si řádů nulový.

Z předchozího je patrné, že činný výkon v obvodu s neharmonickými veličinami je součtem činného výkonu stejnosměrné složky a jednotlivých harmonických.

$$P = P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cos \varphi_h, \quad \varphi_h = \varphi_{uh} - \varphi_{ih} \quad (1.28)$$

Obdobně pro jalový výkon platí:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \sin \varphi_h \quad (1.29)$$

Zdánlivý výkon je součinem efektivních složek napětí a proudu

$$S = U \cdot I, \quad (1.30)$$

které se vypočítají z jednotlivých harmonických následovně:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad (1.31)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (1.32)$$

Účinník je v obvodech s neharmonickými veličinami definován jako podíl činného a zdánlivého výkonu.

$$P = \frac{P}{S} = \frac{P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}} \quad (1.33)$$

Pro neharmonické průběhy platí

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (1.34)$$

Proto se zavádí deformační výkon D v jednotkách VAd.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.35)$$

Někdy je výhodnější než absolutní používat poměrné hodnoty harmonických. [2]

$$u_h = \frac{U_h}{U_1} [-], \quad u_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 [\%] \quad (1.36)$$

$$i_h = \frac{I_h}{I_1} [-], \quad i_{h\%} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 [\%] \quad (1.37)$$

1.6 Impedance sítě

Vedení lze charakterizovat jeho činným odporem, indukčností, kapacitou a svodem. Zanedbáním skin efektu lze předpokládat, že frekvenčně závislé prvky náhradního schématu vedení jsou induktivní a kapacitní reaktance. Většina průmyslových zařízení sloužících k úpravám vlastností elektrické energie při rozvodu či zařízení konečné spotřeby mají pro základní harmonickou výrazný induktivní, případně kapacitní charakter. Reaktance prvků je frekvenčně závislá, a tedy i impedance celé sítě složené ze sérioparalelní kombinace frekvenčně závislých prvků je pro každý řád harmonické jiná. Deformace křivky napětí je způsobena úbytkem napětí na impedanci sítě, jejíž velikost a frekvenční závislost je tedy pro vyšetřování vlivu nelineárních spotřebičů na síť nutné znát.

1.7 Celkové harmonické zkreslení

Jedním z nejrozšířenějších ukazatelů kvality elektrické energie z hlediska harmonických je celkové harmonické zkreslení (zkratka THD z anglického termínu Total Harmonic Distortion), které vyjadřuje míru celkové deformace proudu nebo napětí. Je vyjádřeno poměrem efektivní hodnoty obsahu harmonických k efektivní hodnotě základní harmonické. [2]

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H Q_h^2}}{Q_1} \quad (1.38)$$

Písmeno Q reprezentuje efektivní hodnotu harmonické složky střídavé veličiny.

1.8 Negativní vlivy harmonických

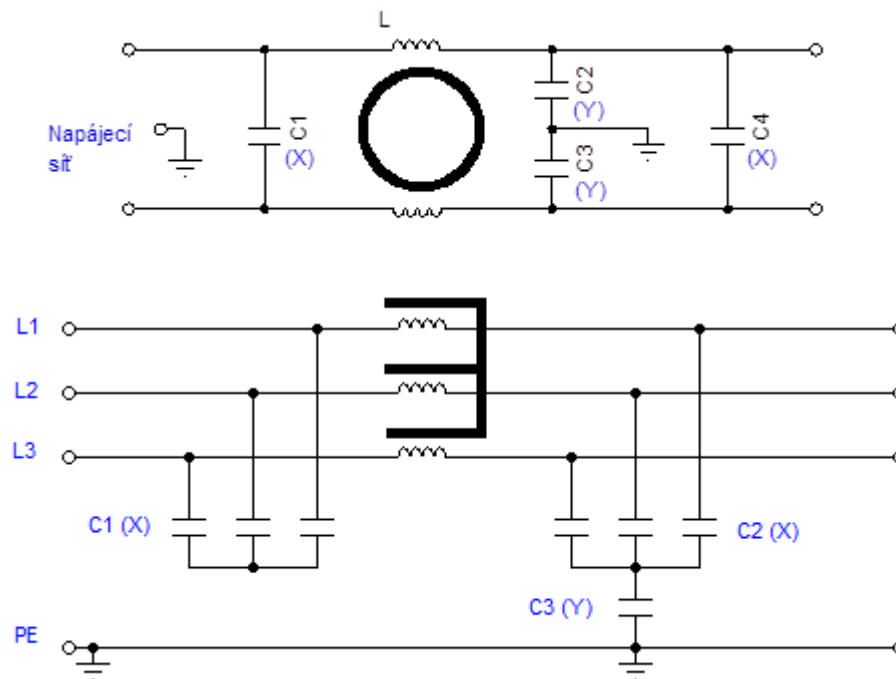
Výskyt harmonických v napájecí síti může přinášet problémy při provozu samotné sítě i kolidovat se správnou činností koncových zařízení. Negativní účinky harmonických lze z hlediska doby působení rozdělovat na okamžité vlivy a dlouhodobé vlivy. U sítě s výrazným podílem vyšších harmonických může docházet například k následujícím jevům.

1.8.1 Okamžité negativní důsledky harmonických

Vybavování elektrických ochran

Proudové chrániče reagují na součet proudů pracovních vodičů, které procházejí součtovým transformátorem ke spotřebiči. Rozdílový proud je vyhodnocován a po překročení nastavené hodnoty dojde k vybavení spouště a odpojení spotřebiče. V napájecích obvodech zejména výpočetní techniky jsou filtry obsahující kondenzátory zapojené mezi fázemi, středním vodičem a zemí. Filtry jsou navrhovány tak, aby působily proti symetrickému i nesymetrickému rušení. Stejnoseměrné rušení snižují kondenzátory C_x a přes kondenzátory C_y a kompenzovanou tlumivku se uzavírá nesouměrné rušení. Vzhledem k frekvenční závislosti impedance kondenzátorů na frekvenci se v případě vysokého podílu harmonických v síti kondenzátory C_y uzavírají proudy, které mohou vést k nežádoucímu vybavení proudového chrániče. Při zapojení většího množství spotřebičů chráněných síťovými filtry

na jeden proudový chránič díky součtu svodových proudů filtrů je nežádoucí vybavení proudového chrániče pravděpodobnější. [2,5]



Obr. 1.8 Ukázka topologie síťového filtru jednofázových zařízení (nahore) a třífázových zařízení (dole) [2]

Nesprávná funkce zařízení synchronizujících se průchodem napětí nulou

Některé elektronické regulátory využívají skutečnosti, že vypínání indukivní zátěže v okamžiku průchodu nulou eliminuje přechodové jevy, snižuje namáhání spínacích součástí a brání vzniku rušení. Vyšší harmonické obsažené v průběhu napětí mohou znemožnit regulátoru správné určení bodu průchodu napětí nulou, nebo tento průběh může procházet nulou během jedné půlperrody i několikrát. [5]

1.8.2 Střední a dlouhodobé negativní důsledky harmonických

Tepelné přetěžování transformátorů, kondenzátorů a motorů

Hysterezní ztráty transformátorů a motorů jsou závislé na frekvenci napájecího napětí. Ztráty vířivými proudy na frekvenci závisejí kvadraticky. Při návrhu je nutné brát v úvahu příspěvek k oteplení od vyšších harmonických, tedy motory i transformátory předdimenzovat, což zvyšuje investiční náklady. U transformátorů s vinutím zapojeným do trojúhelníka, které blokuje přenos vyšších harmonických násobků tří do sítě, se musí při návrhu počítat se

zvýšeným zatíženým cirkulujícími harmonickými. Kondenzátory vlivem vyšších frekvencí obsažených ve spektru napájecího napětí prochází vyšší proud, který působí další tepelné namáhání. Z teorie zabývající se vlastnostmi materiálů je známo, že zvýšení teploty snižuje životnost zařízení.

Mezi rozptylovou reaktancí transformátoru a kapacitou kompenzačního kondenzátoru může za předpokladu rovnosti reaktancí obou prvků dojít k sériové rezonanci, při které je procházející proud omezen jen odporem reprezentujícím činný odpor vinutí a vodičů. Pokud je rezonanční frekvence těchto prvků sítě blízká některé z harmonických, pak je tato odsávána kompenzačním kondenzátorem, který je přetěžován. Posunutí rezonanční frekvence kompenzačního zařízení mimo frekvenci přítomných harmonických napětí a signálu HDO se provádí připojením kondenzátoru přes hradící člen či tlumivku. Zapojení kompenzačního kondenzátoru s tlumivkou se nazývá chráněná kompenzace a používá se u sítí, kde podíl výkonů zařízení generující harmonické a instalovaného zdánlivého výkonu hlavního transformátoru je vyšší než 20 %. [4]

Provozem rušícího zařízení může mezi reaktancí sítě a kapacitou kompenzačního kondenzátoru nebo sítě samotné dojít k paralelní rezonanci. V případě, že by harmonická proudů měla frekvenci blízkou rezonanční frekvenci spojení kapacita – indukčnost sítě, vlivem průchodu vysokou impedancí při paralelní rezonanci by amplituda napětí odpovídající harmonické výrazně stoupla. Pokud je kompenzačnímu kondenzátoru předřazena tlumivka, pro zabránění paralelní rezonance je nutné, aby rezonanční frekvence sériového obvodu kondenzátor - tlumivka byla nižší než frekvence nejnižší harmonické, kterou produkuje rušící zátěž. Dodržení tohoto předpokladu je nezbytné při připínání jednotlivých stupňů kondenzátorové baterie. Obvod kondenzátor – tlumivka má při frekvenci vyšší než rezonanční induktivní charakter a nemůže tedy dojít k paralelní rezonanci s reaktancí sítě. [4]

Přetížení středního vodiče

Proud středním vodičem třífázového systému je dán vektorovým součtem fázových proudů. Pokud je zátěž nelineární, fázové proudy obsahují harmonické včetně třetí a jejích násobků. Pro ilustraci mějme všechny tři fázové proudy rovné. Pak třetí harmonická proudů v každé fázi má stejnou amplitudu a lze její průběh zapsat následovně:

$$i_{L1} = I_3 \sin 3(\omega t) \quad (1.39)$$

$$i_{L2} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t - 2\pi) = i_{L1} \quad (1.40)$$

$$i_{L3} = I_3 \sin 3\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) = I_3 \sin(3\omega t - 4\pi) = i_{L1} \quad (1.41)$$

Pro obecnou souměrnou a vyváženou zátěž ve všech fázích se proud středním vodičem vypočte následovně.

$$I_N = 3 \sqrt{\sum_{h=3}^{\infty} I_{Lh}^2}, h = 3, 9, 15, 21, 27, \dots \quad (1.42)$$

I_{Lh} reprezentuje harmonický proud jedné fáze (L) řádu h . [2]

V minulosti nebyly zdroje třetí harmonické a jejích násobků u jiných než průmyslových odběratelů časté, a tak v souladu s tehdejšími normami docházelo k nasazování kabelů se slabším průřezem středního vodiče než žil fází. Obsah třetí harmonické a jejích násobků v síti se vlivem nástupu spínaných zdrojů, které jsou součástí téměř veškeré spotřební elektroniky, značně zvýšil a dle literatury [5] je proud středním vodičem v komerčních budovách 1,5 až 2,1 násobkem fázových hodnot. Při návrhu vedení s ohledem na vyšší harmonické je potřebné dimenzovat střední vodič o dvojnásobném průřezu, nebo vést dva paralelní střední vodiče stejného průřezu. Rovněž je nutné brát v úvahu teplo vytvářející se průchodem proudu středním vodičem a odpovídajícím způsobem snížit zatížitelnost, aby nedošlo k nadměrnému tepelnému namáhání izolace kabelu.

Skinefekt

U vodičů procházených časově proměnným proudem vzniklé magnetické pole ve vodiči indukuje vířivé proudy, které se superponují na proud vodičem protékajícím. Výsledkem je nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v průřezu vodiče, která směrem ke středu vodiče

exponenciálně klesá. Pro hloubku, ve které proudová hustota poklesne na e^{-1} (36,8%), tzv. hloubku vniku, platí:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (1.43)$$

Ze vzorce je patrné, že skinefekt neboli povrchový jev závisí na materiálu vodiče a frekvenci procházejícího proudu. Pro frekvenci základní harmonické je vliv skinefektu zanedbatelný, ale pro harmonické řádu 7 a vyšší se uvažuje jeho vliv na přídavné ztráty a oteplení. [5]

Ovlivňování signálu HDO

Při redukci obsahu harmonických v síti pomocí filtrů může docházet k nepřijatelnému nárůstu úrovně signálu HDO nebo odsávání signálu a přetěžování filtrů. Tím hrozí snížení kvality napětí na hladině nízkého napětí nebo problémy s příjmem signálu HDO. Vlivem připojeného zařízení odběratele na úroveň signálu HDO se zabývá podniková norma energetiky PNE 33 3430-6. [2,4]

1.9 Kompatibilní meze nízkofrekvenčního rušení

Norma ČSN EN 61000-2-2 definuje kompatibilní úrovně nízkofrekvenčního rušení v rozsahu od 0 do 9 kHz s rozšířením až do 148,5 kHz šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí. Tyto kompatibilní úrovně musí být dodrženy ve společném napájecím bodě PCC. Norma se vztahuje na sítě se jmenovitým fázovým napětím až do 420 V nebo 690 V sdruženého napětí o kmitočtu 50 či 60 Hz. [2,15]

Tab. 1.1 Výtah z normy ČSN EN 61000-2-2[15]

Liché, mimo násobky 3		Liché, násobky 3		Sudé	
Řád harm.	[%] U_N	Řád harm.	[%] U_N	Řád harm.	[%] U_N
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	3	0,5
13	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$	$21 \leq h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \cdot (10/h) + 0,25$

2 Průběhy vstupních proudů domácích spotřebičů

Jednotlivé spotřebiče užívané v domácnosti jsou určeny k zapojení do sítě nízkého napětí a jejich vstupní proud nepřekračuje 16 A. Jejich vliv na napájecí síť lze tedy posuzovat dle normy ČSN EN 61000-3-2, která se zabývá proudy harmonických vydávaných do sítě. Spotřebiče jsou dle uvedené normy rozděleny do 4 kategorií.

Za třídu A jsou označena všechna trojfázová zařízení, domácí spotřebiče vyjma zařízení identifikovaných jako třída D, nářadí kromě přenosného nářadí, regulace světla pro žárovky, zvuková zařízení, zařízení, která nejsou specifikována v ostatních třídách. Ve třídě B se nachází přenosné nářadí a neprofesionální obloukové svářečky. Třídu C tvoří světelná zařízení. Ve třídě D nalezneme osobní počítače, monitory a televizní přijímače s příkonem do 600 W. [2,16]

2.1 Povolené úrovně emitovaných proudů

Pro zařízení třídy A platí, že aby vyhovovala normě, vstupní proud nesmí překročit hodnoty uvedené v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 Meze harmonických proudů třídy A podle ČSN EN 61000-3-2[16]

Řád harmonické [-]	liché harmonické							sudé harmonické			
	3	5	7	9	11	13	15-39	2	4	6	8-40
Max. dovolený proud	2,30	1,14	0,77	0,40	0,33	0,21	0,15·15/h	1,08	0,43	0,3	0,23·8/h

Norma ČSN EN 61000-3-2 určuje, že vstupní proud harmonické zařízení zařazeného do třídy B nesmí překročit hodnoty dané pro skupinu A násobené koeficientem 1,5. Výsledné hodnoty pro přehlednost zobrazuje následující tabulka.

Tab. 2.2 Výtah z normy ČSN EN 61000-3-2[16]

Řád harmonické [-]	liché harmonické							sudé harmonické			
	3	5	7	9	11	13	15-39	2	4	6	8-40
Max. dovol. proud [A]	3,45	1,71	1,16	0,6	0,5	0,32	0,22·15/h	1,62	0,65	0,45	0,345·8/h

. Efektivní hodnoty jednotlivých harmonických proudů zařízení náležících do třídy C s činným výkonem větším než 25 W nesmí dle normy ČSN EN 61000-3-2 přesáhnout procentní hodnoty základní harmonické uvedené v tabulce 2.3.

Tab. 2.3 Výtah z normy ČSN EN 61000-3-2 [16]

Řád harmonické	2	3	5	7	9	1-39 (liché)
Max. proud v % 1.h.	2	30·PF	10	7	5	3

Pro zařízení třídy C s příkonem 25 W a nižším platí, že musí být dodržen jeden z požadavků:

Harmonické vstupního proudu musí být maximálně rovny hodnotám vztaženým na činný příkon uvedených v tabulce 2.4.

Třetí harmonická proudu nesmí být větší než 86% a třetí harmonická proudu nesmí přesáhnout 61 % první harmonické proudu. Křivka odebíraného proudu musí začínat nejpozději v 60° od počátku kladné půlperiody napětí, vrchol křivky nejpozději v 65° a konec nejdříve v 90°. [2,16]

Tab. 2.4 Výtah z normy ČSN EN 61000-3-2 [16]

Řád harmonické	3	5	7	9	11	13	15-39 (liché)
Max. poměr mA/W	3,4	1,9	1	0,5	0,35	0,296	3,85/h

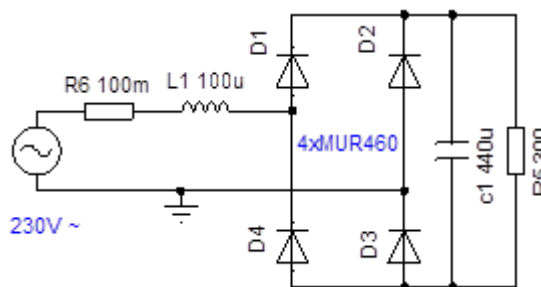
Norma ČSN EN 61000-3-2 definuje meze jednotlivých harmonických vstupního proudu I_h zařízení skupiny D poměrně k jednotkovému činnému příkonu, které jsou uvedeny v tabulce 2.4.

2.2 Vstupní proud neřízeného můstkového usměrňovače

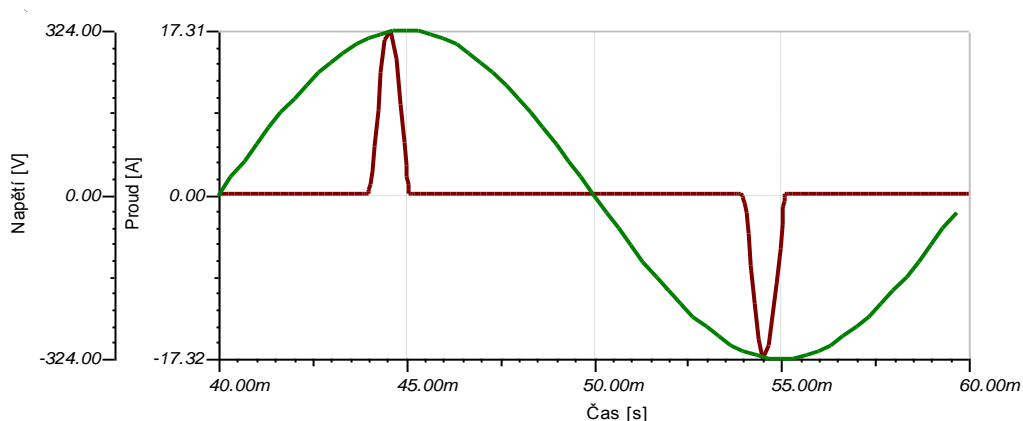
Základní náhled na problematiku vstupních proudů nelineárních domácích spotřebičů lze ilustrovat analýzou jednofázového neřízeného můstkového usměrňovače pracujícího do zátěže tvořené paralelní kombinací vyhlazovacího kondenzátoru a rezistoru. Proud je odebíráán jen v intervalech, kdy je napětí na vstupu usměrňovače větší než napětí na kondenzátoru. Nabíjecí proud kondenzátoru je omezen jen velmi malou impedancí a jeho průběh obsahuje výraznou špičku.

Literatura [11,12] uvádí, že pomocí modelu můstkového usměrňovače připojeného do sítě s parametry X a R lze simulovat proud odebíraný zdrojem osobního počítače. V prvním případě je provedena analýza bez obvodů upravujících průběh vstupního proudu.

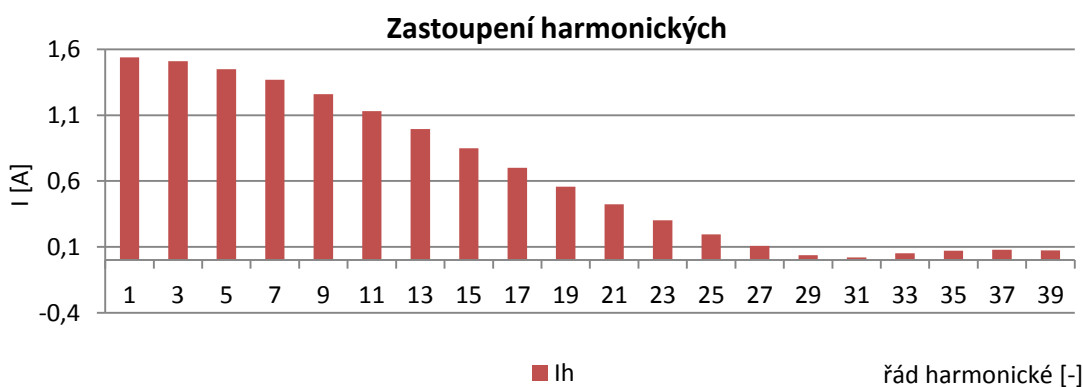
Nechť odpor R_6 a induktor L_1 reprezentují parametry sítě a přívodů zařízení, pak simulační schéma vypadá jako na následujícím schématu.



Obr. 2.1 Schéma obvodu PC zdroje bez PFC pro simulaci v programu Tina



Obr. 2.2 Průběh odebíraného proudu PC zdroje



Obr. 2.3 Zastoupení harmonických v průběhu proudu odebíraného PC zdrojem dle předchozího modelu

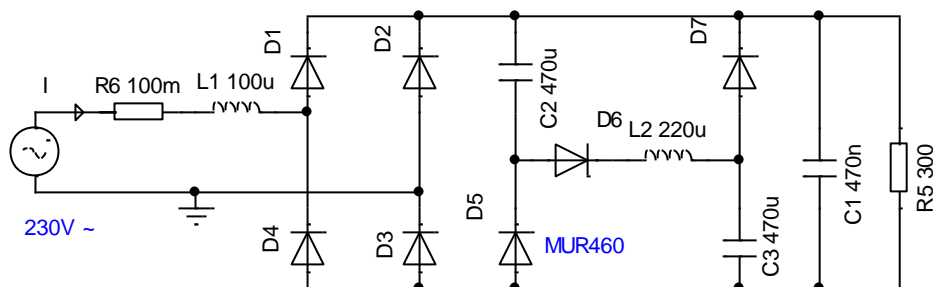
Z harmonické analýzy průběhu odebíraného proudu vyplývá, že třetí harmonická je téměř rovna první a i zastoupení dalších harmonických převyšuje limity normy ČSN EN 61000-3-2 pro třídu D vztahujících se k jednotkovému činnému příkonu. Odebíraný proud je silně deformován, což dokládá vysoké THD_I dosahující 223,7 %. Zapojení většího počtu takových spotřebičů do veřejné rozvodné sítě by mohlo významně omezit správnou funkci její i ostatních připojených spotřebičů, proto je nutné použít obvody upravující průběh vstupního proudu.

2.3 Korektory odebíraného proudu

Obvody upravující tvar odebíraného proudu, aby byly dodrženy legislativou dané meze obsahu harmonických, se v zásadě rozdělují na dvě skupiny, pasivní a aktivní. K pasivním korektorům patří kapacitní a indukční filtry, mezi aktivními je nejčastější výkonový obvod na bázi boost měniče s proměnným vstupním napětím. [2,6]

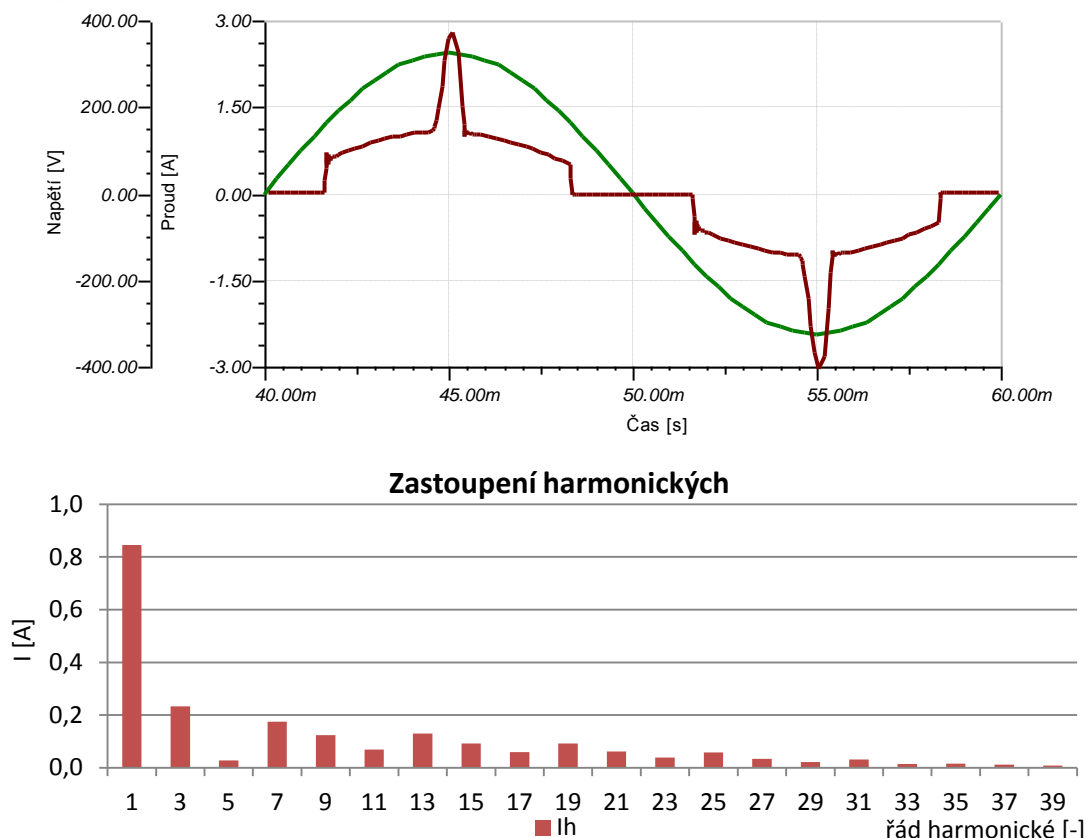
2.3.1 Pasivní kapacitní PFC

Na následujícím obrázku je schéma impulsního zdroje s kapacitním filtrem PFC. Vlastní PFC filtr tvoří hlavně diody D_5 , D_7 , kondenzátory C_2 a C_3 . Cívka L_2 omezuje proudové rázy při komutaci diod. Dokud je vstupní napětí vyšší než polovina své jmenovité hodnoty, pak jsou kondenzátory C_2 a C_3 nabíjeny na polovinu maximální hodnoty vstupního napětí proudem uzavírajícím se přes diodu D_6 . Jakmile začne vstupní napětí klesat ze své maximální hodnoty, dioda D_6 se uzavře. Průběh napětí na výstupu filtru kopíruje sestupnou hranu usměrněného napětí, dokud neklesne na polovinu své maximální hodnoty. Pak diody D_5 a D_7 přejdou do vodivého stavu, spojí kondenzátory C_2 a C_3 do paralelní kombinace, která udrží výstupní napětí filtru na polovině maximálního napětí, dokud se cyklus nezopakuje. [2]



Obr. 2.4 Zjednodušené schéma zapojení vstupní části PC zdroje s kapacitním PFC [2]

Simulace obvodu kapacitního PFC v programu Tina dokládá, že zařazením filtru se významně snížil obsah harmonických oproti obvodu bez filtru. $THD_1 = 46,2 \%$.



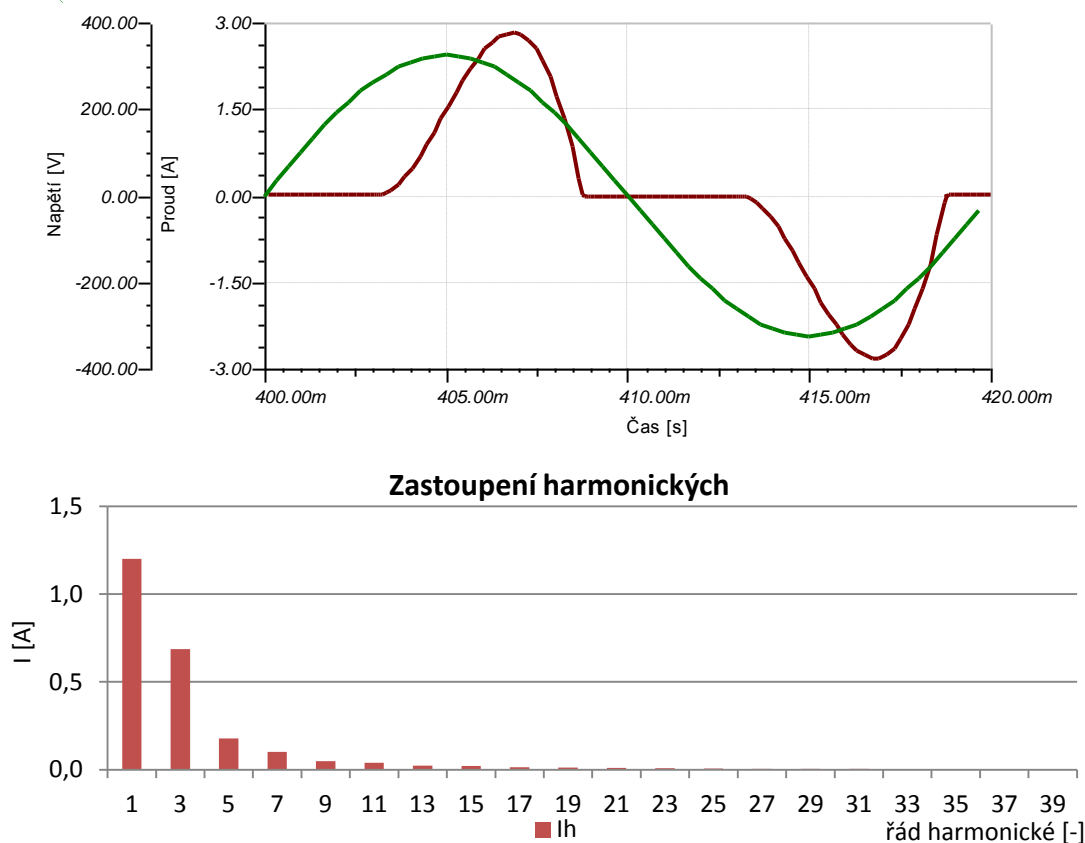
Obr. 2.5 Odebíraný proud zdroje s kapacitním PFC filtrem (nahore) a jeho harmonická analýza (dole)

Zařazením tlumícího odporu sériově s D_6 by se snížila špička odebíraného proudu, ale zvýšilo by se i zvlnění napětí ve stejnosměrném obvodu. Tuto nevýhodu odstraňuje vybavení obvodu napěťovou pumpou. Jak vlivem přidání tlumícího rezistoru, tak napěťové pumpy a citlivostní analýzou vlivu prvků schématu na odebíraný proud se zabývá např. [13].

2.3.2 Pasivní indukční PFC

Zařazením indukčnosti do vstupního obvodu lze oproti kapacitnímu PFC omezit zvlnění odebíraného proudu na úkor jeho harmonického zkreslení. Vlivem indukčnosti dochází k rozšíření a snížení amplitud proudových pulzů nabíjejících kondenzátor na výstupu. Pasivní indukční varianta PFC filtru se používá u zdrojů do výkonu 500 W. [2]

Nevýhodami, které omezují využití tohoto jednoduchého prostředku v domácích spotřebičích, jsou kromě výraznějšího obsahu třetí harmonické hlavně hmotnost, rozměry a cena tlumivky. Na následujícím obrázku je výsledek simulace obvodu PC zdroje s tlumivkou 50 mH na střídavé straně.



Obr. 2.6 Průběh vstupního proudu pasivního indukčního PFC s tlumivkou o velikosti 50 mH (nahore), zastoupení harmonických (dole)

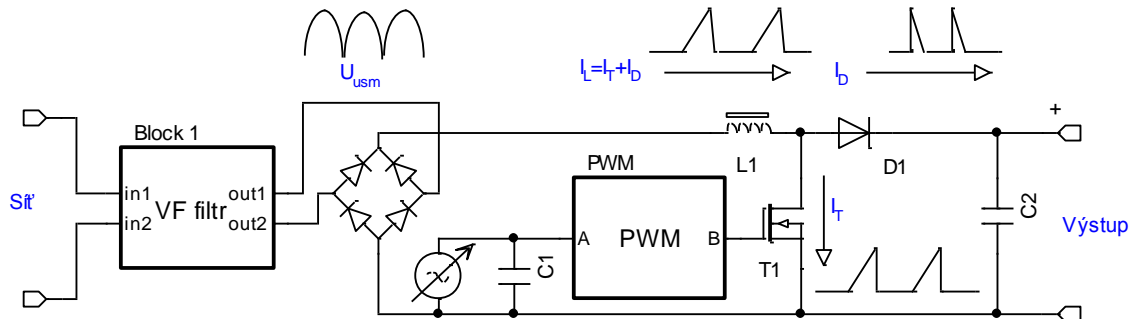
Je patrné rozšíření a pokles špičky pulsu vstupního oproti variantě bez přidané tlumivky. V kontrastu s kapacitním korektorem jsou výrazně vyšší třetí a pátá harmonická a naopak vyšší řady harmonických jsou lépe potlačeny. THD_I simulovaného zapojení je rovno 62,8 %.

2.3.3 Aktivní PFC typu boost

Nejlepších výsledků při eliminaci harmonických odebíraného proudu lze dosáhnout použitím zvyšujícího aktivního měniče na vstupu. Vstupní proud je řízen PWM tak, aby tlumivkou tekla nepřerušovaný proud trojúhelníkového průběhu a ze sítě byl odebírán proud o průběhu co nejbližším sinusoidě. Ke spínání aktivního prvku dochází na základě vyhodnocení vstupního a výstupního napětí. Používají se tři základní režimy – Continuous Conduction Mode (CCM), Discontinuous Conduction Mode (DCM) a Critical Conduction Mode (CRM). [2,13]

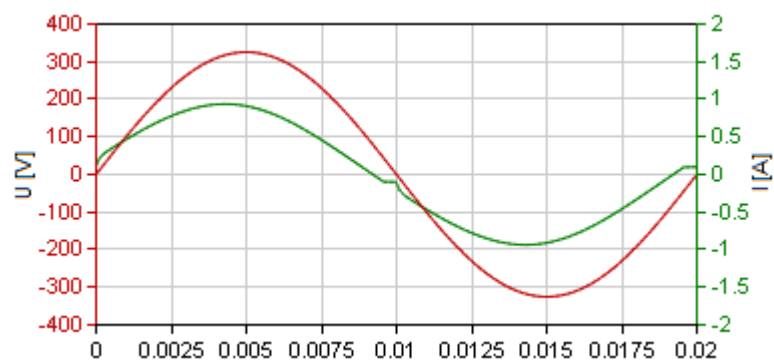
Režim CCM znamená, že proud procházející indukčností je nepřerušovaný a frekvence spínání je v jistých mezích konstantní. Při DCM řízení hodnota proudu procházejícího tlumivkou před opětovným zapnutím klesá k nule a frekvence spínání je proměnná. U CRM

varianty je proud udržován na kritické mezi a při jeho poklesu k nule dojde k sepnutí spínače a opětovnému nárůstu proudu. U aktivního PFC typu boost je usměrněné napětí na výstupu vyšší než amplituda napětí na vstupu. [13]

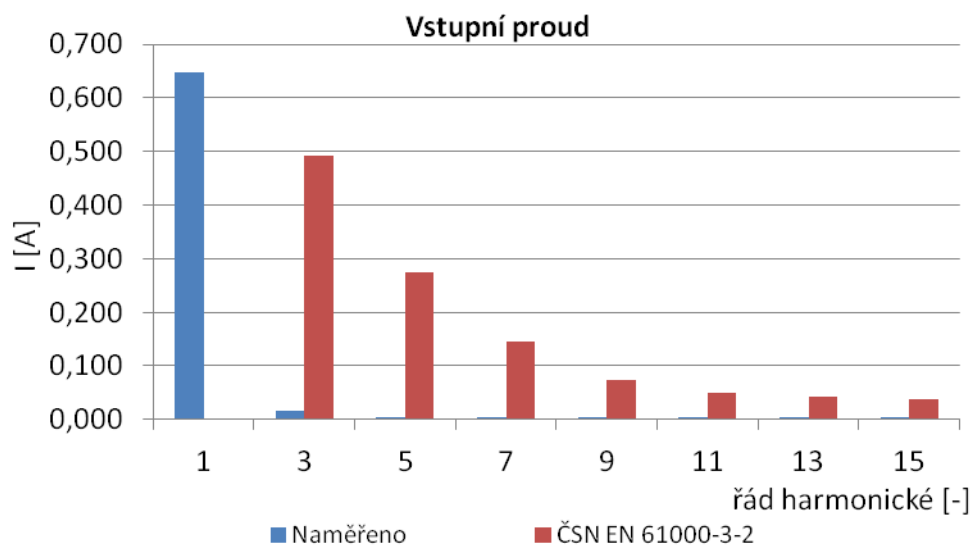


Obr. 2.7 Blokové schéma aktivního PFC typu boost [13]

V simulátoru PowerESim byl simulován aktivní PFC typu boost o příkonu 145 W. Průběh odebíraného proudu s maximální hodnotou 0,94 A a efektivní hodnotou 0,65 A velmi dobře kopíruje funkci sinus. THD proudu je pouze 3,5 % a celkový účinník dosahuje 0,97.



Obr. 2.8 Průběh proudu aktivního PFC obvodu typu boost [19]

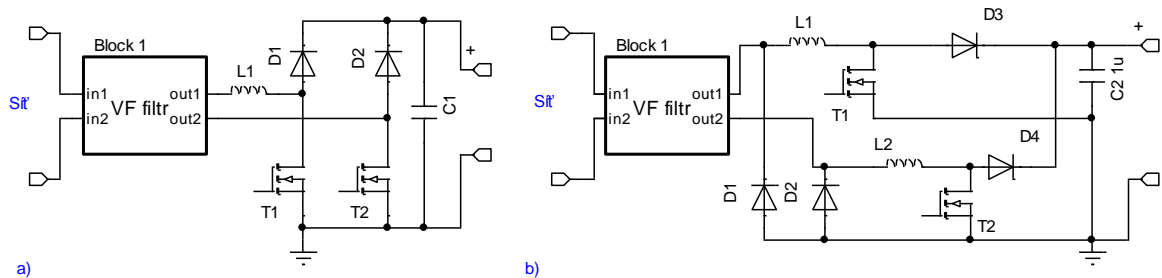


Obr. 2.9 Harmonická analýza proudu aktivního PFC obvodu typu boost [19]

V grafu jsou zachyceny liché harmonické do řádu 15 získané simulací. Vzhledem k nízkému zkreslení jsou hodnoty velmi malé. Zdroj osobního počítače o příkonu 145 W s aktivním PFC typu boost podrobený měření v práci [4] vykazuje vyšší hodnoty harmonických v mezích povolených úrovní. Na rozdíl od simulovaného obvodu skutečný PC zdroj generuje na výstupu několik napěťových úrovní, obsahuje ochrany proti nadměrnému proudu, přepětí či zkratu na výstupních větvích.

2.3.4 Aktivní filtr PFC typu bridgeless

V zapojení bridgeless jsou místo dvou diod můstkového usměrňovače zařazeny MOSFET tranzistory. Tím se vytvoří dva zvyšující měniče. Jedna skupina skládající se z MOSFET spínače a diody je aktivní při kladné půlplně napájecího napětí, druhá při záporné. Přes diodu neaktivní diody se uzavírá proud do zdroje. Dvojnásobným využitím diod se sníží úbytek napětí právě o úbytky na nahrazených diodách a celková efektivnost filtru se zvýší o 1-2 %. [2]

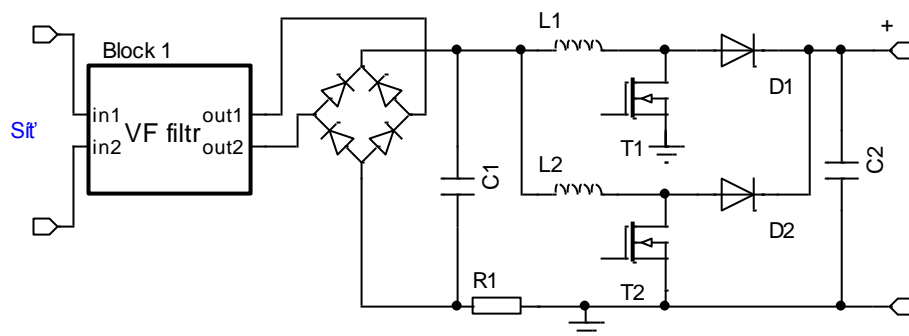


Obr. 2.10 Aktivní PFC typu bridgeless. Vlevo základní schéma, vpravo dvoufázová varianta [2]

V praktických aplikacích se častěji využívá dvoufázová varianta odstraňující některé technické problémy základního zapojení. [2]

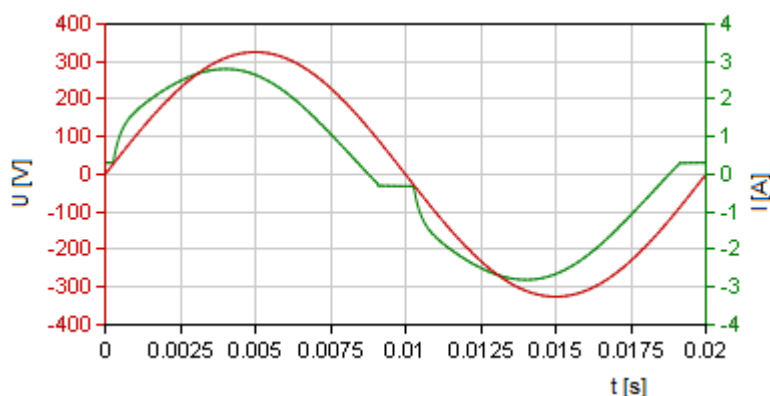
2.3.5 Aktivní filtr PFC typu interleaved

Filtr typu interleaved se skládá ze dvou paralelních měničů dodávajících každý polovinu výkonu. Díky tomu lze oba měniče dimenzovat na nižší zatížení a spolu s tím klesá i cena a rozměr potřebných součástek. Celkové rozměry filtru tak nejsou výrazně vyšší než při použití jediného měniče, oproti kterému má toto zapojení dvě základní výhody. Kromě lepšího odvodu ztrátového výkonu součástek se jedná o omezení zvlnění vstupního proudu při činnosti obou měničů v protifázi. Spolu s nižší velikostí odebíraného proudu z výstupního kondenzátoru klesají i požadavky na jeho kapacitu. Pro svou nízkou prostorovou náročnost se tento typ filtru používá v LCD monitorech a adaptérech pro notebooky. [2]



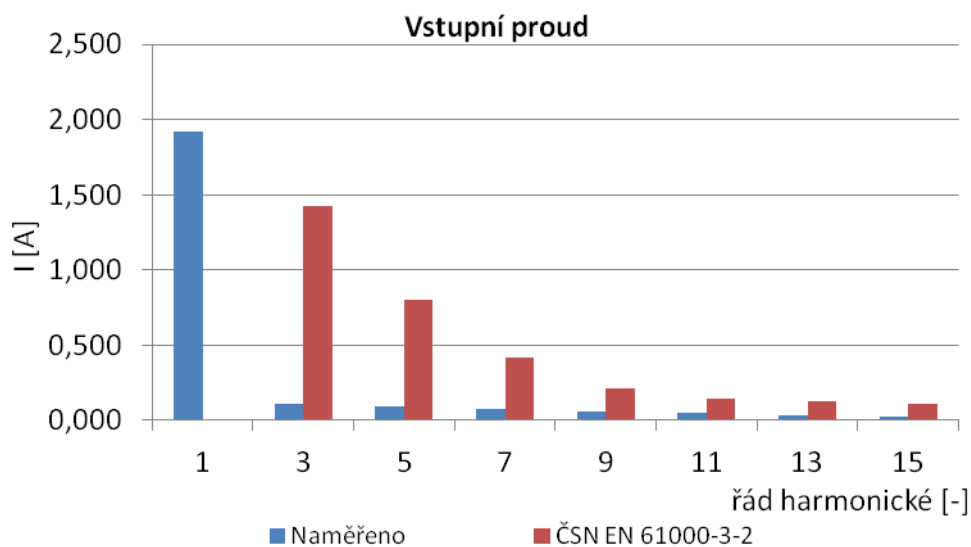
Obr. 2.11 Aktivní PFC obvod typu Interleaved [2]

Pomocí aplikace PowerESim byl simulován měnič AC – DC měnič typu interleaved v režimu CCM o činném výkonu 420 W připojený na napětí 230 V. Křivka jeho odebíraného proudu je zobrazena na následujícím grafu.



Obr. 2.12 Průběh proudu aktivního PFC obvodu typu interleaved [19]

Špička odebíraného proudu dosahuje hodnoty 2,8 A, efektivní hodnota proudu je 1,9 A, zdánlivý výkon 444,2 VA.



Obr. 2.13 Harmonická analýza proudu aktivního PFC obvodu typu interleaved [19]

Z harmonické analýzy uvedeného průběhu lze spočítat celkový účinník, který je roven 0,95, a $THD_I = 9,7\%$. Pro zjednodušení grafu jsou vyobrazeny jen liché harmonické do řádu 15. Ve výpočtech jsou zahrnuty všechny harmonické do řádu 40.

PFC korektory se nasazují pouze u měničů výkonu zhruba do 1 – 2 kW. Pro větší výkony se z důvodů ztrát volí tlumivky, aktivní filtry a pulzní usměrňovače. Vzhledem k zaměření práce na domácí spotřebiče nebudou vlivy měničů vyšších výkonů rozebírány. V dalších částech kapitoly 2 jsou popsána specifika spotřebičů dle příslušnosti do tříd dle normy [16].

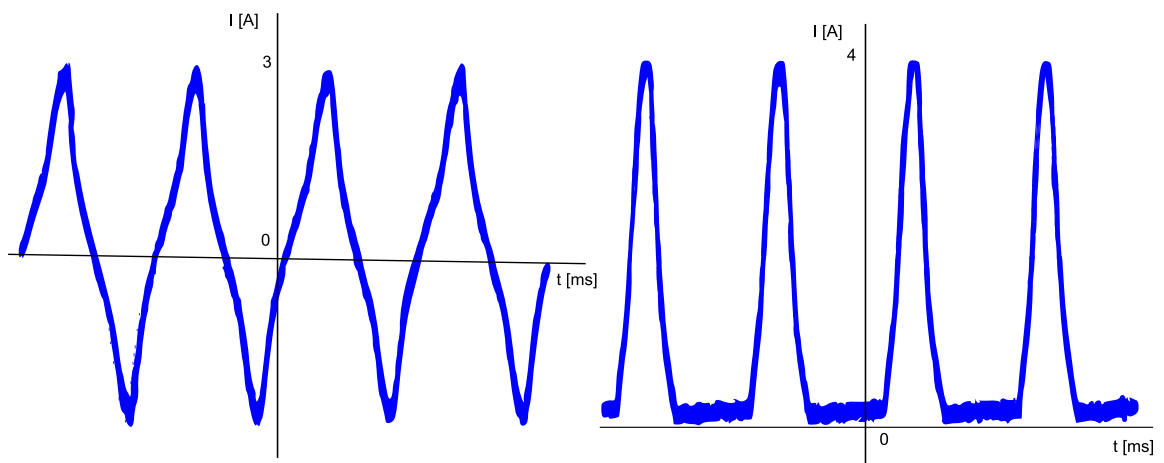
2.4 Třída A

Trojfázová zařízení v domácnosti jsou většinou tepelné spotřebiče, vařiče, bojler. Tepelné spotřebiče s dvoustavovou regulací lze považovat za téměř lineární zátěž. Do třídy A dále patří, jak již bylo uvedeno, domácí spotřebiče nezařazené do skupiny D, čímž se skupina spotřebičů třídy A významně rozrůstá. V práci [17] z roku 2013, která se věnuje vyhodnocení proudů mimo jiné i domácích spotřebičů, jsou z této třídy podrobeny měření data projektory, tiskárny, fén, vysavače a mikrovlnná trouba. Společným jmenovatelem všech uvedených spotřebičů je nízký podíl odběru elektroniky v porovnání s celkovým odběrem daného zařízení, pokud zařízení vůbec nějakou řídicí, signalizační či zabezpečovací elektroniku obsahuje. Ke své činnosti užívají topnou spirálu, která je z hlediska harmonických zcela bezproblémová pro svůj ohmický charakter, nebo motor, nejčastěji komutátorový. Motorové spotřebiče analyzované v práci [17] emitují do sítě hlavně 3. a 5. harmonickou proudů, další harmonické téměř vůbec. Pracují s vysokým celkovým účinníkem od 0,92 – 1. THD_I u jednoho modelu vysavače dosahuje hodnoty 27,3 % a u druhého 8,8 %. U fénu, kde je regulace na polovinu výkonu řešena zařazením sériovým zařazení diody k topné spirále, vznikne jednocestným usměrněním proudu nezanedbatelná úroveň druhé harmonické. Přesto se THD_I pohybuje do 45,2 % v případě regulovaného výkonu a 2,9 % při maximálním. Všechny uvedené spotřebiče emitovaly harmonické proudy v mezích normy.

2.5 Třída B

Přenosné elektrické nářadí jako vrtačky, brusky, pily a další využívají ke své činnosti nejčastěji komutátorové motory a jednofázové asynchronní motory. Z důvodu jednoduché konstrukce a nízké ceny se pro regulaci otáček motorů v domácích spotřebičích často používají měniče napětí. Střední hodnota napětí se mění úhlem sepnutí spínače sériově

zapojeného s vinutím motoru. Tvar křivky odebíraného proudu, a tedy i obsah harmonických, závisí na úhlu sepnutí spínače. Na následujícím obrázku je uveden příklad průběhu proudu odebíraného komutátorovým motorem napájeným z měniče napětí ve dvou provozních stavech. Průběh zachycený vlevo na obrázku odpovídá plnému zatížení motoru. Vpravo je zachycen průběh proudu, který komutátorový motor odebírá z měniče napětí při polovičních otáčkách. Přerušovaný proud motoru způsobuje nárůst generovaných harmonických, které negativně působí jak na napájecí síť, tak na napájený motor. [2]



Obr. 2.14 Průběh proudu odebíraného komutátorovým motorem z měniče napětí při plné zátěži (vlevo) a při polovičních otáčkách (vpravo). Převzato z [2]

Samotné střídavé motory vlivem nelinearity magnetického obvodu, různých výrobních nesymetrií a konstrukčních omezení neodebírají čistě sinusový proud. Některé vnitřní harmonické, které v točivých strojích vznikají, je možné konstrukcí magnetického a elektrického obvodu omezit, ale často jsou potřebná opatření ve vzájemném rozporu a je nutné volit kompromis.

Tato práce se zabývá dopady připojování domácích spotřebičů na sídlišti. Vzhledem k nízkému souběhu činnosti zařízení skupiny B nebude po konzultaci s vedoucím práce dále rozebírán příspěvek těchto zařízení k harmonickému zkreslení napájecího napětí v domácnostech.

2.6 Třída C

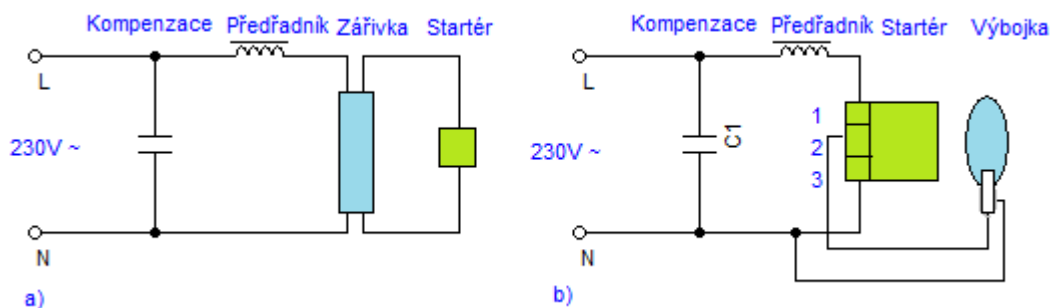
Průběhy proudů odebíraných světelnými spotřebiči závisí na fyzikální podstatě zvolené přeměny elektrické energie ve světelnou. S ní je totiž ve většině případů spjata potřeba úpravy síťového napětí na parametry vhodné k napájení zdroje světla.

2.6.1 Teplotní světelné zdroje

Klasické žárovky s wolframovým vláknem i jejich zdokonalené varianty s vyšší energetickou účinností využívají elektrického proudu k ohřevu vlákna, které emituje světlo. Tenké vlákno se při provozu dvakrát za periodu ohřeje na svou maximální teplotu a dvakrát za periodu ochladí na minimální provozní teplotu. Související změna odporu vlákna a deformace odebíraného proudu jsou však zanedbatelné. Běžně se uvažuje, že klasické žárovky neinjektují do sítě vyšší harmonické. Nízkonapěťové žárovky potřebují ke své činnosti snižovací oddělovací transformátor, který může být součástí tělesa žárovky samotné, svítidla, nebo zcela samostatný. Napájecí transformátor se vzhledem k síti jeví jako induktivně-odporová zátěž s účínkem 0,7 - 0,85 a nelinearita jeho magnetického obvodu zapříčiňuje odběr neharmonického proudu. Celkové harmonické zkreslení proudu odebíraného osvětlovací soustavou napájenou snižujícím transformátorem je menší než 20 %. [6]

2.6.2 Výbojky s indukčním předřadníkem

V sérii se zářivkovou trubicí je zapojena tlumivka, která při zapnutí slouží k získání zápalného napětí a v ustáleném stavu omezuje procházející proud a vytváří úbytek napětí. Průběh proudu je deformován přirozenou nelinearitou VA charakteristiky tlumivky a nelinearitou VA charakteristiky výboje generujícího UV záření, které se posléze pomocí luminoforu přeměňuje na viditelné světlo. Napětí na tlumivce je rozdílem napětí sítě a úbytku na výboji, jehož okamžitá hodnota má pro síťovou frekvenci obdélníkový průběh se znovu-zapalovacími špičkami. Pro kompenzaci nízkého účíniku $\cos \varphi = 0,37 - 0,5$ [2], $\cos \varphi = 0,25 - 0,65$ [6] se zapojení rozšiřuje o kondenzátor. Sníží se efektivní hodnota odebíraného proudu a zvýší účíník na $\cos \varphi = 0,9 - 0,95$ [6]. Celkové harmonické zkreslení proudu se pohybuje od THD = 12 - 35 % [6].



Obr. 2.15 Schéma zapojení výbojky s indukčním předřadníkem. a) žárovka; b) vysokotlaková výbojka [6]

2.6.3 Výbojky s elektronickým předřadníkem

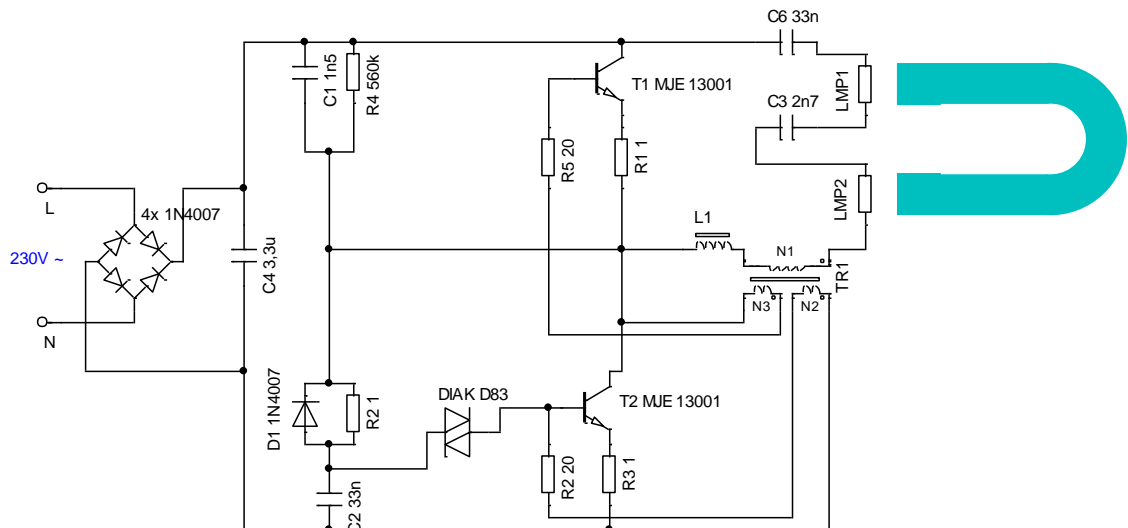
V souladu s požadavky na podstatné zvýšení světelně technických a užitných vlastností světelných zdrojů došlo k vývoji elektronického předřadníku. Oproti indukčnímu předřadníku má výhodu menší hmotnosti, rozměrů a ztrátového výkonu. Z konstrukčního hlediska je elektronický předřadník složen z usměrňovače a frekvenčního měniče. Usměrňovač bývá nejčastěji řešen v můstkovém provedení s vyhlazovacím kondenzátorem. Může být doplněn obvody zlepšujícími parametry odebíraného proudu, pasivním nebo aktivním PFC. [6]

Můstkový usměrňovač využívající čtyři usměrňovací diody a vyhlazovací kondenzátor odebírá impulsní proud s dobou vedení asi 3 ms za polovinu periody. Pro velké celkové harmonické zkreslení proudu mezi 78 – 85 % se používá jen do výkonu 25 W. Pasivními PFC lze dosáhnout THD_I 60 – 15%. Nejdokonalejšího napodobení sinusového průběhu proudu se dosahuje plným řízením nabíjení kondenzátoru, do kterého usměrňovač pracuje, aktivním PFC. V měničích pro světelné zdroje s výkonem nad 25 W se nejčastěji používá varianta DC - DC měniče se zvyšující topologií, kde cyklicky spíná spínač aktivního PFC obvodu s frekvencí několikrát vyšší, než je napájecí frekvence. Celkové harmonické zkreslení proudu takového obvodu se pohybuje do 10 %. Účinník je kapacitního charakteru v rozmezí 0,97 - 1. [6]

2.6.4 Kompaktní fluorescenční zářivky

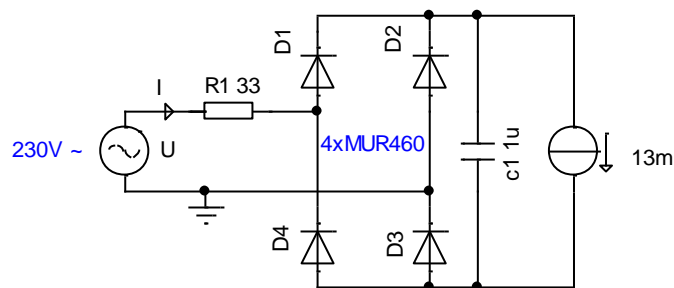
Principiálně jsou obdobné klasickým lineárním zářivkám s elektronickým předřadníkem. Konstrukce umožňuje vložení do svítidel se závitem E14 či klasickým E27. Oproti žárovkám dosahují kompaktní zářivky vyšší účinnosti a delší životnosti. Vstupní část předřadníku se skládá z můstkového usměrňovače, vyhlazovacího kondenzátoru a odrušovací tlumivky.

Na schématu na následující straně je ilustrováno celkové zapojení měniče a trubice kompaktní zářivky Bigluz s výkonem 20 W.



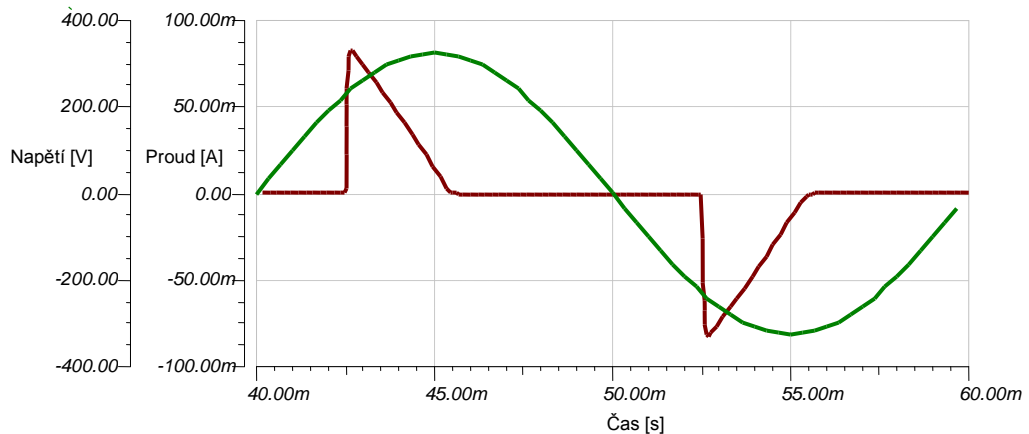
Obr. 2.16 Celkové zapojení elektronického předřadníku kompaktní zářivky Bigluz 20W [7]

Charakterizaci moderních kompaktních zářivek z hlediska harmonických při různých vlastnostech napájecího napětí se věnuje např. [9]. Simulací vstupních proudů kompaktních fluorescenčních zářivek se zabývá literatura [20], kde autoři vytvořili zjednodušený model, který se z hlediska harmonických chová jako reálná zářivka. Vstupní obvod je opět představován můstkovým usměrňovačem. Měnič zabezpečující činnost zářivkové trubice je nahrazen proudovým zdrojem.



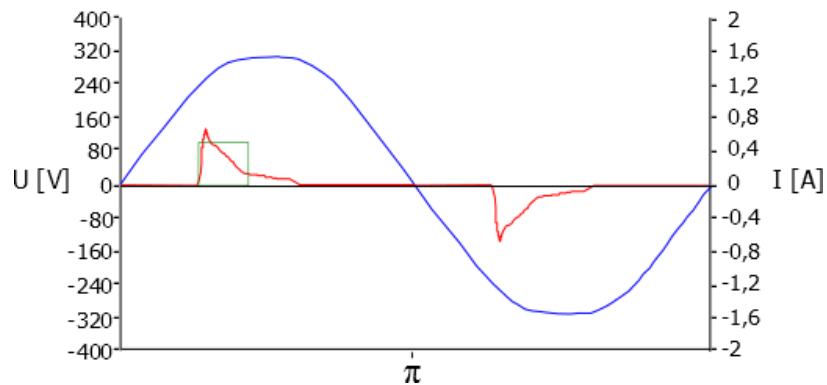
Obr. 2.17 Model pro simulaci kompaktní zářivky v programu Tina [20]

Hodnoty vyhlazovacího kondenzátoru a proudového zdroje jsou oproti původnímu zapojení upraveny tak, aby se průběh odebíraného proudu blížil průběhu naměřenému v [17]. THD_1 simulovaného proudu je 113 % a blíží se hodnotě 126,8 % skutečného svítidla v [17].

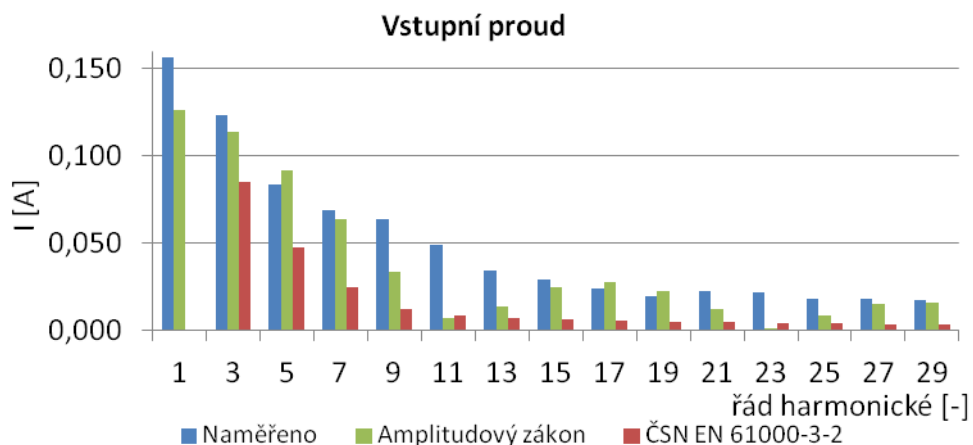


Obr. 2.18 Vstupní proud modelu kompaktní zářivky - simulace

Pro porovnání je uveden tvar křivky odebíraného proudu kompaktní zářivky o výkonu 25 W. Je patrné, že simulace poměrně dobře kopíruje reálnou situaci. V dalším kroku byl na naměřený průběh aplikován zobecněný amplitudový zákon odvozený v kapitole 1.4. Ten se používá k odhadu zastoupení harmonických měničů velkých výkonů za idealizovaných podmínek. Křivka odebíraného proudu byla nahrazena obdélníkem, jehož obsah je totožný s plochou pod křivkou proudu.



Obr. 2.19 Osciloskopický záznam odebíraného proudu kompaktní zářivky Ecolite 25 W s integrovaným předřadníkem. Zeleně vyznačena aproximace zobecněným amplitudovým zákonem. [17]



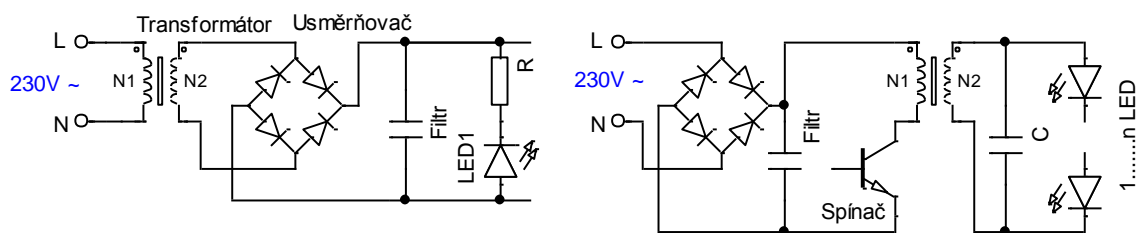
Obr. 2.20 Harmonické proudy odebíraného kompaktní zářivkou 25W se závitěm E27 [17]

Použití zobecněného amplitudového zákona pro odhad zastoupení harmonických v průběhu odebíraného proudu reálných zařízení spotřební elektroniky nepřináší v situaci, kdy lze z naměřeného průběhu samotným osciloskopem či analyzátozem jednoduše provést harmonickou analýzu, podstatné výhody. Vhodnější se jeví použít reálně naměřené hodnoty.

Měření a analýzu odebíraného proudu kompaktních zářivek detailně provedli například Hardie a Watson [10]. Jimi provedená měření odhalila, že zářivky mají navzájem podobný průběh odebíraného proudu. Podrobnější analýza vedla ke zjištění, že u většiny zářivek jsou úhly odpovídajících harmonických proudu málo odlišné a při současném provozu se vektorový součet příspěvků jednotlivých harmonických proudu injektovaných do sítě blíží algebraickému součtu. Nárůstem harmonických injektovaných do sítě kompaktními zářivkami, které spolu s LED svítidly nahrazují klasické žárovky, se zabývají také např. [3] a [14].

2.6.5 LED svítidla

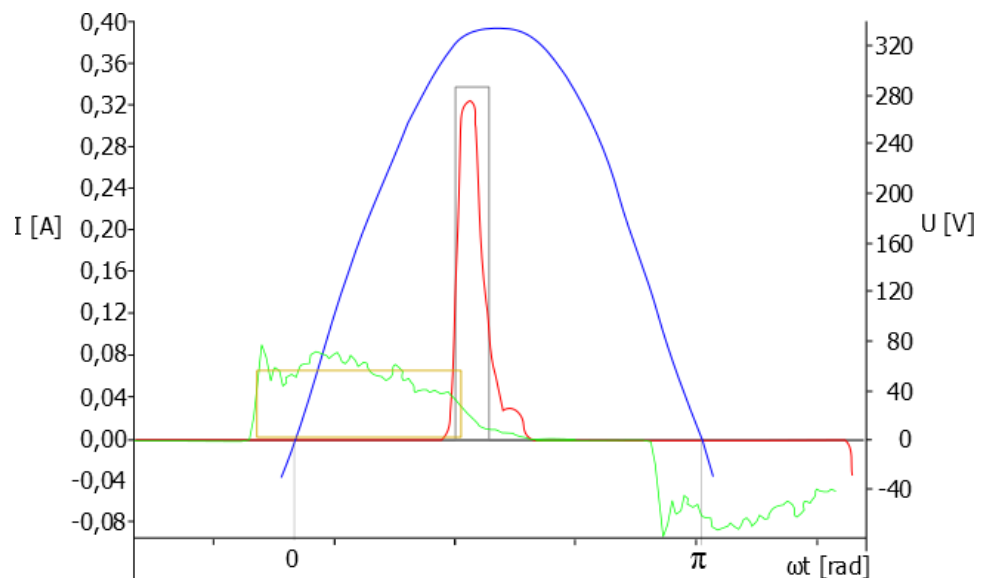
LED diody patří k nejmodernějším a nejperspektivnějším zdrojům světla. Oproti klasickým žárovkám a zářivkám se vyznačují nižší spotřebou, vyšší mechanickou odolností a provozní životností včetně vyššího počtu možných vypnutí a zapnutí. Z ekologického hlediska je dalším pozitivem absence rtuti, která z tělesa zářivkové trubice může v případě rozbití uniknout do prostředí. Strmý tvar VA charakteristiky LED vyžaduje, aby byly diody napájeny ze zdroje proudu. Síťové napětí je nejčastěji usměrněno můstkovým usměrňovačem.



Obr. 2.21 Principiální zapojení měniče pro napájení LED světelných zdrojů [6,19]

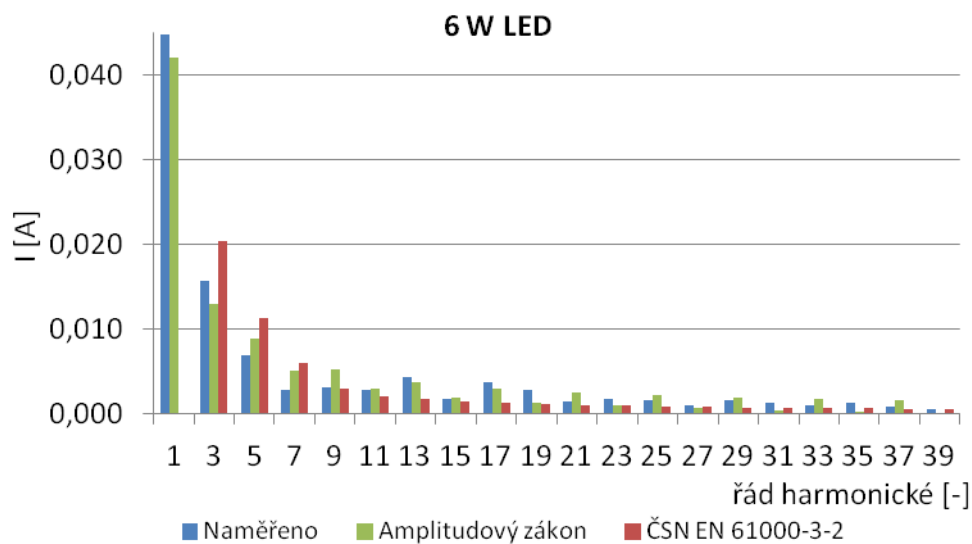
Průběh proudu odebíraného LED svítidlem bude záviset na konkrétním zapojení AC/DC měniče a jeho případném vybavení prvky PFC. Uvedeny jsou průběhy odebíraného proudu LED svítidla 6W a 8W převzaté z literatury [8]. Je patrné, že oba průběhy se velmi liší, ačkoli svítidla pocházejí od stejného výrobce. Silnější svítidlo používá starší typ elektronického předřadníku. Odebírá proud jen v úzkém a strmém pulzu charakteristickém pro usměrňovač

pracující do kapacitní zátěže, který vytváří výrazné harmonické. Činný výkon první harmonické je 7,94 W, její zdánlivý výkon pak činí 8,11 VA a celkový zdánlivý výkon je roven 17,79 VA. THD_1 dosahuje 195 %. Slabší svítidlo odběr s výrazným kapacitním charakterem rozkládá do delšího úseku. Zkreslení proudu použitím modernějšího elektronického předřadníku u 6W svítidla dosahuje mnohem nižší hodnoty $THDI = 39,8 \%$. Činný výkon první harmonické je 4,27 W, její zdánlivý výkon dosahuje 10,53 VA a celkový zdánlivý výkon respektující harmonické je roven 11,35 VA. Harmonické zkreslení koresponduje s rozdílem mezi jalovým výkonem první harmonické a celkovým jalovým výkonem zohledňujícím celé harmonické spektrum proudu. Činný výkon uvedených svítidel je zhruba 2 - 2,7 krát nižší než zdánlivý výkon zohledňující všechny harmonické proudy, proto je nutné při instalaci většího počtu moderních svítidel zjistit skutečné výkonové požadavky svítidel a nevycházet jen z čínného příkonu uvedeného výrobcem. [8]

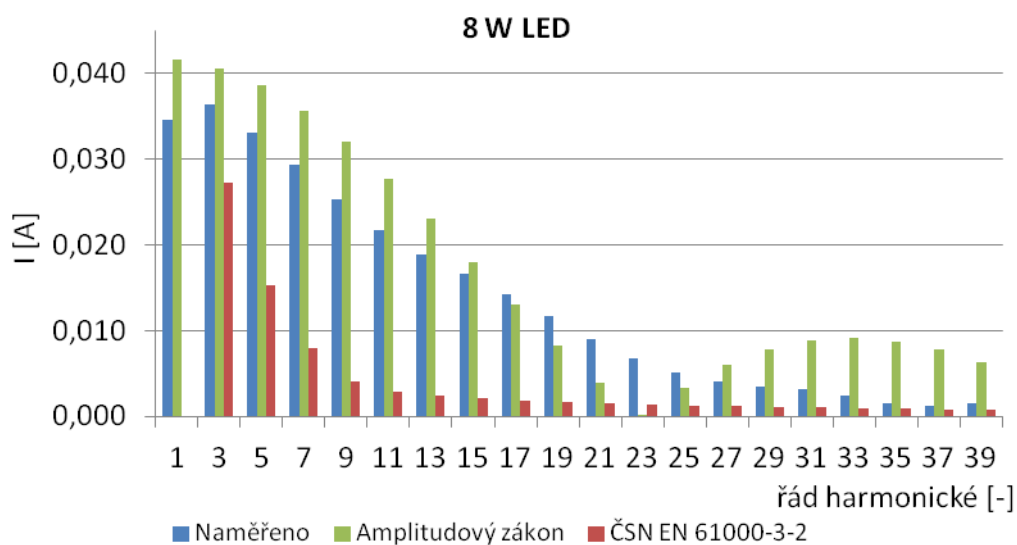


Obr. 2.22 Osciloskopický záznam odebraného proudu svítidlem LED o výkonu 8 W (červeně), 6 W (zeleně) a aproximace obdélkovým průběhem pro popis zobecněným amplitudovým zákonem (šedě a žlutě). [8]

Uvedeným průběhům odpovídají zastoupení jednotlivých harmonických uvedených dále. Z harmonické analýzy průběhů vyplývá, že obě uvedená svítidla pro překročení některých harmonických nevyhovují normě.



Obr. 2.23 harmonické proudy odebíraného LED svítidlem 6 W [8]



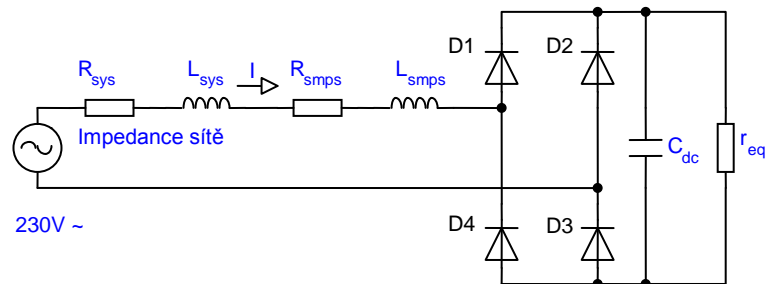
Obr. 2.24 harmonické proudy odebíraného LED svítidlem 8 W [8]

Příklady charakteristik odběrů uvedených typů světelných zdrojů jsou uvedeny v literatuře [6,8,9,17].

2.7 Třída D

Zařízení třídy D se podílejí značnou měrou na celkové spotřebě domácností. Zařízení spotřební elektroniky z důvodu úspory místa a hmotnosti vstupních částí využívají spínané zdroje. Problematice odhadu negativního působení spínaného zdroje napájecí jednotky osobního počítače se věnuje např. [11,12]. V ustáleném stavu je možné počítačový zdroj modelovat ekvivalentním obvodem s můstkovým usměřovačem a vyhlazovacím kondenzátorem zatíženým rezistorem.[11] Velikost ekvivalentního odporu zátěže se vypočte jako podíl kvadrátu hodnoty usměrněného napětí ke štitkovému činnému výkonu. Odpor R_{sys}

a reaktance X_{sys} v sérii se zdrojem napětí reprezentují parametry sítě, do které je spínaný zdroj připojen. Odpor R_{smpls} představuje odpor termistoru omezujícího zapínací proud. Indukčnost L_{smpls} zastupuje převážně indukčnost cívky PFC. Velikost vyhlazovacího kondenzátoru se volí tak, aby energie z kondenzátoru stačila k pokrytí krátkých výpadků napájecího napětí, obvykle 10 ms. Pro návrh velikosti kondenzátoru musí být známo nejnižší napájecí napětí a nejvyšší projektovaný výkon spínaného zdroje. [12]



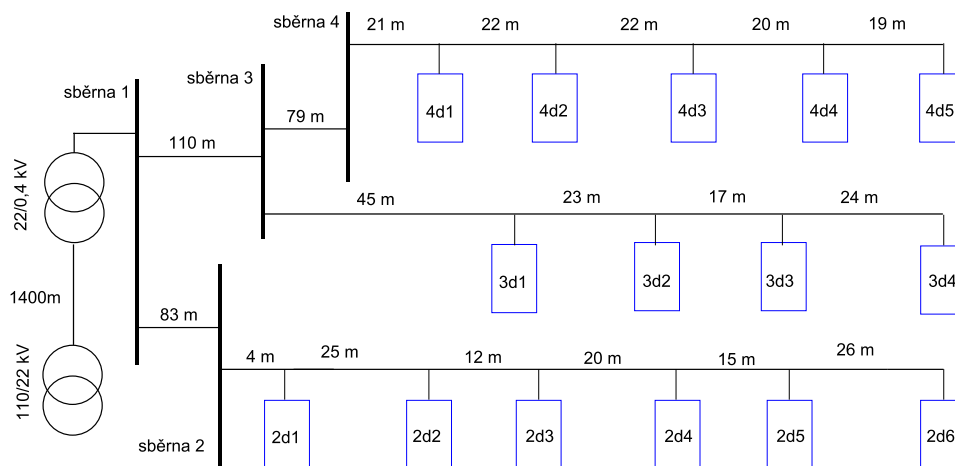
Obr. 2.25 Zjednodušené schéma pro simulaci vlivu počítačového zdroje na síť [12]

V literatuře [11,12] lze nalézt hodnoty prvků R_{sys} , L_{sys} , R_{smpls} , L_{smpls} , a dle požadovaného výkonu zdroje zvolit hodnoty C_{dc} a r_{eq} . Simulace vlivu spínaného zdroje osobního počítače vybaveného pasivním či aktivním korektorem účinníku byly provedeny v předcházejících kapitolách. Měřením a analýzou proudu odebíraného reálnými spotřebiči třídy D se věnuje například [2,10,17], celkovým odběrem domácnosti pak literatura [14].

3 Model reálné sítě sídliště

3.1 Východiska modelu

V této práci je vytvořen realistický model sítě části nejmenovaného plzeňského sídliště, která byla vytipována ve spolupráci s ČEZ a.s., pracoviště Plzeň. Z bezpečnostních důvodů a z důvodu potřebné ochrany dat není konkrétní místo v práci blíže specifikováno. Model se dopouští určitých zjednodušení. Počítá s tím, že jednotlivé byty panelových domů se zapojují jednofázově tak, aby se docílilo téměř stejného zatížení všech fází na hlavním domovním rozvaděči. Vyšetřovaná oblast zahrnující 361 bytů v 15ti panelových domech je napájena z distribučního transformátoru umístěného v samostatně stojící stanici, kde je k dispozici i stoprocentní záloha. Na jednu fázi tedy vychází 120 (121) bytů. Počty bytů jednotlivých domů a jejich rozdělení na fáze jsou uvedeny v příloze B. Orientační schéma sledované části sídliště je zobrazeno na *Obr. 3.1*. Na hladině 22 kV transformátory propojuje kabel AXEKVCEY 3×1×240, na nízkonapěťové hladině jsou zapojeny kabely 3×150+70 AYKY a 3×240+120 AYKY. Typy a průřezy použitých kabelů v konkrétních částech rozvodů jsou zachyceny v příloze A, jejich parametry v příloze G.



Obr. 3.1 Ilustrativní schéma vyšetřované části sídliště

Výsledné schéma pro vyšší harmonické zohledňuje metodiku popsanou např. v [2]. Vedení se modelují pomocí π -článku, transformátory jsou reprezentovány sériovým R-L spojením.

Harmonické proudy jsou na úrovni bytových domů reprezentovány proudovými zdroji. Pro analýzu vlivu připojování jednotlivých spotřebičů na síť jsou voleny dva scénáře možných odběrů.

Nejnepříznivější stav z hlediska vzniku harmonických nastává v časovém intervalu vysoké soudobosti nelineárních spotřebičů. K té může docházet zejména v zimních měsících, kdy je současně spuštěno mnoho úsporných svítidel a vlivem omezení venkovních aktivit obyvatel je více užíváno výpočetní a zábavní techniky. Hodnoty jednotlivých harmonických proudů reálného bytu rozpracovává např. studie [14], ve které je kompletně provedena série měření harmonických emisí domácích spotřebičů v realistickém modelu domácnosti. Výchozí studie se sice zabývá městským rodinným domem ve Švédsku, ale skladbou spotřebičů v podstatě odpovídá očekávatelné vybavenosti bytů sledovaného sídliště. Na druhou stranu se v [14] nepočítá s malými odběry elektroniky v pohotovostním režimu, ve kterém se nachází značná část spotřební elektroniky při nečinnosti. Výkon v řádech jednotek wattů je sice malý, ale uplatňuje se téměř kontinuálně a je většinou neharmonický, což lze použít jako kompenzaci k nadhodnocenému počtu svítidel ve výchozí studii. Scénář vysokého odběru počítá se současnou činností LED TV, CRT monitoru, počítače, mikrovlnné trouby, indukčního vařiče a skupiny 16ti klasických žárovek a 16ti kompaktních zářivek. Úsporné zářivky s výkonem od 11 do 15 W a účínkem kolem 0,6 byly voleny od různých výrobců. Indukční vařič byl nastaven na stupeň 7 (640 W) s $THD_I = 6,3\%$. Mikrovlnná trouba odebírala výkon 900 W s $THD_I = 23\%$. Skupina počítače a televizoru odebírala přibližně 235 W s $THD_I = 72\%$. V této diplomové práci je k uvedeným spotřebičům ještě připočten vliv lednice používající moderní kompresory s říditelnými otáčkami motoru s $THD_I = 22,4\%$ ze studie [10].

Druhým sledovaným scénářem je případ pravděpodobného odběru zvoleného opět na základě [14]. Při sledované variantě jsou současně spuštěny LED TV, CRT monitor, počítač a skupina 16ti klasických žárovek a 16ti kompaktních zářivek. Pro běžnou bytovou jednotku se nepředpokládá současná činnost všech uvedených svítidel. Opět platí předpoklad se započítáním výkonu nadhodnocených úsporných svítidel do pohotovostního režimu spotřební elektroniky.

Jednotlivé harmonické proudy pro oba scénáře simulace jsou zachyceny v efektivních hodnotách v následující tabulce.

Tab. 3.1 Harmonické proudy injektovaného do sítě při simulaci

Řád harmonické [-]		3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Proud harmonické [A]	Pravděpodobný scénář	0,551	0,221	0,27	0,073	0,065	0,037	0,014	0,039	0,025	0,02
	Scénář vysokého odběru	1,613	0,568	0,205	0,232	0,076	0,08	0,052	0,017	0,072	0,034

3.2 Příklad výpočtu prvků modelového schématu reálné sítě sídliště

Model respektuje zkratový výkon soustavy 110 kV, který je na sídlištní zástavbu velmi vysoký a činí $S_k = 3133$ MVA. Impedance napájecí sítě se vypočte z jednofázového zkratového výkonu. Dosazením fázové hodnoty nízkého napětí do následujícího vzorce se získá impedance napájecí sítě na straně nízkého napětí.

$$Z_s = \frac{1,1 \cdot U_v^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 400^2}{3,133 \cdot 10^9} = 5,61762 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (3.1)$$

Protože impedance je frekvenčně závislá a pro různé harmonické se liší, je třeba vyjádřit indukčnost sítě. Následující vzorec zanedbává činnou složku impedance.

$$L_s = \frac{Z_s}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{5,61762 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,78814 \cdot 10^{-7} \text{ H} \quad (3.2)$$

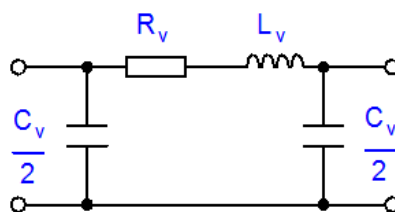
Ze jmenovitého výkonu transformátoru se vypočte jeho impedance a ta se následně rozdělí na reálnou a imaginární část. Ve vyšetřované části sídlištních rozvodů figurují dva transformátory - transformátor 110/22 kV o výkonu 40 MVA s napětím nakrátko $u_k = 11$ % a ztrátami $P_k = 207,4$ kW a distribuční transformátor 22/0,4 kV o výkonu 400 kVA s napětím nakrátko $u_k = 6\%$ a ztrátami $P_k = 7,3$ kW. Dále je uveden příklad výpočtu pro transformátor 22/0,4 kV. Korekční koeficient pro vyšší frekvence k_{hf} , který se dle [2] pohybuje v intervalu (0,8 - 1), byl pro zjednodušení výpočtu volen roven 1.

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_v^2}{S_T} = \frac{6}{100} \cdot \frac{400^2}{400 \cdot 10^3} = 24 \text{ m}\Omega \quad (3.3)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_v^2}{S_T^2} = 7300 \cdot \frac{400^2}{(400 \cdot 10^3)^2} = 7,3 \text{ m}\Omega \quad (3.4)$$

$$L_T = \frac{\sqrt{Z_T^2 - R_T^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{24^2 - 7,3^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = 72,775 \mu\text{H} \quad (3.5)$$

Kabelová vedení jsou modelována pomocí π -článku. Parametry odporu, indukčnosti a kapacity na jeden kilometr délky kabelu byly určeny z katalogu výrobce NKT Cables.



Obr. 3.2 Náhradní schéma kabelového vedení

Délka kabelu je reprezentována symbolem l . Písmeno p udává počet paralelních větví. Ve vzorcích níže je uveden přepočten parametrů na vztažné napětí. Příklad výpočtu pro kabel AXEKVCEY $3 \times 1 \times 240$ vedoucí od transformátoru 110/22 kV k transformátoru 22/0,4 kV je uveden v následujících třech vztazích.

$$L_k = l_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2 = 0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 1,4 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{400}{22000} \right)^2 = 263,802 \text{ nH} \quad (3.6)$$

$$R_v = r_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2 = 0,125 \cdot 1,4 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{400}{22000} \right)^2 = 57,851 \mu\Omega \quad (3.7)$$

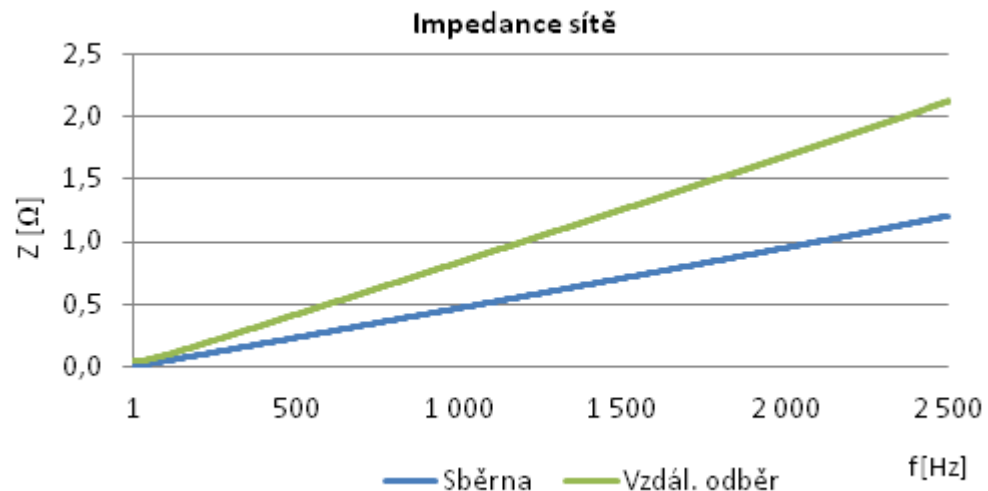
$$C_v = c_k \cdot l \cdot p \cdot \left(\frac{U}{U_v} \right)^2 = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 1 \cdot \left(\frac{22000}{400} \right)^2 = 1,271 \mu\text{F} \quad (3.8)$$

3.3 Simulace

Parametry získané způsobem popsaným v 3.1 a 3.2 byly použity pro simulaci v programu Tina. Ten byl zvolen proto, že snadno umožňuje vložení zdroje proudu definovaného rovnicí. Užitečným nástrojem tohoto programu je měřič impedance, který dokáže počítat impedanci v daném bodě pro definovaný rozsah frekvencí. V tomto případě v intervalu 0 do 2500 Hz, což odpovídá prvním padesáti harmonickým. Tato práce se soustředí pouze na liché harmonické, protože sudé harmonické jsou vzhledem k typu spotřebičů užívaných v domácnostech zanedbatelné. [14]

Při reálném sestavování modelu bylo zjištěno, že pokud počet znaků vyjadřujících rovnici proudu emitovaného proudovým zdrojem překročí určitou mez, je model v souboru po uložení a opětovném otevření poškozen. Z toho důvodu bylo počítáno s lichými

harmonickými pouze do řádu 21. Vypočítaná závislost impedance na frekvenci je téměř lineární, jak ukazuje následující graf. V uvažovaném rozsahu frekvencí nedochází k rezonanci.

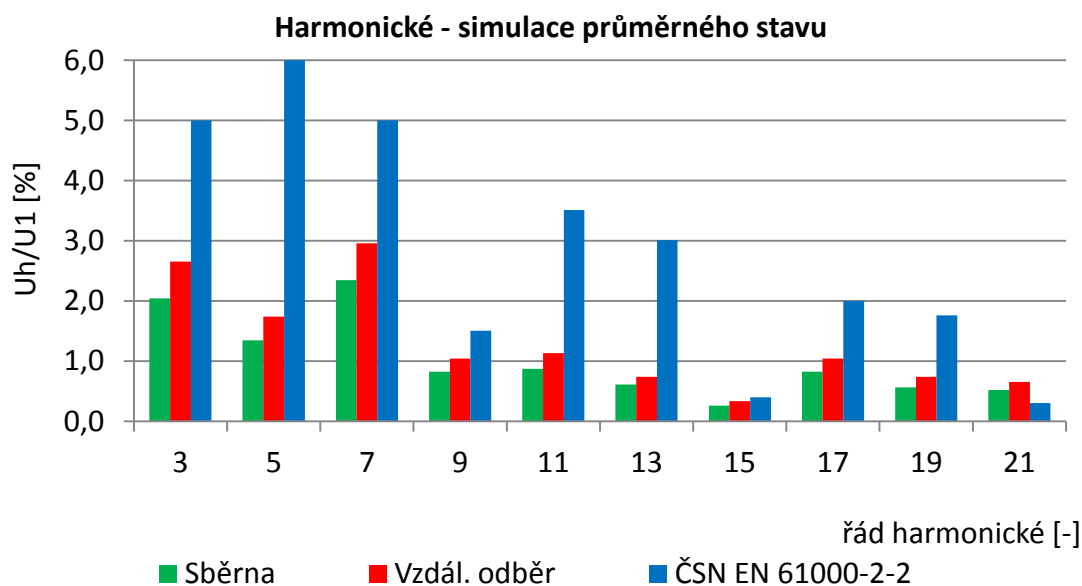


Obr. 3.3 Průběh impedance sítě v analyzovaných bodech v závislosti na frekvenci

Zanedbáním harmonických řádů vyšších než 21 se tedy model nedopouští nepřijatelného zkreslení. Podobně měření uvedená v následujících částech práce jsou s ohledem na proveditelnost omezena na liché harmonické do řádu 25.

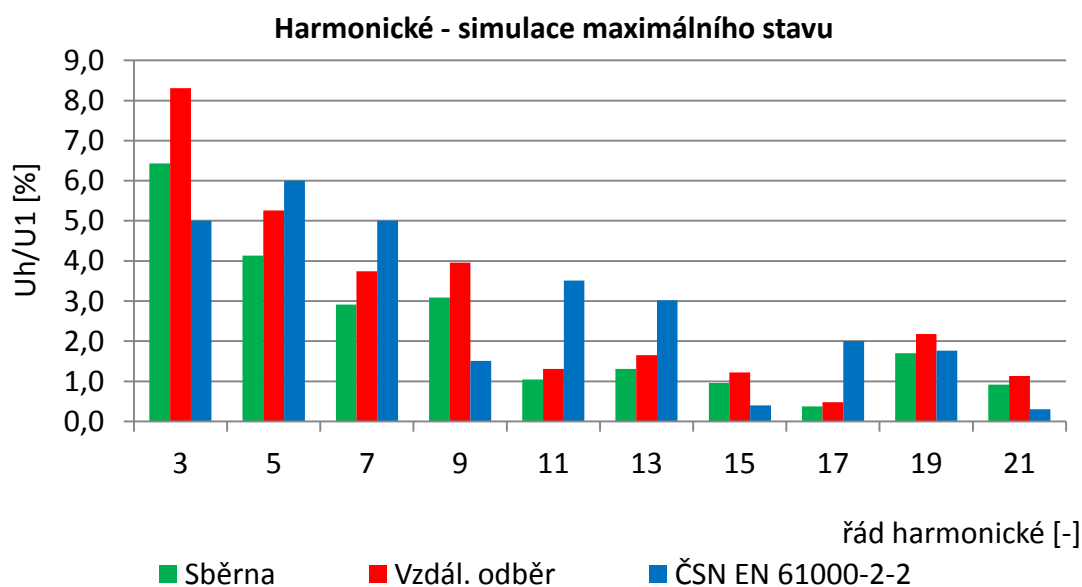
3.4 Výsledky simulace

Ve vytipovaných částech modelu sítě byly zjištěny velikosti jednotlivých harmonických napětí. Potvrdilo se, že při podobné velikosti jednotlivých odběrů dochází k největší deformaci křivky napětí u nejvzdálenějšího odběru, na Obr. 3.1 a v příloze B označeného jako 4d5. V případě pravděpodobného odběru je však zkreslení napětí i v tomto místě téměř vždy mnohem menší než maximum přípustné normou. Odlišná situace ale nastává u harmonické řádu 15, jejíž hodnoty jsou s těmi povolenými normou při pravděpodobném odběru srovnatelné. Napětí 21. harmonické na všech místech simulovaného rozvodu normu [15] při uvažování průměrného odběru překračuje.



Obr. 3.4 Procentní harmonické napětí pro pravděpodobný odběr

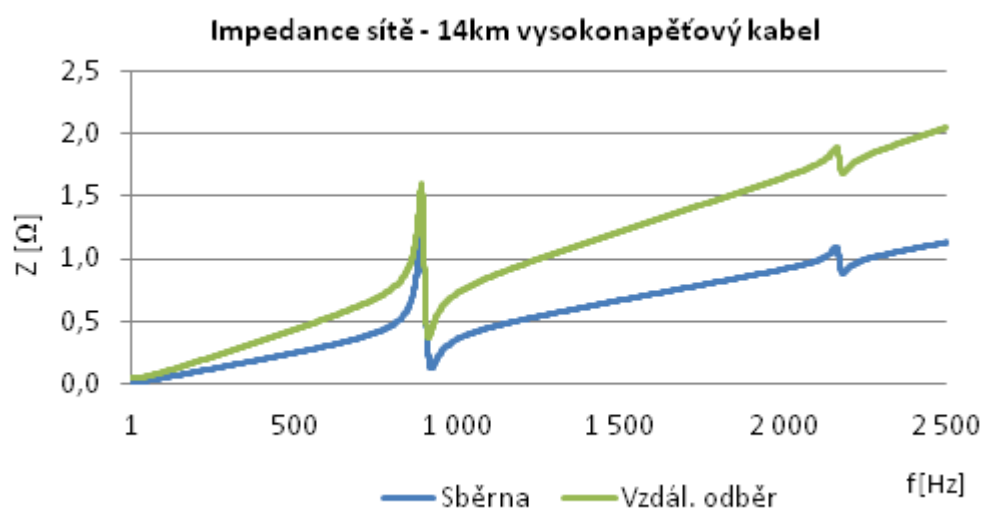
Scénář maximálního odběru počítá stejně jako scénář průměrného odběru s velmi nepravděpodobnou situací, kdy se proudy emitované jednotlivými byty sčítají, jako by měly stejnou fázi. To ve spojení s vysokými hodnotami těchto proudů vede k vysokým hodnotám harmonických napětí, které pro řady násobků tří normu výrazně překračují. Výsledky v procentních hodnotách zachycuje následující graf.



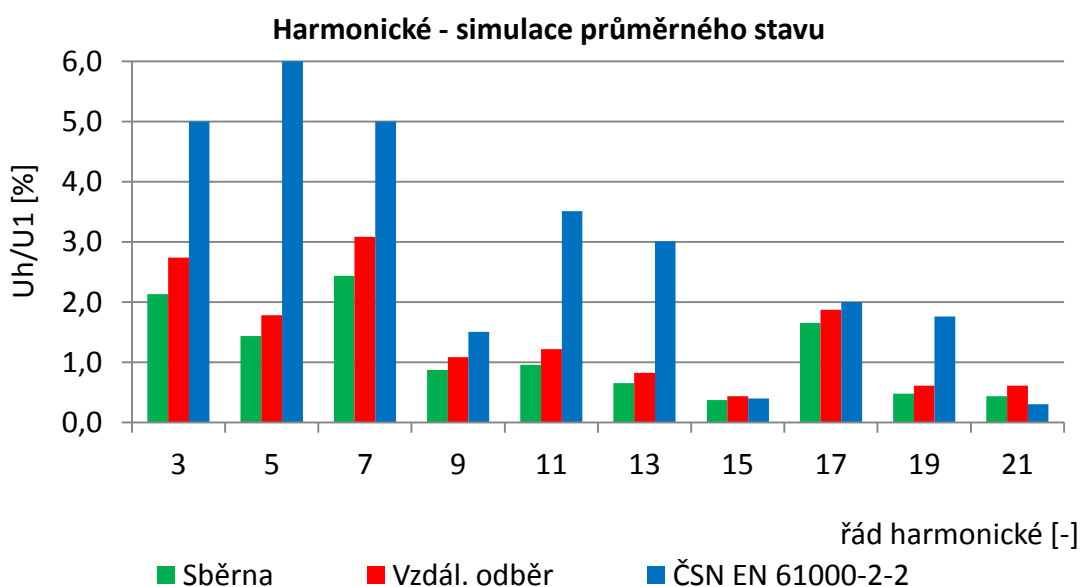
Obr. 3.5 Procentní harmonické napětí pro maximální odběr

Ve skutečnosti nedochází při vzniku různých harmonických proudů k jejich algebraickému součtu, ale k určitým vzájemným kompenzacím, jak popisuje např. [10]. Proto lze předpokládat, že v reálné situaci takových hodnot dosahováno nebude. Ze simulací je

patrné, že zkoumaná síť je ohrožena až při výrazně vysokých hodnotách harmonických proudů. To je dáno vysokým zkratovým výkonem sítě, který je určen jak vysokonapětovou, tak nízkonapětovou částí rozvodů. Pro ověření vlivu parametrů napájecí soustavy na kvalitu napětí z hlediska harmonických byla provedena citlivostní analýza. Při uvažování konstantních parametrů nízkonapětových rozvodů a distribučního transformátoru vychází, že hodnoty harmonických napětí ovlivňuje výrazně délka kabelu na hladině vysokého napětí. V některých zástavbách není možné umístit transformátory tak blízko jako v uvažovaném sídlišti. Při úvaze vysokonapětového kabelu o délce 14 km se na přibližně 890 Hz objeví rezonanční špička mající za následek zvýšení napětí 17. a 18. harmonické.

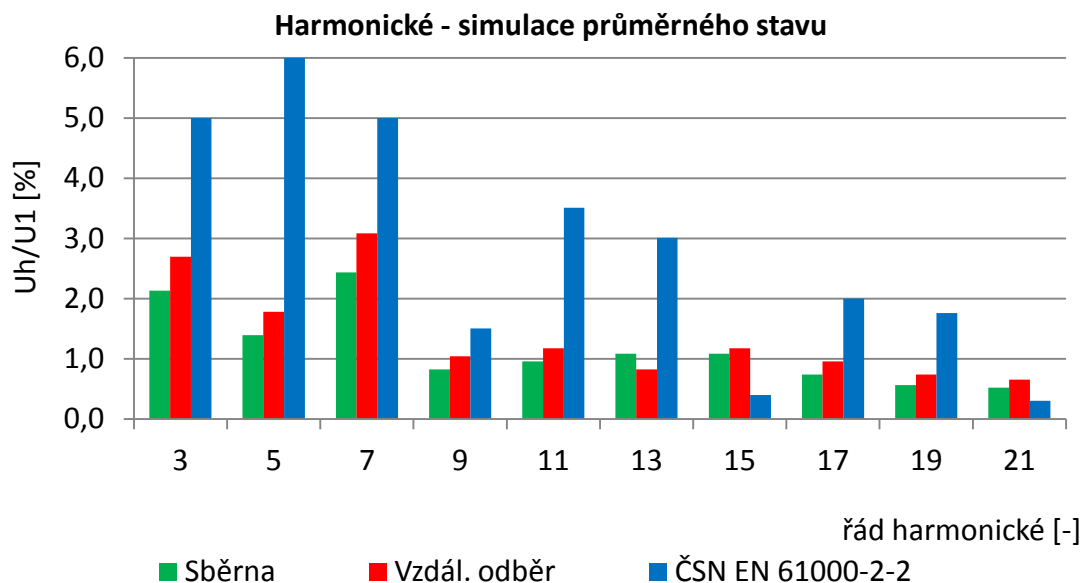


Obr. 3.6 Závislost impedance sítě v bodech A (sběrna transformátoru) a B (vzdálený odběr)



Obr. 3.7 Procentní harmonické napětí sídliště s 14 km VN kabelem pro pravděpodobný odběr

Graf harmonických napětí (*Obr. 3.7*) zachycuje mírný nárůst hodnot oproti původnímu modelu s markantním zvýšením 17. harmonické, které odpovídá zjištěnému průběhu impedance sítě v závislosti na frekvenci. Vzhledem k tomu, že 17. harmonická má relativně vysoké povolené hodnoty, nepředstavoval by tento nárůst zásadní problém. Nepříznivá situace by však nastala v případě, že by vysokonapěťový kabel měl délku 18 km (*Obr. 3.8*). Pak se rezonanční špička objevuje na frekvenci zhruba 740 Hz a ovlivňuje výrazně hodnoty 15. harmonické, jejíž povolené limity jsou normou nastaveny na 0,4 %.

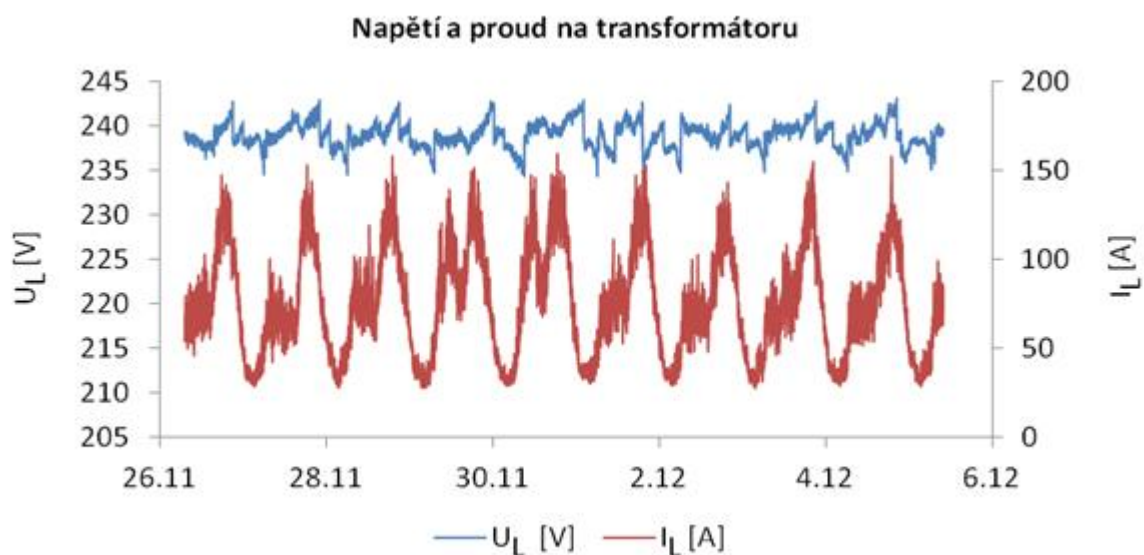


Obr. 3.8 Procentní harmonické napětí sídliště s 18 km VN kabelem pro pravděpodobný odběr

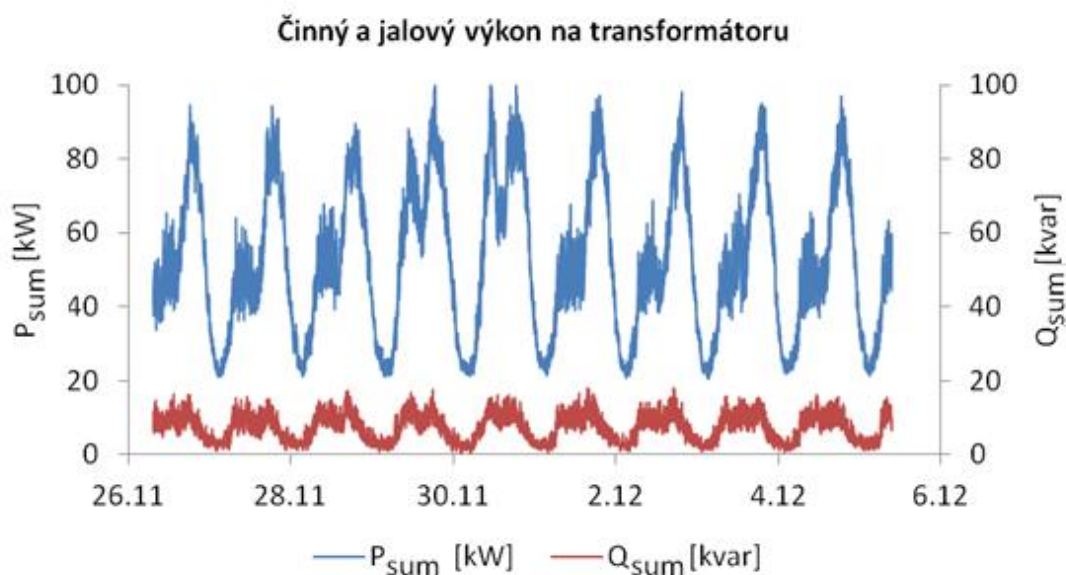
4 Reálná síť

4.1 Měření v síti

V době od 26. listopadu do 5. prosince se uskutečnilo měření, jehož cílem bylo praktické ověření provedených simulací a zjištění skutečného stavu reálné sítě v místech s velkou hustotou obyvatelstva. Všechna fázová napětí a proudy všech fází včetně proudu středním vodičem byly měřeny ve třech místech cejkovaným analyzátozem MEg38/C, třída „S“, výrobce MEgA – Měřicí Energetické Aparáty, a.s. Spolu s uvedenými veličinami byl zachycen i průběh výkonů v čase. Z hodnot naměřených na distribučním transformátoru je patrný pravidelný cyklus denního odběru.

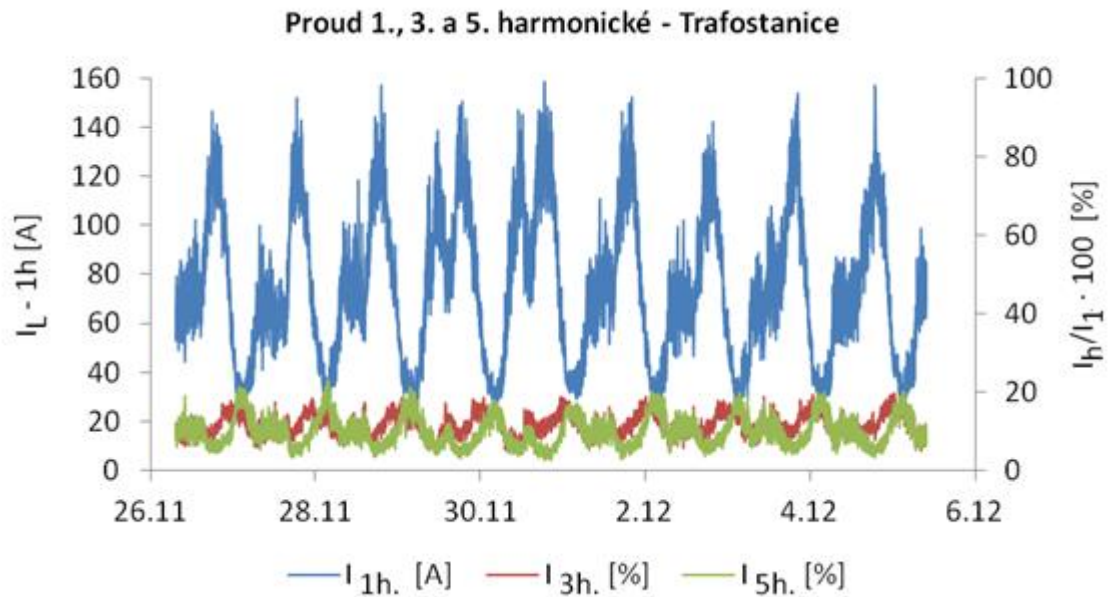


Obr. 4.1 Napětí a proud na transformátoru



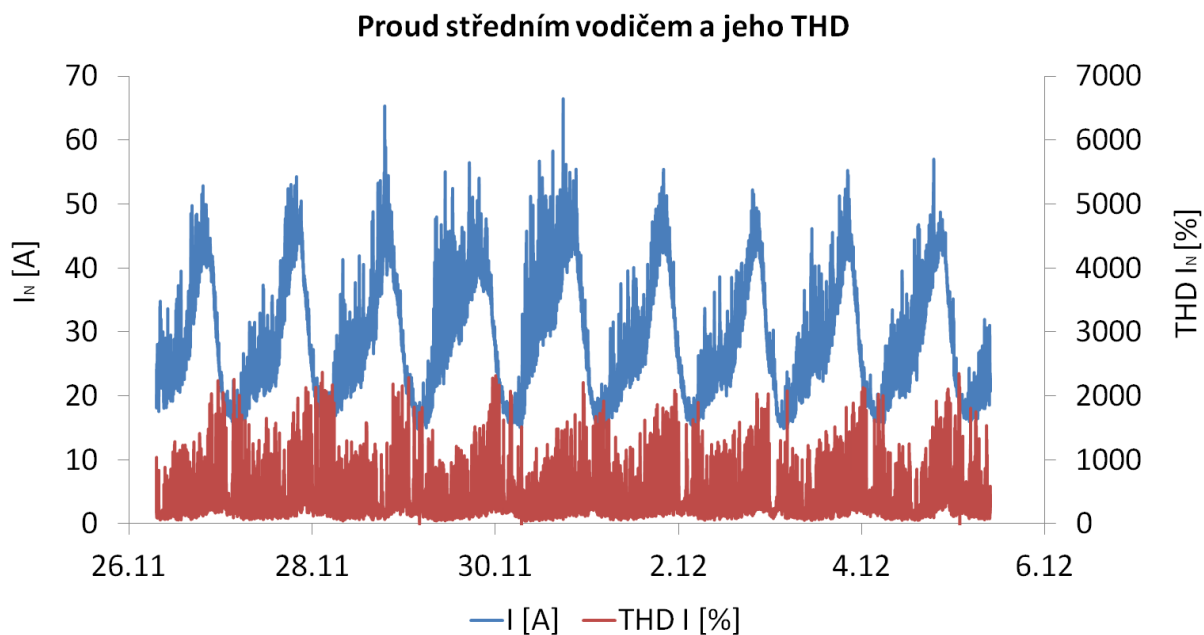
Obr. 4.2 Průběh činného a jalového výkonu

Nejnižší hodnoty jsou pravidelně dosahovány kolem 2. hodiny v noci, nejvyšší hodnoty se objevují ve dvou špičkách – kolem sedmé hodiny ráno a sedmé hodiny večer. O víkendu je doba ranní špičky posunuta přibližně o jednu hodinu a zvýšený odběr částečně přetrvává i v odpoledních hodinách. Denní cyklus zatížení je důležitý pro odhad času intervalů s velkým zkrácením. Přepočítání odběru na jeden byt vede na hodnotu 140 W při odběru průměrném a 280 W při odběru v maximální špičce. Vybrané výsledky demonstrující vlivy nelineárních spotřebičů jsou zpracovány v následujících grafech.



Obr. 4.3 Průběh 1., 3. a 5. harmonické proudů na nízkonapěťové části transformátoru v měřeném týdenním intervalu

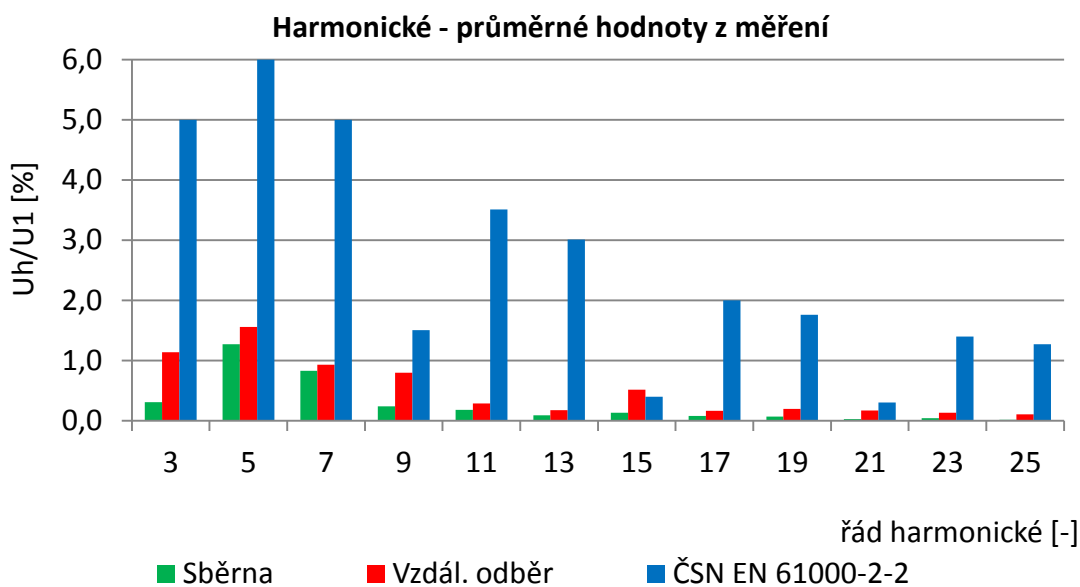
Z průběhu 1. harmonické (na obrázku vyznačené modře) je již popsán odběrový cyklus jasně viditelný. Vynesení 3. a 5. harmonické v procentech 1. harmonické je patrné, že relativní zastoupení harmonických je závislé na velikosti odběru, potažmo na skladbě zapojených spotřebičů. Nejvyšších procentních hodnot pátá harmonická dosahuje v intervalech nejnižšího odběru. Podobnou závislost lze vysledovat s určitými odlišnostmi také u třetí harmonické. V obdobích nízkého odběru zřejmě nejsou zapojeny spotřebiče s ohmickým charakterem, ale značnou část spotřeby tvoří například zařízení v pohotovostním režimu.



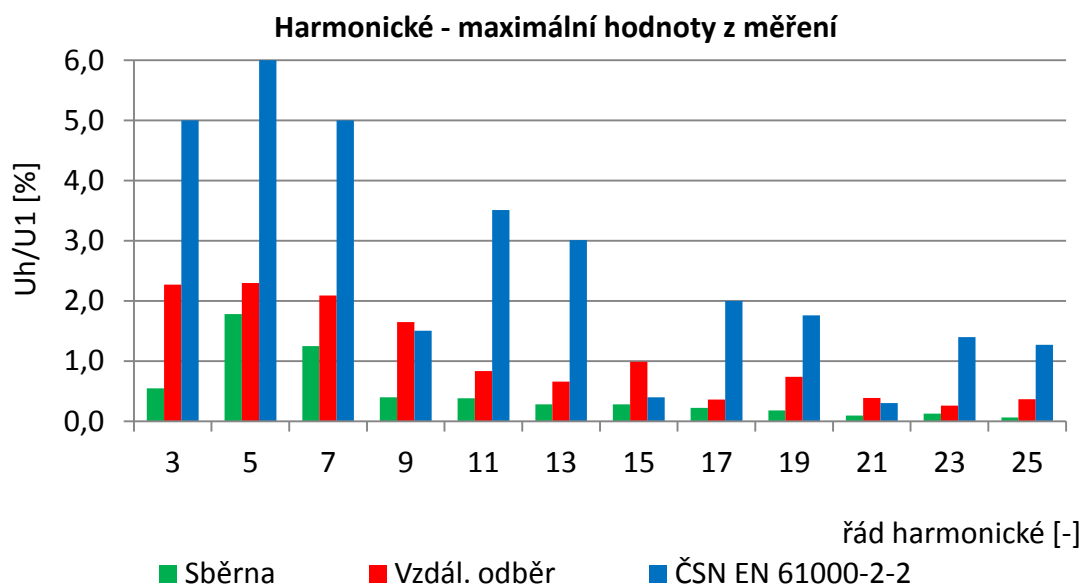
Obr. 4.4 Průběh první harmonické proudu středním (nulovým) vodičem a THD_I tohoto proudu

I z dalšího grafu je patrné, že zkreslení proudu ve středním vodiči je značné zvláště při malých odběrech. Celkové harmonické zkreslení proudu středním vodičem na sběrně transformátoru se pohybuje mezi 46,6 % a 2346,2 % s průměrnou hodnotou 359,5 %.

Harmonická analýza napětí byla zpracována z průměrných a maximálních hodnot harmonických z dotyčného měření. Podstatným zjištěním je, že na sekundární straně transformátoru v žádném případě nedošlo k překročení kompatibilních úrovní harmonických napětí povolených normou.

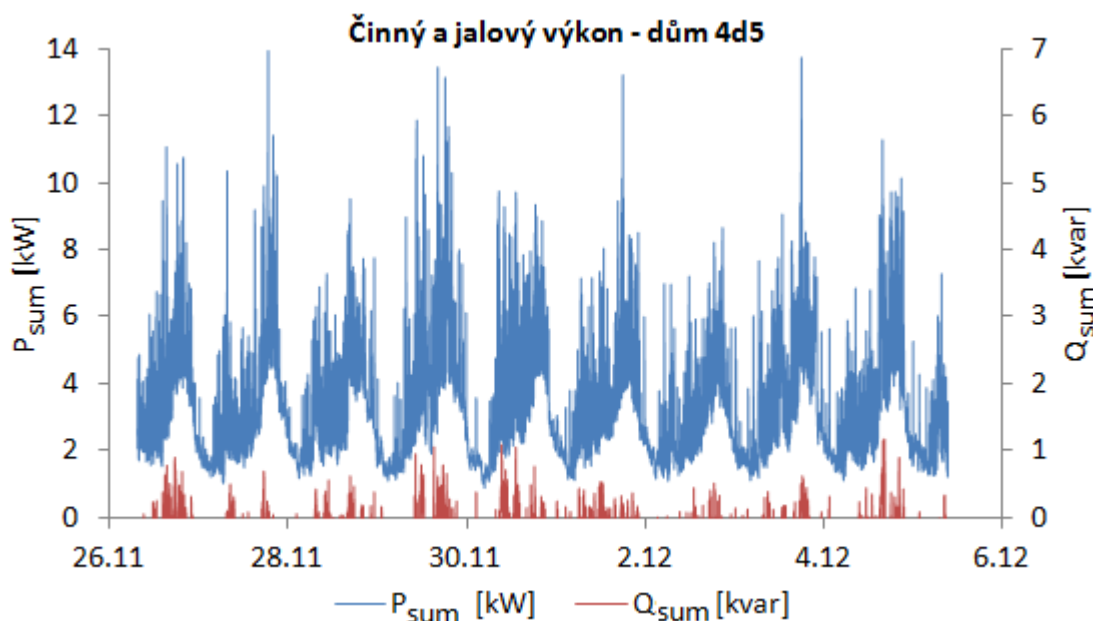


Obr. 4.5 Naměřené harmonické napětí pro průměrné na trafostanici a vzdáleném odběru (fáze L1)



Obr. 4.6 Naměřené harmonické napětí pro maximální hodnoty na trafostanici a vzdáleném odběru (fáze L1)

Odlíšná situace byla zjištěna na vzdáleném konci vedení. Odběr domu s 22 byty označeného 4d5 ukazuje Obr. 4.7, kde je vyneseno průběh sdruženého výkonu všech tří fází v týdenním intervalu měření.



Obr. 4.7 Odebíraný činný a jalový výkon domu s 22 byty na konci vedení

Průměrná hodnota 15. harmonické napětí v příslušném bodu přes malé zatížení překračuje povolenou hodnotu. K překročení meze 15. harmonické nedochází jen na vzdáleném konci vedení, ale maximální hodnoty překračují meze rovněž na sběrně 3 vzdálené od transformátoru jen 110 m.

Tab. 4.1 Hodnoty 15. harmonické napětí na vzdáleném odběru domu 4d5 a na rozpojovací skříní (sběrna 3)

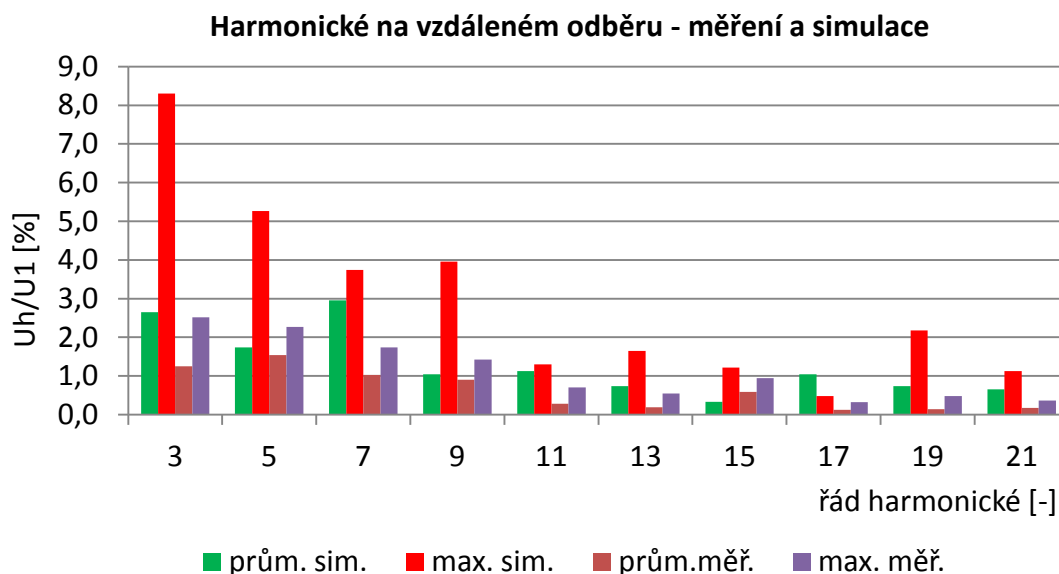
	Dům 4d5			Sběrna 3		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Průměr [%]	0,52	0,59	0,67	0,40	0,32	0,31
Maximum [%]	0,90	0,92	1,03	0,61	0,56	0,54
Minimum [%]	0,28	0,35	0,38	0,21	0,17	0,14

Zjištěné překračování kompatibilní úrovně napětí 15. harmonické je v souladu s měřeními provedenými v posledních letech, popsány např. v [18]. Procentní hodnoty nejsou vysoké, ale normou danou úroveň 0,4 % překračují. Při maximální zátěži jsou na vzdáleném odběru dokonce překračovány i hodnoty dalších harmonických (9. u fáze L2 a 21. u všech fází). Grafické zpracování hodnot jednotlivých harmonických změřených ve vyšetřovaných částech rozvodu je pro každou fázi zachyceno v příloze D - F.

4.2 Porovnání měření a simulací

Analýzou provedených měření bylo odhaleno, že v síti je připojeno malé množství klasických spotřebičů. Z harmonické analýzy naměřených proudů lze usuzovat na nezanedbatelný procentní podíl spotřebičů s nelineárním charakterem odběru. V nočních hodinách pak jde z velké části o spotřebiče ve stand-by režimu. Pouze v ojedinělých obdobích jsou v soustavě připojeny větší domácí spotřebiče lineárního charakteru typu pračky, myčky, vařiče, varné konvice a další.

Reálné hodnoty zkreslení napětí u harmonických nízkých řádů jsou hluboko pod hranicí danou normou [15]. Hodnoty harmonických napětí, které jsou násobkem 3, jsou zejména u vyšších řádů (od 15. harmonické) z hlediska porovnání s normou na mezních hodnotách. To, zda tyto úrovně z hlediska fyzikálního mají skutečný vliv na funkci a životnost zařízení, je předmětem studií, např. [23-25]. Výsledky měření i simulací v této práci podporují závěry ze studie [18] pro zvýšení normou povolených hodnot harmonických napětí řádu 15., 21. a případně i dalších. Konkrétní úrovně však nelze nyní navrhnout. V případné budoucí aktualizaci normy ČSN EN 61000-2-2 bude nutné zohlednit nejen reálné hodnoty harmonických napětí v sítích, předpokládaný vývoj připojovaných zařízení, vliv na jejich funkci a životnost, ale i dopředu těžko predikovatelné interakce s telekomunikačními a jinými citlivými zařízeními, na jejichž kabely se mohou harmonické vyšších řádů indukovat.

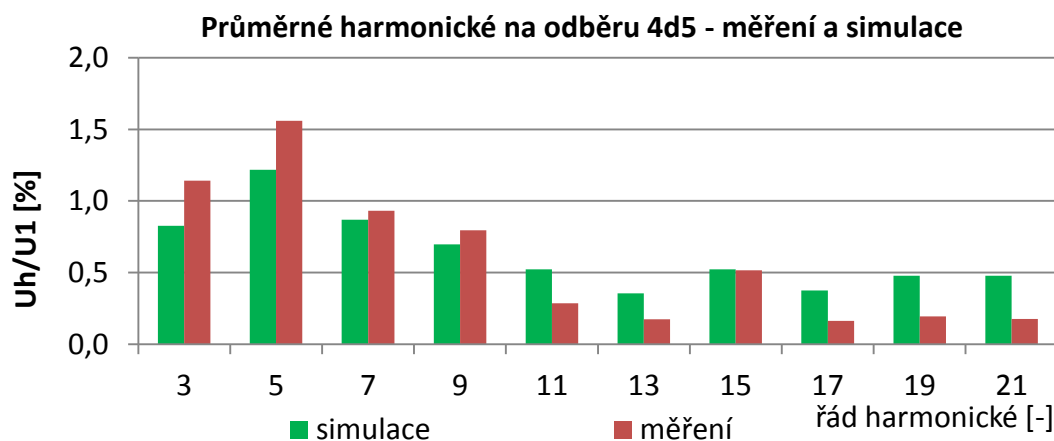


Obr. 4.8 Porovnání harmonických napětí pro simulaci a měření na rozvaděči domu 4d5

Z grafu porovnávajícího výsledky simulace s reálně naměřenými hodnotami je patrné, že scénář simulace maximálního odběru je nadhodnocen. Pro obdržení výsledků srovnatelných s maximy měření postačuje u většiny sledovaných harmonických scénář pravděpodobného odběru. Určitou výjimkou je napětí 15. harmonické, jehož nejvyšší hodnota v reálu dosahuje téměř simulovaného maxima. Pro ověření parametrů modelu bylo přistoupeno k vytvoření další varianty simulace, ve které jsou do sítě injektovány průměrné proudy naměřené na rozvaděči domu 45d na konci vedení, a výsledky jsou porovnávány s průměrnými napětími harmonických na konci odběru.

Tab. 4.2 Průměrné harmonické proudy jedné fáze měřené na rozvaděči domu 4d5

Řád harmonické [-]	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Proud harmonické [A]	0,173	0,155	0,082	0,051	0,031	0,018	0,023	0,014	0,016	0,014



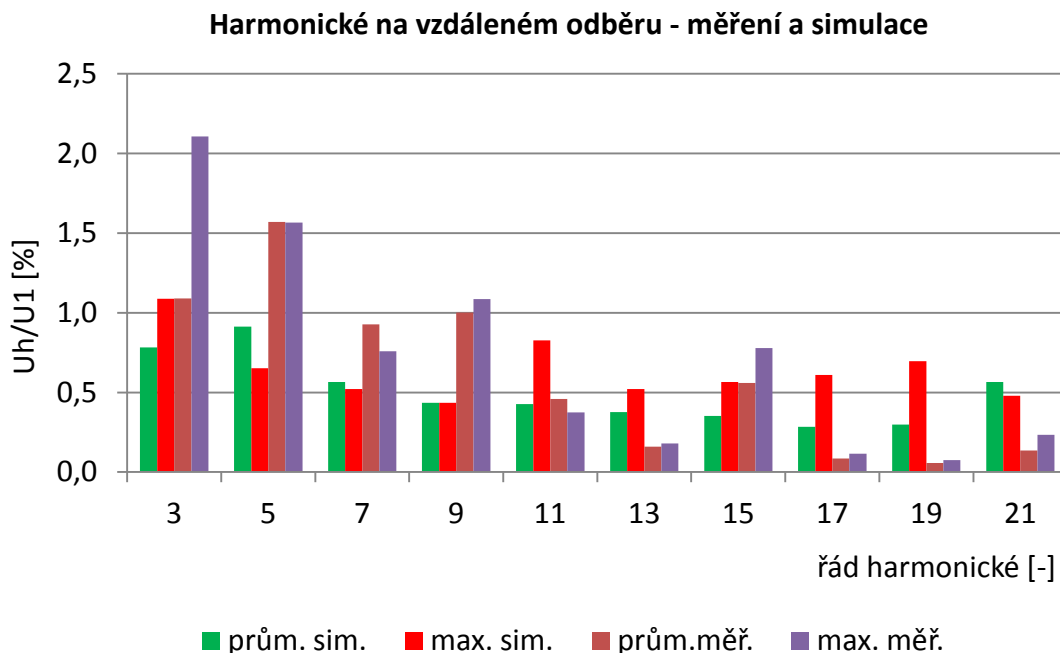
Obr. 4.9 Porovnání harmonických napětí z upravené simulace a měření na rozvaděči domu 4d5

Injektované proudy jsou získány výpočtem průměrné hodnoty z celého intervalu měření pro každou harmonickou zvlášť. Nejmenší jednotkou, která do výpočtu vstupuje, je průměr z třicetivteřinového intervalu. Průměr z každého třicetivteřinového intervalu představuje jeden číselný údaj, který je pak prvkem vektoru, ze kterého se počítá průměr a maximum. Z grafu 4.9 je patrná dobrá shoda upravené simulace s reálnými údaji. Rozdíly v odběrech jednotlivých domů se v dlouhém časovém intervalu potlačí a injektování jednotného proudového signálu s poměrnou velikostí dle počtu bytových jednotek přináší relativně přesné výsledky.

V dalším kroku byla analyzována situace pro průměrný deformační výkon (medián D) a vysoký deformační výkon (95% percentil D). Zde je shoda simulace a měření horší než v předchozím případě, což je zřejmě způsobeno tím, že jsou v daném čase odběry ostatních domů odhadnuty ze situace na domu 4d5 na konci vedení.

Tab. 4.3 Harmonické proudy jedné fáze domu 4d5 injektovaného do sítě při simulaci

Řád harmonické [-]		3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
Proud harmonické [A]	Pravděpodobný scénář	0,161	0,118	0,053	0,031	0,025	0,018	0,015	0,011	0,01	0,016
	Scénář vysokého odběru	0,231	0,082	0,048	0,031	0,048	0,026	0,025	0,022	0,023	0,014



Obr. 4.10 Harmonické napětí vypočtené z proudů na rozvaděči 4d5 versus skutečně naměřené hodnoty

4.3 Rozbor průměrného odběru bytové jednotky

Z analýzy měření na hlavním domovním rozvaděči domu 4d5 vychází průměrný odběr za 24 hodin na bytovou jednotku 146,6 W, což za den představuje energii 3,52 kWh. Významné čistě lineární zátěže jsou v domácnostech zapojeny po krátké časové okamžiky, neboť se jedná např. o topné spirály domácích spotřebičů. Do bytů je zavedena plynová přípojka a teplá voda z centrálního zdroje.

Další rozbor je založen na odhadu poměrného zastoupení lineárních a nelineárních spotřebičů v domácnostech. S ohledem na dříve provedené rozborů a údaje z literatury [10,14,17] je uvažováno, že nelineární spotřebiče představují polovinu energetického odběru bytu za den. Z tohoto vyplývá předpokládaný odběr lineárních spotřebičů 1,76 kWh za den.

Na nelineární odběr pak připadá 1,76 kWh denně, což odpovídá činnému příkonu 73,33 W. Při zanedbání příspěvku výkonu dalších harmonických pro průměrný proud první harmonické z nelineárních spotřebičů bytu platí:

$$I_1 = \frac{73,33}{230} = 0,319 \text{ A} \quad (4.1)$$

Z údajů o spotřebě lze uvažovat, že modelový byt obsahuje následující typy spotřebičů:

Tab. 4.4 Vybavení modelového bytu spotřebiči

Spotřebič	Příkon	Počet	Doba chodu	Energie
[-]	[W]	[-]	[h]	Wh
Pračka/myčka/trouba	1350	1	1	1350
Jiné lineární zařízení	135	3	1	405
PC sestava	300	1	3	900
Zařízení stand-by	7,5	4	24	720
Úsporné zářivky	10	3	4	120

Spotřebiče modelového bytu odeberou denně energii 3,5 kWh, což vyvrací původní předpoklad malého zatížení sítě. V kategorii bytů sledované části sídliště je taková spotřeba běžná. Zajímavé je, že v modelovém případě zařízení ve stand-by režimu spotřebují 6krát více energie než úsporná svítidla, přičemž některá [17] odebírají silně deformovaný proud.

4.4 Možnosti omezení dopadu vlivů nelineárních spotřebičů

Určitým interakcím spotřebičů s napájecí sítí a se sebou navzájem nelze již z principu fyzikální podstaty jejich činnosti nikdy zcela zabránit. S ohledem na potřebu současného provozu mnoha zařízení je nutné zajišťovat omezení zpětných vlivů na takovou úroveň, která nebude žádným způsobem kolidovat se správnou funkcí jak těchto zařízení samotných, tak ostatních elektrických zařízení umístěných v jejich blízkosti.

Na problematiku omezení vlivu nelineárních spotřebičů lze nahlížet ze dvou různých úhlů. Jiná opatření se volí při projektování budoucí sítě, jiné prostředky pro zajištění plynulého chodu sítě stávající.

Z hlediska projektování sítě je podstatné zajištění vhodného připojení a dostatečného dimenzování rozvodných sítí. Připojení rušící zátěže do místa s vysokým zkratovým výkonem zajistí nízkou deformaci křivky napájecího napětí. V rozvodech s vysokými proudy harmonických násobků tří se doporučuje průřez středního vodiče volit dvojnásobný oproti průřezu žil fází z důvodu sčítání třetí harmonické, jak bylo popsáno v kapitole 1.8. Z důvodu zamezení průniku třetí harmonické přes transformátor do napájecí sítě se používá zapojení D/yn. Pokud jsou tato opatření nedostatečná nebo některá z nich nelze z důvodů technicko-ekonomických plně uplatnit, přichází na řadu obohacení návrhu o pasivní či aktivní filtry. [4]

Literatura [1,2] nahlíží na tuto problematiku z hlediska sítě již hotové. Rozděluje prostředky vhodné k zajištění elektromagnetické kompatibility do dvou základních skupin.

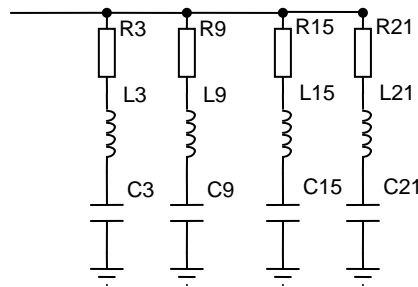
- Omezení negativních účinků bez použití přídavných zařízení

Do této skupiny spadají opatření na straně výrobců samotných zařízení. V procesu návrhu se volí taková zapojení a prostorová uspořádání, která se vyznačují minimálními vlivy na napájecí síť a emitují nízké úrovně vysokofrekvenčního rušení. Jde zpravidla o zvětšení počtu fází, sériové a paralelní spojení měničů, volbu parametrů komponent měničů a nasazení pulzních usměrňovačů. Pro provozovatele sítě, který zodpovídá za kvalitu elektrické energie dodávané zákazníkům, je konstrukce spotřebičů danou skutečností, kterou musí respektovat. [1,2]

- Omezení negativních účinků s použitím přídavných zařízení

V případě nepřijatelného zkreslení křivky napájecího napětí lze použít filtračně kompenzační zařízení tvořená vhodným zapojením kondenzátorů a tlumivek. Filtr zároveň kompenzuje jalový výkon. V extrémních případech přichází v úvahu nasazení aktivních filtrů, jejichž činnost spočívá v generování zbytkové křivky jako rozdílu mezi nesinusového a sinusového průběhu napětí, případně proudu. [2]

Z výsledků simulace by vycházela možnost zvážit použití některého z uvedených prostředků. Jako nejvhodnější opatření ke snížení hodnoty 3., 9., 15. a 21. harmonické by se nejspíš hodily pasivní sériové filtry navržené s minimálním kompenzačním účinkem umístěné na sběrně 1.



Obr. 4.11 LC filtr. Indexy prvků značí řád filtrované harmonické.

Praktická měření, která na rozdíl od simulace nezjišťovala nejhorší možný scénář, ale skutečné reálné průběhy, však přesvědčivě dokázala, že taková opatření by v současné situaci byla nadbytečná. Reálná kvalita současné sítě je zajisté velmi pozitivně ovlivněna vysokým zkratovým výkonem napájecí sítě a krátkou délkou vysokonapěťového kabelu.

Závěr

Diplomová práce zpracovává problematiku vlivu připojení velkého množství nelineárních domácích spotřebičů do elektrické sítě, neboť stále vyšší a vyšší množství domácích elektrospotřebičů vytváří při jejich souběhu situaci, jejímž případným dopadům na síť je třeba se věnovat.

V první části se práce zabývá teorií vzniku harmonických a důsledkům jejich přítomnosti v síti. Proud odebíraný spotřební elektronikou byl simulován v souladu s literaturou v části druhé. Nejprve byl na jednofázovém můstkovém usměrňovači s vyhlazovacím kondenzátorem nasimulován v programu Tina průběh odebíraného proudu a následně bylo schéma modifikováno a sledovány průběhy pro kapacitní a indukční PFC obvody. Dále byly popsány některé topologie aktivních PFC a u typu interleaved a boost byly provedeny simulace v systému PowerESim.

Ve třetí části byla simulována situace části reálné sítě. K velkému množství malých nelineárních odběrů dochází nepochybně v hustých městských zástavbách. Proto tato práce zpracovává v dalších částech reálnou situaci na jednom plzeňském sídlišti, a to nejdříve simulací na modelu, který je podle skutečné struktury sítě vytvořen v programu Tina. K získání podrobnějších dat, která jsou nezbytná pro nastavení modelu, bylo vycházeno ze zahraničních studií, které řešily obdobnou problematiku z hlediska jednotlivých bytů. Pro posouzení skupinového působení nelineárních spotřebičů na síť je nutné zohlednit i fázi jednotlivých harmonických od každého spotřebiče, protože kvůli rozdílným úhlům harmonických proudu od každého zařízení je nutné příspěvky sčítat geometricky. Úhly natočení fázorů harmonických proudu sice řeší studie [10], ale zveřejněna jsou jen data pro nízké řády. Jako vhodné řešení se jeví provedení vlastního měření odběru skupiny referenčních spotřebičů v modelu průměrného bytu, ale studiem literatury bylo zjištěno, že takové měření provedli v roce 2013 výzkumníci v práci [14]. Proto byly dva scénáře pro posouzení vlivu proudů nelineárních spotřebičů na síť převzaty ze studií [10,14].

Získaný model byl využit k simulacím jak v podmínkách odběru pravděpodobného, tak i maximálního. Ze zpracování získaných dat vyplývá, že zkraslení napětí není zanedbatelné, ale u zvažovaného pravděpodobného scénáře odběru k překračování povolených hodnot u lichých harmonických nízkých řádů nedochází. To je dáno vysokým

zkratovým výkonem sítě i relativně vysokými normou povolenými hodnotami napětí těchto harmonických.

Síť by byla ohrožena až při výrazně vysokých proudech harmonických, které jsou v současné praxi nereálné.

V dalším průběhu práce bylo přistoupeno k měření reálných hodnot v odpovídajícím terénu. Toto měření bylo uskutečněno v listopadu, kdy je předpoklad vyššího zatížení sítě odběry nelineárních spotřebičů. Po zpracování byly jeho výsledky porovnány s daty získanými simulací.

Bylo zjištěno, že scénář maximálního odběru je nadhodnocen. Pro ověření byl model testován proudy skutečně naměřenými na rozvaděči konkrétního domu na místě vzdáleného odběru. Porovnání naměřených průměrných harmonických napětí s výsledky získanými injektováním průměrných naměřených proudů vykazuje relativně dobrou shodu. Ukázalo se jako přesnější než srovnání naměřených a vypočtených napětí při výpočtu z proudů při průměrném a maximálním deformačním výkonu.

Zajímavým výsledkem měření je vysoké celkové harmonické zkreslení ve středním vodiči, které při vysokém zatížení přesahuje i 2000 %. To je v souladu s předpokládaným vysokým zastoupením nelineárních spotřebičů v síti. V nočních hodinách tvoří nezanedbatelnou část spotřeby zařízení v pohotovostním režimu s nelineárním charakterem odběru.

Výsledky z místa vzdáleného odběru vypovídají o tom, že zatímco 9. a 21. harmonická překračují normu [15] pouze ve svých maximech, 15. harmonická přesahuje kompatibilní hodnoty i při odběru průměrném. S ohledem na to, že ke skutečnému ohrožení sítě nemůže v této situaci reálně docházet, vyslovují se závěry této práce spíše pro to, že je zapotřebí se v budoucnosti vážně zabývat přehodnocením maximálních úrovní daných pro liché harmonické uvedenou normou.

Seznam literatury a informačních zdrojů

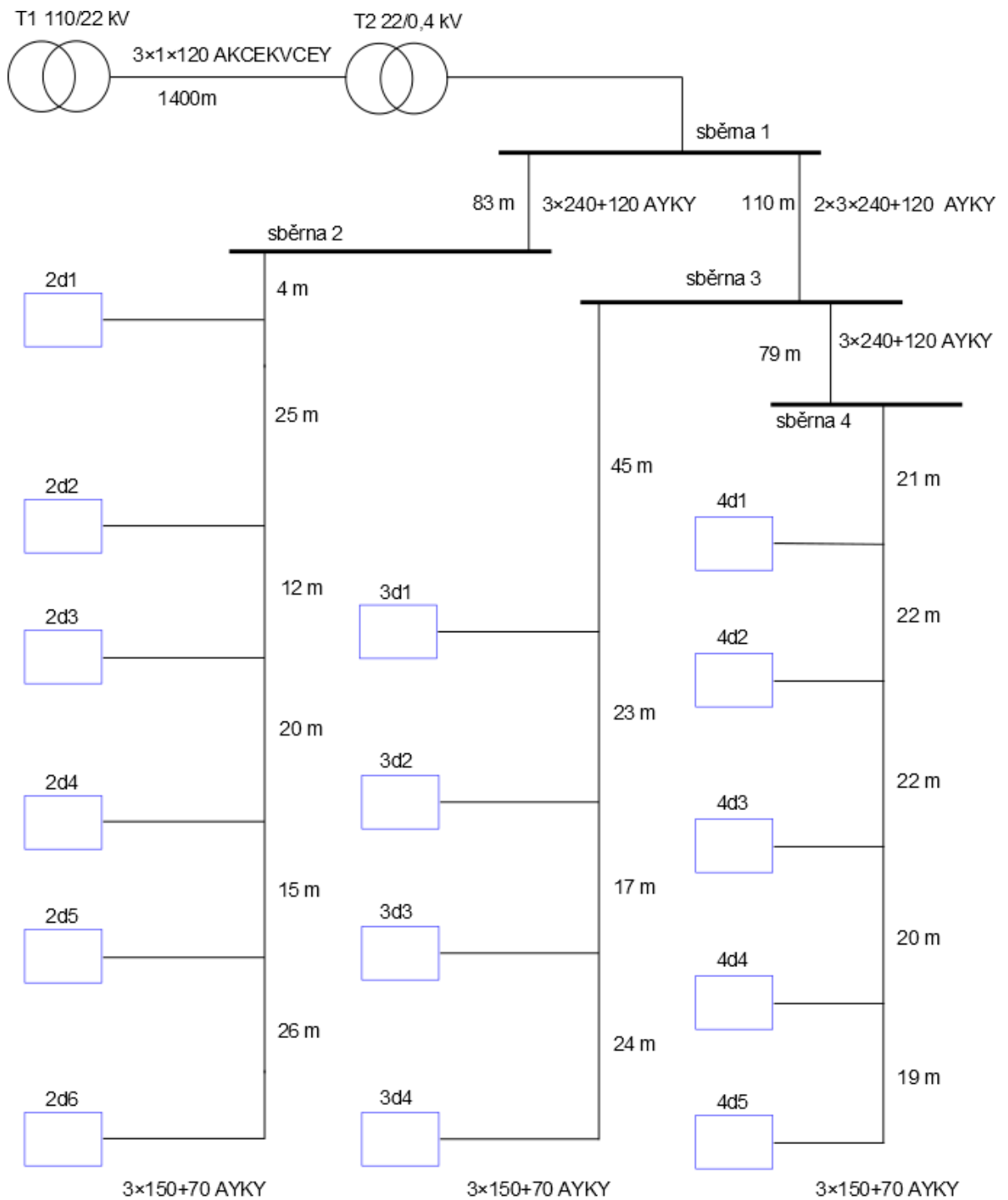
- [1] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 183 s., ISBN 80-7300-062-8
- [2] KŮS, V., SKÁLA, J., HAMMERBAUER, J. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, 372 s., ISBN 978-80-7300-476-7
- [3] SHARMA, H., SUNDERMAN, W. G., GAIKWAD, A. *Harmonic impacts of widespread use of CFL lamps on distribution systems*. In: 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting [online]. 2011 [cit. 2015-02-13]. DOI: 10.1109/pes.2011.6039496. Dostupné z : <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6039496&isnumber=6038815>
- [4] TESAŘOVÁ, M. *Průmyslová elektroenergetika*. 1. vyd, Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s., ISBN:8070827033
- [5] CHAPMAN, D. *Kvalita elektrické energie: Harmonické: Příčiny a účinky* [online]. 2001 [cit. 2014-08-5]. Dostupné z: [http://www.medportal.cz/files/file/3_1\(1\).pdf](http://www.medportal.cz/files/file/3_1(1).pdf)
- [6] DRÁPELA, J. *Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť*. Brno, 2006, dizertační práce (Ph.D), Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [7] RŮŽIČKA, P. *Úsporná zářivka a elektronický předřadník* [online]. [cit. 2014-09-29]. Dostupné z: <http://pavouk.org/hw/lamp/>
- [8] ŽÁK, F. *Vliv používání moderních světelných zdrojů na síť* [online]. [cit. 2014-09-30]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=48394
- [9] ELPHICK, S. T., CIUFO, P., PERERA, S. *The electrical performance of modern compact fluorescent lamps* [online]. In: Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 7, (1) pp. 43-51, 2010, Dostupné z : <http://search.informit.com.au/documentSummary;dn=732915958808532;res=IELENG>
- [10] HARDIE, S., WATSON, N., *The effect of new residential appliances on Power Quality* [online]. In: Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2010 20th Australasian, vol., no., pp. 1,6, 5-8 Dec. 2010, Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5710787&isnumber=5710678>
- [11] CIVIDINO, L. *Power factor, Harmonic distortion; Causes, effects and considerations* [online]. Quebec, Canada. Dostupné z: <http://www.enetsystems.com/~lorenzo/pmeter/PFCHarmonics.pdf>

- [12] RAO, A. N. Malleswara, REDDY, K. Ramesh, RAM, B. V. Sanker. *Estimating the Power Quality disturbance caused by Personnel Computer* [online]. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), s. 6, [cit. 2014-09-01]. Dostupné z: <http://www.ijera.com/papers/vol%201%20issue%203/XP01310341039.pdf>
- [13] SÝKORA, O. *Aktivní Filtr PFC pro spínané zdroje do výkonu 2kW*. Plzeň, 2013, diplomová práce (Ing.), Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [14] GIL-DE-CASTRO, A., RONNBERG, S. K., BOLLEN, M. H. J., MORENO-MUNOZ, A. *Harmonics from household equipment and different lamp technologies*. In: 2013 International Conference-Workshop Compatibility And Power Electronics [online]. IEEE, 2013, s. 1-6, [cit. 2014-11-19]. ISBN 978-1-4673-4913-0. DOI: 10.1109/CPE.2013.6601119. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6601119>
- [15] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úroveň pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut
- [16] ČSN EN 61000-3-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-2: Meze - Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)*. Praha: Český normalizační institut
- [17] HANZLÍČEK, M. *Vyhodnocení proudů spotřebičů používaných v domácnostech, kancelářích a průmyslu*. Plzeň, 2013, bakalářská práce (Bc.), Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [18] BHATTACHARYYA, S., COBBEN, S., RIBEIRO, P., KLING, W. *Harmonic emission limits and responsibilities at a point of connection* [online]. In: IET Generation, Transmission. 2012, [cit. 2015-01-29]. ISSN 17518687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2011.0376. Dostupné z: <http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2011.0376>
- [19] PowerELab, Ltd. Free Switch Mode Power Supply Circuit (SMPS) Design Software & Transformer Calculation / Simulation Tool. <http://www.poweresim.com/>
- [20] VUGT, P. Van, TIMENS, R. B., STIEVANO, I. S., LEFERINK, F. B. J., CANAVERO, F. G. *Experimental characterization of CFL bulbs for power quality assessment* [online]. In: 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2013 [cit. 2015-02-11]. DOI: 10.1109/isemc.2013.6670415. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6670415&isnumber=6670363>
- [21] NKT CABLES S.R.O. *Energetické kabely (CZ/EN): Katalog*. 2012. Dostupné z: http://www.nktcables.com/sitecore/shell/Controls/Rich%20Text%20Editor/~/_media/Files/NktCables/download%20files/cz/MV_Catalog.pdf
- [22] NKT CABLES S.R.O. *Katalog*. [cit. 2015-01-29] Dostupné z: [nktcables.com/~/_media/Files/NktCables/Products/Cz/LV%20cables/1-AYKY.pdf](http://www.nktcables.com/~/_media/Files/NktCables/Products/Cz/LV%20cables/1-AYKY.pdf)

- [23] MAZZANTI, G. *Distortion limits in international standards vs. reliability of power components: Always on the safe side as to low-order voltage harmonics?*[online]. In: 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2012 [cit. 2015-03-13]. DOI: 10.1109/pesgm.2012.6344692.
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6344692>
- [24] MAZZANTI, G. *Reliability evaluation of insulation subjected to harmonic voltages within the limits set by international standards* [online]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2014, vol. 21, s. 2037-2046 [cit. 2015-03-13]. DOI: 10.1109/tdei.2014.004616.
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6927331>
- [25] BARR, R. A., GOSBELL, V. J. *Power system harmonic voltage limits for the future* [online]. In: 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). 2014 [cit. 2015-03-13]. DOI: 10.1109/ichqp.2014.6842902.
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6842902>

Přílohy

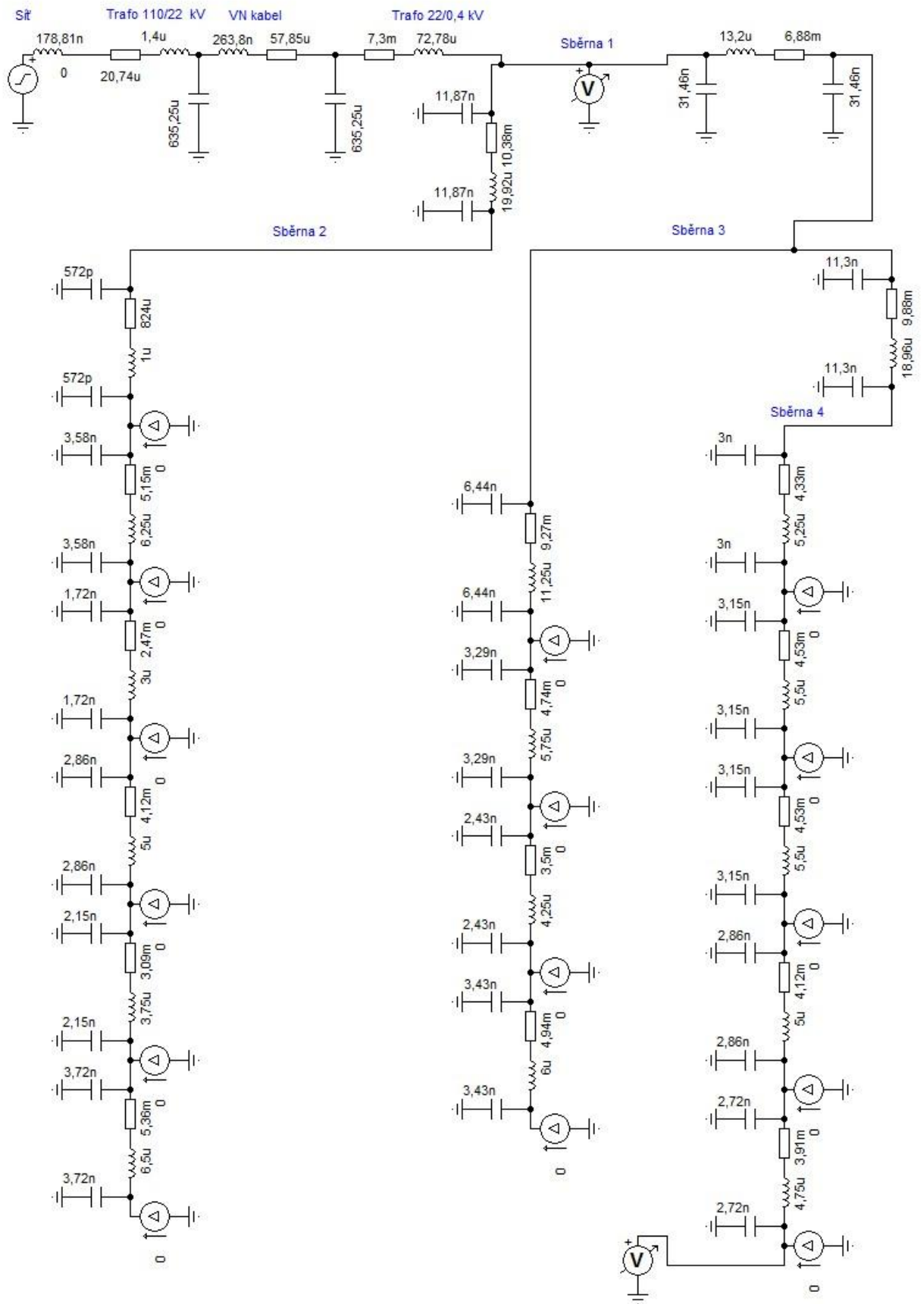
Příloha A



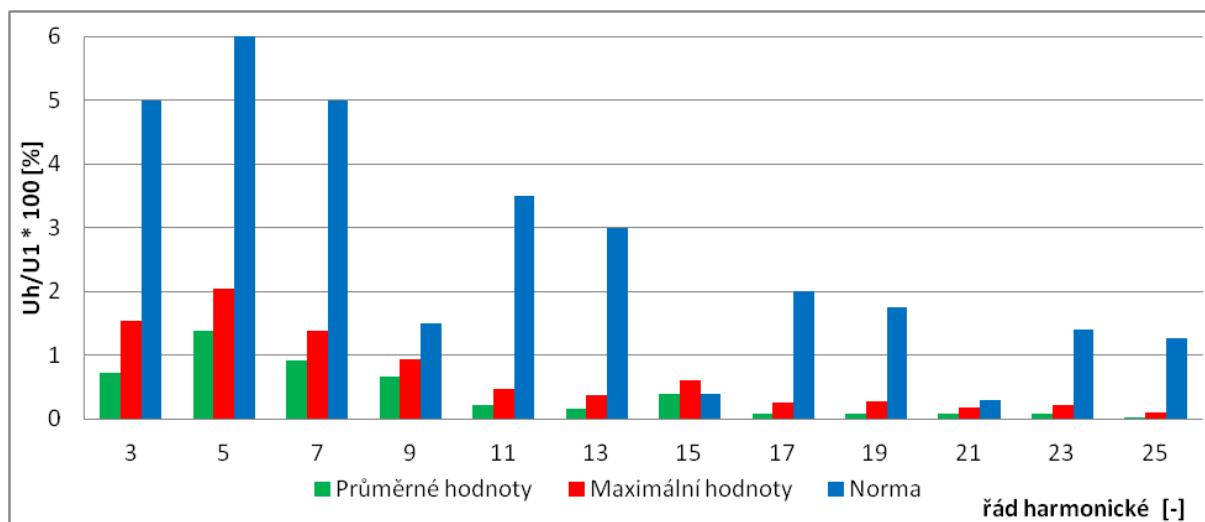
Příloha B – Rozvržení bytů na fáze

Dům	Počet bytů	Fáze L1	Fáze L2	Fáze L3
2d1	21	7	7	7
2d2	20	7	7	6
2d3	21	7	7	7
2d4	21	7	7	7
2d5	21	7	7	7
2d6	20	6	7	7
3d1	29	10	10	9
3d2	29	9	10	10
3d3	29	10	9	10
3d4	29	10	9	10
4d1	29	10	10	9
4d2	28	9	9	10
4d3	23	7	7	7
4d4	22	7	7	7
4d5	22	7	8	7
Suma bytů na fázi		120	121	120

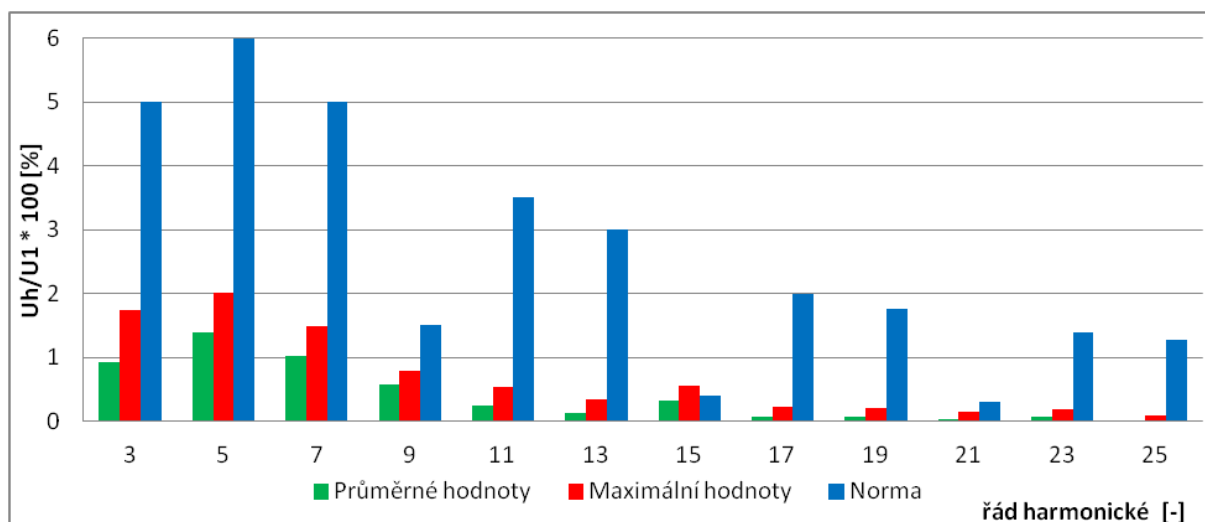
Příloha C – Model vyšetřované části sídliště



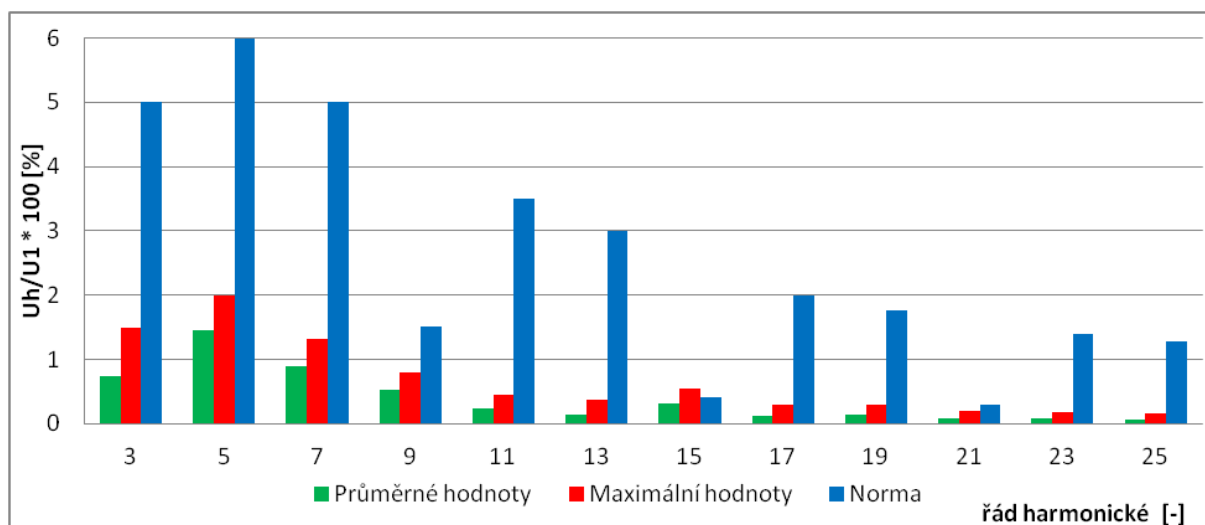
Příloha D – Harmonická analýza napětí na rozpojovací skříní (sběrna 3)



Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na sběrně 3 – Fáze L1

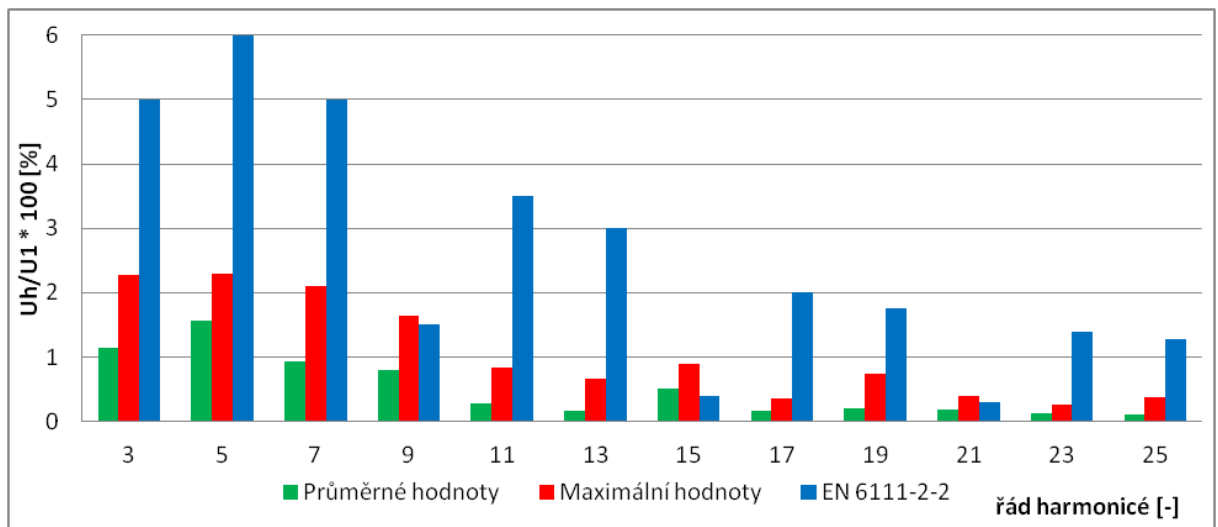


Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na sběrně 3 – Fáze L2

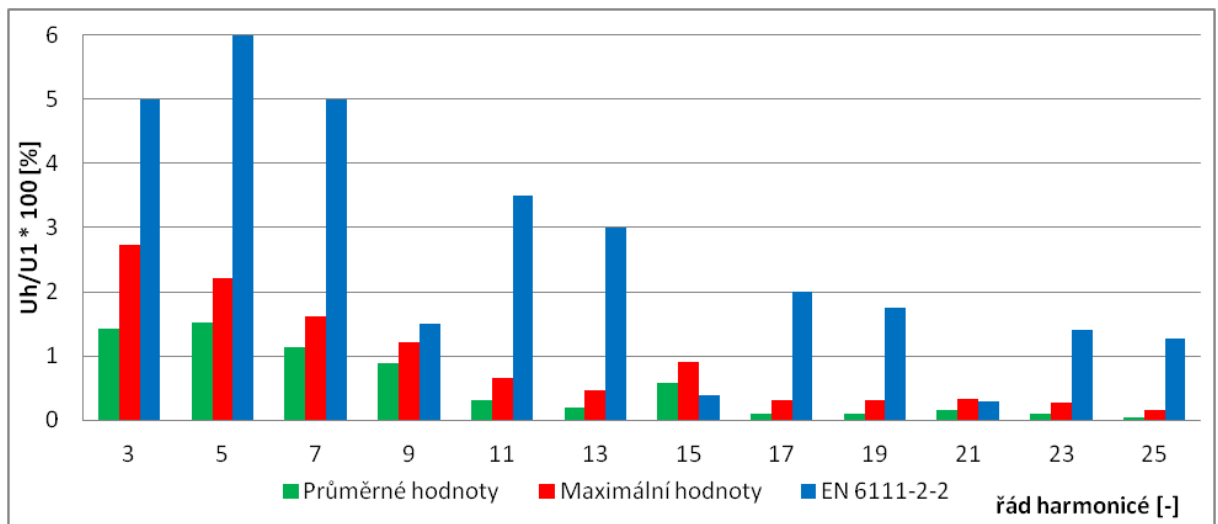


Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na sběrně 3 – Fáze L3

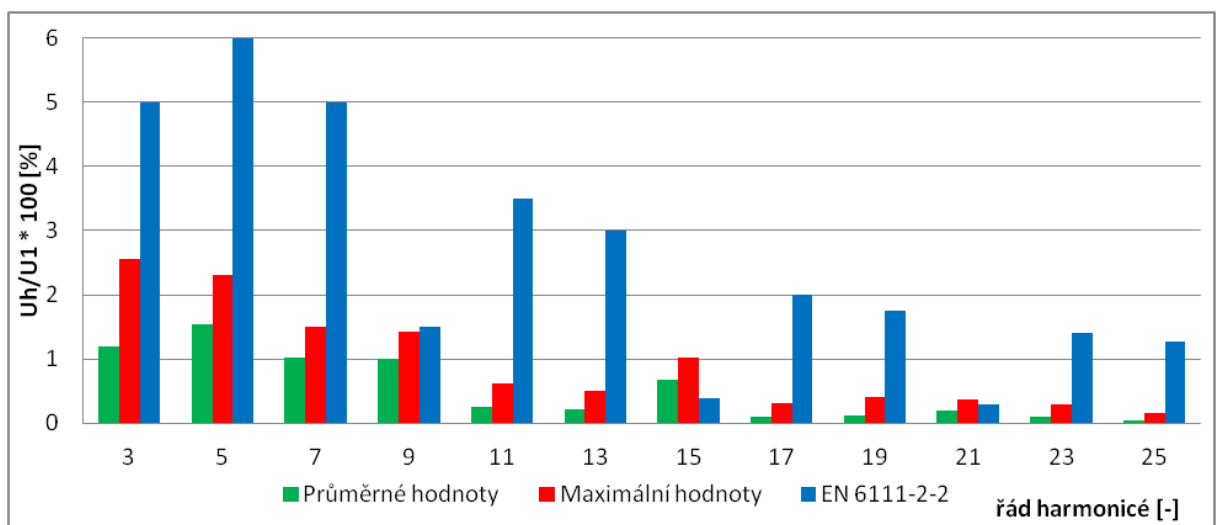
Příloha E – Harmonická analýza napětí na HDS domu 4d5



Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na HDS domu 4d5 – Fáze L1

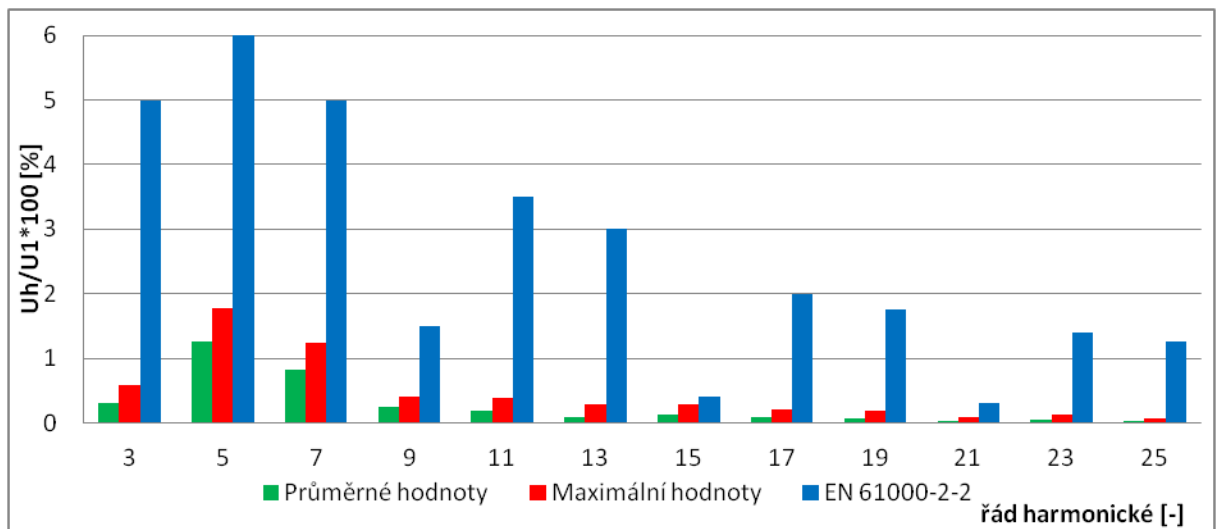


Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na HDS domu 4d5 – Fáze L2

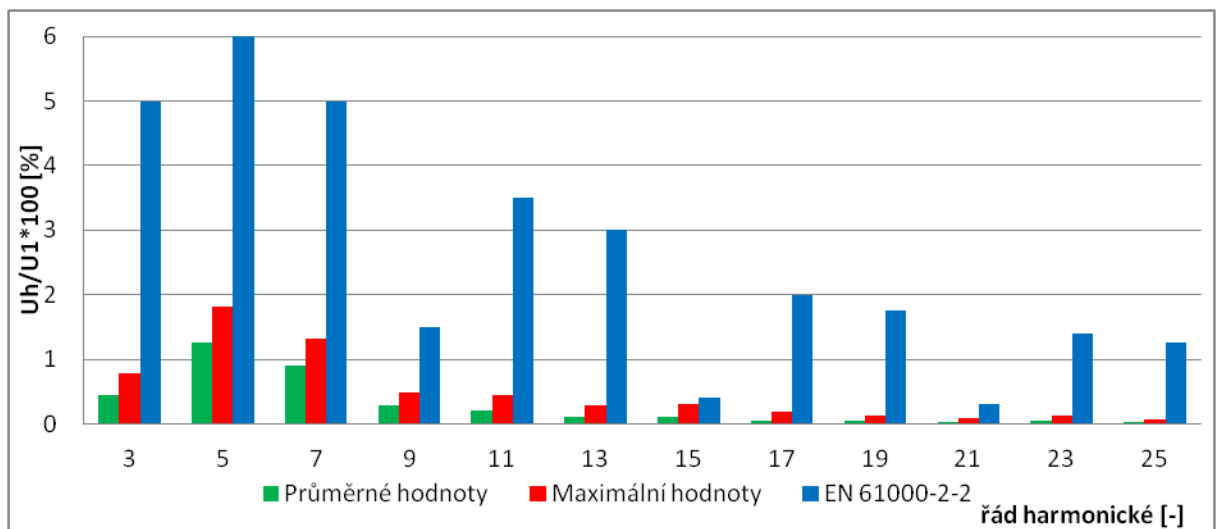


Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na HDS domu 4d5 – Fáze L3

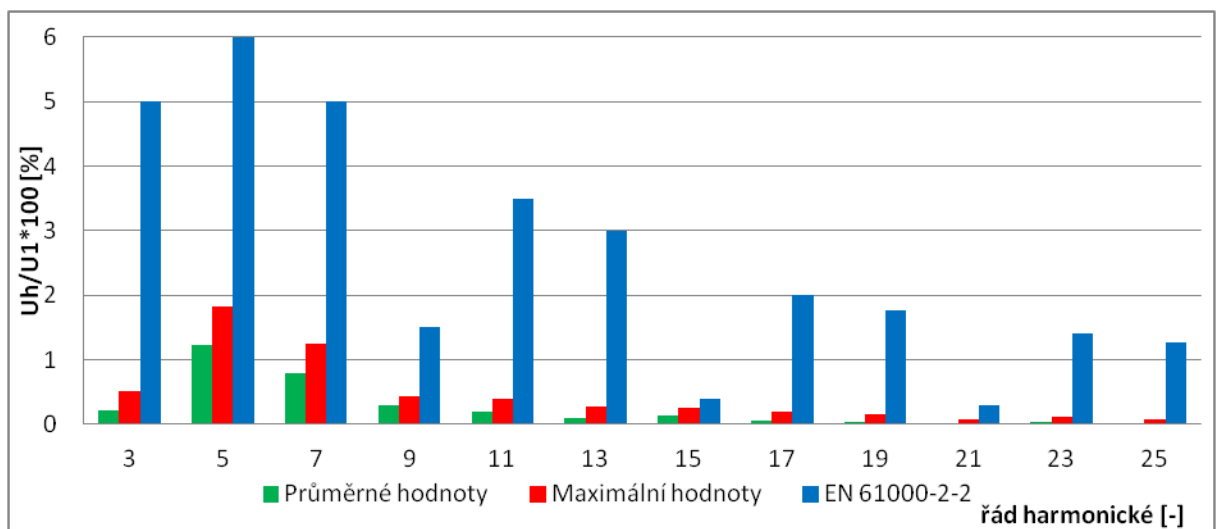
Příloha F – Harmonická analýza napětí na transformátoru



Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na transformátoru – Fáze L1



Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na transformátoru – Fáze L2



Naměřené harmonické napětí pro průměrné a maximální hodnoty na transformátoru – Fáze L3

Příloha G – Parametry kabelů

Počet x průřez žil/štinění No. of cores and cross-section (mm ²)	Činný odpor při 20°C DC resistance at 20°C (min.) (Ω/km)	Kapacita Capacitance (μF/km)	Indukčnost (v trojúhelníku) Cable inductance (trefoil installation) (mH/km)	Indukčnost na vzduchu (paralelně) Cable inductance on air (parallel) (mH/km)	Indukčnost v zemi (paralelně) Cable inductance in ground (parallel) (mH/km)
1x185/25	0.164	0.27	0.37	0.54	0.59
1x240/25	0.125	0.30	0.36	0.52	0.57
1x300/25	0.100	0.32	0.34	0.50	0.55

Parametry kabelu 22-AXEKVCEy[21]

Počet žil x průřez jáder (n x mm ²) Number of cores x cross-section of conductors (n x mm ²)	Tvar jádra Shape of the conductor	Průměr inf. (mm) Diameter appr. (mm)	Hmotnost inf. (kg/km) Cable mass appr. (kg/km)	Poloměr ohybu (mm) Radius of bend (mm)	Činný odpor (Ω/km) Effect. resist. of conductors (Ω/km)	Ekvivalentní zkratový proud (kA) Short circuit current-equiv. (kA)	Časová odpovídací konst. (s) Time heating constant (s)	Zašlehetnost na vzduchu (A) Current carrying cap. in air (A)	Zašlehetnost v zemi (A) Current carrying cap. in ground (A)	Kapacita (μF/km) Capacity (μF/km)	Indukčnost (mH/km) Inductivity (mH/km)	Obsah AI (kg/km) Content AI (kg/km)
3x240	SM	50	3 196	600	0,125	18,300	1 427	338	364	-	0,220	2 160
3x240+120	SM	53	3 700	660	0,125	18,300	1 427	338	364	-	0,240	2 520
4x16	RE	20	565	240	1,910	1,220	195	61	81	-	0,280	192

Number of cores x cross-section of conductors (n x mm ²)	Shape of the conductor	Diameter appr. (mm)	Cable mass appr. (kg/km)	Radius of bend (mm)	Effect. resist. of conductors (Ω/km)	Short circuit current-equiv. (kA)	Time heating constant (s)	Current carrying cap. in air (A)	Current carrying cap. in ground (A)	Capacity (μF/km)	Inductivity (mH/km)	Content AI (kg/km)
3x120+70	SM+RE	38	2 098	475	0,253	9,120	873	216	245	-	0,240	1 290
3x150	SM	40	2 004	480	0,206	11,400	1 052	246	275	-	0,230	1 350
3x150+70	SM+RE	42	2 290	505	0,206	11,400	1 052	246	275	-	0,250	1 560
3x185	SM	45	2 450	540	0,164	11,400	1 192	285	313	-	0,230	1 665

Parametry kabelů AYKY v nízkonapěťové části rozvodu [22]