

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Harmonické v sítích příměstských sídlišť

zadání DP

Abstrakt

Cílem předkládané diplomové práce je analýza nízkofrekvenčního elektromagnetického rušení v distribuční síti nízkého napětí příměstské zástavby tvořené výhradně rodinnými domy.

V úvodní části je věnována pozornost obecné problematice odběru nesinusového proudu nelineárními spotřebiči. Dalším bodem práce je zhodnocení rizik spojených s deformací sinusové formy signálu napětí a proudu v kontextu zpětného působení vzrůstající koncentrace elektronických zařízení na síť.

Podstatná část práce se následně zabývá diskusí v souvislosti s chováním analyzované části distribučního systému prostřednictvím statistického zpracování poskytnutého záznamu elektromagnetických emisí, jenž byl pořízen v rámci měření kvality elektrické energie v různých částech rozvodu. Součástí zpracování je rovněž hledání nových hledisek pro přehledné posuzování míry koncentrace rušení uvnitř zkoumaného systému, které budou dále sloužit k vědeckovýzkumné činnosti katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Přehledné zpracování dat umožňuje následnou komparaci vzhledem k příslušným legislativním limitům a hodnotám stejných proměnných v městské zástavbě, tvořené panelovými budovami, pro účely diskuse ohledně rozdílné odběrové aktivity obyvatelstva v odlišných typech obydlí.

Poslední částí práce je simulace reálné sítě na základě poskytnutých dat a parametrů sítě a zhodnocení použité metodiky realizace modelu.

Klíčová slova

Nelineární domácí spotřebiče, harmonická analýza, Fourierova řada, harmonické zkreslení, kompatibilní úrovně, hromadné zpracování dat, rozdělení pravděpodobnosti simulace elektrické sítě sídliště.

Abstract

The aim of the diploma thesis submitted is an analysis of the low-frequency electromagnetic interference in the low-voltage distribution network of the suburban built-up areas comprised solely by family houses.

In the introduction, the attention is paid to general issues of the non-sinusoidal current draw by the non-linear appliances. Another goal of the thesis is to evaluate risks related to deformations of the voltage and current signals' sinusoidal forms in the context of the retroactive effect of the increasing concentration of the electronic equipment on the network.

A remarkable part of the thesis is subsequently occupied with a discussion in accordance with a behaviour of the analysed part of the distribution system through statistical processing of the provided record with electromagnetic emissions that has been drawn up within measuring electricity quality in different parts of the distribution. The processing also includes a seek new aspects for well-arranged assessment of a magnitude of interference concentration that will serve the Department of Electromechanics and Power Electronics at the Faculty of Electrical Engineering at the University of West Bohemia in Pilsen for science and research activities.

A well-arranged data processing enables a subsequent comparison due to relevant legislative limits and values of the same variables in the urban built-up areas, which are comprised by blocks of flats, for the purposes of a discussion on a different current draw activity of the population in diverse types of dwelling.

The last part of the thesis is engaged with a simulation of a real network based on provided figures and parameters of the network and with an evaluation of the used methodology of the model implementation.

Key words

Nonlinear appliances, harmonic analysis, Fourier series, harmonic distortion, compatibility levels, mass data processing, probability distribution, simulation of distribution system in a housing.

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 19. 5. 2016

David Vokál

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za zprostředkování klíčových materiálů pro práci, cenné profesionální rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Miloslavě Tesařové, Ph.D. za pomoc během modelování sítě a Ing. Haně Kopincové, Ph.D., jenž ochotně poskytla odbornou podporu při zpracování numerických metod pro záznam dat.

.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	11
1 FOURIEROVA ŘADA	12
1.1 Fourierova transformace	14
2 VÝKONY V OBVODECH S NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽÍ	16
3 NEGATIVNÍ ÚČINKY ODBĚRU PROUDU NELINEÁRNÍMI SPOTŘEBIČI	20
3.1 Negativní účinky harmonických proudů lichých řádů o násobku 3.....	21
4 VÝCHOZÍ NORMY Z OBLASTI EMC	23
4.1 ČSN EN 61000-2-2	25
4.1.1 Kompatibilní úroveň, úroveň odolnosti a mez emise.....	25
4.1.2 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nízkého napětí.....	26
4.2 ČSN IEC 60050-131	27
4.3 ČSN EN 61000-4-7	27
4.3.1 Struktura přístroje a charakter porízených výsledků	28
4.3.2 Třídy přesnosti.....	28
5 ROZBOR A NÁSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT	29
5.1 Data pro zpracování	29
5.2 Prosté zobrazení vybraných veličin v čase.....	30
5.3 Vliv PVE na chování zkoumané části veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí	31
5.3.1 Ovlivnění účinníku základní harmonické	33
5.3.2 Vliv PVE na celkové harmonické zkreslení sinusové formy proudu.....	38
5.3.3 Vliv PVE na dodávaný činný výkon	40
5.3.4 Srovnání všedních dnů s různou mírou vlivu PVE	40
5.3.5 Shrnutí celkového působení PVE ve zkoumané části distribuční sítě.....	42
6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S PLATNOU LEGISLATIVOU	44
6.1 Obecné srovnání v místě vzdáleného odběru.....	45
6.2 Diskuse velikosti kompatibilní úrovně 15. harmonické napětí	48
7 ÚROVEŇ ELEKTROMAGNETICKÝCH EMISÍ V RŮZNÝCH ČÁSTECH VEŘEJNÉ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ	51
7.1 Elektromagnetické rušení v různých částech systému během vybraných všedních dnů	51

7.1.1	Elektromagnetické působení dominantního spotřebiče individuální domácnosti v distribuční síti n. n. obce.....	58
7.2	Koncentrace vyšších harmonických v různých částech sítě během celého týdne	63
7.3	Shrnutí míry koncentrace nízkofrekvenčního rušení vzdáleného odběru veřejné napájecí sítě blíže nespecifikované části satelitní obce a sídlištní zástavby	65
8	ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ ZKOUMANÉHO STATISTICKÉHO SOUBORU	66
8.1	Zobrazení absolutní četnosti vybraných veličin.....	66
8.2	Absolutní kumulativní četnost	70
8.2.1	Shrnutí výhod použitého statistického zpracování	71
9	MODEL REÁLNÉ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ N. N.	72
9.1	Podklady pro model	72
9.2	Příklad výpočtu individuálních prvků modelu reálné distribuční sítě n. n.	73
9.3	Metodika řešení modelu	74
9.4	Diskuse výsledků simulace	75
9.5	Zhodnocení metodiky modelování sítě	79
10	ZÁVĚR	80

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_0, a_h, b_h	Fourierovy koeficienty
C	Kapacita [F]
C_{hvs}	Průměrná hodnota vzorků během velmi krátkého času měření
c_k	Kapacita vedení na 1 km délky [F/km]
C_s	Kapacita sítě [F]
C_v	Kapacita vedení [F]
ČSN	Česká státní norma
D	Deformační výkon [VA]
DFT	Diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier transform)
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EN	Evropská norma
f	Frekvence [Hz]
FFT	Rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier transform)
h	Řád harmonické [-]
HC	Harmonic content (celkový obsah harmonických)
i, I	Proud, okamžitá, efektivní hodnota [A]
I_h	Proud harmonické řádu h [A]
I_N	Prou středním vodičem
ISO	Mezinárodní norma
l	Délka vedení [m]
L	Indukčnost [H]
L_1, L_2, L_3	Fázové vodiče napájecí soustavy
L_k	Indukčnost kabelu [H]
l_k	Indukčnost kabelu na 1 km délky [H/km]
L_s	Indukčnost sítě [H]
L_T	Indukčnost transformátoru [H]
L_v	Indukčnost vedení [H]
M	Celkový počet zaznamenaných hodnot
$n, n.$	Nízké napětí
p, P	Činný výkon, okamžitá, střední hodnota [W]
PCC	Point of common coupling, společný napájecí bod

<i>PM0263, PM</i>	Sběrné místo těsně za distribučním transformátorem
<i>PVE</i>	Fotovoltaický zdroj energie (photovoltaik engineering)
<i>Q</i>	Jalový výkon [VA]
<i>Q_h</i>	Efektivní hodnota harmonické složky střídavé veličiny
<i>Q_~</i>	neaktivní výkon [VA]
<i>r_k</i>	Odpor kabelu na 1 km délky [Ω /km]
<i>R</i>	Odpor [Ω]
<i>R1970</i>	Sběrné místo uprostřed sítě
<i>R1974</i>	Sběrné místo vzdáleného odběru (individuální domácnost)
<i>S_{δ}</i>	Průřez vodiče zatížen většinovým působení povrchového jevu
<i>S</i>	Zdánlivý výkon [VA]
<i>Sk''</i>	Zkratový výkon sítě [VA]
<i>t</i>	čas [s]
<i>THD</i>	Total harmonic distortion, celkové harmonické zkreslení [-, %]
<i>u, U</i>	Napětí, okamžitá, efektivní hodnota [V]
<i>U_h</i>	Napětí harmonické řádu h [V]
<i>U_n</i>	Jmenovité napájecí napětí [V]
<i>X</i>	Reaktance [Ω]
<i>Z_s</i>	Impedance sítě [Ω]
<i>Z_h</i>	Impedance při kmitočtu konkrétní harmonické
<i>δ</i>	Hloubka vniku [m]
<i>φ</i>	Úhel [$^\circ$, rad]
<i>μ</i>	Magnetická permeabilita [H·m-1]
<i>λ</i>	Power factor (účinník)

ÚVOD

Rušivé signály lze rozeznat v jakémkoli elektricky vodivém, nebo nevodivém prostředí. Původ těchto vlivů představuje široká škála rušivých zdrojů. V základu lze z hlediska původu obvykle rozeznávat umělé interferenční zdroje, vznikající jako důsledek lidské činnosti a přírodní interferenční zdroje, tedy bleskové výboje, sluneční vítr apod. Dominantní vliv je však z pohledu elektromagnetické kompatibility přisuzován umělým zdrojům rušení, které přímo souvisí s masivním nasazováním elektronických zařízení v průmyslu i domácnostech. Vlivem dynamické voltampérové charakteristiky polovodičových prvků v těchto zařízeních obsažených, dochází mimo jiné k deformaci sinusové formy signálu napětí a odebíraného proudu. Působí proto z hlediska odběru elektrické energie jako nelineární zátěž. Přestože je nelinearita odběru malých spotřebičů legislativně omezována, může jejich celkové spolupůsobení vytvářet řadu problémů. Výčet možných problémů a rizik s touto problematikou spojených je velice rozsáhlý, přičemž se jistě mnoho dalších dosud nepodařilo odhalit. Daň za úsporu elektrické energie a realizaci sofistikovaných druhů řízení elektrických pohonů je tedy vznik požadavků na řešení problematiky negativních vlivů spotřebičů na napájecí síť.

Cílem této práce je uvedení nejpodstatnějších nepříznivých vlivů zmíněných deformovaných veličin na napájecí síť v oblasti nízkých kmitočtů a zhodnocení jejich koncentrace ve veřejné napájecí síti nízkého napětí jejich statistickým zpracováním. K tomuto účelu byla použita data, měřená v rámci posouzení kvality elektrické energie poskytnutých katedrou KEV ZČU v Plzni, která budou v rámci této práce dále popsána. Na základě statistické analýzy dat a parametrů sítě je provedena simulace blíže nespécifikované satelitní periferie, která je následně porovnána s reálným měřením. Výsledky získané zpracováním naměřených a simulovaných výsledků jsou porovnány s příslušnou normou ČSN EN 61000-2-2. Tuto práci proto lze díky množství poskytnutých dat a vyvozených doporučení chápat rovněž jako možné hledisko během modelování odběru jak individuálních objektů, tak celých úseků veřejného napájecího systému nízkého napětí. Poskytuje zároveň představu o míře nízkofrekvenčního rušení v různých částech sítě nízkého napětí a jeho výši vzhledem k platné legislativě.

1 FOURIEROVA ŘADA

Standardním aparátem pro posouzení míry deformace signálu je vyjádření funkce popisující signál v různých proměnných pomocí integrální transformace, tedy vyjádření funkce v různé bázi. Speciálním případem uvedené transformace je tzv. trigonometrická Fourierova transformace, která je tvořena bázovými funkcemi $\sin(ht)$ a $\cos(ht)$, popřípadě $e^{(jkt)}$, kde konstanta k představuje celé číslo, nebo reálnou proměnnou v případě Fourierovi transformace.

Základem pro odvození Fourierovy transformace je Fourierova řada periodické funkce, která spočívá ve skládání anizochronních harmonických kmitů téhož směru s takovými frekvencemi, aby výsledná funkce mohla být periodická, tedy $T_h = T_1 \cdot h$. Přičemž uvedená h je celé číslo. [3; 5]. Jinými slovy dochází k rozložení funkce na sadu harmonických složek vyšších řádů, které jsou celistvým násobkem harmonické základní způsobem uvedeným v rovnici (číslo rovnice).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cdot \sin(h\omega t) + \sum_{k=1}^{\infty} b_h \cdot \cos(h\omega t) \quad (1.1)$$

Zde a_h a b_h jsou koeficienty tvořící spektrum funkce $f(t)$.

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(h\omega t) dt \quad (1.2)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(h\omega t) dt \quad (1.3)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (1.4)$$

Přepočtem dle literatury [6] lze Fourierovu řadu vyjádřit také pomocí koeficientů, jenž přímo tvoří spektrální hustotu amplitud respektive fázové spektrum signálu.

$$c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (1.5)$$

$$\varphi_h = \arccos\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \quad (1.6)$$

Zde φ_h udává fázový posun a c_h amplitudu harmonické řádu h . Fourierovu řadu lze proto vyjádřit též pomocí rovnice (1.7).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \cdot \cos(h\omega t - \varphi_h) \quad (1.7)$$

Výsledná řada slouží k vyjádření téměř naprosté většiny průběhů, splňujících kromě periodičnosti, nebo předpokladu ustáleného stavu též např. tzv. Dirichletovi podmínky:

- $f(t)$ je na intervalu $\langle 0, T \rangle$ ohraničená
- $f(t)$ má na intervalu $\langle 0, T \rangle$ nejvýš konečný počet bodů nespojitosti prvního druhu
- $f(t)$ má na intervalu $\langle 0, T \rangle$ alespoň jednu z těchto vlastností:
 - a) má konečný počet bodů ostrého lokálního extrému
 - b) je po částech monotónní
 - c) je po částech hladká.

Zdroj: [3; 5].

Uvedené podmínky jsou však pouze postačující, nikoliv nutné pro zajištění konvergence limity posloupnosti částečných součtů řady v bodech nespojitosti prvního řádu a bodech spojitých. Existují tedy rovněž funkce, které uvedené podmínky nesplňují, nicméně jejich Fourierova řada konverguje a ve svém součtu tak odpovídá rozvíjené funkci. Lze tak zajisté nalézt značné množství podmínek konvergence, popřípadě uvažovat více druhů konvergenčí [3; 5]. Avšak vzhledem k zaměření práce je dané problematice věnována pouze omezená pozornost, nezbytná pro výklad kontextu vytvoření spektrální hustoty amplitud měřeného signálu.

1.1 Fourierova transformace

Neperiodický signál lze na oboru všech reálných čísel chápat jako limitní případ periodického signálu s periodou $T \rightarrow \infty$, čímž je suma jednotlivých koeficientů nahrazena integrálem. Frekvence se při zvolené periodě přirozeně blíží nule a diskrétní spektrum přechází na spektrum spojité. Signál $f(t)$ a jeho Fourierův obraz $F(f)$ jsou v tomto případě pouze odlišné obrazy identického signálu. Jsou tak vzájemně vázány přímou a inverzní Fourierovou transformací (1.8; 1.9). Dle použité literatury [6] jsou $f(t)$ a $F(f)$ označovány jako transformační pár mezi časovou a frekvenční doménou [5; 6].

$$F(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-ift} dt \quad (1.8)$$

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(f) \cdot e^{ift} df \quad (1.9)$$

Lze ovšem nalézt více definic transformace, konstanta 2π nemusí být při transformaci umocněna, přičemž by v takovém případě nebyla při inverzní transformaci uvedena. Konstantu lze též přesunout do exponentu uvnitř integrálu [5].

Vzhledem k uplatnění především číslicového zpracování signálu je evidentně nezbytné provést transformaci rovněž v diskrétních časových okamžicích, čili jednotlivých vzorků funkce $f(t)$. K tomuto účelu byla tudíž zavedena diskrétní Fourierova transformace (dále pouze DFT), spočívající v nahrazení integrálu součtem vzorků během ekvidistantní, nebo naopak různě dlouhé periody vzorkování.

$$F_h(h) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n \cdot (\cos(-2\pi \frac{n}{N} h) + j(\sin(-2\pi \frac{n}{N} h))) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n \cdot e^{j2\pi \frac{n}{N} h}, \quad h \in Z \quad (1.10)$$

$$f_n(n) = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{N-1} F_h(h) \cdot (\cos(2\pi \frac{n}{N} h) + j(\sin(2\pi \frac{n}{N} h))) = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^{N-1} F_h \cdot e^{-j2\pi \frac{n}{N} h}, \quad n \in Z \quad (1.11)$$

Zde n představuje pořadí individuálních vzorků signálu z celkového množství period základní harmonické N uvnitř okna. $f_n(n)$ reprezentuje změřenou velikost signálu v diskrétním okamžiku $t_n = n$. $F_h(h)$ následně obsahuje jednotlivé frekvenční složky výsledného spektra,

kteří jsou označeny h , přičemž tímto určují řád konkrétních harmonických složek signálu.

Z uvedeného vztahu 1.10 si lze všimnout skutečnosti, že během transformace je každému pořízenému vzorku přiřazena amplituda s orientací reprezentovanou bázovými funkcemi sinus a cosinus. Výsledkem transformace je proto interpolace, jenž v příslušný časový okamžik přímo prochází diskrétními body. Vztah pro DFT si lze proto také představit v maticové formě, kde mohou jednotlivé sloupce zahrnout příslušnou amplitudu v čase a jednotlivé řádky celistvé násobky základní frekvence. Zmíněné maticové vyjádření DFT je v použité literatuře [6] obvykle uvedeno takto:

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & \dots & W^{N-1} \\ 1 & W^2 & W^4 & \dots & W^{2(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & W^{N-1} & W^{2(N-1)} \dots & \dots & W^{(N-1) \cdot (N-1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_{n-1} \end{bmatrix}$$

obr. 1 Maticové vyjádření DFT

Kde $W = 2^{j2\pi/N}$. Z uvedeného zápisu je zřejmé, že řešení matice vyžaduje N^2 operací násobení v plovoucí řádové čárce. Vezmeme-li v úvahu značný počet vzorků, který je třeba v souladu s Shannon-Nyquist-Kotělnikovým teorémem, jako minimálním kritériem zpětné reprodukce dat pořídit, dosahuje frekvence záznamu dat při zkoumání vysokých řádů harmonických desítek až stovek kS/s. Následné zpracování dat je tedy přirozeně nezbytné zjednodušit.

Jednou z metod optimalizace zavedeného schématu je v literatuře [6] představen tzv. Danielsonův–Lanczosův algoritmus. Podstatou tohoto algoritmu je rozepsání posloupnosti o délce N jako sumy dvou, sudých a lichých DFT vzorků s délkou $N/2$. Rekurzí tohoto postupu lze dospět k triviálním DFT s délkou 1. Algoritmus je proto omezen pouze na celočíselné mocniny 2, ovšem nalezením vzájemně jednoznačné korespondence mezi DFT s délkou 1 a původními vzorky f_n permutací v bitově reverzním pořadí, lze po zpětné konstrukci DFT délky N dospět k řešení zahrnující pouze $N \cdot \log_2(N)$ operací násobení v plovoucí řádové čárce. Tento algoritmus se nazývá rychlou Fourierovou transformací (Fast Fourier Transform, dále pouze FFT) [6].

2 VÝKONY V OBVODECH S NELINEÁRNÍ ZÁTĚŽÍ

Výkon lze obecně určit součinem napětí a proudu. Přičemž lze následně rozlišit okamžitou hodnotu výkonu (2.1), jenž se vztahuje ke konkrétnímu časovému okamžiku, nebo střední hodnotu výkonu (2.2), která je vztažena k určitému časovému intervalu.

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) \quad (2.2)$$

Elektrický výkon je tedy evidentně závislý na tvaru napájecího napětí a proudu odebíraného spotřebičem a jejich případnému vzájemnému fázovému posuvu φ .

Dochází-li k šíření harmonických skrze distribuční systém, jehož individuální větve nejsou z hlediska výskytu harmonických proudů dimenzovány, šíří se v podobě harmonických napětí. Výchozím předpokladem bude tedy napětí, které lze v konkrétním místě rozvodného systému vyjádřit ve shodě s použitou literaturou [Kůs 2013] pomocí Fourierovi řady následovně:

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} u_k(t) \quad (2.3)$$

,zde

$$u_k(t) = \sqrt{2}U_k \cdot \sin(k\omega_1 t + \varphi_{uk}), k \in Z \quad (2.4)$$

,přičemž

$$u_0(t) = U \quad (2.5)$$

Obdobně lze vyjádřit rovněž proud, který spotřebičem prochází:

$$i(t) = \sum_{l=1}^{\infty} i_l(t) \quad (2.6)$$

,zde

$$i_l(t) = \sqrt{2}i_l \cdot \sin(l\omega_l t + \varphi_{il}), \quad l \in Z \quad (2.7)$$

,přičemž

$$u_0(t) = U \quad (2.8)$$

Dosazením vztahů 2.4 a 2.7 pro okamžité hodnoty napětí a proudu do rovnice pro střední hodnotu výkonu (2.2) lze za předpokladu shodných frekvenčních složek ($h = l = k \neq 0$) provést vhodnou úpravou příslušných goniometrických funkcí vyjádřením výkonu dle učebního textu [1], kryjícího činné ztráty v obvodu vzniklé přenosem energie a její přeměnu na jiný druh energie přímo ve spotřebiči, tedy činného (nebo také aktivního) výkonu individuálních harmonických složek P_h .

$$P_h = U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) \quad (2.9)$$

V případě nultého řádu trigonometrické Fourierovi řady odpovídá činný výkon prostému součinu stejnosměrné složky napětí a proudu, tedy:

$$P_0 = U_0 \cdot I_0 \quad (2.10)$$

Součtem činných výkonů jednotlivých harmonických a výkonu stejnosměrného lze v souladu s použitou literaturou [1] vyvodit vztah pro celkový činný výkon neharmonického napětí a proudu.

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots = \sum_{h=0}^{\infty} P_h = P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) \quad (2.11)$$

Stejným způsobem je možné dospět k jalové složce dodávaného výkonu, která je normou [7] označována Q . Jedná se o jalový výkon, který je též často označován jako reaktivní, neboť obvykle zajišťující vytvoření elektrického pole kapacitorů a magnetického pole induktorů. Jelikož je přeměna elektrické energie nepochybně reverzibilní, kmitá jalová složka výkonu střídavě mezi napájecím zdrojem a zásobníky elektrické energie v podobě indukčností a kapacit v obvodu. Používanou jednotkou této veličiny je dle ČSN IEC 60050-131/A1 z roku 2005 *voltampér* [1; 13].

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin(\varphi_h) \quad (2.12)$$

Z praktických důvodů je pro návrh obvodů z hlediska velikosti celkového proudu třeba definovat výkon za předpokladu čistě sinusového průběhu napětí a proudu bez vzájemného fázového posunu φ . K tomuto účelu slouží zdánlivý výkon S a jeho velikost odpovídá součinu efektivních hodnot napětí a proudu (2.15), koherentní jednotkou je tedy $V \cdot A$. Efektivní hodnotu konkrétních veličin lze na základě znalosti všech harmonických složek určit dle vztahu 2.13 pro napětí, nebo vztahu 2.14 v případě proudu. Efektivní hodnota je obvykle udávána jako RMS hodnota [1].

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \quad (2.13)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (2.14)$$

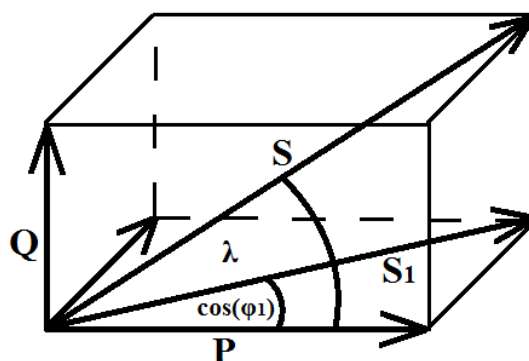
$$S = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} = U_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (2.15)$$

Přítomnost zdroje harmonických v soustavě způsobuje mimo jiné nerovnost dle vztahu 2.16. Tento jev je vyvolán spolupůsobením individuálních složek spektrální hustoty amplitud napětí a proudu. Dochází tak ke vzniku výkonu, jenž nepřispívá k tvorbě činného, nebo jalového výkonu. Vzniklá část je v souladu s tříložkovou koncepcí výkonů označována jako

deformační výkon, který je obvykle určen rovnicí 2.17. Zároveň tak mění trojúhelník výkonu na kvádr, tedy prostorový útvar dle obr. 2, zde S_1 reprezentuje zdánlivý výkon obvodu bez přítomnosti zdroje harmonických [1].

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (2.16)$$

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.17)$$



obr. 2 Kvádr výkonů

Posledním uvedeným výkonem v rámci této kapitoly je normou [7] a její pozdější úpravou z roku 2014 definovaný tzv. neaktivní výkon, který se označuje $Q_~$, nebo také $Q_$. Jedná se o imaginární část komplexního výkonu, definovaný vztahem 2.18.

$$Q_~ = \sqrt{S^2 - P^2} \quad [var] \quad (2.18)$$

Účinník λ je v použité literatuře [1] charakterizován jako míra využití účinného napětí a proudu pro přenos energie. Jako účinník je možné v českých normách nalézt rovněž $\cos(\varphi)$, v případě obvodu s nelineární zátěží udává $\cos(\varphi)$ pochopitelně pouze vzájemný fázový posun napětí a proudu stejného kmitočtu. Zahrnuje-li obvod pouze lineární zátěž, jsou oba účinníky shodné.

$$\lambda = \frac{|P|}{S} = \frac{\left| P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) \right|}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2}} \quad (2.19)$$

3 NEGATIVNÍ ÚČINKY ODBĚRU PROUDU NELINEÁRNÍMI SPOTŘEBIČI

S rostoucí základnou kvalitních polovodičových součástek a současným poklesem výrobních a pořizovacích nákladů dochází přirozeně k masivnímu nárůstu jejich množství. Společným jmenovatelem polovodičových součástek je deformace sinusové formy průběhu odebíraného proudu. Přestože je z hlediska norem vliv individuálních nelineárních spotřebičů na napájecí síť omezován, může hromadné působení většího počtu relativně malých spotřebičů vyvolat svým odběrem nelineárního proudu řadu nepříznivých důsledků.

Ve směru působení harmonických proudů, tedy směrem od rušícího zařízení, dochází mimo jiné k harmonickému zkreslení průběhu napětí na impedancích v různých částech sítě, tzn. vyvolání napěťových harmonických. Deformované napájecí napětí může následně omezit funkci citlivých spotřebičů, zapříčinit chybnou synchronizaci řídicí elektroniky, nebo je úplně vyřadit z provozu. Těmito spotřebiči mohou být klíčové systémy řízení procesu, nebo měřicí zařízení, která pro požadovaný způsob činnosti potřebují správnou úroveň napětí [14].

V prozozech často nelineární odběr proudu způsobuje zvýšení pořizovacích nákladů na elektrickou energii následkem větších ztrát na přenosových cestách (zejména vlivem skinefektu). Dochází též ke vzniku deformačního výkonu a značnému zatížení jalovým výkonem, jelikož činnou práci zajišťuje pouze reálná část základní harmonické proudu. Zvýšení ztrát v napájecí síti v důsledku harmonického zkreslení proudu je dle použitých zdrojů [15] popsáno rovnicí 3.1.

$$\frac{\Delta P_h}{\Delta P_1} = \frac{\sum_{h=1}^N R \cdot I_h^2}{R \cdot I_1^2} = \frac{I_1^2 + \sum_{h=1}^N I_h^2}{I_1^2} = 1 + THD_I^2 \quad (3.1)$$

Zde celé číslo h odpovídá řadu harmonické složky proudu, která je z hlediska kmitočtu shora omezena nejvyšší harmonickou složkou N .

Velkým nebezpečím z hlediska působení harmonických proudů v síti je riziko vytvoření oscilačních obvodů v rozsahu vyšších kmitočtů. Vzniklá rezonance může následně způsobit zničení nechráněného kompenzačního zařízení.

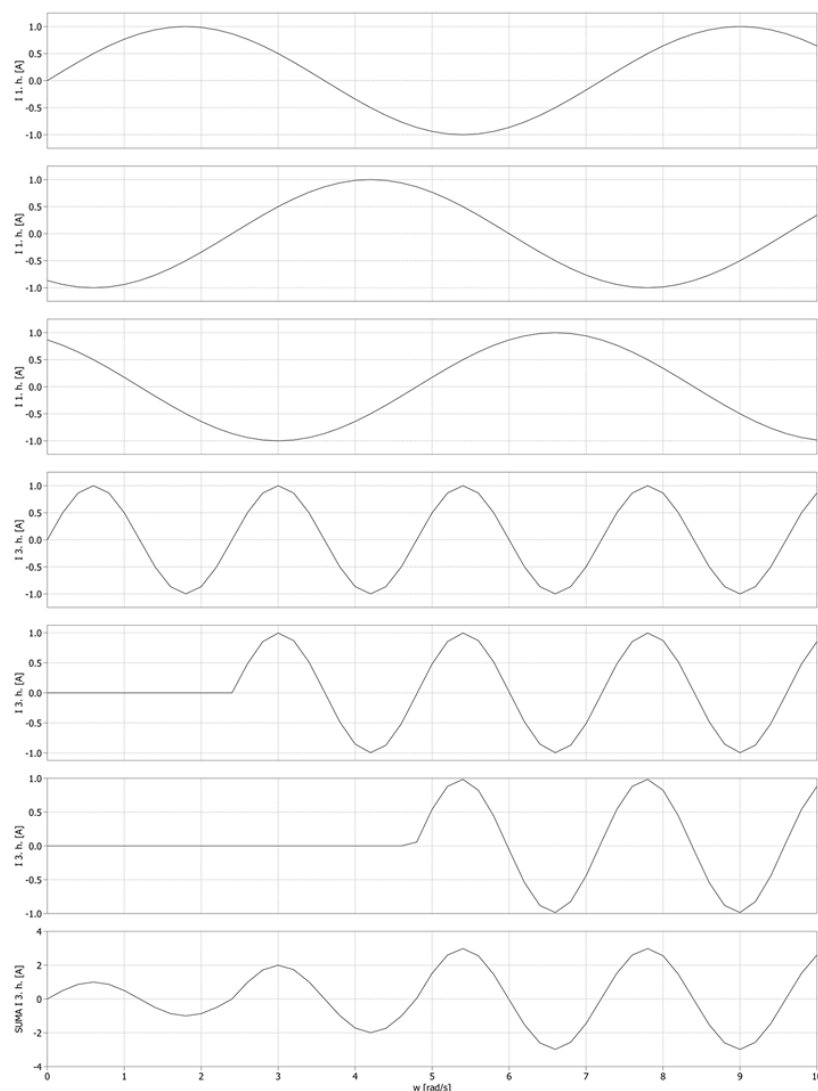
Vysokofrekvenční podíly vyšších harmonických složek proudu často vlivem vířivých proudů způsobují rovněž větší tepelné namáhání transformátorů a kabelů v síti. Jelikož s rostoucím řádem harmonických složek vzrůstají ztráty vířivými proudy exponenciálně,

může dojít k podstatnému snížení životnosti zmíněných částí obvodu.

3.1 Negativní účinky harmonických proudů lichých řádů o násobku 3

Velice často diskutovanými řády harmonických proudů jsou z hlediska nepříznivých účinků především ty, jejichž kmitočet odpovídá lichému násobku 3 kmitočtu síťového, dále pouze $3n$ harmonické proudů. Působí-li například zmíněné řády harmonických proudů ve vinutí transformátoru, pak je-li toto vinutí zapojeno do hvězdy, působí transformátor vzhledem k $3n$ harmonickým proudům jako filtr. Dochází tedy k uzavření uvedených násobků lichých harmonických složek skrze vinutí transformátoru, zatímco ostatní řády harmonických proudů procházejí dále do sítě. Zmíněné komponenty je proto vlivem cirkulace $3n$ harmonických proudů nezbytné mnohdy překompenzovat, nebo redukovat maximální zatížení v již existujícím zařízení dle dříve stanovené pracovní oblasti.

Dalším velice důležitým vlivem vyšších harmonických složek celkového spektra signálu, který bude v rámci této kapitoly uveden, je přetížení středního vodiče trojfázové soustavy, při zapojení do hvězdy. Za předpokladu čistě sinusového průběhu proudů se vzájemným fázovým posunem jednotlivých fází o 120° dochází k vektorovému součtu zmíněných fázových proudů, přičemž výsledkem uvedeného součtu je proud středním vodičem třífázové soustavy, jenž je v případě symetrického zatížení nepochybně nulový. Působením harmonického zkreslení signálu ovšem dochází k vzájemnému aritmetickému součtu lichých harmonických o násobku 3, jejichž vzájemný fázový posun je roven trojnásobku fázového posuvu harmonické základní, která je naznačena v provedené simulaci na *obr. 3*. Dle závěrů v použitých materiálech [16] bylo během případových studií v komerčních budovách dokázáno, že proud ve středním vodiči se pohybuje mezi 150% až 210% hodnoty proudů základní harmonické.



obr. 3 Sčítání násobků harmonických proudů řádů lichých násobků tří ve středním vodiči trojfázového systému při zapojení do hvězdy

Literatura [1] uvádí obecný vztah pro výpočet proudu nulovým vodičem v případě souměrného a vyváženého odběru všech fází:

$$I_N = 3 \cdot \sqrt{\sum_{h=3}^{\infty} I_{F,h}^2} \quad , \text{ pro } h = 3, 9, 15, 21, \dots \quad (3.2)$$

Zde proud $I_{F,h}$ reprezentuje proud individuální fáze F řádu h .

Problematiku přetěžování středního vodiče trojfázových soustav lze během návrhu sítě řešit volbou vodiče většího průměru, větším počtem paralelně spojených vodičů, nebo přímým omezením elektromagnetických emisí filtračně kompenzačním zařízením, které

budou dále uvedeny. Problematikou zatížitelnosti vícežilových kabelů se dle závěrů [16] pouze informativně zabývá norma IEC 60364-5-523 procentuálním snížením zatížitelnosti kabelu v závislosti na obsahu lichých harmonických násobků tří v celkové spektrální hustotě amplitud proudu.

Uvedená rizika je třeba chápat pouze jako enumeraci možných nepříznivých vlivů nízkofrekvenčního elektromagnetického rušení, šířícího se skrze vodiče. Vzniká tak zřejmá potřeba měření a odpovídající analýzy celé problematiky.

4 VÝCHOZÍ NORMY Z OBLASTI EMC

Systém ČSN, který se zabývá elektromagnetickým působením je obvykle přebírán z mezinárodní normy (IEC), popřípadě normy evropské (EN). Lze ovšem nalézt též ČSN vycházející z mezinárodních norem pro obecnou standardizaci (ISO), jejíž vybrané části se týkají elektromagnetické kompatibility. V případě vysokofrekvenčního rušení mnohdy ČSN vychází ze standardů Zvláštního mezinárodního výboru pro rádiové (resp. vysokofrekvenční) rušení (CISPR). Vzhledem k zaměření této práce budou dále rozebrány pouze normy, zabývající se přímo nízkofrekvenčním rušením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí (tedy normy s označením ČSN EN, popř. ČSN IEC).

V souladu s literaturou [1] a [17] lze strukturu norem v rámci elektromagnetické kompatibility rozdělit do tří oblastí:

- základní normy (Basic Standards)
- kmenové normy (Generic Standards)
- normy výrobků (Product Standards)

Základní normy charakterizují EMC, popisují zkušební zařízení a zároveň poskytují podmínky a metody testování a příslušné dokumentace [1]. Jedná se tedy jmenovitě o vhodnou terminologii, popis prostředí, nízkofrekvenční, vysokofrekvenční a impulzní odolnost a nízkofrekvenční a vysokofrekvenční vyzářování [17].

Kmenové normy, které lze v některých českých publikacích rovněž nalézt jako normy všeobecné, definují minimální požadavky a metodiku měření veškerých výrobků, nebo systémů v konkrétním typu elektromagnetického prostředí (obytná prostředí,

průmyslová prostředí, speciální prostředí apod.), přičemž se současně odvolávají na normy základní [1]. Kmenové normy jsou v učebním textu [17] obecně zaměřeny na vyzářování (harmonické, kolísání napětí apod.), odolnost (elektrostatický výboj, rychlé napěťové přechodové jevy apod.), prostory (obytné, obchodní a lehký průmysl) a průmyslové prostředí.

Normy výrobků jsou nejvíce preferované předpisy, neboť vymezují přísné požadavky pro konkrétní výrobky, nebo skupiny výrobků a zařízení podobných, ze všech hledisek. Samotné požadavky na EMC tedy tvoří pouze část požadavků. V případě, že není určitý výrobek, nebo skupina výrobků a zařízení v normě výrobků konkrétně specifikován, řídí se výrobce požadavky kmenové normy. Normy výrobků tudíž tvoří nejvyšší úroveň v hierarchii platné legislativy. Zdroj [1] rozlišuje tyto skupiny výrobků:

- spotřebiče pro domácnost, kancelářské stroje a přístroje, přenosné elektrické nářadí a podobné elektrické přístroje s výjimkou zařízení informační techniky (ZIT),
- průmyslová zařízení s výjimkou ZIT,
- zařízení informační techniky a telekomunikační zařízení,
- televizory a podobná zařízení,
- dopravní a přepravní zařízení,
- lékařská zařízení,
- měřicí a testovací zařízení.

Některé ze zahraničních společností, které se věnují testování výrobků z hlediska EMC dále rozlišují tzv. normy skupiny výrobků (Product Family standards), které řeší zkušební úrovně a výkonnostní kritéria specifických kategorií výrobků a systémů. Do této skupiny patří například ČSN EN 50498, zabývající se elektromagnetickou kompatibilitou elektronických zařízení pro dodatečnou montáž ve vozidlech, nebo ČSN EN 50445, základní výrobní norma k prokazování shody zařízení pro odporové svařování, obloukové svařování a příbuzné procesy se základními omezeními týkajícími se vystavení člověka elektromagnetickým polím (0 Hz - 300 GHz).

Existují rovněž normy výrobce a podnikové normy (PNE). Zejména v oblasti automobilového průmyslu vznikají požadavky na elektromagnetickou kompatibilitu, které odvolávají se na mezinárodní nebo vnitrostátní normy zahrnují specifické požadavky, které musí podnik a případní dodavatelé splnit. S ohledem na zaměření práce budou dále rozebrány pouze normy, týkající se zpracování nízkofrekvenčních (zpravidla do 9kHz, nejedná-li se o systém síťové signalizace) elektromagnetických emisí ve střídavých veřejných sítích

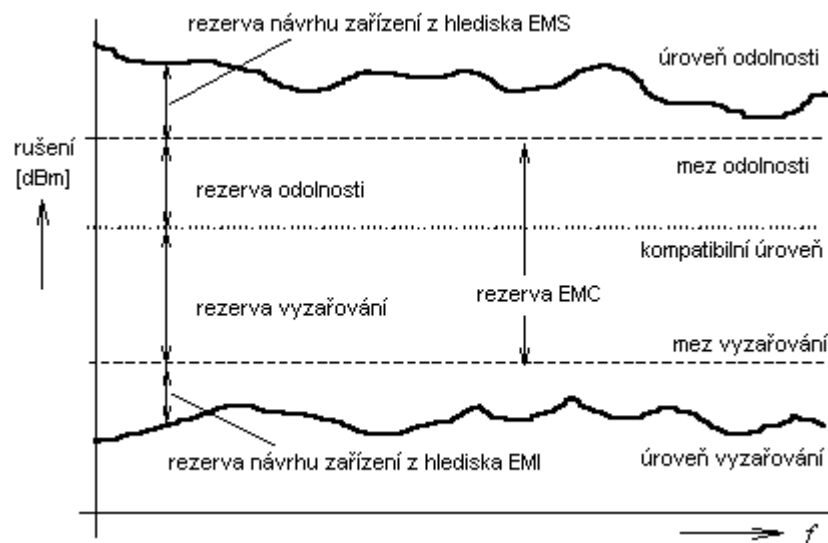
nízkého napětí.

4.1 ČSN EN 61000-2-2

Posouzení úrovně harmonických napětí v měřeném úseku sítě je v této práci provedeno komparací naměřených harmonických napětí v různých částech sítě s platnou normou ČSN EN 61-000-2-2: Prostředí - Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí. Uvedená norma se zabývá elektromagnetickým rušením skrze vedení ve frekvenčním rozsahu 0 až 9 kHz s rozšířením do 148,5 kHz v případě systémů signálů ve veřejných rozvodných sítích. Kompatibilní úrovně normy se vztahují na veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí, jejichž jmenovité fázové napětí nepřekračuje hodnotu 420V, nebo 690V napětí sdruženého, se jmenovitým kmitočtem 50Hz, nebo 60Hz.

4.1.1 Kompatibilní úroveň, úroveň odolnosti a mez emise

Kompatibilní úroveň slouží nejen jako zkouška minimální úrovně odolnosti zařízení v daném elektromagnetickém prostředí, indikuje zároveň maximální pravděpodobné úrovně rušení, které lze do tohoto prostředí šířit. Cílem návrhu výrobku, či systému je tedy z hlediska EMC dodržení kompatibilní úrovně, která je v ideálním navržena s vhodnou rezervou dle obr. 4 [1; 8].



obr. 4 Vzájemný vztah kompatibilních úrovní, úrovní a mezí odolnosti a úrovní a mezí vyzařování.

Zdroj:[18]

Z hlediska odolnosti připojených zařízení jsou kompatibilní úrovně stanoveny pro individuální projevy elektromagnetického rušení, v případě harmonických a meziharmonických navíc pro individuální frekvenci, popř. frekvenční rozsah. Spolupůsobení jednotlivých elektromagnetických vlivů tak může navzdory dodržení příslušných kompatibilních úrovní zhoršit funkci připojeného zařízení. Norma v takovém případě přirozeně nemůže efektivně posuzovat kombinace zmíněných vlivů. Vhodným řešením je dle doporučení ČSN EN 61-000-2-2 provést analýzu odolnosti výrobku vzhledem ke konkrétní kritické kombinaci elektromagnetického rušení [8].

4.1.2 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nízkého napětí

tab. 1. Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická lichých harmonických napětí, vyjma násobku 3, ve veřejných sítích nízkého napětí dle [8]

Liché harmonické, vyjma násobku 3	
Řád harmonické h	Napětí harmonické %
5	6
7	5
11	3,5
13	3
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \cdot (17/h) - 0,27$

tab. 2. Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická lichých harmonických napětí o násobku 3 ve veřejných sítích nízkého napětí dle [8]

Liché harmonické o násobku 3	
Řád harmonické h	Napětí harmonické %
3	5
9	1,5
15	0,4
21	0,3
$21 \leq h \leq 45$	0,2

Kompatibilní úroveň pro celkové harmonické zkreslení je $THDU = 11\%$. V normě je dále stanoven činitel k , jímž jsou v případě působení velmi krátkodobých účinků kompatibilní úrovně individuálních řádů harmonických napětí násobeny. Výpočet činitele je následující:

$$k = 1,3 + \frac{0,7}{45} \cdot (h - 5) \quad (4.1)$$

Kompatibilní úrovně uvedené v této normě jsou vztaženy ke společnému napájecímu bodu, běžně označovaném jako PCC (V této práci je společný napájecí bod soustavy označen v souladu s původním označením sběrného místa během měření PM viz *obr. 5*)

4.2 ČSN IEC 60050-131

Další uvedená norma slouží jako slovník, jenž byl použit zejména v rámci korektní terminologie během teoretické části práce.

Jedná se o všeobecný mezinárodní slovník, který je v části 131 zaměřen na teorii elektrických a magnetických obvodů, všeobecné termíny vztahující se k prvkům obvodu a k jejich charakteristikám, termíny vztahující se k topologii sítí, k n-branům a dvojbranům a k metodám teorie obvodů [7].

4.3 ČSN EN 61000-4-7

Během popisu a následném zpracování obdržených dat je rovněž vhodné popsat druh měřených dat a okolnosti za kterých v souladu s platnou legislativou měření probíhalo. Uvedená část 4. dílu normy se zabývá obecnými pokyny pro měření a požadavcích na měřicí přístroje harmonických a meziharmonických kmitočtů do 9kHz v rozvodných sítích a zařízeních, jenž jsou do této sítě připojeny [9].

Nízkofrekvenční rušení je v [9] definováno jako nepříznivé elektromagnetické působení do kmitočtu 9 kHz. Měření charakteristických harmonických složek ovšem obvykle probíhá pouze do řádu $h = 50$, popř. $h = 40$, tedy kmitočtu 2,5 kHz, popř. 2 kHz. Vyšší frekvence v oblasti nízkofrekvenčního rušení je označováno jako akustické nízkofrekvenční rušení, které svým působením ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů, jako např. rozhlas, nebo měřicí a řídicí zařízení. Tato práce je však věnována výhradně problematice charakteristických harmonických v nízkofrekvenční oblasti. Proto zde nebude

věnována pozornost měření nad rozsahem 2,5 kHz [3].

4.3.1 Struktura přístroje a charakter pořízených výsledků

Hlavní měřicí přístroj se obecně skládá ze vstupních obvodů s filtrem na bázi dolní propusti, zajišťujícím dodržení minimální vzorkovací frekvence dle Nyquistova-Shannonova vzorkovacího teorému. Následuje A/D převodník obsahující vzorkovací a paměťové jednotky. Další část obecné struktury přístroje zajišťuje synchronizaci, ze které vyplývá požadavek na příslušný tvar okna, čili zpracovávané části signálu pomocí DFT, popř. FFT (viz. kapitola 1). Poslední část tvoří procesor pro výpočet koeficientů DFT, popř. FFT.

Šířku okna je za předpokladu pravoúhlého vážení a síťového kmitočtu 50Hz doporučeno zvolit jako desetinásobek periody měřeného signálu. V tomto případě jsou výstupní hodnoty tvořeny individuálními koeficient a_h a b_h (viz. kapitola 1), které jsou dále zpracovány (seskupování, vyhlazování atd.). Pořízené výsledky harmonických proto tvoří pouze amplitudy provedené transformace uvnitř individuálních analyzovaných oken, tedy za dobu 200ms. Kupříkladu v případě 3s intervalu, který je zároveň uvažován jako efektivní měřicí čas (viz. kap. 2.2.2 [3]) je proto přirozeně pořízeno 15 hodnot, ze kterých je třeba v souladu s literaturou [1] vhodně vyvodit průměrnou hodnotu dle rovnice 4.2.

$$C_{hvs} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^M C_{hk}^2}{M}} \quad (4.2)$$

Zde M je počet všech zaznamenaných hodnot a C_h hodnoty zaznamenaných amplitud provedené transformace v jednotlivých oknech, jejichž pořadí je určeno hodnotou k . C_{hvs} lze tedy chápat jako efektivní hodnoty harmonických, zaznamenané během jednoho intervalu měření.

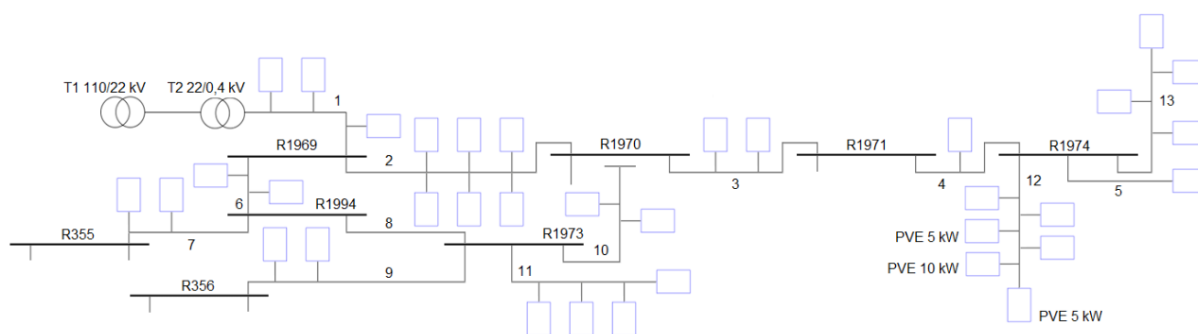
4.3.2 Třídy přesnosti

Norma [9] rozlišuje pouze dvě třídy přesnosti s požadavky vztaženými k jmenovitým rozsahům napětí a proudu měřicího přístroje. Použití přístrojové třídy I je doporučeno v případě ověření shody s normou během měření emisí, nebo ověření platnosti smluvních závazků mezi odběratelem a dodavatelem, tedy požadavku na značnou přesnost a spolehlivost pořízených výsledků. Třída II slouží především ke zjišťování orientačních výsledků.

5 ROZBOR A NÁSLEDNÉ ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT

5.1 Data pro zpracování

Data obdržená pro tuto práci byla poskytnuta v rámci spolupráce katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni a společností ČEZ a.s., pracoviště Plzeň během měření kvality elektrické energie. Místo odběru je z důvodu ochrany citlivých informací, které mohou zpracované výsledky poskytnout blíže nespecifikovaná část obce, přičemž jednotlivé odběry jsou tvořeny výhradně rodinnými domy. Zkoumaná část sítě zahrnuje 35 rodinných domů. Tři z těchto domů jsou navíc opatřeny vlastním fotovoltaickým zdrojem elektrické energie (instalovaný výkon 10kW, 5kW a 5kW, dále pouze PVE). Lze tedy dle odběrů během jednotlivých dnů posoudit míru působení připojených měničů na celkové fungování soustavy. Měření probíhalo ve 3 různých částech sítě. Jednotlivá odběrná místa jsou označena a zpracována pod označením R1974, R1970 a PM0263. Odběrné místo R1974 reprezentuje měření vybraného rodinného domu a lze tak získané hodnoty použít jako ukázkou individuálního odběru ve srovnání s odběrem celého systému, který je měřen za transformátorem v místě označeném jako PM0263. Odběr R1974 tedy může po následném zpracování sloužit jako ukázkový exemplář při volbě velikosti amplitud jednotlivých harmonických složek generovaných individuálními domácnostmi během návrhu modelu celého systému.



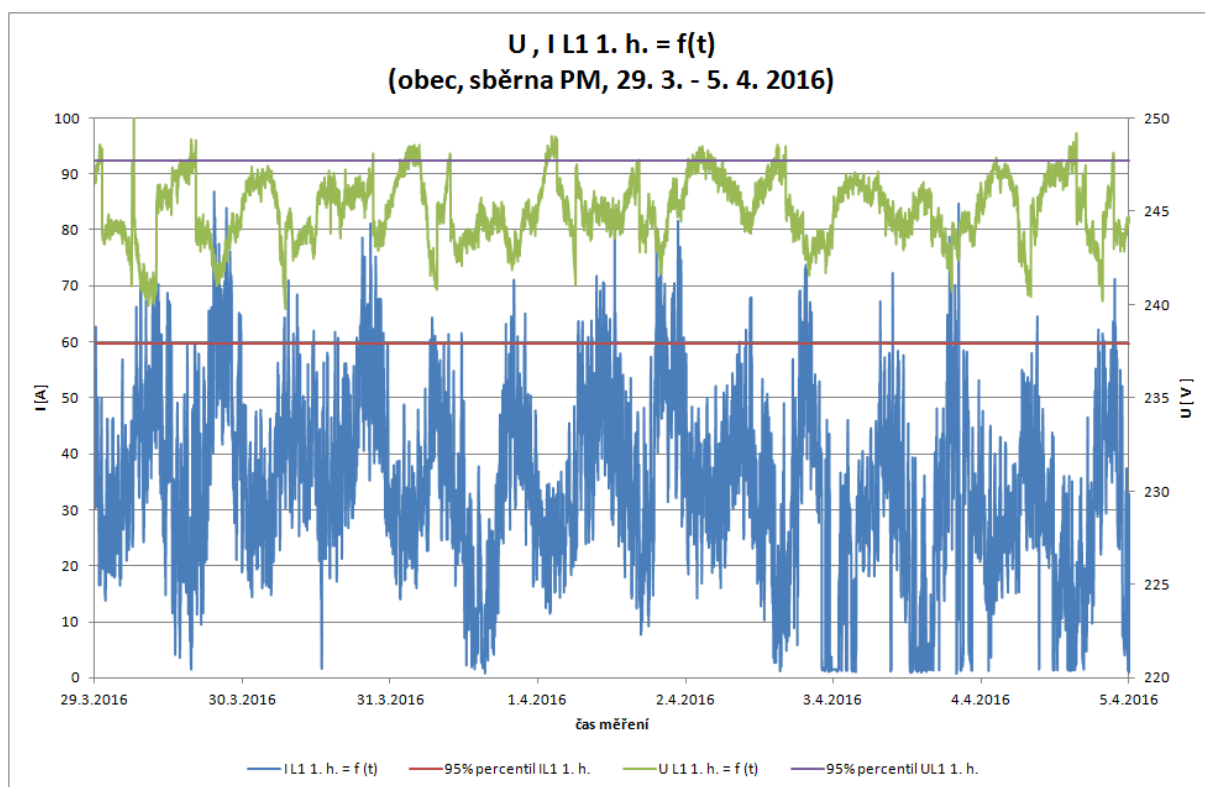
obr. 5 Schéma měřené sítě

Měření probíhalo v rámci hodnocení kvality elektrické energie, tedy míry nepříznivých zpětných vlivů odběratelů na veřejnou střídavou distribuční síť nízkého napětí. Celková doba měření je přibližně 15 dní, přičemž záznam efektivních hodnot dle vztahu 4.2

probíhal ve 30 sekundovém intervalu. Z uvedených dat byl na základě porady s vedoucím práce prof. Ing. Kůsem, CSc. zpracován pouze týden od 29. 3. do 5. 4. 2016. Přesto však přirozeně vzniká vlivem značné frekvence záznamu dat během dlouhého časového úseku velké množství dat, které je třeba pro přehledné posouzení vlastností systému provést.

5.2 Prosté zobrazení vybraných veličin v čase

Statistické vyhodnocení dat je v nejprve provedeno prostým zobrazením vybraných proměnných v čase s příslušnými numerickými kvantily. Zpracovanými proměnnými jsou harmonické složky napětí a proudu do řádu 25, činný, jalový a deformační výkon a patřičné ukazatele celkového zkreslení sinusové formy signálu napětí a proudu *THD*. Zpracování dat je provedeno zprvu pro celý týden a následně pro individuální dny. Všechny tyto veličiny byly změřeny na jedné fázi. Předpokládaná třída přesnosti je vzhledem k charakteru měření *I*. Stejnou úvahou lze dospět k závěru, že metoda měření odpovídá dle [7] pravděpodobně třídě A. Naměřené výsledky proto jistě musí odpovídat náležitým kompatibilním úrovním, stanoveným platnou legislativou. Součástí práce je tedy rovněž posouzení výsledků měření ve vztahu k příslušným normám, které byly popsány v kap. 4.1.



obr. 6 Prosté zobrazení odběru 1. harmonické napětí a proudu celé analyzované soustavy

(obec, sběrna PM, 29. 3. 2016 ÷ 5. 4. 2016)

Na obr. 6 uveden odběr základní harmonické napětí a proudu během celého zkoumaného týdne. Základní harmonická složka napětí je zde evidentně ovlivněna průběhem odebírané základní harmonické složky proudu, která má přirozeně dominantní vliv na velikost odebíraného zdánlivého výkonu a jeho činné a jalové složky. Počet připojených domácností není příliš vysoký, průběh odběru zmíněného proudu proto během jednotlivých dní plně nekoresponduje s průběhem denního diagramu zatížení jako například v případě odběru sídlištní zástavby (obr. 7).

Data pořízená v rámci měření kvality elektrické energie v bytech panelových domů jsou podrobně popsána v diplomové práci Ing. Jana Pikouse: *Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů* a literatuře [3]. Záznam vzdáleného odběru městské zástavby bude za účelem dalšího srovnání obdržených dat z distribučního systému obce chápán jako odběrné místo individuální domácnosti panelové budovy.

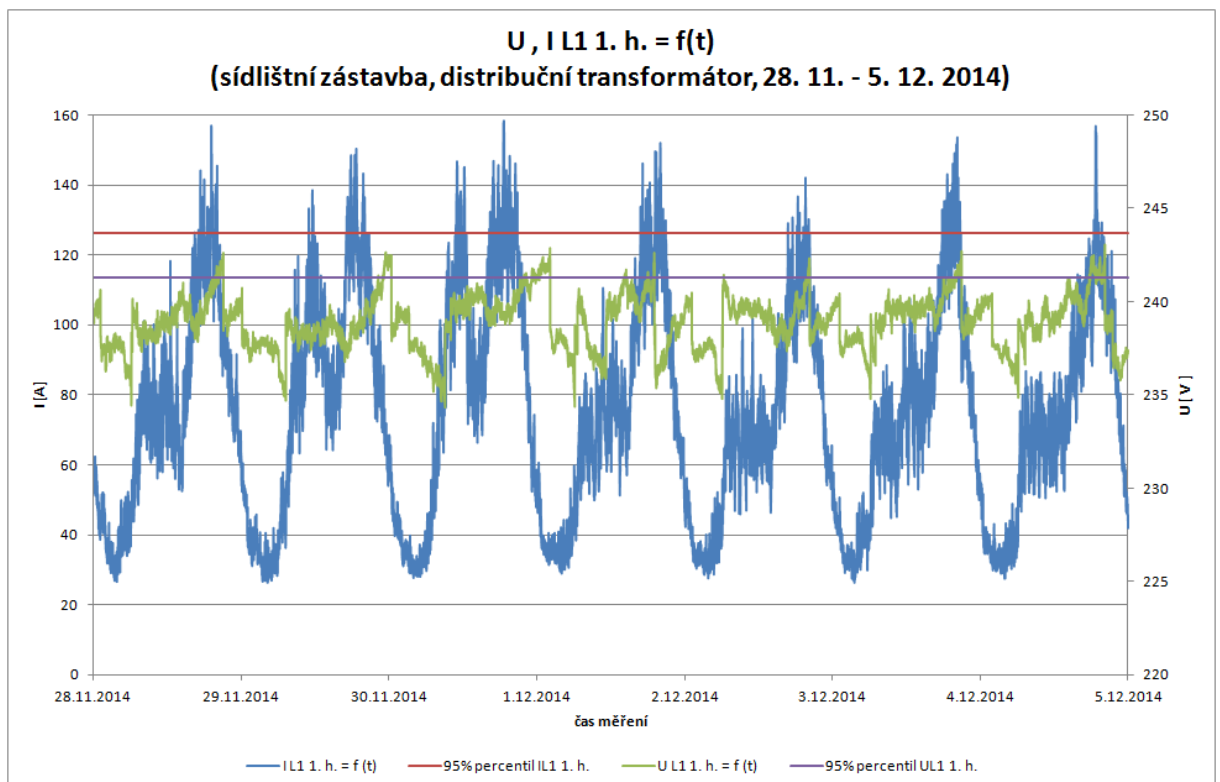
Protokol o měření základní harmonické složky napětí a proudu by se však již v uvedeném počtu 35 domácností neměl lišit tak dramatickým způsobem. Průběh odběru elektrické energie během víkendu 2. a 3. 4. je samozřejmě způsoben odlišnou spotřební aktivitou obyvatelstva, avšak značné rozdíly se projevují rovněž během pracovního týdne. Zatímco například během středy 30. 3. a pátku 1. 4. průběh odebíraného proudu předpokládanému dennímu diagramu zatížení přibližně odpovídá, během úterý 29. 3. a čtvrtka 31. 3. odpoledne byl zaznamenán nulový nebo téměř nulový odběr. S přihlédnutím k závěrům [3] nemůže tento jev vlivem aktivity spotřebičů s permanentním odběrem a spotřebičů v režimu stand-by nastat v případě sítě bez přítomnosti vnitřního zdroje elektrické energie. Následující kapitola se proto věnuje problematice vlivu PVE na zkoumanou část veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí.

5.3 Vliv PVE na chování zkoumané části veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí

S rozvojem alternativních možností výroby elektrické energie z obnovitelných zdrojů vyplývá nutně problematika nejen efektivní přeměny různých forem energie na energii elektrickou, ale také vliv invertoru, neboli střídače, který v případě fotovoltaických systémů přeměňuje stejnosměrnou energii fotovoltaických článků na elektrickou energii střídavou.

Růst vyvíjených typů stále sofistikovanějších měničů a způsobů jejich řízení přirozeně umožňuje realizaci fotovoltaických elektráren malého instalovaného výkonu u rodinných domů. Interakce měničů fotovoltaických systémů s napájecí soustavou je proto poměrně aktuální tematikou zejména z pohledu jejich zpětného elektromagnetického působení. Díky poskytnutým údajům, popsaným v kapitole 5.1 lze krátce zhodnotit spolupůsobení konkrétních střídačů v reálné distribuční síti za předpokladu splnění všech nutných podmínek pro připojení k veřejné napájecí síti příslušné napěťové hladiny. Podmínkami pro zpětné působení místních výroben elektrické energie na napájecí síť se mimo jiné v kapitole 12 zabývá literatura [20], vycházejíc přitom ze zásad [8] a podnikových norem PNE 33 3430-0 až PNE 33 3430-6.

Jelikož je průběh odběru základní harmonické složky napětí a proudu z *obr. 7* značně ovlivněn proměnlivostí počasí, která se přirozeně projevuje ve formě energie, dodávané měničem připojených fotovoltaických jednotek v síti, bude nejprve uveden příklad průběhu základní harmonické složky proudu blíže nespécifikovaného Plzeňského sídliště bez připojených měničů PVE.



obr. 7 Prosté zobrazení základní harmonické napětí a proudu sídlištní zástavby v čase
(sídlištní zástavba, distribuční transformátor, 29. 3. 2016 ÷ 5. 4. 2016)

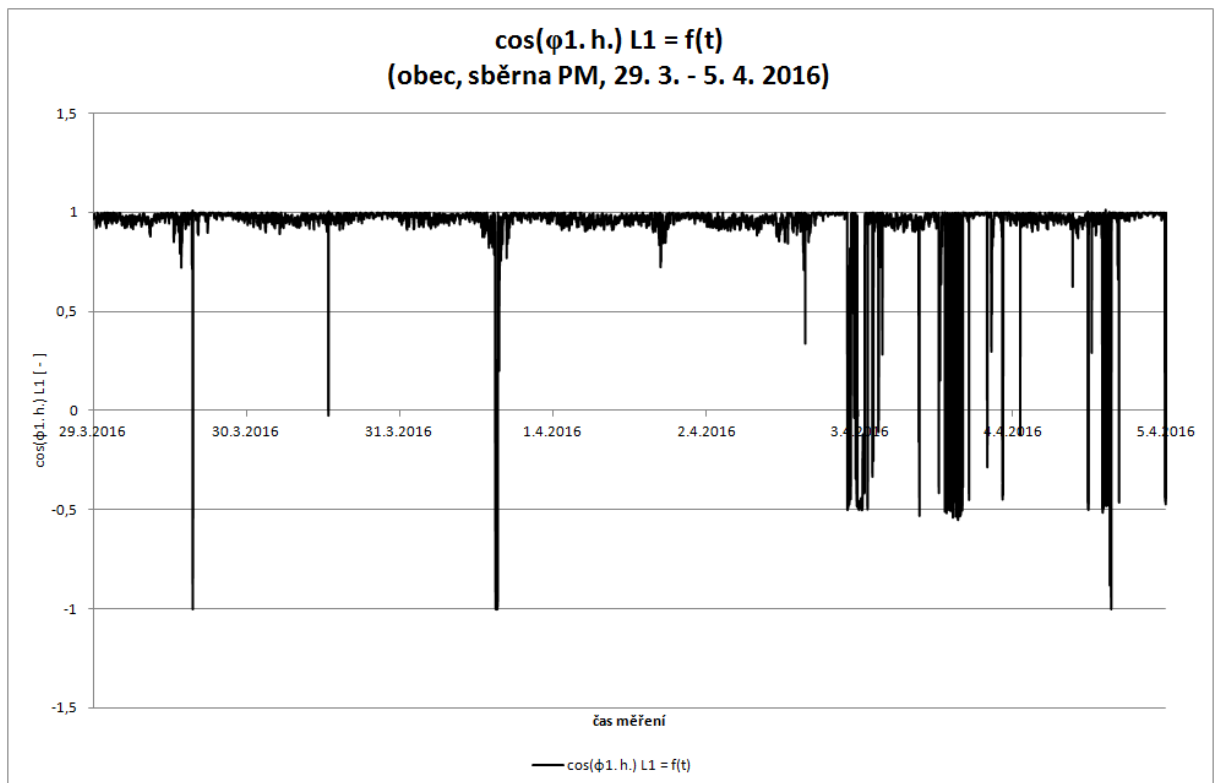
Tvar křivky odebíraného proudu na *obr. 7* již mnohem přesněji odpovídá běžně

předpokládanému diagramu zatížení. Lokální maxima průběhu umožňují lehce rozeznat odběr základní harmonické proudu během jednotlivých pracovních dnů a během víkendu.

Na základě průběhu odebíraného proudu z *obr. 7* lze nyní říci, že spotřeba elektrické energie domácností během víkendu je podstatně vyšší především kvůli zvýšené odběrové aktivitě obyvatelstva během dne a delšímu špičkovému odběru během večerních hodin. Tato odchylka od, z hlediska konzumace elektrické energie, běžného všedního dne společně s působením samostatných zdrojů elektrické energie způsobuje, že se zkoumané víkendové období městského satelitu z *obr. 6* stává velice nepřehledné.

5.3.1 Ovlivnění účinníku základní harmonické

Dalším možným hlediskem této kapitoly je pro přehlednost zobrazení účinníku základní harmonické.



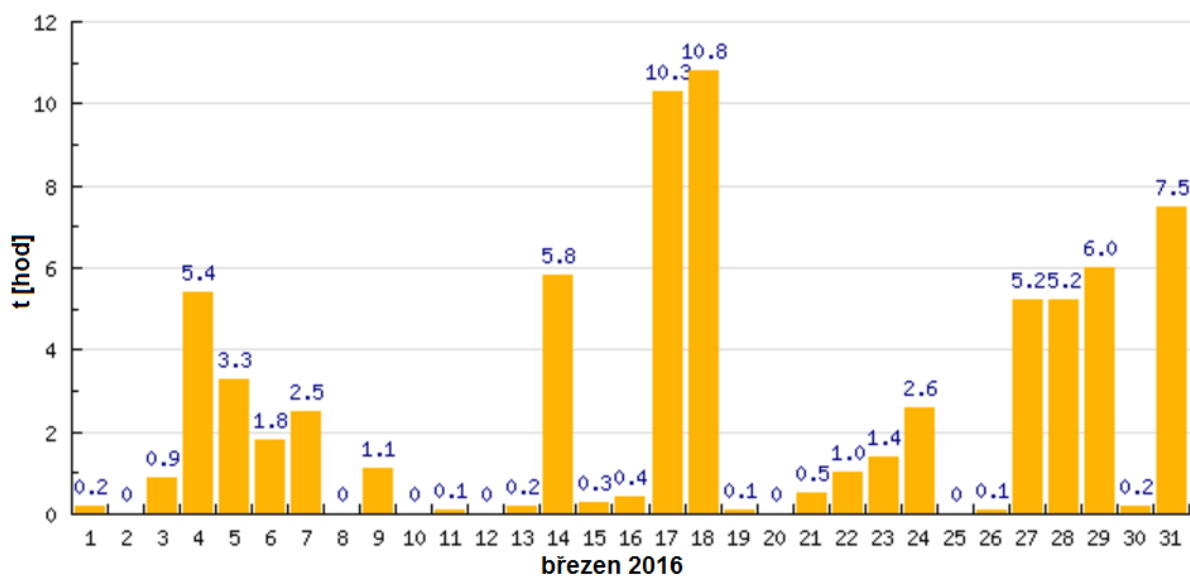
obr. 8 Prosté zobrazení $\cos(\varphi_1)$ celé soustavy v čase (obec, sběrna M, 29. 3. 2016 ÷ 5. 4. 2016)

Zobrazením závislosti dle *obr. 8* lze ověřit dříve uvedené závěry o přítomnosti projevujících se PVE. O této skutečnosti svědčí nulová nebo záporná velikost $\cos(\varphi_1)$, tedy fakt že v těchto okamžicích byl odběr 1. harmonické činného výkonu zkoumané soustavy nulový, popř. záporný. Nízká absolutní hodnota $\cos(\varphi_1)$ během odpoledních hodin neděle 3. 4.

je opět pravděpodobně způsobena činností měničů připojených k PVE, kteréžto pokrývají většinu poptávaného činného výkonu soustavy, resp. jeho základní harmonickou. Dodávaný výkon skrze distribuční transformátor tedy pokrývá pouze malou část spotřebované energie a ovlivňuje tak vzájemný poměr zaznamenaných harmonických složek činného a jalového výkonu, které dle rov. 5.1 určují velikost $\cos(\varphi_1)$.

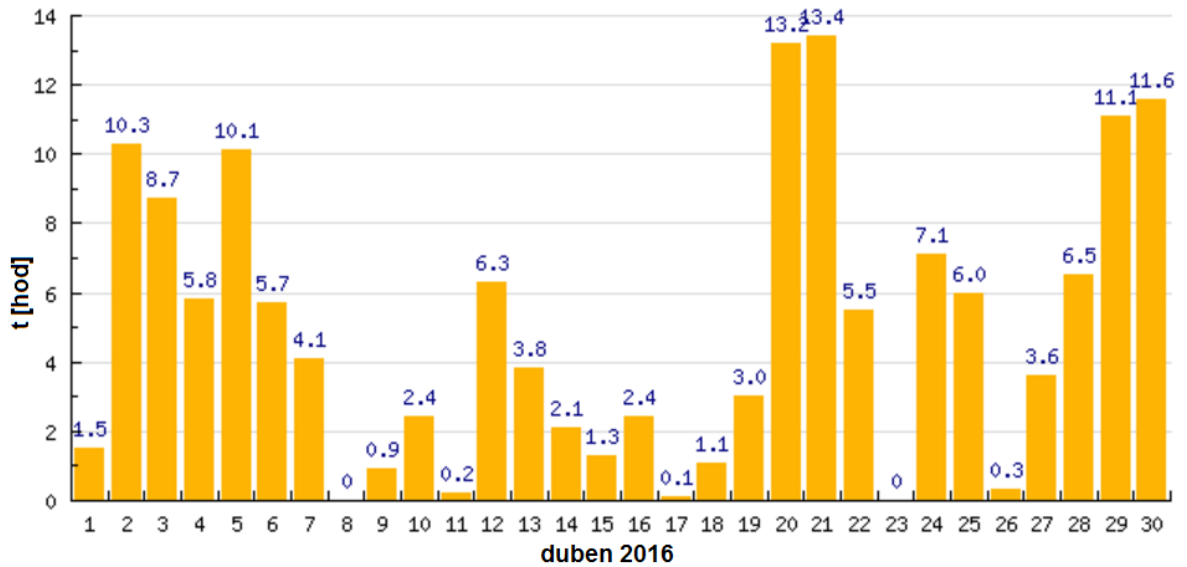
$$\cos(\varphi_h) = \frac{P_h}{\sqrt{P_h^2 + Q_h^2}} \quad (5.1)$$

Zajímavým úhlem pohledu může též být srovnání průběhu z *obr. 8* s průběhem klimatu během stejného období. K tomuto účelu byla použita data meteostanice Českého hydrometeorologického ústavu Plzeň - Mikulka ze serveru <http://www.in-pocasi.cz/>.



obr. 9 Délka trvání slunečního svitu (březen 2016)

Zdroj: [www.in-pocasi.cz]



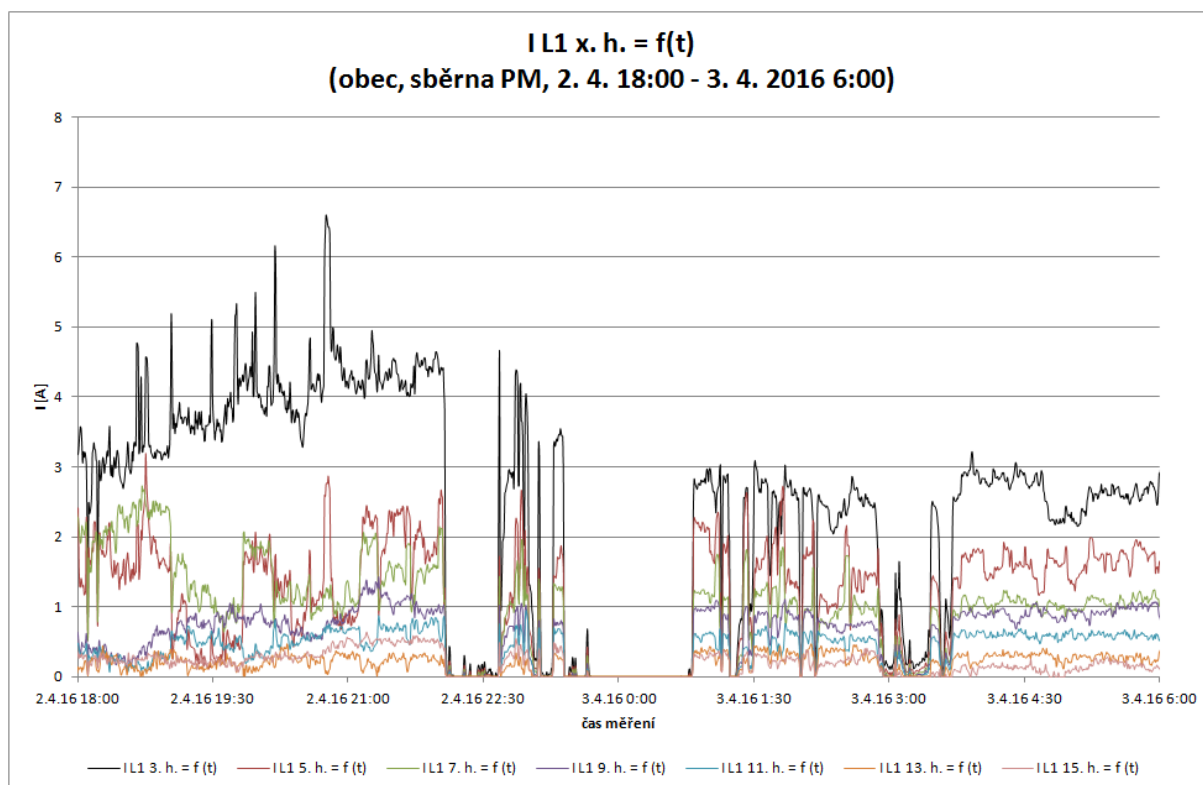
obr. 10 Délka trvání slunečního svitu (duben 2016)

Zdroj: [www.in-pocasi.cz]

Uvedené průběhy z obr. 9 a obr. 10 znázorňují počet hodin slunečního svitu v průběhu jednotlivých dní během měsíců března a dubna 2016. Porovnáme-li dobu slunečního svitu s výkyvy $\cos(\varphi_1)$, lze si utvořit představu o vlivu PVE na zmíněný parametr.

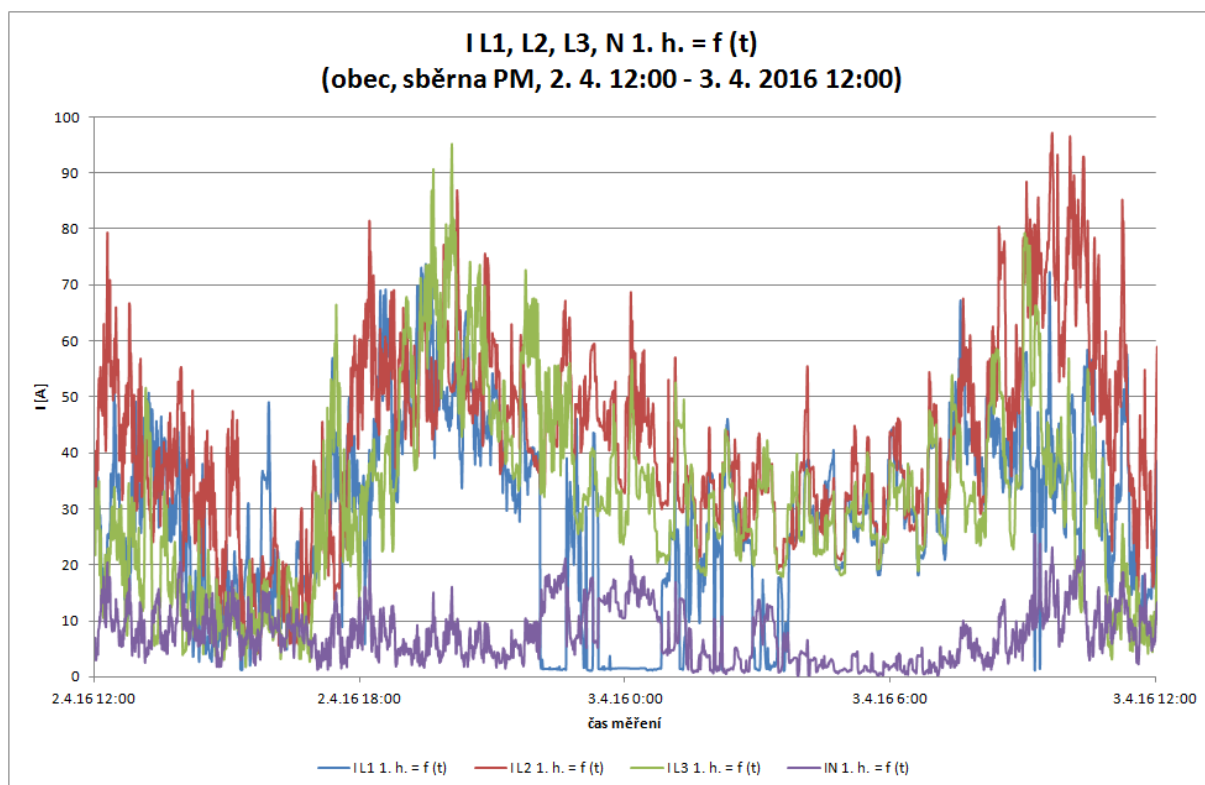
Jedinou výjimku tvoří přelom soboty a neděle 2. a 3. dubna, hodnoty cosinu vzájemného úhlu 1. harmonické napětí a proudu v tomto okamžiku signalizují podobný pokles dodávaného činného výkonu, jako v případě činnosti PVE. S ohledem na průběh činného výkonu ve všech fázích a denní dobu byla však tato možnost přirozeně zavrhnuta.

Při bližším zkoumání uvedeného časového úseku mezi 2. a 3. dubnem byly zjištěny okamžiky nulového odběru všech vyšších harmonických proudu fáze L_1 . Z důvodu přehlednosti jsou zobrazeny pouze liché harmonické do řádu 15. Ostatní řády harmonických proudu včetně řádů sudých byly zaznamenány též nulové.



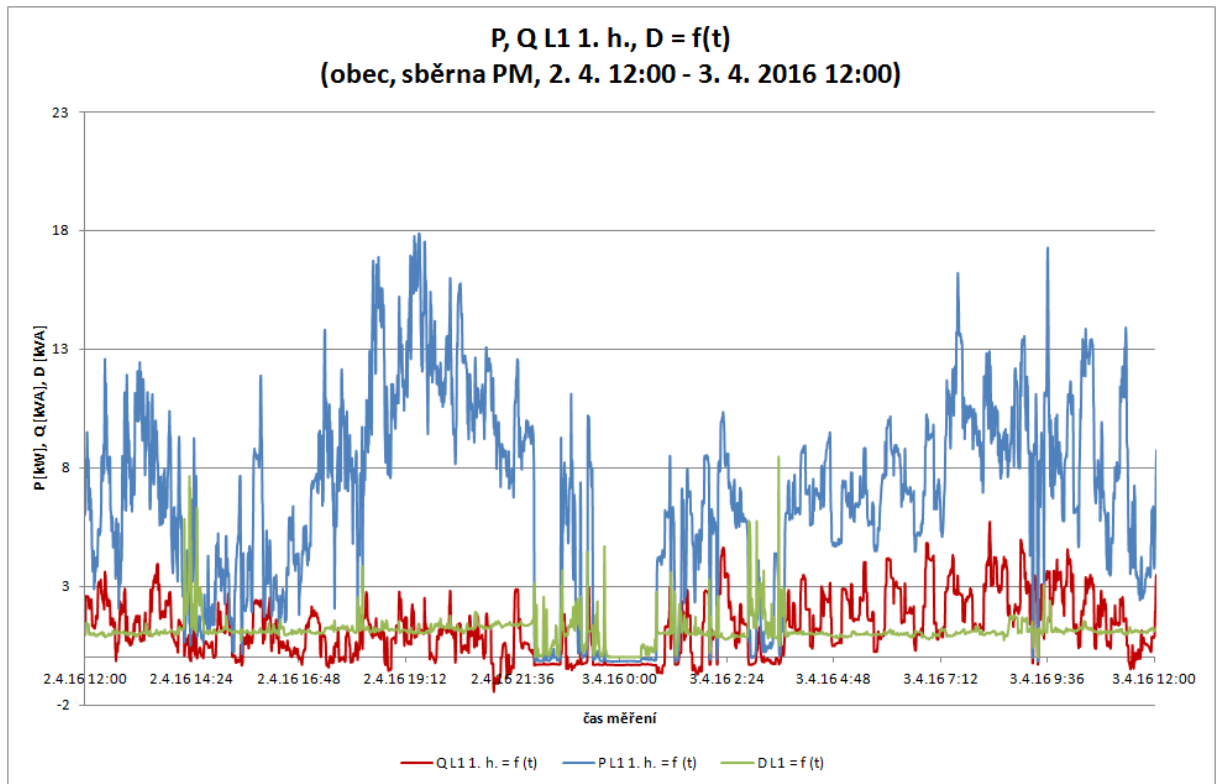
obr. 11 Prosté zobrazení lichých harmonických vyšších řádů fáze L1 v čase (řády 3 ÷ 15)
(obec, sběrna PM, 2. 4. 2016 18:00 - 3. 4. 2016 6:00)

Ve stejném okamžiku klesá rovněž odběr základní harmonické proudu stejné fáze. Střídavý pokles 1. harmonické probíhal přibližně mezi hodnotou, která je v daném okamžiku odebírána skrze ostatní fáze a hodnotou okolo 1 A. S přihlédnutím k průběhu zaznamenané velikosti účinníku $\cos(\varphi_1)$ je nezbytné doplnit, že nízká okamžitá hodnota základní harmonické proudu je během zmiňovaného období nulového odběru vyšších řádů harmonických proudu záporná. Dochází proto též k poklesu odebíraných výkonů stejné fáze (obr. 13). Podstatná část 1. harmonické proudu tudíž protékala pouze fázemi L_2 a L_3 , přičemž se takto vzniklé nesymetrické napájení projevilo zvýšením hodnoty proudu nulovým vodičem distribučního transformátoru.



obr. 12 Prosté základní harmonické proudy skrze všechny fáze a nulový vodič v čase
(obec, sběrna PM, 2. 4. 2016 12:00 - 3. 4. 2016 12:00)

Jestliže dochází k nulovému odběru vyšších harmonických proudů, musí být hodnota odebraného deformačního výkonu rovněž nulová. Na základě zobrazení $\cos(\varphi_1)$ a základní harmonické fáze L_1 je dále evidentní, že přibližně shodná hodnota zaznamenaného činného a jalového výkonu bude mít ve stejnou dobu zápornou hodnotu. Tento pokles byl pravděpodobně způsoben krátkým přerušením dodávky elektrické energie skrze zkoumanou fázi, nejedná se tedy o vliv PVE.



obr. 13 Prosté zobrazení deformačního výkonu a výkonu činného a jalového základní harmonické skrze všechny fáze a nulový vodič v čase (obec, sběrna PM, 2. 4. 2016 12:00 - 3. 4. 2016 12:00)

5.3.2 Vliv PVE na celkové harmonické zkreslení sinusové formy proudu

Zajímavým projevem činnosti měniče fotovoltaického systému v síti je ovlivnění celkového harmonického zkreslení sinusové formy proudu, tedy THD_I , normou definovaný ukazatel kvality elektrické energie, obecně definovaný vztahem 5.2.

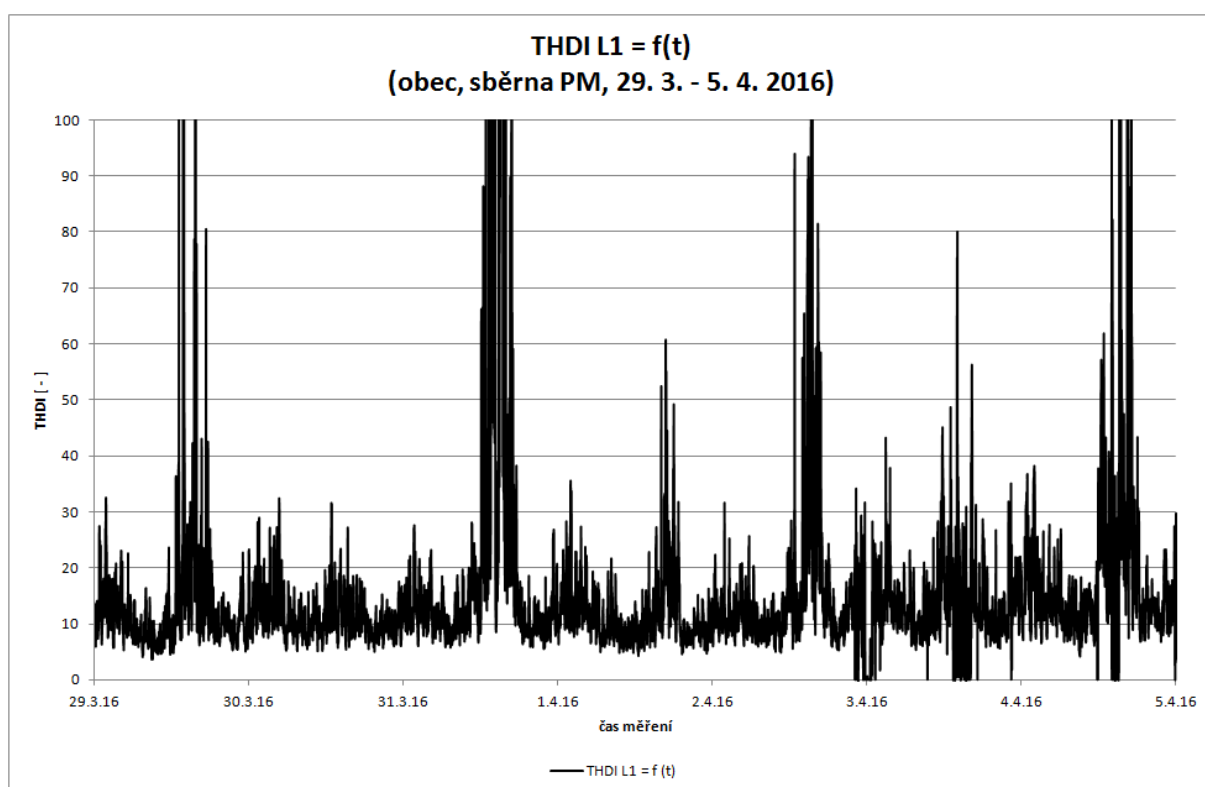
$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1} \right)^2} \quad (5.2)$$

Zde Q představuje efektivní hodnotu proudu, nebo napětí řádu h , popř. základní harmonické Q_1 . H je obvykle rovno 50, v případě nízkého rizika případné rezonance v oblasti vyšších řádů harmonických, umožňuje norma volit velikost H pouze 25 [8].

V době největší výrobní aktivity PVE dodával měnič uvedeného zdroje patrně zejména 1. harmonickou proud. Odběr základní harmonické celé soustavy proto poklesl, avšak odběr harmonických proudů vyšších řádů se výrazně nezměnil. V jedné z následujících kapitol bude dokázáno, že v některých základní harmonické složky proudu dokonce opačná. THD_I proto v takových okamžicích dosahuje nesmyslně vysokých hodnot a bez informace

o činnosti samostatných zdrojů elektrické energie uvnitř sítě proto jako ukazatel kvality elektrické energie ztrácí fyzikální smysl. Z legislativního hlediska uvádí norma [10] prozíravě kompatibilní úroveň THC a $PWCHC$ (celkový a dílčí vážený proud harmonických), které jsou vztaženy k předem definovanému referenčnímu proudu a to pouze pro individuálních zařízení různého příkonu.

THD_I celého systému však dle lokálních maxim umožňuje posoudit míru aktivity PVE během týdne mnohem přehledněji, než v případě prostého zobrazení $\cos(\varphi_I)$ v čase. Nereálně vysoké hodnoty zobrazovaného parametru nejsou v rámci přehlednosti zobrazeny.

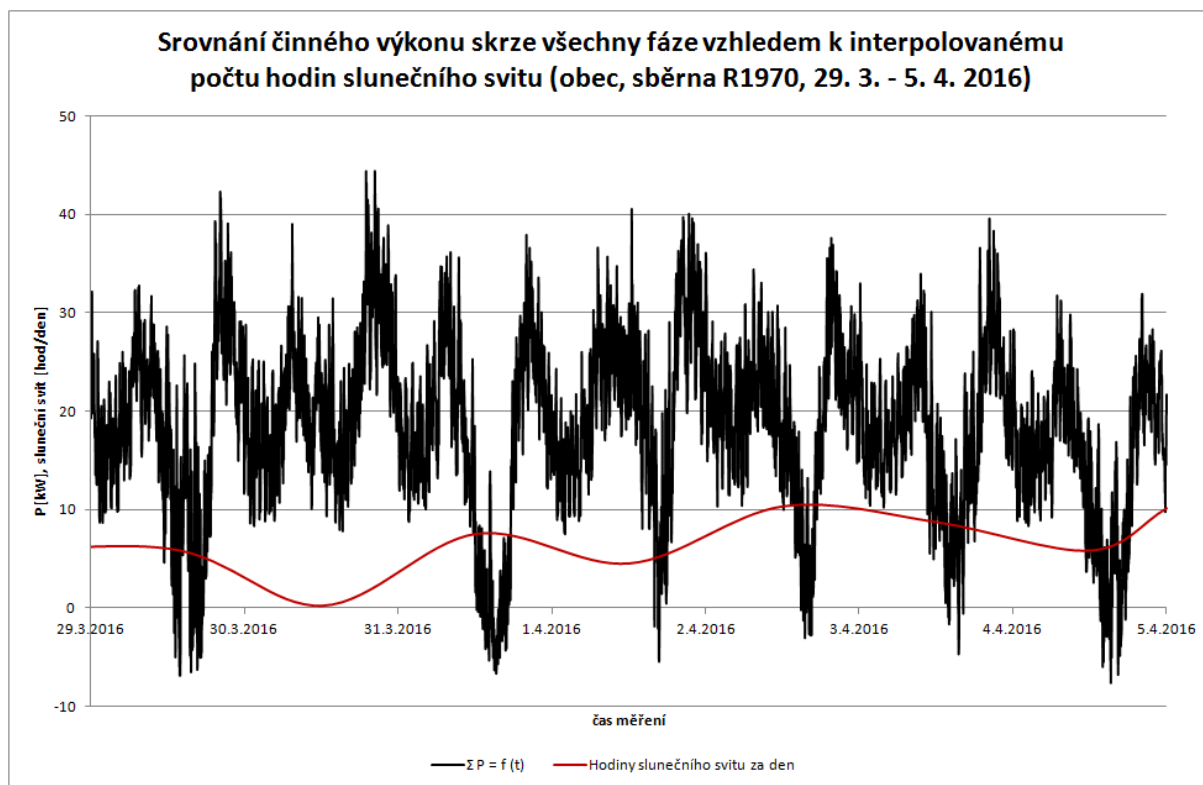


obr. 14 Prosté zobrazení THD_I fáze L_1 celé soustavy v čase
(obec, sběrna PM, 29. 3. 2016 ÷ 5. 4. 2016)

Během úterý 29. 3. , středy 31. 3. a soboty 2. 4. 2016 lze z obr. 14 nyní jasně rozpoznat snížení odběru základní harmonické, která se projevuje formou zvýšení THD_I a zároveň koresponduje se zaznamenanou sluneční aktivitou. Vlivem vyššího odběru domácností během neděle 3. 4. je navzdory aktivitě PVE dodávána již větší část základní harmonické proudu skrze fázi L_1 distribučního transformátoru a THD_I je proto navzdory značné délce slunečního svitu v průběhu tohoto období nižší, než během ostatních slunných dnů. Nulová hodnota THD_I během přelomu 2. a 3. 4. 2016 byla opět evidentně způsobena nulovou velikostí vyšších harmonických složek proudu.

5.3.3 Vliv PVE na dodávaný činný výkon

Další možností demonstrace vlivu PVE v síti je porovnání činného výkonu, odebíraného skrze všechny fáze, s interpolovaným průběhem záznamu délky slunečního svitu během stejného období.



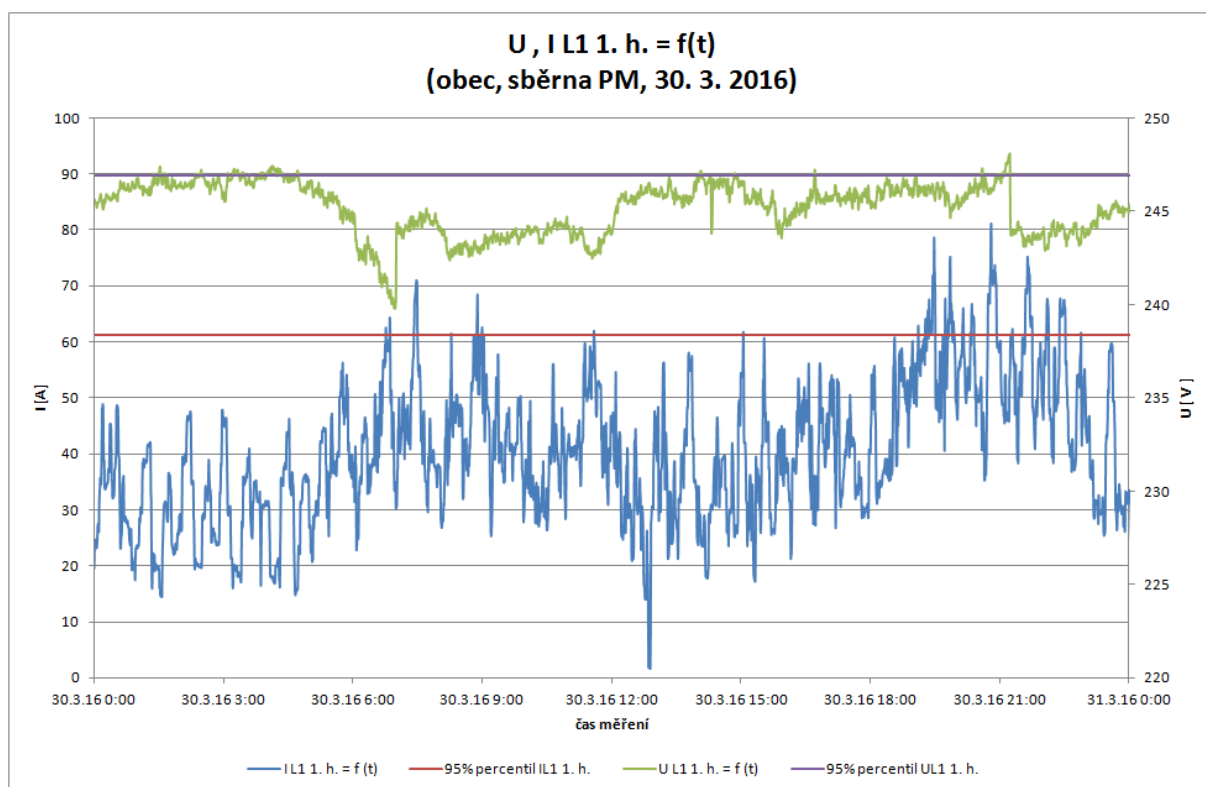
obr. 15 Srovnání činného výkonu skrze všechny fáze vzhledem k interpolovanému počtu hodin slunečního svitu (obec, sběrna R1970, 29. 3. 2016 ÷ 5. 4. 2016)

Zobrazené srovnání činného výkonu ve všech fázích během celého zkoumaného týdne nepřímou úměrou odpovídá době trvání slunečního svitu v průběhu individuálních dnů. Vliv na průběh zmíněného wattového výkonu má však rovněž velikost aktuálně poptávané elektrické energie, která je v různé míře hrazena dodávaným výkonem skrze distribuční transformátor a fotovoltaickým systémem uvnitř sítě. S ohledem na spolupůsobení aktuální spotřeby a době trvání slunečního svitu lze říci, že k nejvýraznějšímu vlivu PVE dochází během čtvrtka 31. 3. 2016. Naopak nejméně ovlivněným dnem je evidentně středa 31. 3. 2016. Tento závěr potvrzuje rovněž zobrazení THD_I z obr. 14.

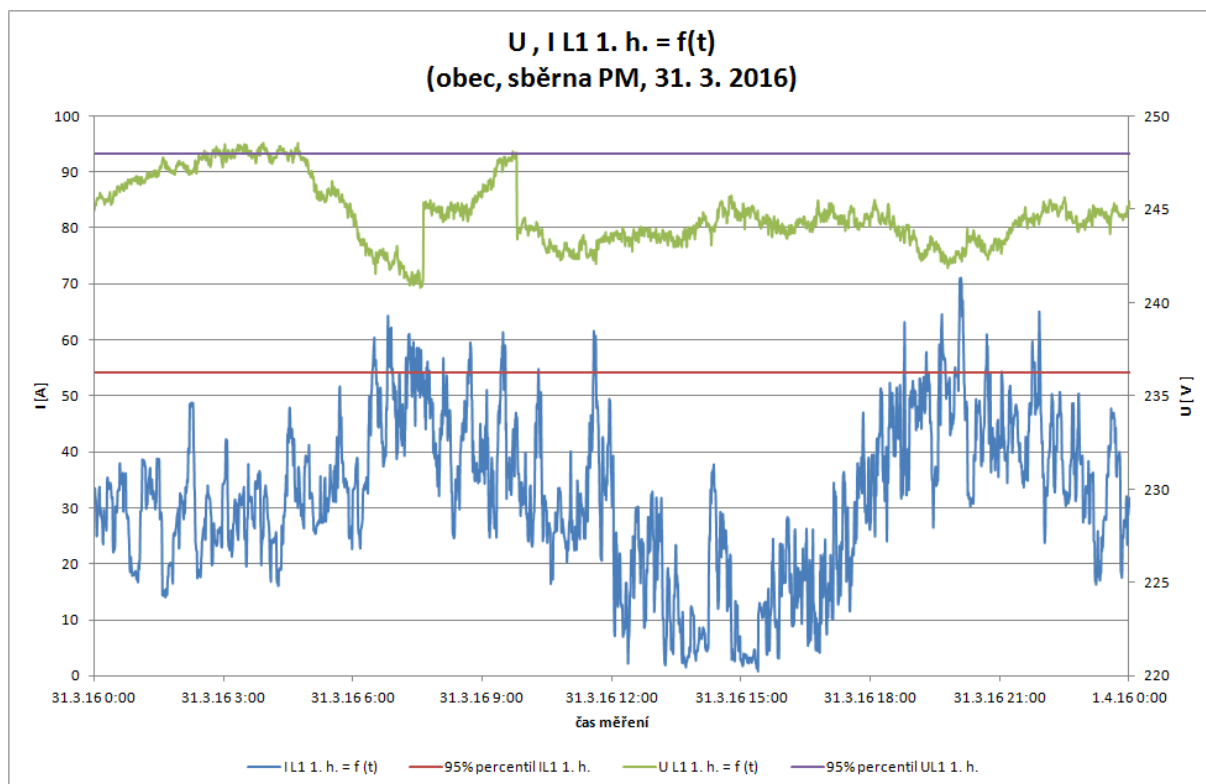
5.3.4 Srovnání všedních dnů s různou mírou vlivu PVE

Prvním krokem vzájemného porovnání individuálních dnů s různým rozsahem vlivu PVE je zobrazení efektivních hodnot základní harmonické napětí a proudu v závislosti

na čase. Působením značné fluktuace hodnot je pro přehlednost přidán 95% percentil.

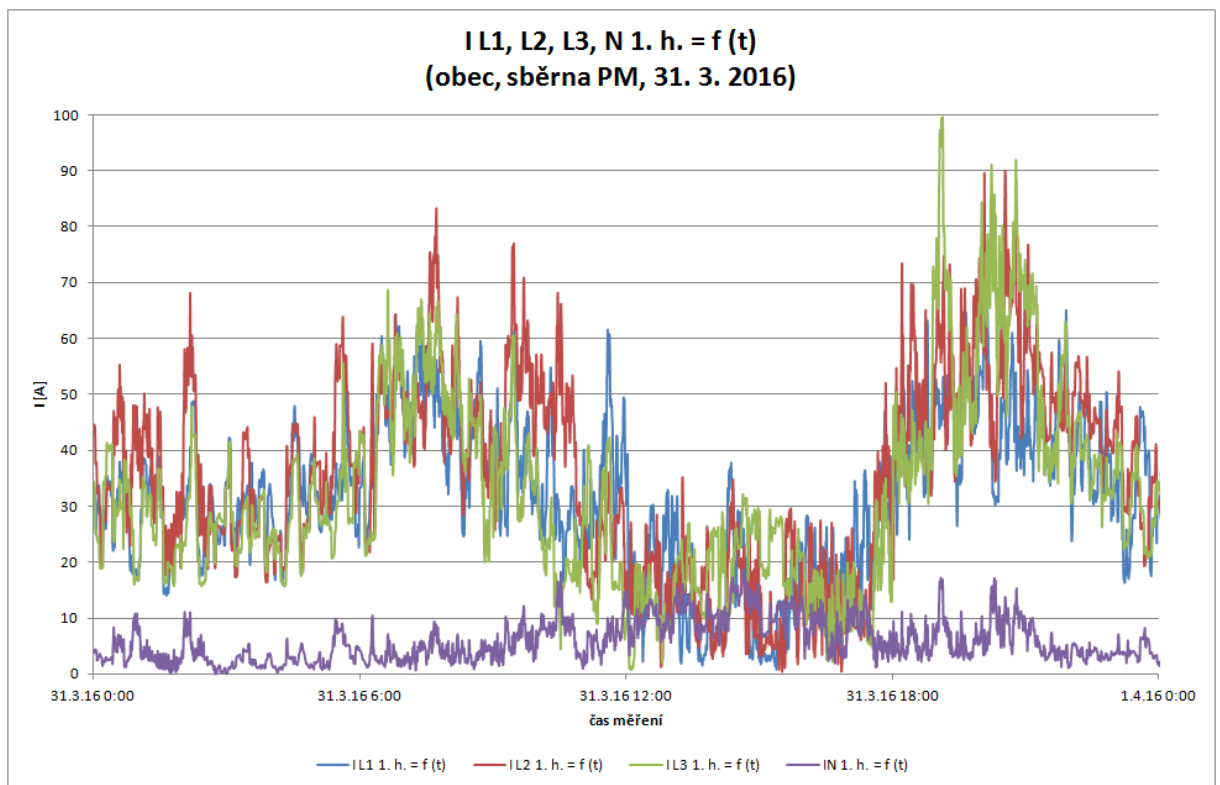


obr. 16 Základní harmonické složky napětí a proudu celé soustavy během vybraného individuálního dne (obec, sběrna PM, 30. 3. 2016)



obr. 17 Základní harmonické složky napětí a proudu celé soustavy během vybraného individuálního dne (obec, sběrna PM, 31. 3. 2016)

Zatímco se průběh základní harmonické napětí svým tvarem a provedeným kvantilem během obou vybraných všedních dnů v podstatě shoduje, základní harmonické složky proudu jsou činností měniče značně ovlivněny. Je třeba rovněž dodat, že lokální maximum průběhu mezi 12. a 3. hodinou odpolední nabývá dle záznamu $\cos(\varphi_1)$ v obr. 8 záporných hodnot. Z matematického hlediska proto provedený kvantil ztrácí smysl, neboť zahrnuje pouze pořizené efektivní hodnoty proměnných, nikoliv orientaci. Stále však jednoznačně poukazuje na výrazně nižší hodnotu dodávané 1. harmonické proudu. V uvedenou denní dobu tedy docházelo k přenosu energie do sítě skrze fázi L_1 distribučního transformátoru. Zobrazením ostatních fází dle obr. 18 během 31. 3. 2016 bylo zjištěno obdobné chování. Místní elektrický zdroj tedy působí všech fázích systému. Je třeba také dodat, že činnost napájecí sítě byla také nepatrně ovlivněna také během středy 30. 3. 2016.

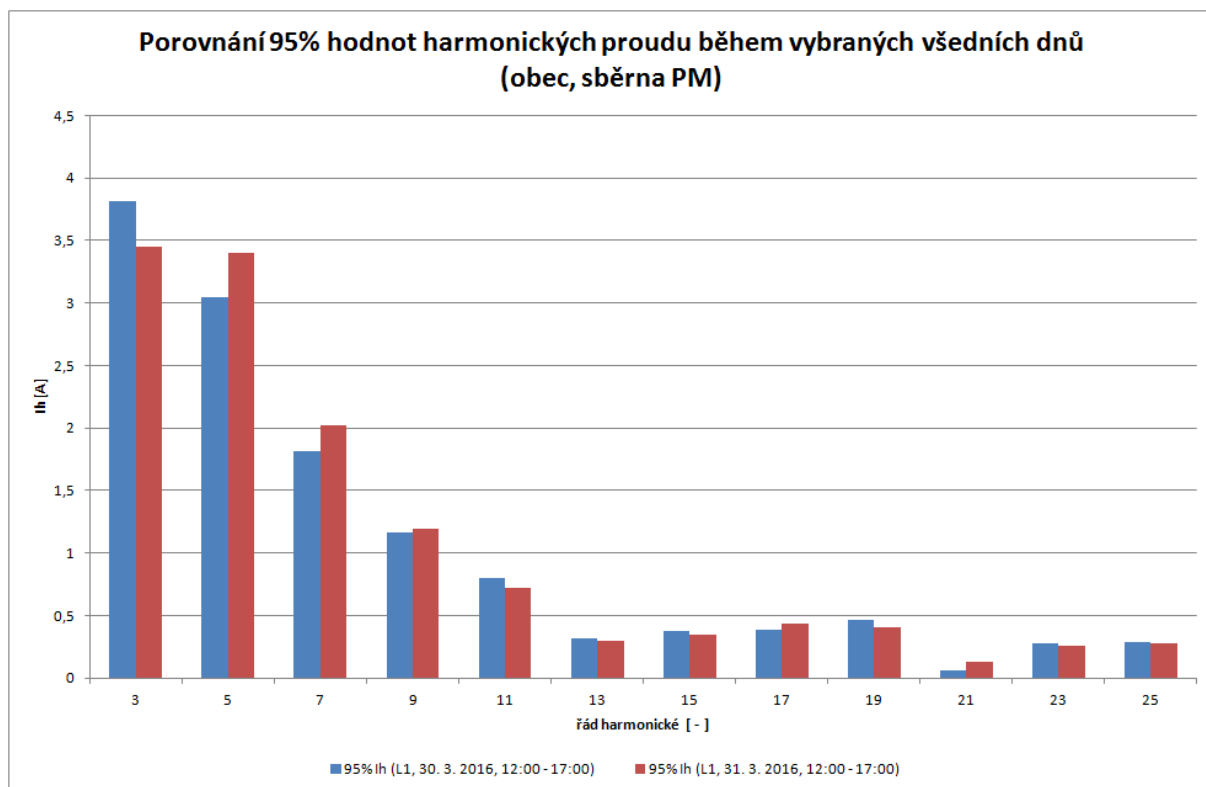


obr. 18 Srovnání základní harmonické proudu skrze L_1 , L_2 , L_3 a N během značné aktivity PVE
(obec, sběrna PM, 31. 3. 2016)

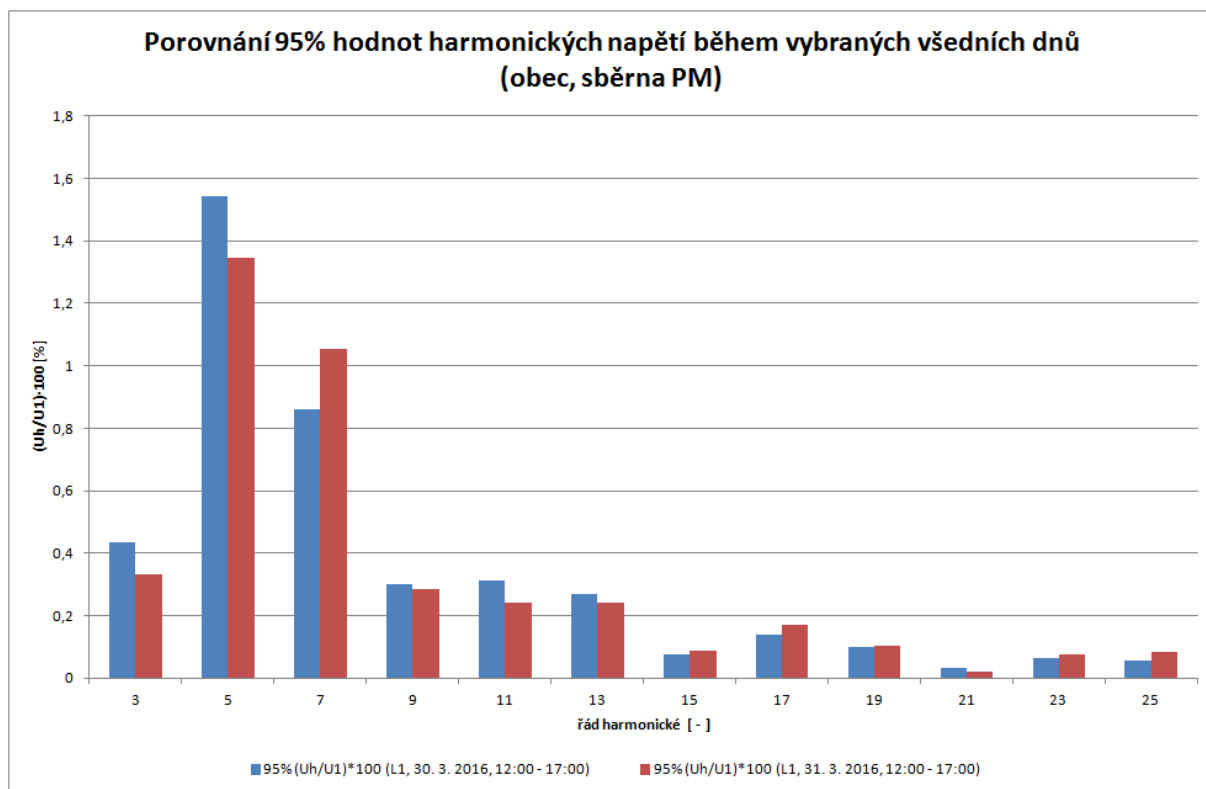
5.3.5 Shrnutí celkového působení PVE ve zkoumané části distribuční sítě

V poslední části této kapitoly je uvedeno zobrazení 95% zaznamenaných hodnot vyšších harmonických proudu a napětí během největšího působení PVE v síti. Toto období je na základě průběhu z obr. 17 stanoveno mezi 12. a 17. hodinou ve čtvrtek 31. 3. 2016. Stanovené procentuálně hodnoty jsou zároveň porovnány s 95% percentilem zaznamenaných

hodnot v průběhu stejného období ve středu 30. 3. 2016.



obr. 19 Porovnání vyšších harmonických proudů během různé aktivity měniče PVE systému
(obec, sběrna PM, 30. a 31. 3. 2016, 12:00 - 17:00)



obr. 20 Porovnání vyšších harmonických napětí během různé aktivity měniče PVE systému
(obec, sběrna PM, 30. a 31. 3. 2016, 12:00 - 17:00)

Během činnosti měniče fotovoltaických zdrojů byla ovlivněna zejména 7. harmonická složka napětí, dále 5. a 7. harmonická složka proudu. Jedná se proto evidentně o měnič, jenž je připojen ke všem 3 fázím sítě, přičemž je zde jasně rozeznatelný náznak amplitudového zákona. Výrazně nižších hodnot dosahují během působení PVE 3. harmonická proudu a relativní velikost 3. a 5. harmonické napětí. Zvýšení uvedených elektromagnetických emisí je ve vztahu k jejich celkové velikosti a příslušným kompatibilním úrovním (viz. kap. 4.1) poměrně nízké.

V okamžicích značné výrobní aktivity PVE překročila hodnota dodávaného výkonu spotřebu připojených rodinných domů a docházelo tak k průtoku energie skrze distribuční transformátor dále do sítě vyššího napětí. Působením dodávaného převážně činného výkonu do zkoumané části veřejné distribuční sítě nízkého napětí byla ovlivněna obzvláště základní harmonická proudu. Jelikož byl záznam měřených dat uskutečněn bez informace o činnosti samostatných zdrojů elektrické energie uvnitř sítě, byly poklesem základní harmonické proudu ovlivněny mimo jiné parametry THD_I a $\cos(\varphi_I)$. Oba parametry proto neposkytují korektní informaci o chování sítě, jeli v této síti připojena PVE.

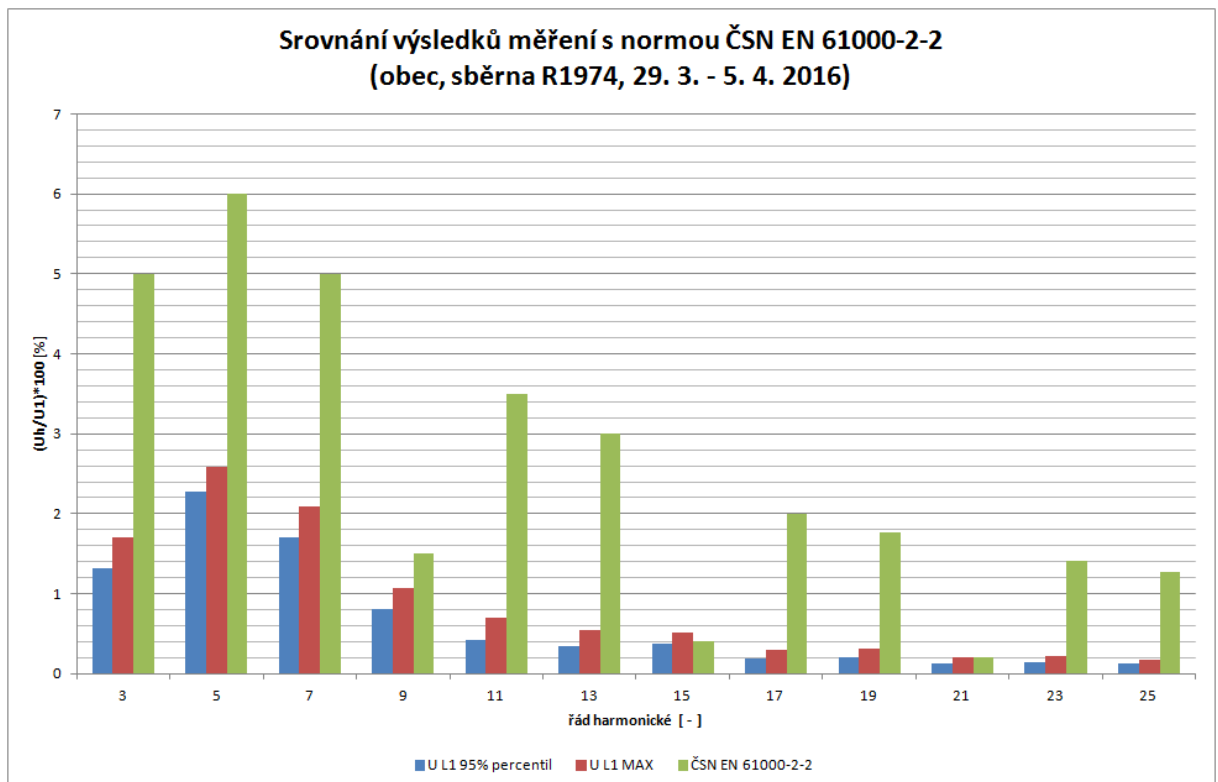
Z hlediska lichých harmonických napětí a proudu lze říci, že měnič připojených fotovoltaických jednotek svou činností chod ostatních zařízení v síti ovlivňuje pouze nepatrně. Jedinou nevýhodou PVE tedy zůstává pouze značná proměnlivost ve výrobní aktivitě a s ní spojené problematice akumulace přebytků elektrické energie.

6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S PLATNOU LEGISLATIVOU

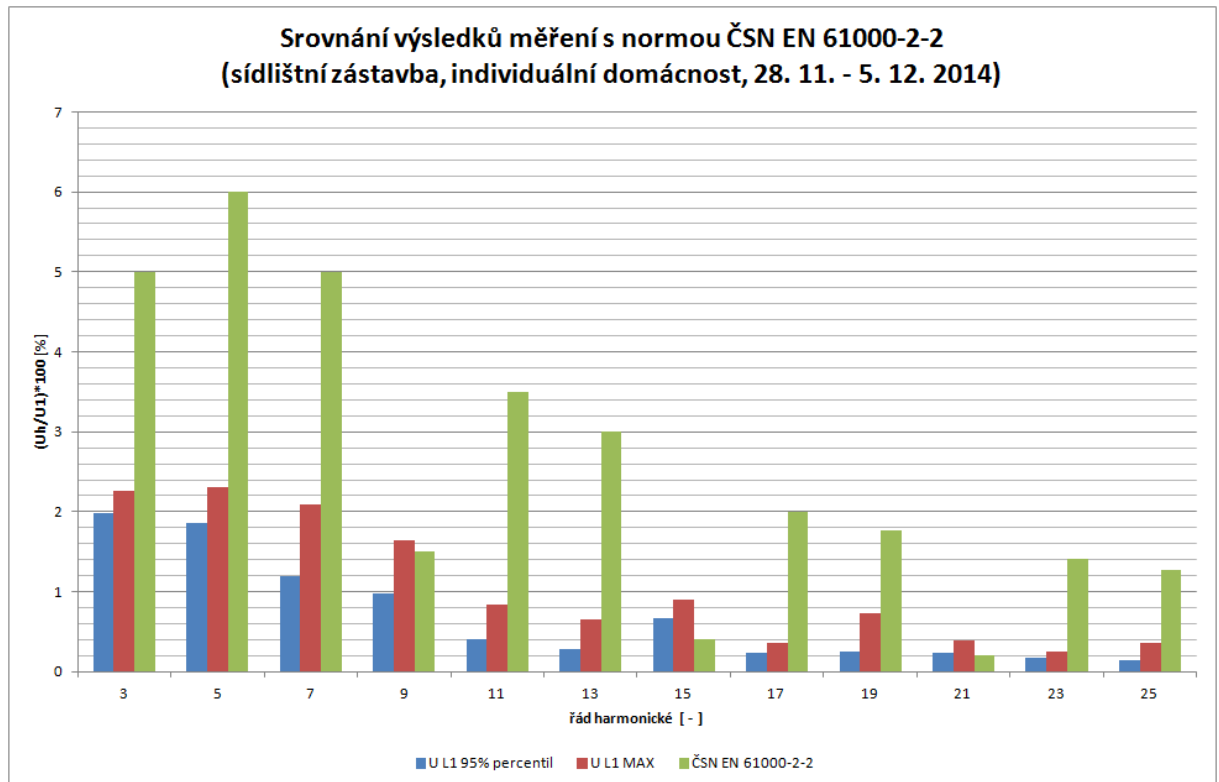
Z hlediska norem je hromadné nízkofrekvenční elektromagnetické působení celého systému kontrolováno mimo jiné kompatibilními úrovněmi harmonických napětí a kolísáním napětí napájecího. Působení nesinusového proudu, který svými úbytky na impedancích sítě napěťové harmonické vyvolává je posuzováno pouze u jednotlivých spotřebičů. Výsledné spolupůsobení spotřebičů různých příkonů je proto z hlediska elektromagnetických emisí v síti hodnoceno velikostí harmonických napětí, popř. THD_U . Výsledky zpracovaných napěťových harmonických budou proto dále srovnány s příslušnými kompatibilními úrovněmi normy ČSN EN 61000-2-2 *Prostředí - Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*.

6.1 Obecné srovnání v místě vzdáleného odběru

Komparace dat je provedena pro celotýdenní měření individuálních domácností panelových budov a zkoumané části distribuční sítě v obci (obvykle označeno jako PCC). Data obdržená v rámci měření městského sídliště jsou podrobně popsána v [3; 4]. Konkrétní kompatibilní úrovně individuálních řádů harmonických jsou v souladu s výše uvedenou normou porovnávány s 95% percentilem naměřených hodnot a dále s hodnotami maximálními. Zobrazení maximálních hodnot vzorků popsanych v kapitole 5.1 mají výhradně teoretický význam. Kupříkladu lze na základě značného rozdílu mezi maximální hodnotou a 95% percentilem posoudit míru fluktuace zpracovaných emisí. Navzdory debatě o případném zavedení benevolentnějších kompatibilních úrovní zkoumaných veličin za předpokladu, že 100% pořízených výsledků spadá do stanovených limitů, platí nadále 95% pásmo. Jak již bylo řečeno v kapitole 4.3.1, pořízené výsledky jsou již jednou průměrovány dle rovnice 4.2. Nejedná se tedy evidentně o krátkodobé odchylky, které lze bez znalosti hlubšího kontextu dění v systému s jistotou zanedbat. Zůstává proto otázkou do jaké míry je vyloučených 5% naměřených výsledků schopno v případě překročení stanovených mezí ovlivnit funkci zařízení do této sítě připojených.



obr. 21 Porovnání harmonických napětí do řádu 25 s ČSN EN 61000-2-2
(obec, sběrna R1974, 29. 3. - 5. 4. 2016)



*obr. 22 Porovnání harmonických napětí do řádu 25 s ČSN EN 61000-2-2
(sídlíštní zástavba, individuální domácnost, 29. 3. - 5. 4. 2016)*

Zaznamenané hodnoty celkového harmonického zkreslení THD_U jsou 2,91% na sídlíšti a 2,99% v případě zkoumané části distribuční sítě obce. Odpovídající kompatibilní úroveň THD_U je 11%.

Již během prvního pohledu na *obr. 21* a *obr. 22* je zřejmá značná rezerva mezi kompatibilními úrovněmi, stanovenými platnou normou a hodnotami provedených kvantilů zaznamenaných lichých harmonických napětí vyjma násobku 3. Z důvodu přehlednosti bude tedy v následující části kapitoly uvedeno srovnání provedených percentilů, maximálních hodnot a kompatibilních úrovní rovněž pomocí tabulky. Přestože napěťové harmonické lichých řádů násobků tří, dále pouze harmonické $3n$, svou relativní velikostí přibližně odpovídají ostatním lichým řádům harmonických napětí, příslušné kompatibilní úrovně jsou v tomto případě značně přísné. Překročení normou stanovených limitů bylo ve zkoumané fázi L_1 zaznamenáno pouze v případě městské zástavby, konkrétně se jedná o 15. a 21. harmonickou složku. Z hlediska míry koncentrace těchto emisí ve vztahu k platné legislativě se jedná o kritické řády harmonických napětí. Zejména 15. harmonická dosahuje 170% povolené hodnoty. Problematice striktních limitů koncentrace 15. harmonické v síti se dále věnuje kapitola 3.1.

Zbývá poznamenat, že k překročení kompatibilních úrovní 15. a 21. harmonické napětí

došlo v místě vzdáleného odběru panelového domu v různé míře rovněž ve fázích L_2 a L_3 . Ostatní řády lichých harmonických již odpovídají příslušným legislativním mezím. Dále došlo k překročení kompatibilní úrovně měřeného rodinného domu u 15. harmonické napětí ve fázi L_3 , přestože se jedná o důkladně navrženou moderní distribuční síť s předpokladem vzrůstající koncentrace elektromagnetických emisí vlivem masivního nasazování elektronických zařízení, při zachování odpovídajících nároků na kvalitu elektrické energie.

tab. 3 Srovnání zaznamenaných harmonických napětí do řádu 25 s ČSN EN 61000-2-2

řád [-]	U _h /U ₁ [%]				
	sídlíštní zástavba		veřejná distribuční síť n. n. obce		ČSN EN 61000-2-2
	95%	maximum	95%	maximum	
3	1,985	2,268	1,313	1,708	5
5	1,862	2,301	2,278	2,591	6
7	1,198	2,094	1,701	2,098	5
9	0,978	1,649	0,808	1,068	1,5
11	0,413	0,836	0,426	0,697	3,5
13	0,285	0,66	0,344	0,546	3
15	0,676	0,898	0,373	0,511	0,4
17	0,238	0,361	0,197	0,302	2
19	0,258	0,736	0,201	0,321	1,761
21	0,24	0,391	0,124	0,211	0,2
23	0,181	0,259	0,147	0,224	1,408
25	0,143	0,368	0,129	0,178	1,274

K tab. 3 je třeba doplnit, že velikosti základní harmonické napětí se mírně liší. Zatímco v případě zkoumané části obce je 95% hodnot zmíněné harmonické shora omezeno napětím 247,7 V, v případě sídliště je to pouze 241,3 V. Jelikož je z legislativního hlediska posuzováno působení vyšších harmonických napětí vzhledem k harmonické 1., je uvedené srovnání provedeno a dále diskutováno stejným způsobem, avšak je třeba si uvědomit, že zejména v oblasti vyšších kmitočtů znamená nepatrně vyšší koncentrace porovnávaných harmonických napětí v městské síti, že absolutní jejich hodnota zůstává shodná, nebo menší než absolutní hodnota harmonické stejného řádu, která byla naměřena v obci.

Číselným zobrazením bylo zjištěno, že 5., 7., 11. a 13. harmonická složka napětí je v případě městské zástavby nižší, než hodnoty stejných řádů zaznamenaných při měření

v obci. Koncentrace uvedených řádů jasně ukazuje na dominantní vliv elektromagnetického působení třífázových spotřebičů ve zkoumaném rodinném domě. Převažující velikost zbylých řádů harmonických napětí vzdáleného odběru panelového domu naopak signalizuje výskyt především jednofázových spotřebičů.

Zřetelně odlišné formě odběru elektrické energie rodinných domů a bytů panelových budov bude nadále věnována pozornost v průběhu následujících kapitol.

6.2 Diskuse velikosti kompatibilní úrovně 15. harmonické napětí

V současné době převažují v odborné veřejnosti z oblasti nízkofrekvenčního rušení 2 různé názory ohledně striktních limitů koncentrace lichých řádů harmonických napětí v síti, jenž jsou dle platné legislativy [8] závazné a v zastaralejších instalacích zároveň velice obtížně splnitelné. Nízké hodnoty stanovených úrovní koncentrace harmonických řádů $3n$ jsou přirozeně voleny mimo jiné kvůli nepříznivým účinkům harmonických proudů stejného řádu, jenž svými úbytky na síťových impedancích tato rušivá napětí vytvářejí. Zmíněné účinky jsou detailně popsány v kapitole 3. Stále častěji se však objevují spekulace, že překročení stávajících kompatibilních úrovní nepředstavuje výrazná rizika, spojená s působením $3n$ řádů harmonických. Jak již bylo v předchozí části práce demonstrováno, jedná se zejména o 15. harmonickou složku napětí, která přestože často dosahuje pouze nízkých procentuálních hodnot, překračuje zároveň stanovenou 0,4% kompatibilní úroveň, tedy porušuje platnou normu. Dále dochází rovněž k častému překročení harmonické řádu $h = 21$.

Cílem této kapitoly bude proto diskuse míry působení 15. harmonické napětí a proudu na rizika spojená s jejich negativním působením, popsaným v kap. 3. Nepříznivé účinky, které jsou v obecné souvislosti s harmonickými $3n$ často skloňovány, se týkají především přetěžování vinutí transformátorů a středního vodiče třífázových sítí. Případová studie v komerčních budovách dle [16] počítá s různou koncentrací 3. harmonické proudu v síti. K překročení kompatibilní úrovně 3. harmonické napětí však ve veřejné distribuční síti nízkého napětí dochází dle provedených závislostí jen velice zřídka.

Jedním z problémů vyšší koncentrace 15. harmonické je rovněž zvýšení deformačního výkonu a ztrát v systému. Předpokládejme tedy nyní teoretické zvýšení kompatibilní úrovně 15. harmonické složky napětí ze současných 0,4% na hodnotu 1%. Úroveň zmíněné frekvenční složky je uvažována např. 0,8%, ostatní řády zůstávají zachovány. Hodnoty

celkového obsahu harmonických napětí HC_1 (harmonic content) jsou převzaty ze zpracovaných dat dle obr. 22 a přepočteny z veličin relativně vztažených k základní harmonické na veličiny absolutní. HC_2 reprezentuje stejnou veličinu, avšak hodnota 15. harmonické napětí je uměle zvýšena na zmíněnou velikost 0,8%, tedy zhruba 2V.

$$HC = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} Q_h^2} \quad (6.1)$$

$$\frac{HC_2}{HC_1} \cdot 100 = \frac{8,27}{8,07} \cdot 100 = 102,4 \% \quad (6.2)$$

Zde Q označuje efektivní hodnotu harmonické složky napětí, nebo proudu, řádu od 2 do H , obvykle do $H = 50$).

V kontextu působení na celkový obsah harmonických dojde při zvýšení současné hodnoty 0,37% na 0,8 % pouze k minimálnímu přírůstku 2%. Výsledný komplexní výkon bude jako součin odmocněných kvadrátů amplitud jednotlivých harmonických složek napětí a proudu zvýšen velice nepatrně. Deformační výkon, který lze následně dle rovnice 2.17 obdržet odečtením činného a jalového výkonu dílčích frekvenčních složek celého spektra od zdánlivého komplexního výkonu, zůstane i za předpokladu, že zvýšení 15. harmonické neovlivní zbylé složky výkonu, téměř beze změny.

Vzhledem k vyšší frekvenci 15. složky spektrální hustoty amplitud signálu se může rovněž projevit skinefekt. Kmitočet zkoumané harmonické odpovídá $f = 750 \text{ Hz}$, uvažovaný materiál vodiče je hliník, jehož konduktivita zhruba odpovídá $\gamma = 37 \text{ S/mm}^2$, relativní permeabilita přibližně $\mu_r = 1$ a permeabilita vakua $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 750 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 37 \cdot 10^6}} = 3,02 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Při frekvenci $f = 750 \text{ Hz}$ tudíž klesne v hloubce $\delta = 3,02 \text{ mm}$ pod povrchem přívodního vodiče amplituda dopadající vlny e^{-1} - krát v porovnání s hodnotou na jejím povrchu. Tudíž protéká přívodním kabelem $4x150 \text{ E-A2X2Y-JN}$ k místu odběru individuální domácnosti 63,2% 15. harmonické složky proudu, který tak protéká plochou:

$$r_{\text{vodice}} = \sqrt{\frac{150}{\pi}} = 6,91 \text{ mm}^2 \quad (6.4)$$

$$S_{\delta} = S_{\text{vodice}} - \pi \cdot (r_{\text{vodice}} - \delta)^2 = 150 - \pi \cdot (6,91 - 3,02)^2 = 102,49 \text{ mm}^2 \quad (6.5)$$

Plocha S_{δ} tvoří zhruba 2/3 celkové plochy přívodního kabelu, kterým protéká přibližně 2/3 15. harmonické proudu. Z uvedených výpočtů lze proto říci, že z pohledu povrchového jevu má na tato složka spektrální hustoty amplitud minimální dopad na přídavné ztráty a oteplení systému.

Ovlivnění jednofázových indukčních elektrických strojů je v případě 15. harmonické proudu opět minimální, jelikož vliv na moment motoru klesá s 5. mocninou kmitočtu napájecího proudu. Vysoká reaktance stroje navíc způsobuje vysoké hodnoty impedance v oblasti vyšších frekvencí. Dle závěrů odborníků z oblasti konstrukce elektrických strojů nepředstavuje ani 15. harmonická složka napětí konkrétní výrazní rizika pro fungování indukčních motorů.

Značným problémem však zůstává riziko vytvoření oscilačního obvodu v kmitočtové oblasti vyšších harmonických. Problematika zniku rezonancí sítě je velmi složitá a není předmětem práce. Současně se projevuje a vzniká pro různé frekvence u rozvodů pro občanskou vybavenost a podnikové sítě.

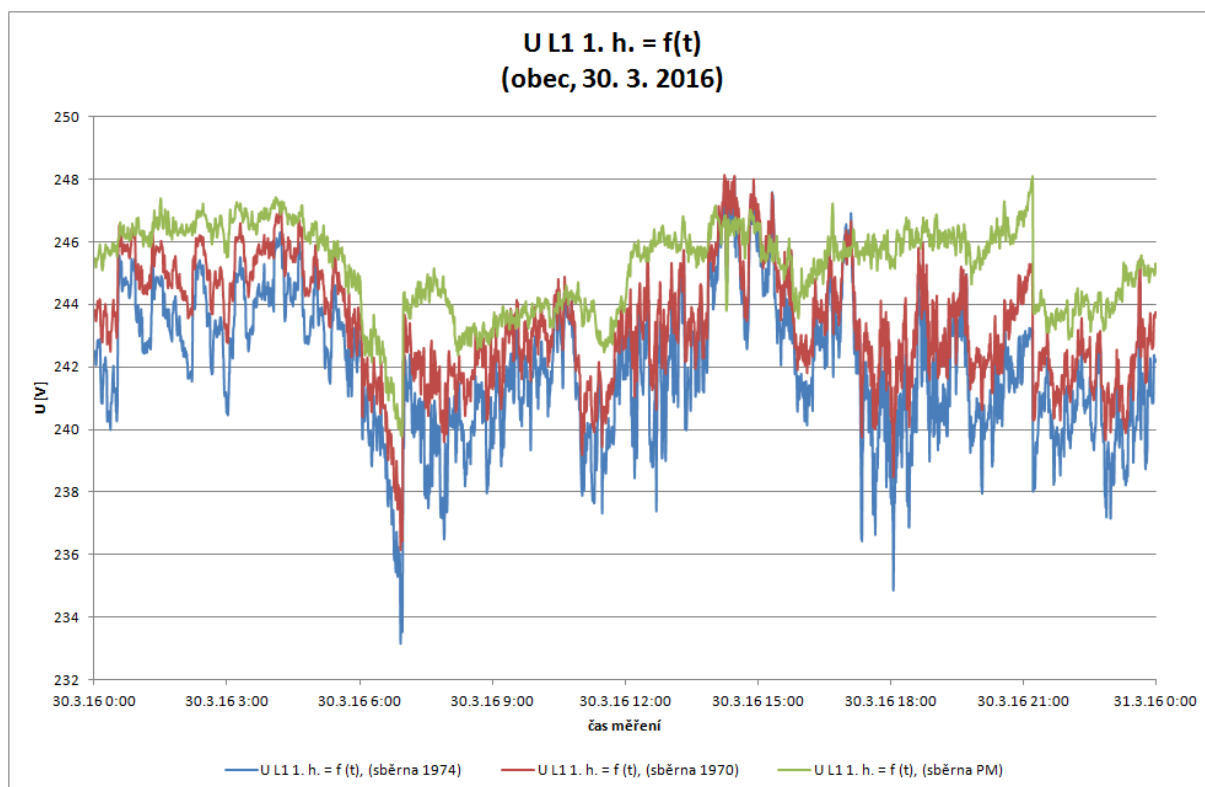
Zůstává tedy otázkou, zda je třeba do současně platné míry liché řady násobků tří harmonických napětí legislativně omezovat. Jelikož je však spektrum potenciálních rizik velice rozsáhlé, nelze v rámci diplomové práce řešit, zda jsou nastavené kompatibilní úrovně harmonických napětí přespříliš nízké, či nikoliv. Je třeba pouze dodat, že jsou zejména v případě 15. harmonické velmi striktní a tudíž poměrně často dochází k jejich překročení. Během dalších kapitol bude proto mimo jiné problematice eventuálního překročení kompatibilních úrovní 15. harmonické napětí okrajově věnována pozornost během statistického zpracování výsledků měření.

7 ÚROVEŇ ELEKTROMAGNETICKÝCH EMISÍ V RŮZNÝCH ČÁSTECH VEŘEJNÉ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ NÍZKÉHO NAPĚTÍ

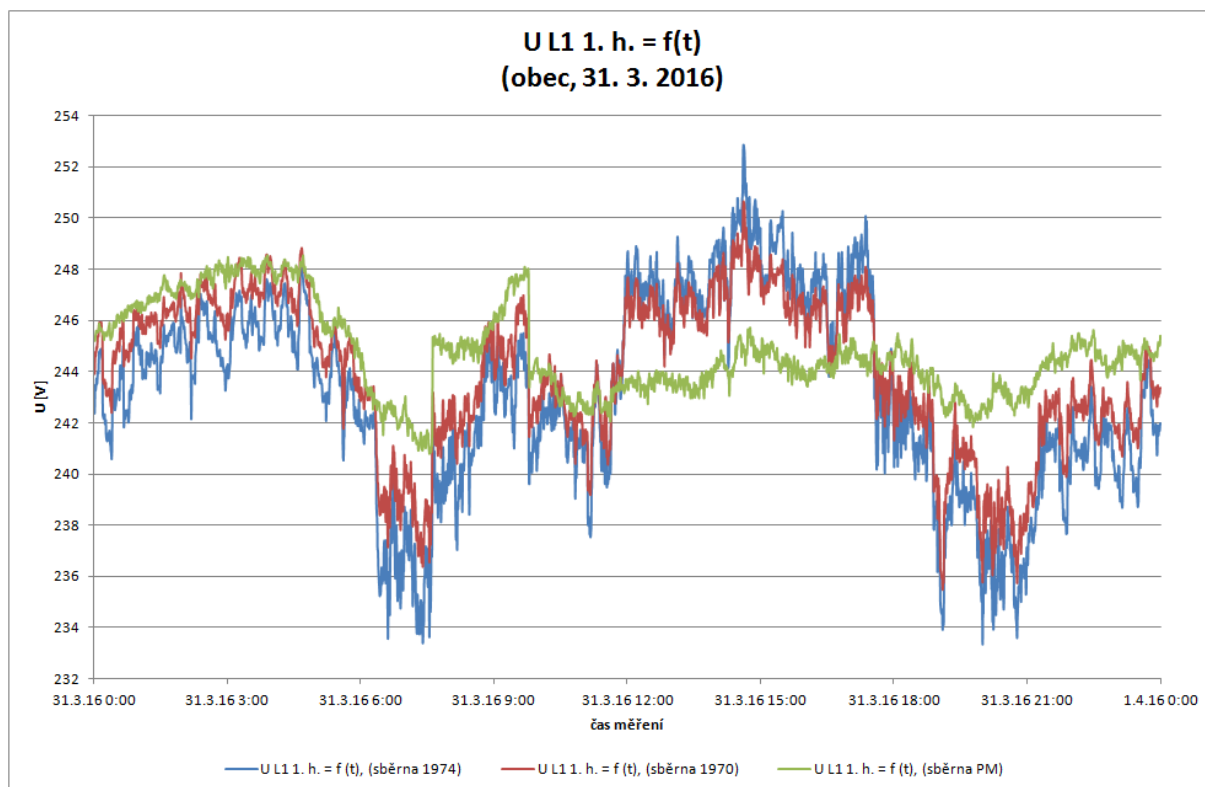
Výhodou měření prováděném během března a dubna 2016 ve veřejné distribuční síti n. n. blíže nespecifikované obce je možnost porovnání výsledků měření z různých sběrných míst sítě. Přestože se limity koncentrace jednotlivých harmonických složek napětí vztahují dle normy ke společnému napájecímu bodu, poskytují obdržaná data rovněž pohled na velikosti emisí uvnitř sítě. Provedené závislosti budou mimo jiné porovnány s výsledky měření v kvalitě odebírané elektrické energie městské sídlištní zástavby, jež byly prezentovány v práci [3] a [4]. Prioritně bude však věnována pozornost výsledkům měření v obci. Dále je k následující diskusi třeba doplnit fakt, že měření v obecní a městské zástavbě probíhalo během různých ročních období, které má na spotřební aktivitu obyvatelstva nezanedbatelný dopad a může proto vytvářet některé z rozdílů, jež budou během komparace hodnot zmíněny.

7.1 Elektromagnetické rušení v různých částech systému během vybraných všedních dnů

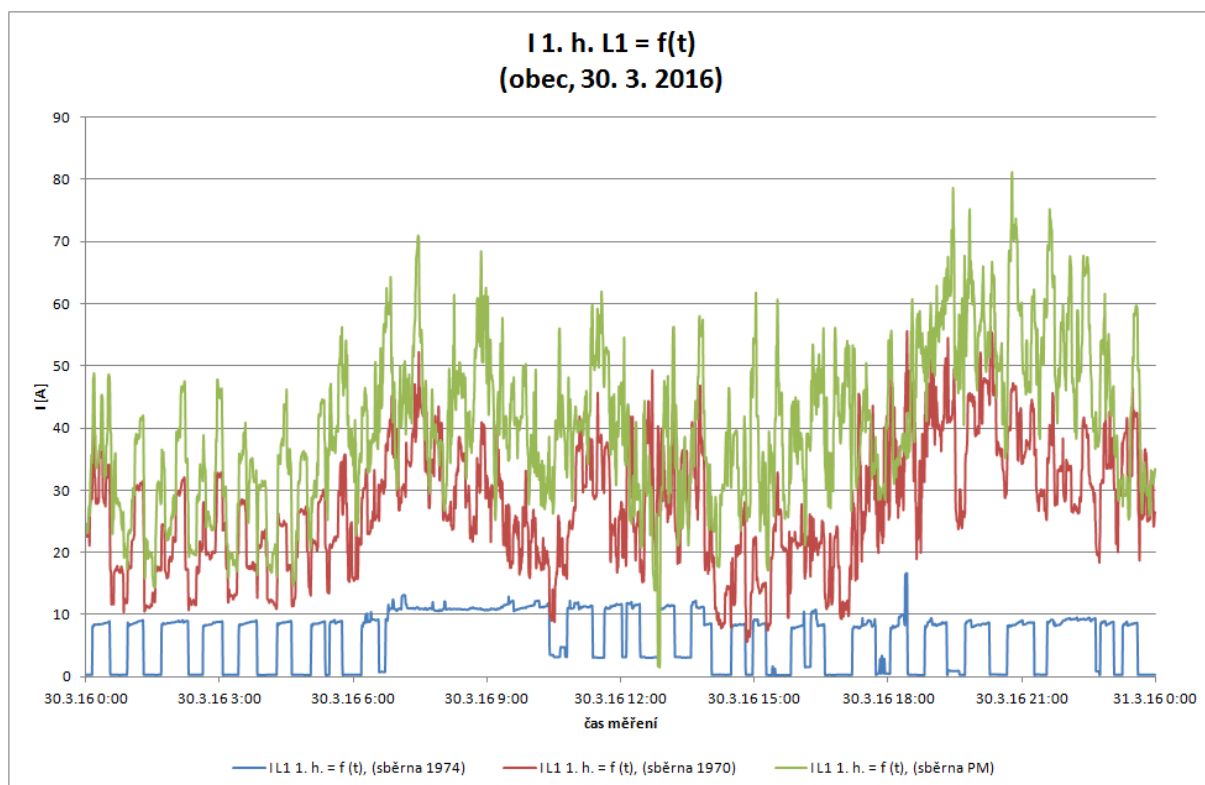
Zprvu je třeba znázornit průběh základní harmonické napětí a proudu ve všech měřených místech sítě. S cílem vytvoření přehledného zobrazení zaznamenaných dat je uvedeno prosté zobrazení zmíněných veličin v čase během jednotlivých všedních dnů s různou mírou působení PVE, těmito dny jsou na základě závěrů učiněných v kap. 5.3 středa a čtvrtek 30. a 31. 3. 2016.



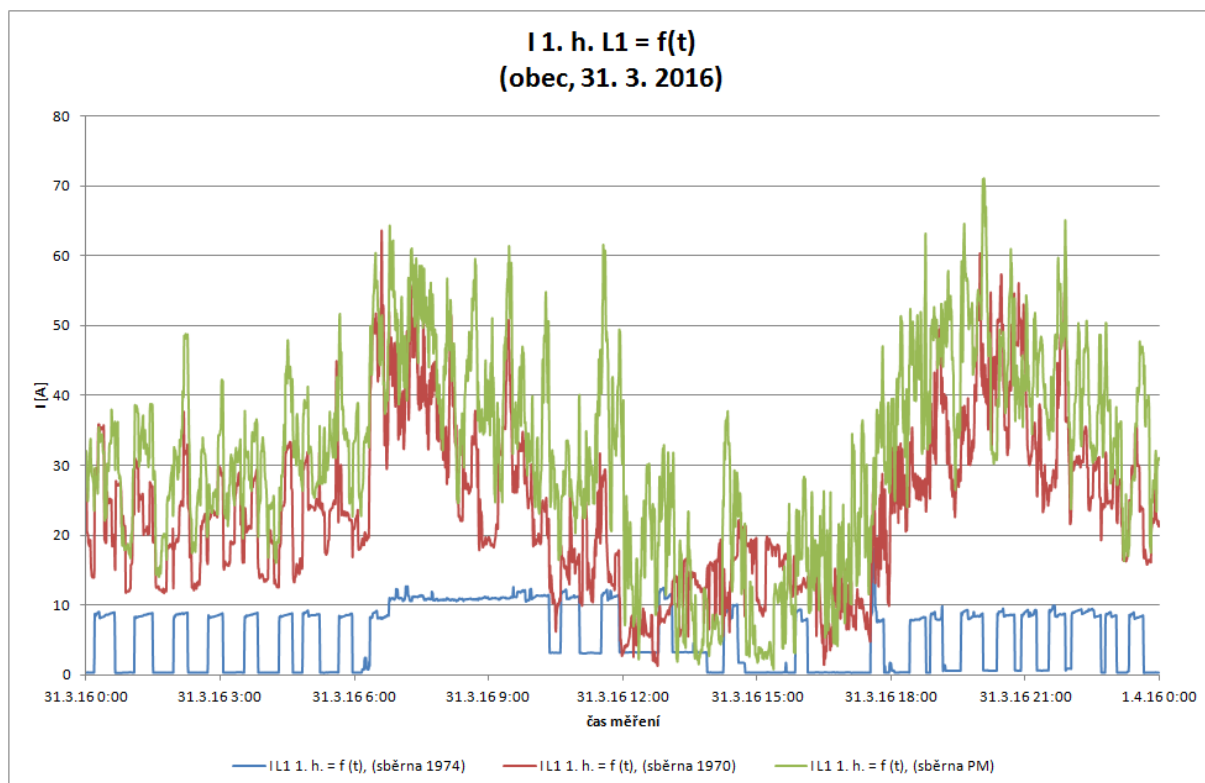
obr. 23 Prosté zobrazení základní harmonické napětí v čase v různých částech distribuční sítě n. n
(obec, středa 30. 3. 2016)



obr. 24 Prosté zobrazení základní harmonické napětí v čase v různých částech distribuční sítě n. n
(obec, středa 30. 3. 2016)



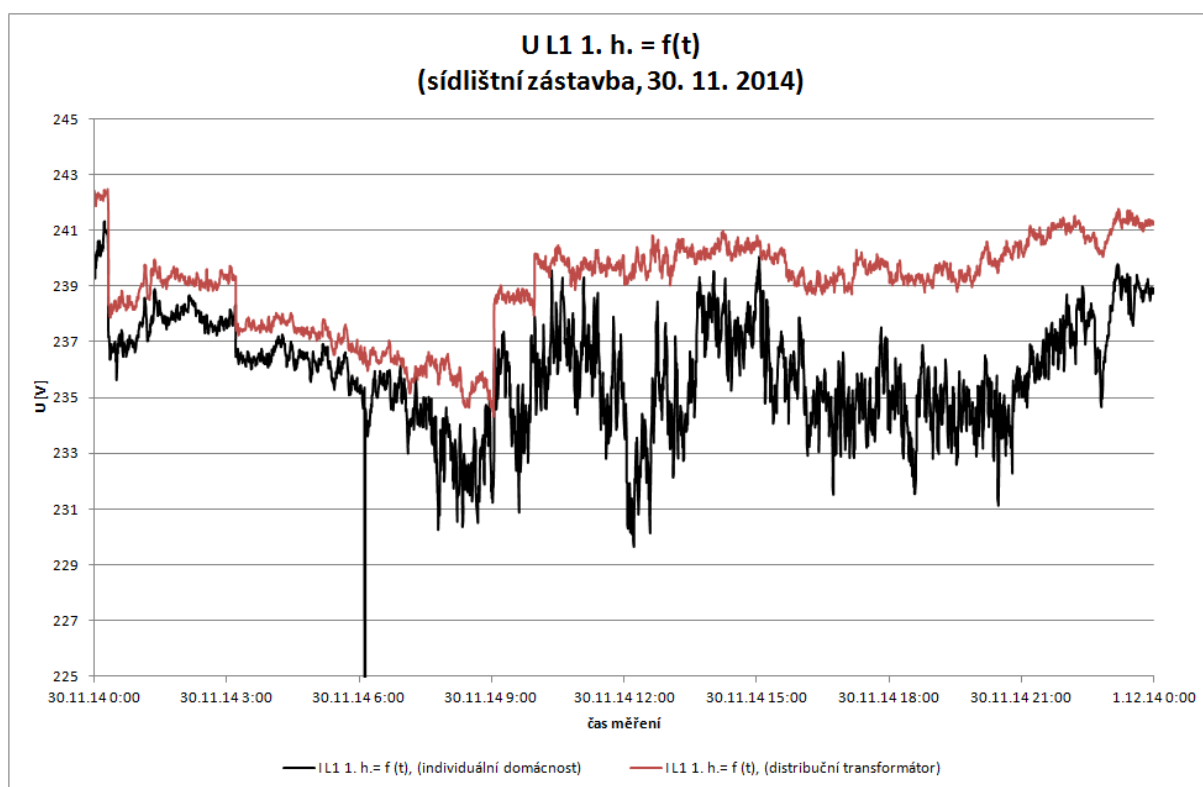
obr. 25 Prosté zobrazení základní harmonické proudu v čase v různých částech distribuční sítě n. n
(obec, středa 30. 3. 2016)



obr. 26 Prosté zobrazení základní harmonické proudu v čase v různých částech distribuční sítě n. n
(obec, čtvrtek 31. 3. 2016)

Z uvedených průběhů základní harmonické napětí je evidentní, že kolísání napětí probíhá v mezích vymezených normou [11], tedy $\pm 10\%$ jmenovitého napětí U_n za předpokladu normálních provozních podmínek, vyjma období přerušení. Lze jasně rozeznat poklesy v průběhu špičkového odběru elektrické energie a opětovný nárůst napětí během odběru minimálního. Nejvíce ovlivněnou částí systému je v kontextu působení aktuálně konzumované elektrické energie na napájecí napětí evidentně sběrna R1974, tedy místo odběru samostatného rodinného domu. Nejméně je naopak pochopitelně ovlivňováno napětí těsně za distribučním transformátorem.

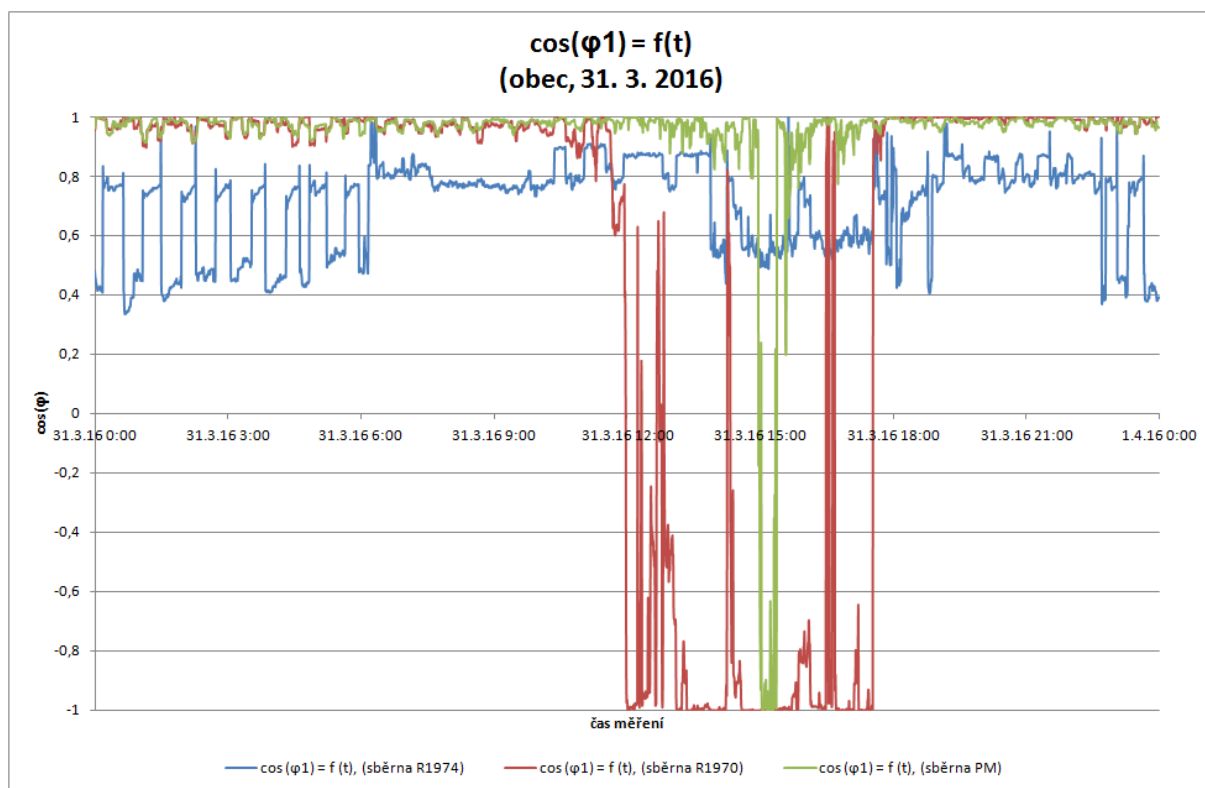
Doplněním záznamu odběru základní harmonické napětí těsně za distribučním transformátorem a individuální domácnosti distribuční sítě městského sídliště na obr. 27 lze dokázat, že uvedené závěry platí pro obě zkoumané sítě.



obr. 27 Prosté zobrazení základní harmonické napětí a proudu v čase v různých částech distribuční sítě n. n (sídlištní zástavba, 30. 11. 2014)

Pozoruhodným úkazem, jenž lze z obr. 23 až obr. 26 vyvodit je působení PVE, který je patrný zejména během odpoledního poklesu spotřební aktivity systému a současně značné aktivity PVE (obr. 25, čtvrtek 31. 3. 2016 12:00 – 18:00). Jelikož jsou zaznamenané hodnoty harmonických proudu dle kap. 4.3.1 pořizovány jako hodnoty efektivní, je třeba

pro jednoznačné určení jejich orientace uvést rovněž záznam účinníku 1. harmonické ze stejného dne.

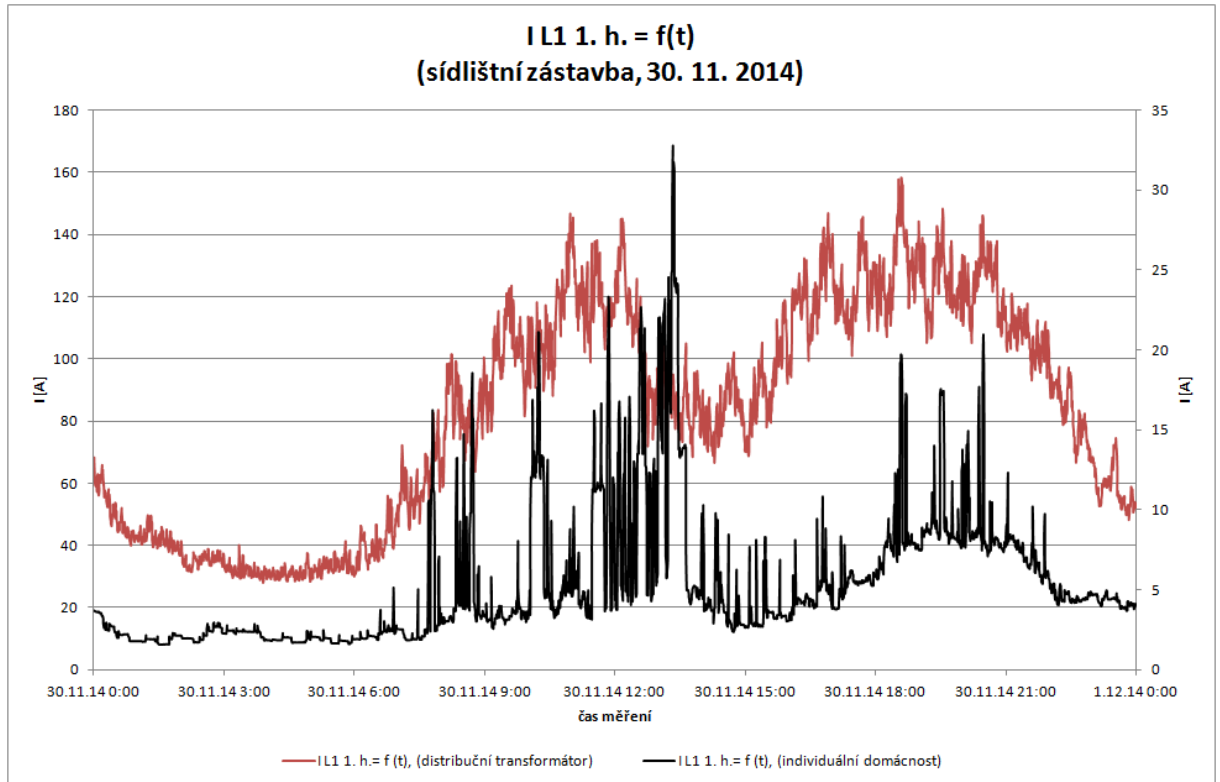


obr. 28 Prosté zobrazení účinníku základní harmonické napětí a proudu v čase v různých částech sítě

(obec, čtvrtek 31. 3. 2016)

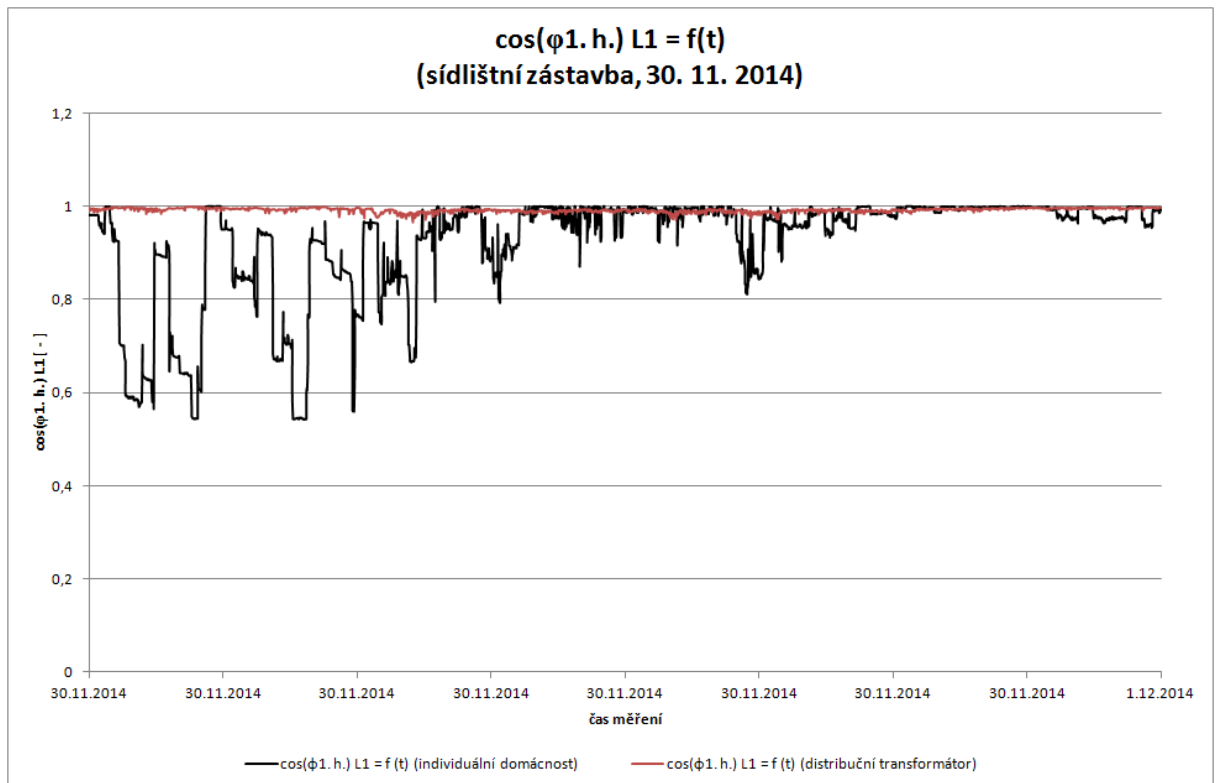
Doplnění cosinu vzájemného úhlu napětí a proudu základní harmonické poskytuje důkaz pro tvrzení, že nejvíce ovlivněnou částí systému připojeným měničem fotovoltaických jednotek je právě jeho střed. Připojený rodinný dům není naopak ovlivněn vůbec, jelikož pouze čerpá elektrickou energii, bez ohledu na způsob jejího vzniku. Nicméně zatímco zaznamenaný $\cos(\varphi_1)$ ve středu sítě a těsně za distribučním transformátorem odpovídá v době nečinnosti PVE přibližně jedné, v případě sběrného místa R1974 kolísá účinník 1. harmonické okolo hodnot 0,4 a 0,8. Z hlediska platného cenového rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2012 ze dne 30. listopadu 2012 je však zřejmé, že odběrné místo R1974 nespadá do definovaných kategorií A, B, nebo C, ve kterých je pod pohružkou případné přírážky odběratel elektrické energie povinen odpovídající velikost $\cos(\varphi_1)$ dodržet.

Pro účely komparace průběhu efektivní hodnoty základní harmonické složky proudu a její orientace v obou sítích je dále opět doplněn záznam stejných hodnot obdrženy během měření v síti městské zástavby ve středu 30. 11. 2014.



obr. 29 Prosté zobrazení základní harmonické napětí a proudu v čase v různých částech sítě

(sídlíšní zástavba, čtvrtek 31. 3. 2016)



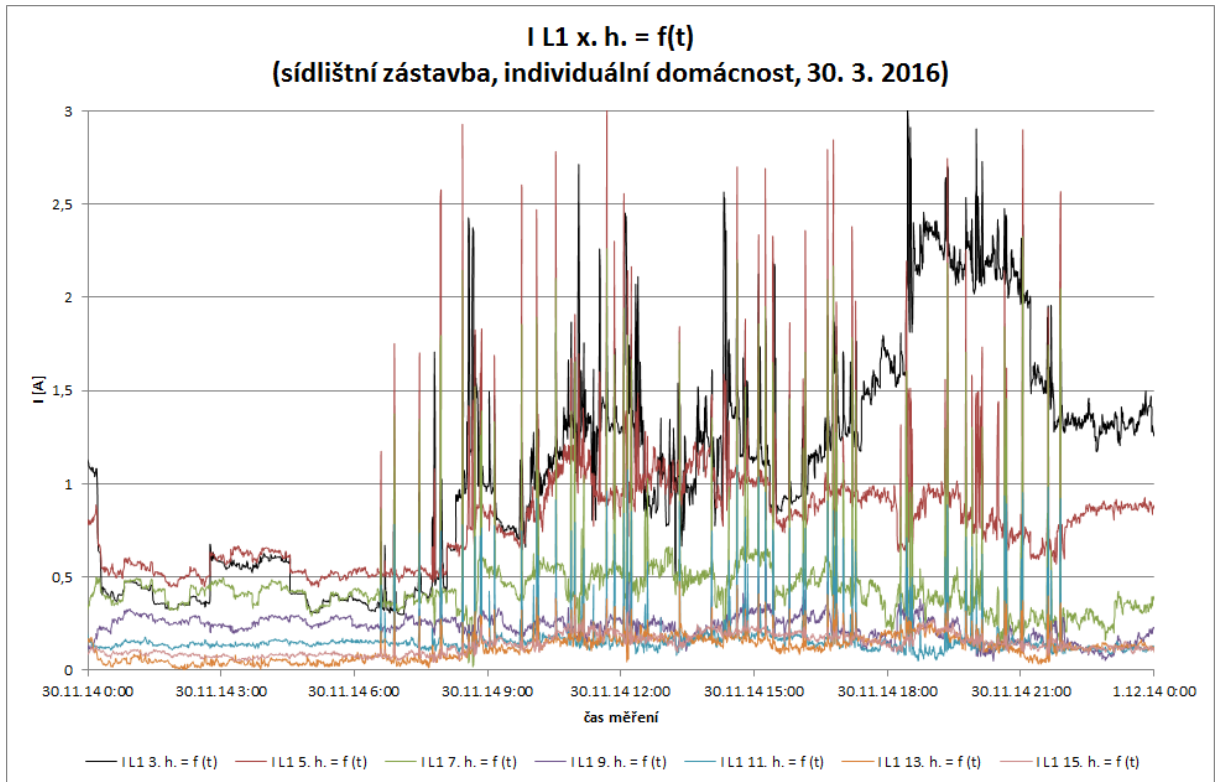
obr. 30 Prosté zobrazení účinníku základní harmonické napětí a proudu v čase v různých částech sítě

(sídlíšní zástavba, čtvrtek 31. 3. 2016)

Průběh odběru základní harmonické proudu v městské zástavbě demonstruje ukázkovou shodu s průběhem denního diagramu zatížení. Zejména v případě odběrného místa těsně za distribučním transformátorem. Díky nepřítomnosti PVE nedochází k výraznému ovlivňování $\cos(\varphi_1)$, jehož velikost v takovém případě evidentně závisí na velikosti základní harmonické složky odebíraného proudu, jenž má dominantní vliv na celkovou velikost činné a jalové složky odebíraného komplexního výkonu, tedy aktuální výši spotřební aktivity domácností. Výše odběru základní harmonické obou vybraných domácností z různých prostředí se ve zkoumané fázi přibližně shoduje.

Dalším zajímavým úkazem z *obr. 23* až *obr. 26* je forma odběru 1. harmonické proudu samostatné domácnosti. Střední hodnota zaznamenaných velikostí efektivních hodnot základní harmonické přibližně odpovídá předpokládanému tvaru denního diagramu zatížení, stejně jako v případě ostatních odběrných míst obou zkoumaných systémů, avšak nastává zde značná fluktuace. Střídavě se měnící úrovně přibližně konstantního minimálního a maximálního odběru je způsobena provozem elektrického spotřebiče se značným odběrem, který je evidentně spínán s ohledem na nastavenou hysterezi, velice podobně jako například elektrické vytápění. Podrobná analýza chování spotřebiče je dále provedena v 7.1.1. Jelikož má provoz uvedené zátěže dominantní vliv na celkový odběr rodinného domu a jeho elektromagnetické působení v síti, lze rozbor jeho chování přijmout jako analýzu působení celé zkoumané domácnosti.

Velikost odběru vyšších harmonických složek proudu v městské zástavbě se v jednotlivých fázích poměrně liší. Největší koncentrace harmonických proudu byla zaznamenána ve fázi L_1 .



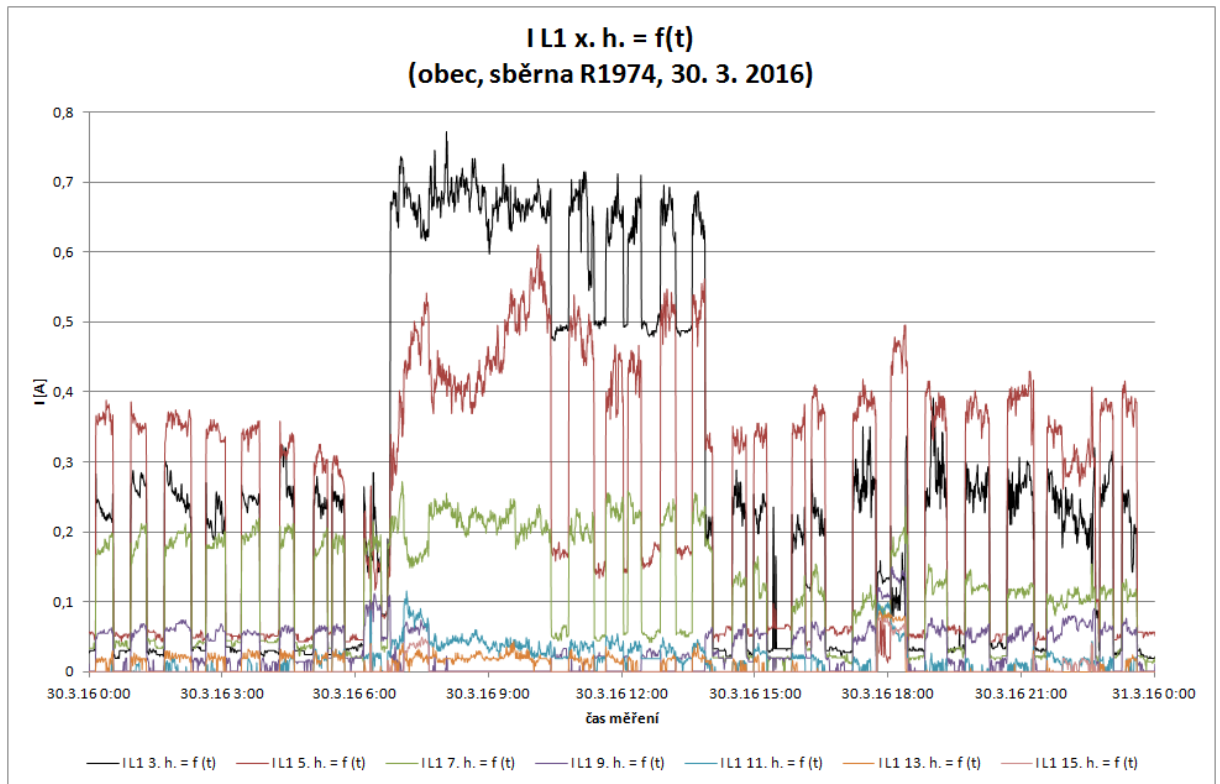
obr. 31 Prosté zobrazení vyšších harmonických složek proudu v čase

(sídlíštní zástavba, středa 30. 3. 2016)

Průběh vyšších harmonických složek analyzovaného vzdáleného odběru sídlíštní zástavby je stejně jako v případě rodinného domu přímo úměrně závislý na velikosti odebíraného výkonu. Na rozdíl od rodinného domu však žádný z připojených spotřebičů jednoznačně nepřevyšuje svým příkonem spotřebiče ostatní. Vzhledem k výši jednotlivých amplitud celkové spektrální hustoty lze předpokládat značný vliv nelineárních zátěží v ostatních částech městské sítě.

7.1.1 Elektromagnetické působení dominantního spotřebiče individuální domácnosti v distribuční síti n. n. obce

Pro úplné zhodnocení elektromagnetického působení dominantního spotřebiče individuální domácnosti v síti je na následném grafu uveden průběh vyšších harmonických složek proudu fáze L_1 během středy 30. 3. 2016, z důvodu přehlednosti pouze do řádu 15.

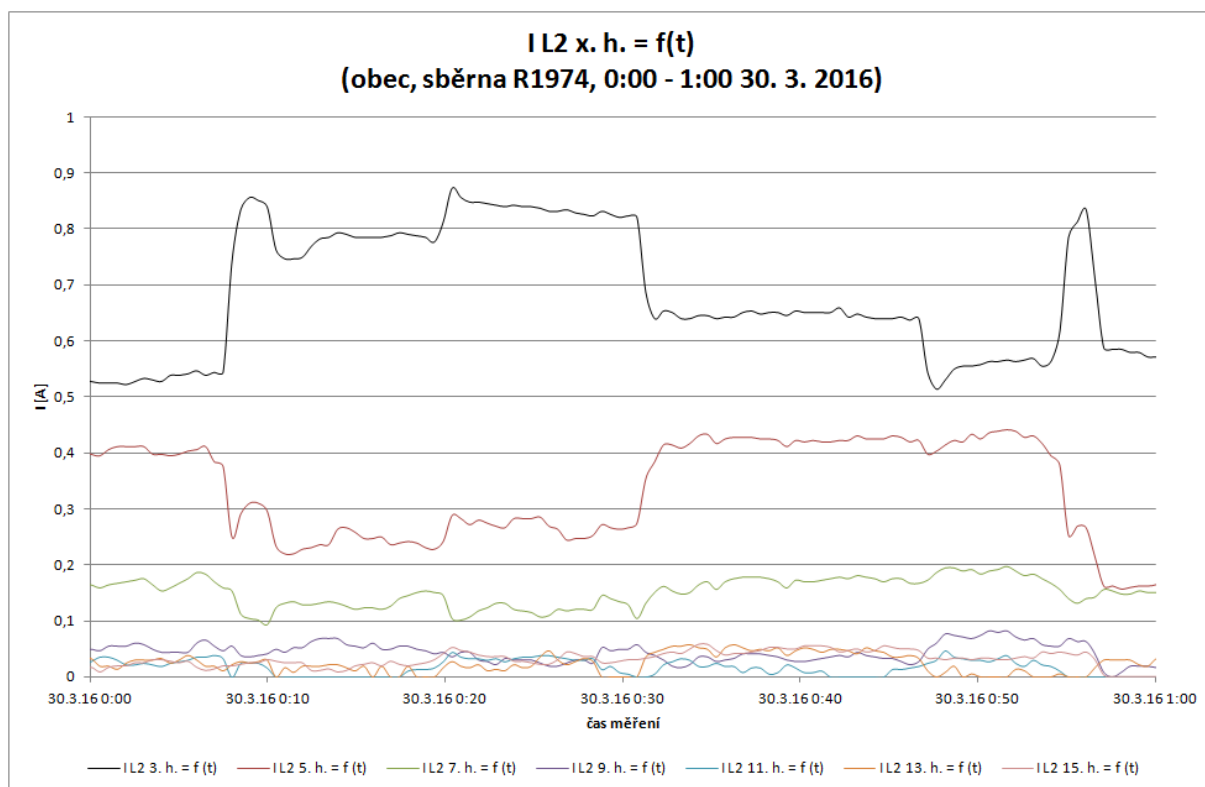


obr. 32 Prosté zobrazení vyšších harmonických složek proudu v čase

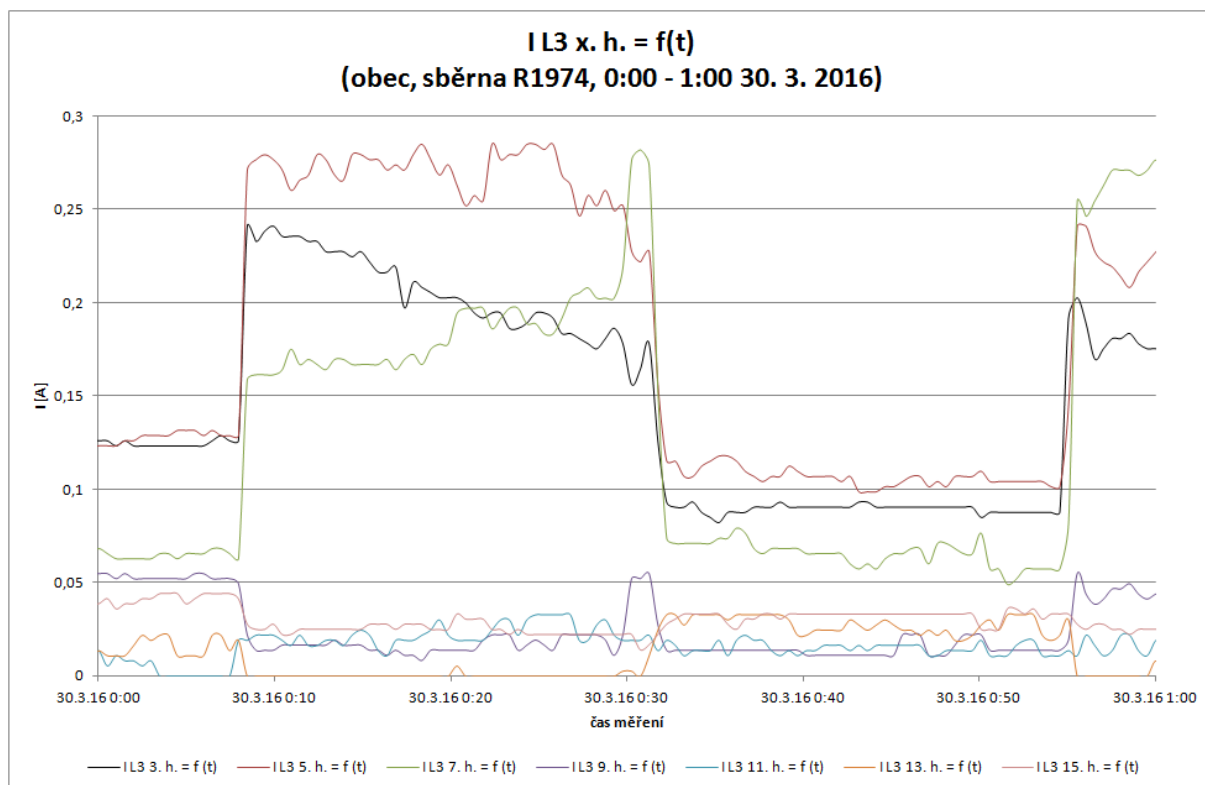
(obec, sběrna R1974, středa 30. 3. 2016)

Srovnáním záznamu 1. harmonické z odběrného místa R1974 z obr. 25 s průběhem lichých harmonických proudů vyšších řádů během stejného období a účínkem $\cos(\varphi_1)$ z obr. 28, který je v průběhu obou vybraných všedních dnů takřka identický, lze dokázat, že zkoumaný spotřebič má podstatný vliv nejen na odběr základní harmonické, ale rovněž na velikost odebíraných harmonických vyšších řádů a velikost účínku $\cos(\varphi_1)$ fáze L_1 .

Za účelem důkladného zhodnocení působení spotřebiče je však třeba se zaměřit i na zbývající fáze systému. Dále jsou proto uvedeny průběhy lichých harmonických proudů do řádu 15 ostatních fází během jednoho z cyklů maximálního a minimálního odběru mezi 0:00 a 1:00 během středy 30. 3. 2016.

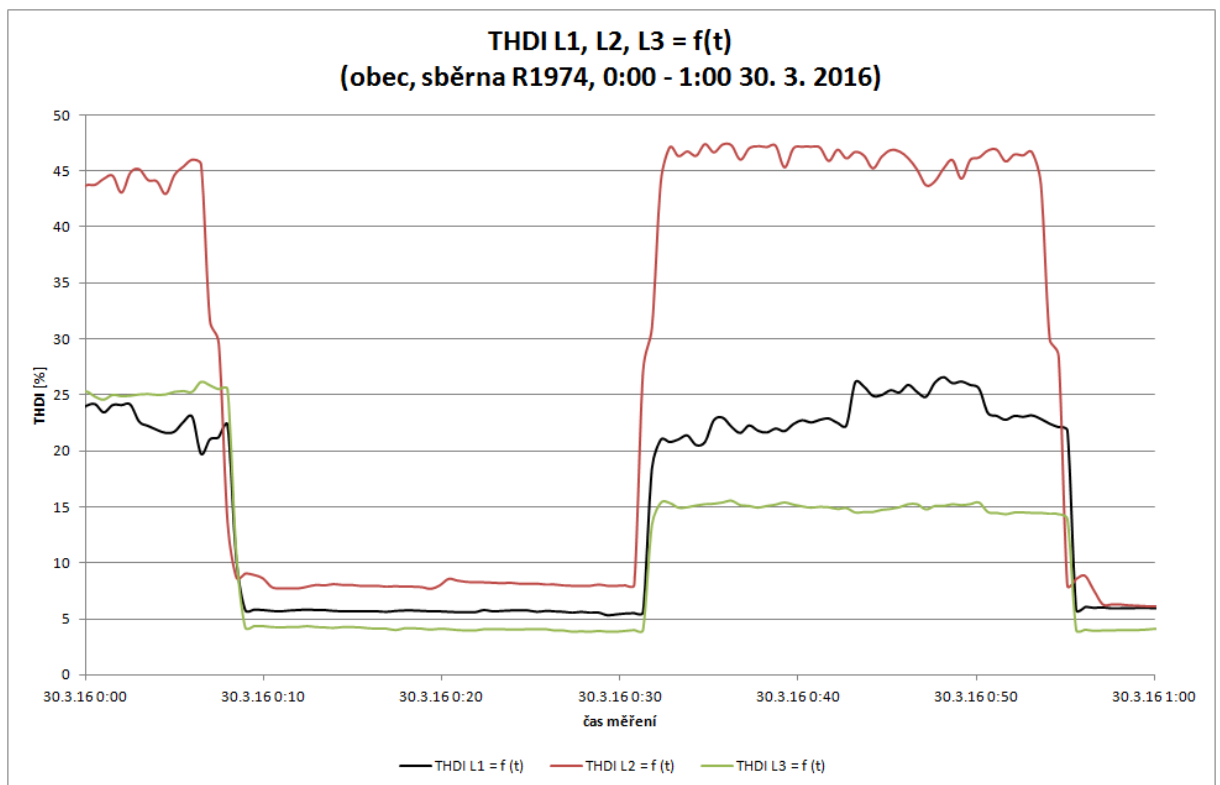
obr. 33 Prosté zobrazení vyšších harmonických složek proudu v čase skrze fázi L_2

(obec, sběrna R1974, 0:00 - 1:00 30. 3. 2016)

obr. 34 Prosté zobrazení vyšších harmonických složek proudu v čase skrze fázi L_3

(obec, sběrna R1974, 0:00 - 1:00 30. 3. 2016)

Elektromagnetické působení spotřebiče se v různých fázích evidentně velice liší. Zatímco odběr vyšších harmonických složek řádu 3., 5. 7. 9. a 13. v době činnosti spotřebiče ve fázi L_1 stoupá, v případě fáze L_2 dochází ve stejnou dobu k nárůstu pouze harmonické proudu 3. řádu a poklesu 5. a 7. řádu. Z pohledu odběru vyšších harmonických proudů skrze fázi L_3 dochází podobně jako v případě fáze 1. k nárůstu 3., 5. a 7. složky, ale zároveň také k poklesu složky 9., 13. a 15. Fluktuace zmíněných řádů navíc v rámci jednotlivých fází probíhá mezi značně odlišnými hodnotami. Posuzování vlastností zkoumané zátěže rodinného domu z hlediska odběru jednotlivých složek celkové spektrální hustoty amplitud se tedy jeví jako značně nesrozumitelné. Z toho důvodu je uvedeno celkové harmonického zkreslení sinusové formy proudu.



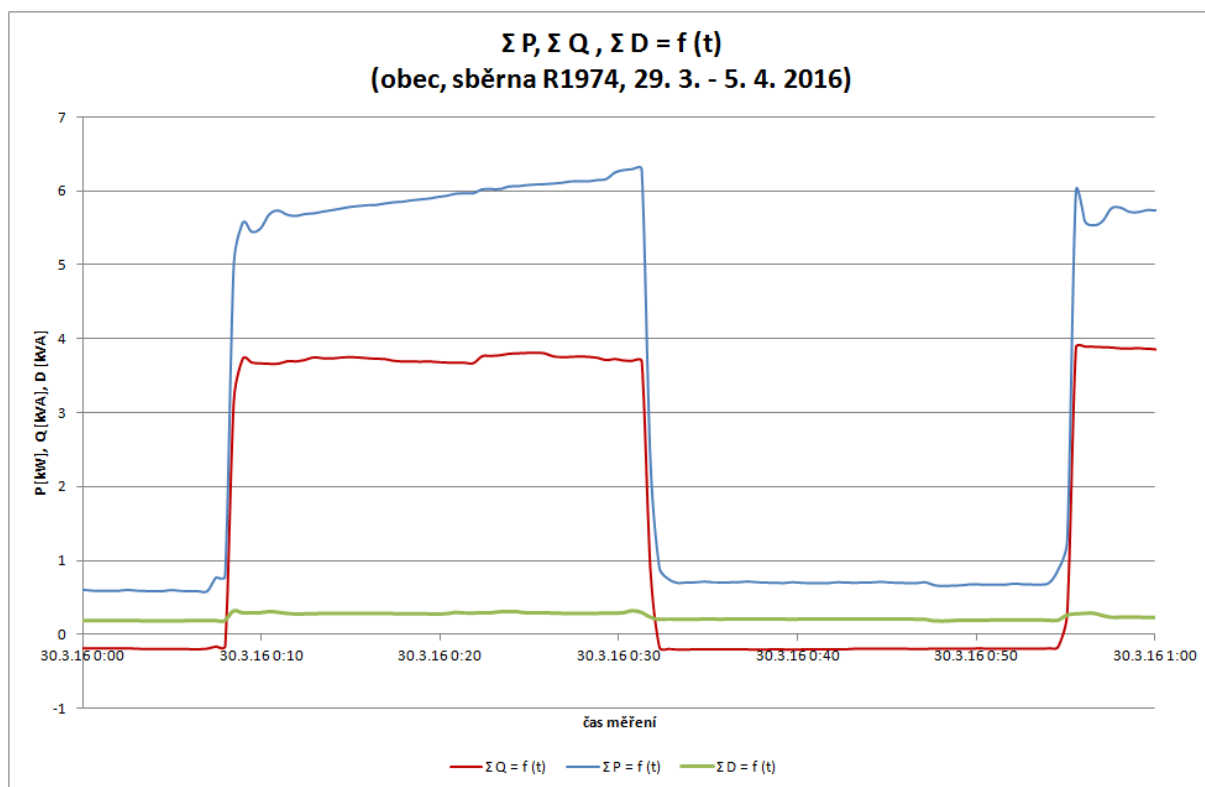
obr. 35 Prosté zobrazení celkové harmonické zkreslení sinusové formy proudu v čase skrze všechny fáze

(obec, sběrna R1974, 0:00 - 1:00 30. 3. 2016)

Zobrazením THD_I během jednoho z cyklů minimálního a maximálního odběru zkoumané zátěže lze poukázat na skutečnost, že koncentrace vyšších harmonických proudů během její činnosti je v porovnání s nárůstem základní harmonické proudu pouze nepatrná a v každé fázi se značně liší. Kupříkladu $THD_I L_3$ dosahuje v době nečinnosti dominantního spotřebiče zhruba trojnásobku hodnoty stejného parametru ve fázi L_1 .

Posledním zobrazeným hlediskem v kontextu analýzy chování zkoumaného spotřebiče je

průběh celkového činného, jalového a deformačního výkonu ve všech třech fázích.



obr. 36 Prosté zobrazení jednotlivých složek komplexního výkonu v čase skrze všechny fáze

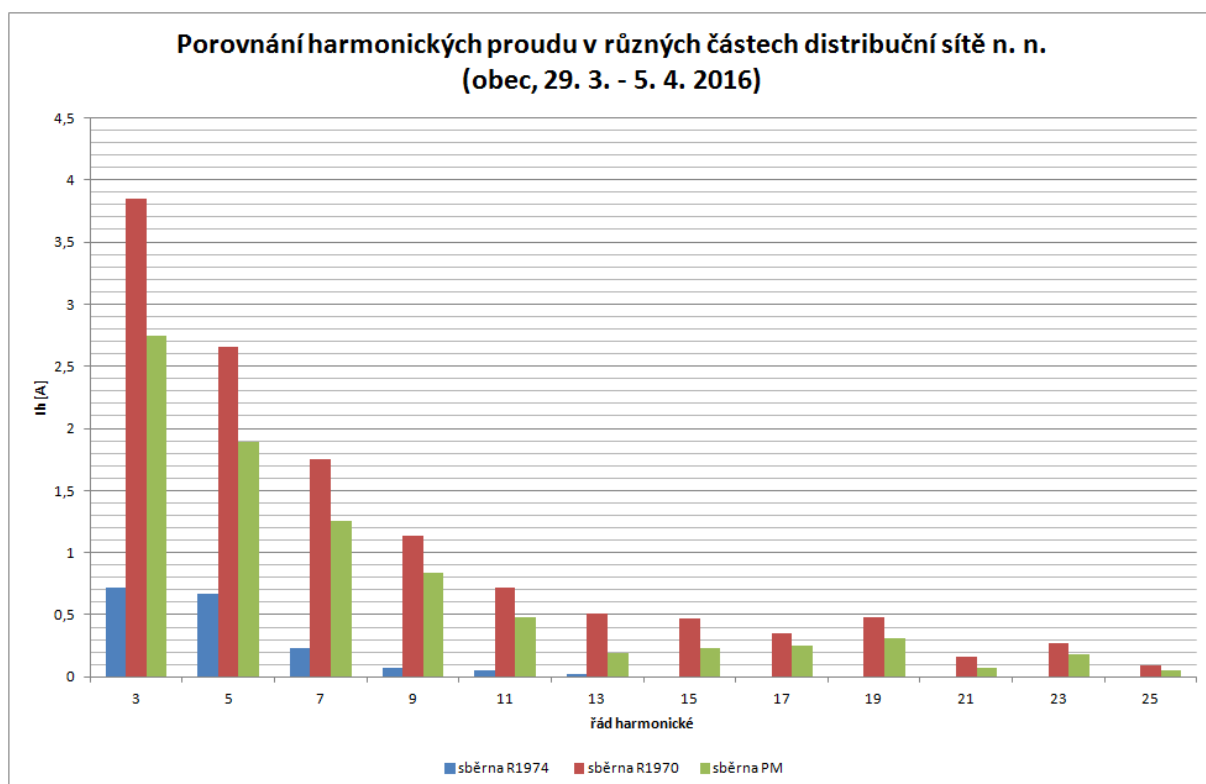
(obec, sběrna R1974, 0:00 - 1:00 30. 3. 2016)

Na základě prostého zobrazení jednotlivých složek komplexního výkonu v době minimálního a maximálního odběru zkoumaného dominantního spotřebiče lze říci, že vyjma převažující velikosti činného výkonu dochází během činnosti spotřebiče také ke značnému odběru rovněž výkonu jalového. Zkoumaná zátěž se tedy vyznačuje vysokou indukčností. Vzhledem k záporné velikosti jalového výkonu během poklesu odběru (-200 VA) je indukční charakter zátěže pravděpodobně kompenzován. Zvýšená hodnota deformačního výkonu ve všech fázích ukazuje na elektronické řízení spotřebiče. S přihlédnutím k dosavadním závěrům a příkonu je zkoumaná zátěž s velkou pravděpodobností elektrický kotel se zásobníkem teplé užitkové vody, který je dle poměrně výskytu harmonických složek proudu řízen střídavým měničem napětí, jehož řídicí úhel je s ohledem na vzájemný posun napětí a proudu, tedy charakter zátěže omezen a umožňuje spojitou regulaci pouze v malém rozsahu.

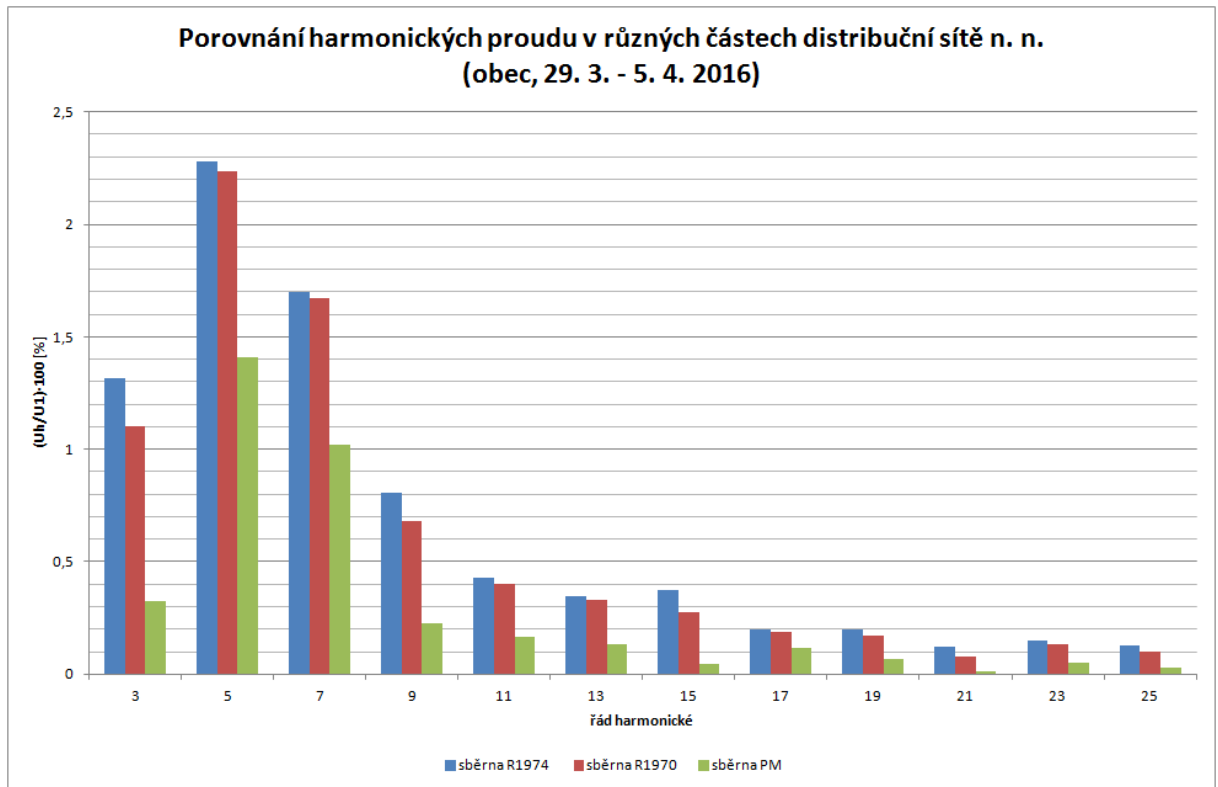
Uvedený závěr je však nutno brát pouze jako jeden z možných výkladů chování diskutovaného spotřebiče s majoritním elektromagnetickým působením na odběr vybraného rodinného domu.

7.2 Koncentrace vyšších harmonických v různých částech sítě během celého týdne

Za účelem srozumitelné demonstrace rozsahu působení vyšších harmonických ve zkoumané části distribučního systému obce během celého týdne je dále znázorněno 95% hodnot harmonických napětí a proudů fáze L_1 během celého zkoumaného týdne v místech R1974, R1970 a PM (viz. obr. 5).



obr. 37 Porovnání 95% percentilu harmonických proudů v různých částech distribuční sítě n. n.
(obec, 28. 3. - 5. 4. 2016)



obr. 38 Porovnání 95% percentilu harmonických napětí v různých částech distribuční sítě n. n.
(28. 3. - 5. 12. 2016)

Největší zaznamenaná koncentrace harmonických proudů je dle *obr. 37* ve středu distribuční soustavy (sběrna R1970), nejnižší hodnoty harmonických proudů samozřejmě generuje individuální rodinný dům, jenž byl zaznamenan v sběrném místě R1974. Vzájemné spolupůsobení těchto proudů však vyvolává nejvyšší hodnoty harmonických napětí v místě sběrně R1974, tedy místě s nejnižší koncentrací harmonických proudů.

Jednoduché vysvětlení vysokých hodnot harmonických napětí lze vztáhnout rovněž k distribučnímu systému panelového komplexu. Nízké hodnoty odebíraných harmonických proudů v místě sběrně R1974 souvisí s vysokou hodnotou impedance rodinného domu v porovnání se zbytkem sítě. Nízké hodnoty frekvenčních složek proudů, které se v poměru těchto impedancí v síti šíří, svým úbytkem na těchto impedancích vytváří vyšší hodnoty harmonických napětí. Je třeba si dále uvědomit, že malý rozdíl v reaktanci v oblasti nízkých kmitočtů přirozeně znamená, při zanedbání vlivu případné rezonance, podstatně větší rozdíl reaktancí ve vysokofrekvenční oblasti.

7.3 Shrnutí míry koncentrace nízkofrekvenčního rušení vzdáleného odběru veřejné napájecí sítě blíže nespecifikované části satelitní obce a sídlištní zástavby

Za účelem konečného zhodnocení míry elektromagnetických emisí generovaných individuálním rodinným domem a bytem v panelové budově je dále uvedeno srovnání celotýdenního měření sdruženého výkonu a jednotlivých složek výkonu komplexního skrze všechny fáze. Vzhledem ke značné fluktuaci veličin pouze ve formě mediánu.

tab. 4 Porovnání 50% hodnot sdruženého výkonu a individuálních složek komplexního výkonu během celého týdne ve všech fázích

místo měření	ΣP [kW]	ΣQ [kVA]	ΣD [kVA]	ΣS [kVA]
rodinný dům	4,4	1,9	0,27	4,84
byt panelového domu	2,7	-0,4	0,59	3,1

Jednoznačně vyšší hodnota zdánlivého výkonu rodinného domu a jeho činné a jalové složky je přirozeně způsobena všeobecně vyšší spotřební aktivitou rodinných domů. Vysoká hodnota deformačního výkonu souvisí s vyšší koncentrací harmonických napětí a proudu v panelové budově. Zajímavým úkazem je převážně záporná velikost odebíraného jalového výkonu v bytě, ke které dochází ve fázích L_1 a L_2 . Hodnota zmíněné složky zdánlivého výkonu skrze fázi L_3 je kladná a převážně vyšší, než v ostatních fázích.

S přihlédnutím k dosud uvedeným závěrům a závěrům předchozích kapitol lze říci, že k elektromagnetickému rušení ve veřejné distribuční síti přispívají v porovnání s moderními rodinnými domy zejména byty panelových budov. Dále je třeba uvést, že zatímco forma odebírané elektrické energie je v případě zkoumaného rodinného domu dána převážně provozem individuálních třífázových spotřebičů značného příkonu, celkový odběr bytu panelového domu je určen majoritním podílem velkého počtu jednofázových zařízení s malým odběrem, které však svým vzájemným spolupůsobením generují harmonické obecně vyšších hodnot.

8 ZPŮSOBY ZPRACOVÁNÍ ZKOUMANÉHO STATISTICKÉHO SOUBORU

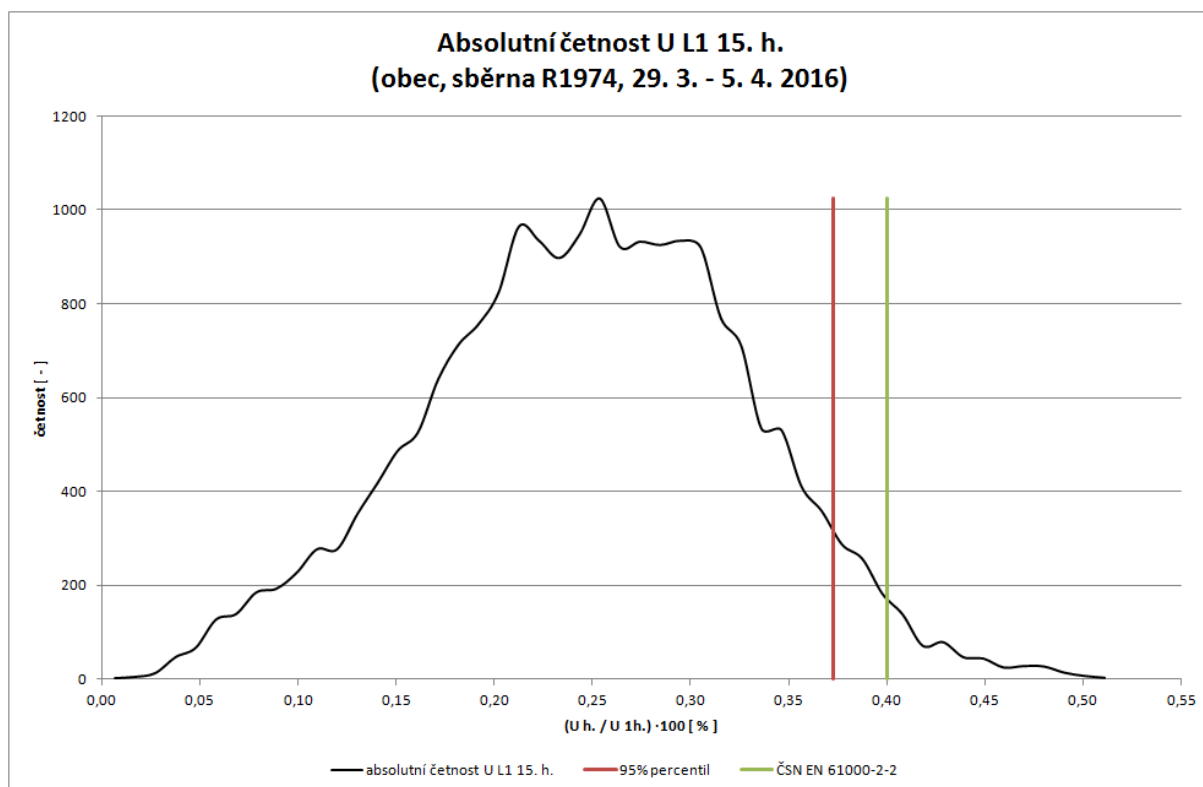
Jelikož je cílem této práce mimo jiné hledat nová statistická hlediska pro hodnocení obsahu elektromagnetického rušení v síti je dále provedeno a diskutováno absolutní rozdělení četností kritických veličin ve vztahu k platným kompatibilním úrovním dle příslušné normy [8].

8.1 Zobrazení absolutní četnosti vybraných veličin

Prvním zobrazeným rozdělením je tedy 15. harmonické napětí v místě sběrný R1974 ve fázi L_1 v různých částech distribučního systému za účelem diskuse případných odlišností.

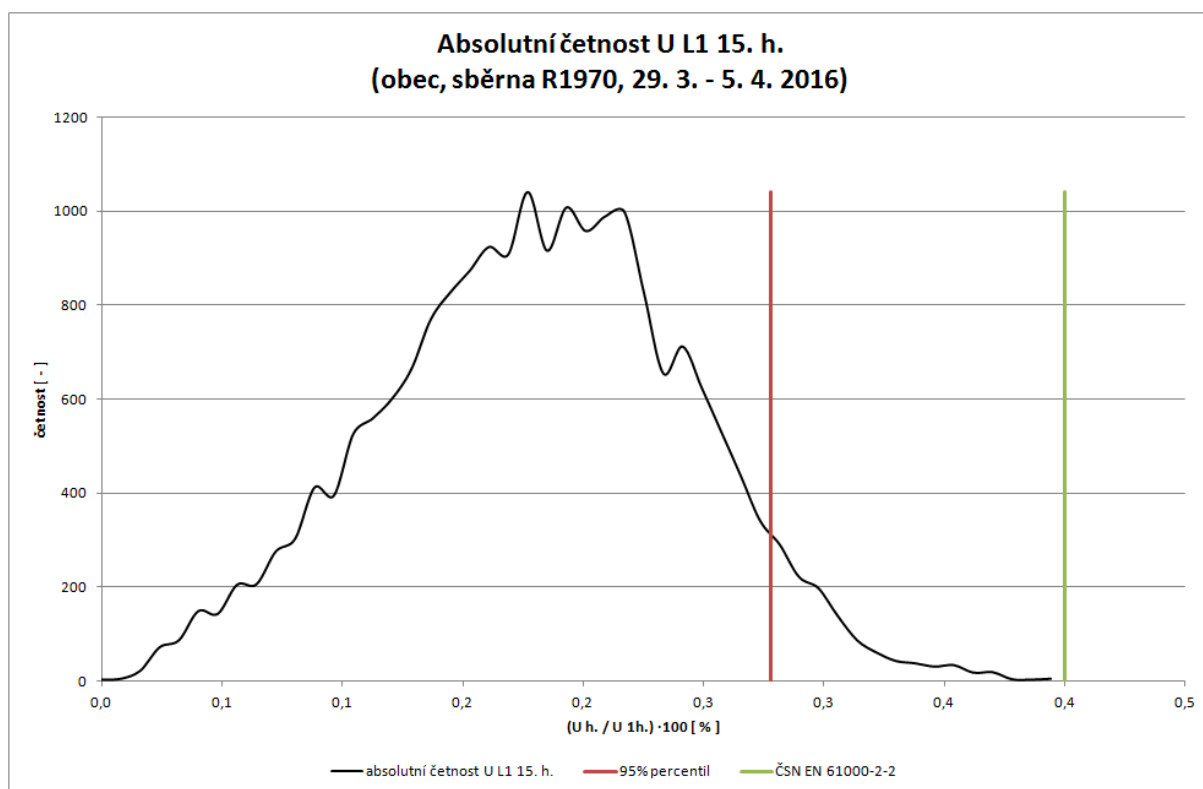
Zobrazení četností harmonických proudů je vlivem značné fluktuace hodnot velice nepřehledné. Zatímco harmonické napětí kolísají v určitém pásmu kladných hodnot, harmonické proudy fluktuují mezi svou maximální hodnotou a hodnotou nulovou, přičemž nelze bez informace o orientaci konkrétní harmonické složky proudu jednoznačně říci, zda je okamžitá hodnota pořízeného vzorku v danou chvíli kladná, nebo záporná. Rozložení četností harmonických proudů proto z uvedených důvodů není uvedeno.

Zpracované četnosti harmonických obsahují celkem 50 ekvidistantně rozdělených prvků statistického souboru (někdy označovaných také jako třídy hodnot) z celého zkoumaného týdne. Dle závěrů práce [3] je evidentní nestandardní rozdělení hodnot, které jsou proměnlivé v čase. Provedené zobrazení absolutní četnosti je proto provedeno výhradně numericky.



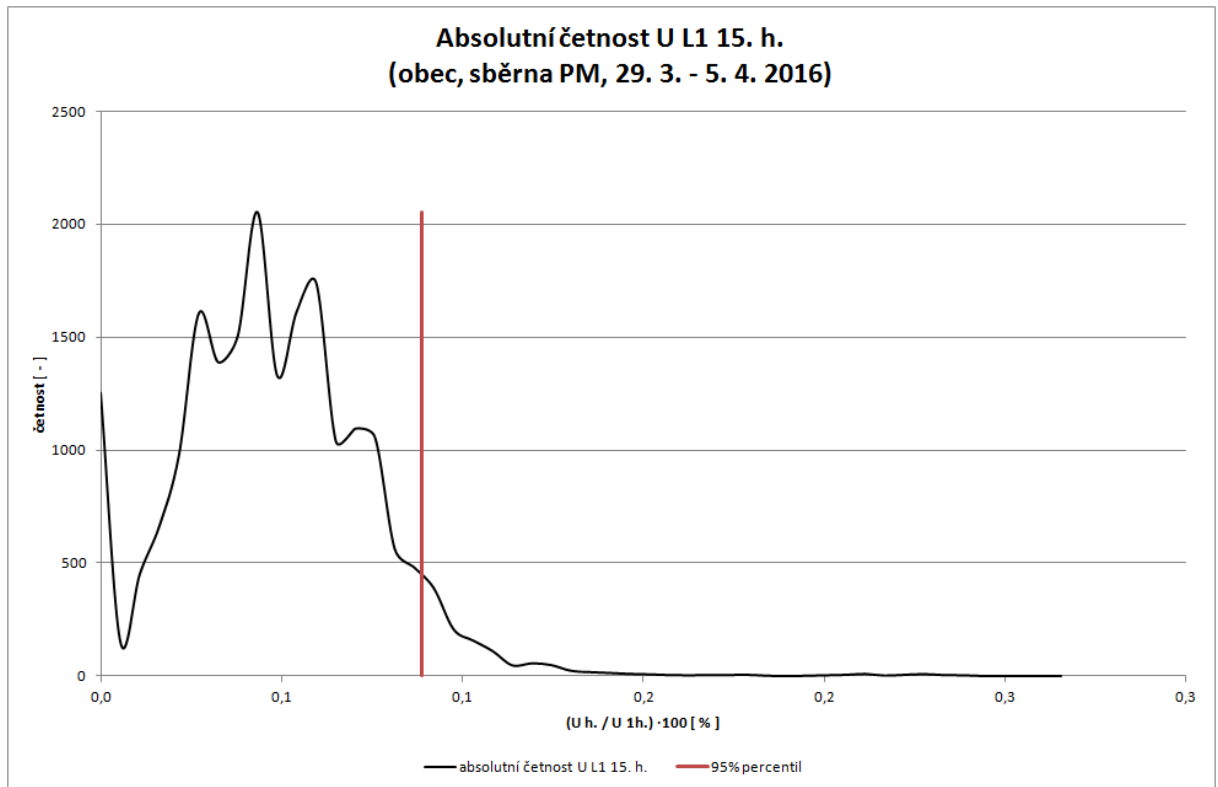
obr. 39 Srovnání zobrazení absolutní četnosti 15. harmonické napětí s platnou legislativou

(obec, sběrna R1974, 29. 3. - 5. 4. 2016)



obr. 40 Srovnání zobrazení absolutní četnosti 15. harmonické napětí s platnou legislativou

(obec, sběrna R1970, 29. 3. - 5. 4. 2016)



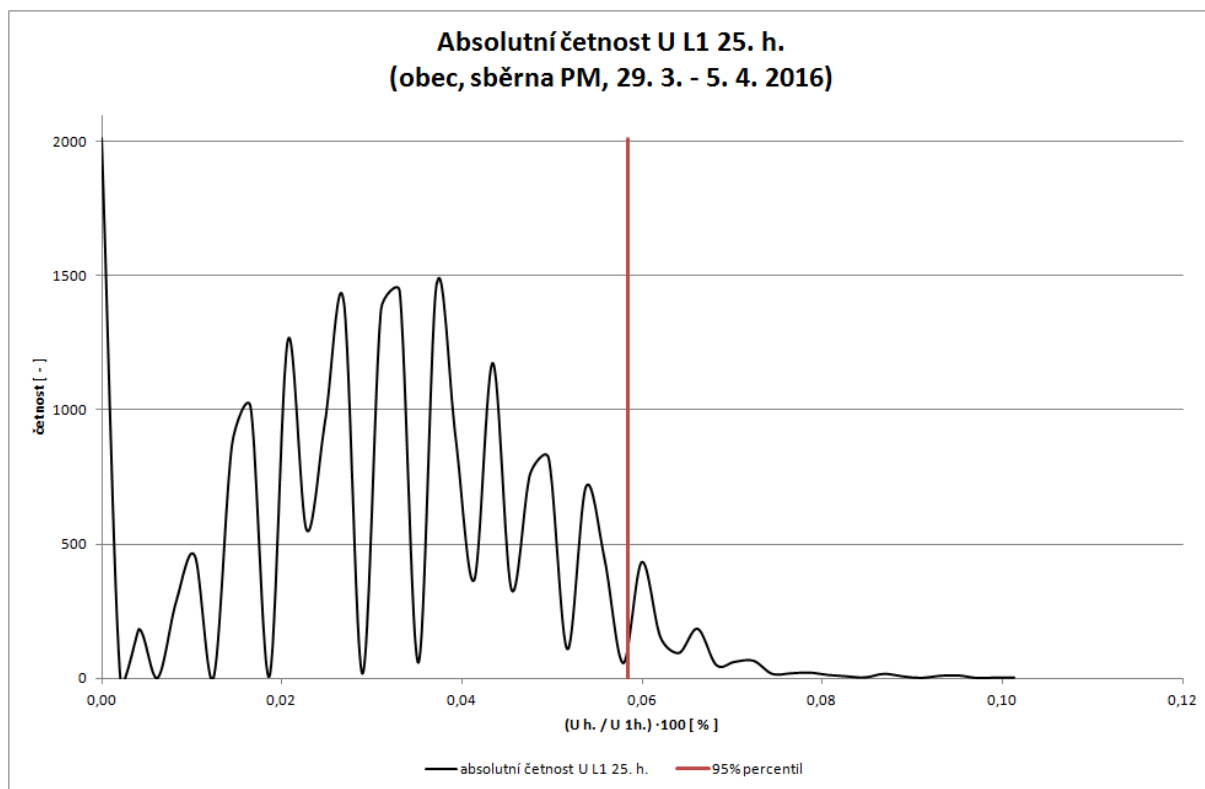
obr. 41 Srovnání zobrazení absolutní četnosti 15. harmonické napětí s platnou legislativou

(obec, sběrna PM, 29. 3. - 5. 4. 2016)

Přestože provedené četnosti neodpovídají žádnému ze známých rozložení veličin (normální, Weibullovo, Studentovo atd.), lze na jejich základě zobrazit vybrané výsledky z lépe srozumitelné perspektivy.

Poměrně symetrické rozložení 15. harmonické složky napětí z **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** celkem přehledně ukazuje, že pouze nepatrná část hodnot dosahuje velikosti stanovených kompatibilních úrovní. Nepatrně kmitavý průběh absolutního rozdělení 15. harmonické napětí v místě sběrně PM je typický zejména pro rozdělení harmonických vyšších řádů. Je částečně způsoben postupně převažujícím výskytem některých, obvykle nulových, nebo téměř nulových hodnot a řídkého výskytu hodnot ostatních v porovnání s celkovým počtem zvolených prvků statistického souboru. Dále je zmíněná kmitavost způsobena současným působením spotřebičů, jejichž provoz má na konkrétní řady harmonických dominantní vliv, nebo je charakteristický pro určitou denní dobu u většiny připojených spotřebičů, popř. domácností. Větší počet zdrojů konkrétní harmonické složky přirozeně zvyšuje počet možných permutací hodnot, které jsou celým systémem generovány. S větším počtem hodnot výsledných odběrů různé velikosti dojde k rovnoměrnějšímu rozdělení do ekvidistantně zvolených tříd. Hladké rozdělení četnosti se

proto projevuje zejména u řádů harmonických, jenž jsou způsobeny provozem majoritní části připojených nelineárních spotřebičů uvnitř daného systému. K výraznému kmitání dochází spolupůsobením uvedených vlivů například u 25. harmonické napětí těsně za distribučním transformátorem (sběrné místo PM).



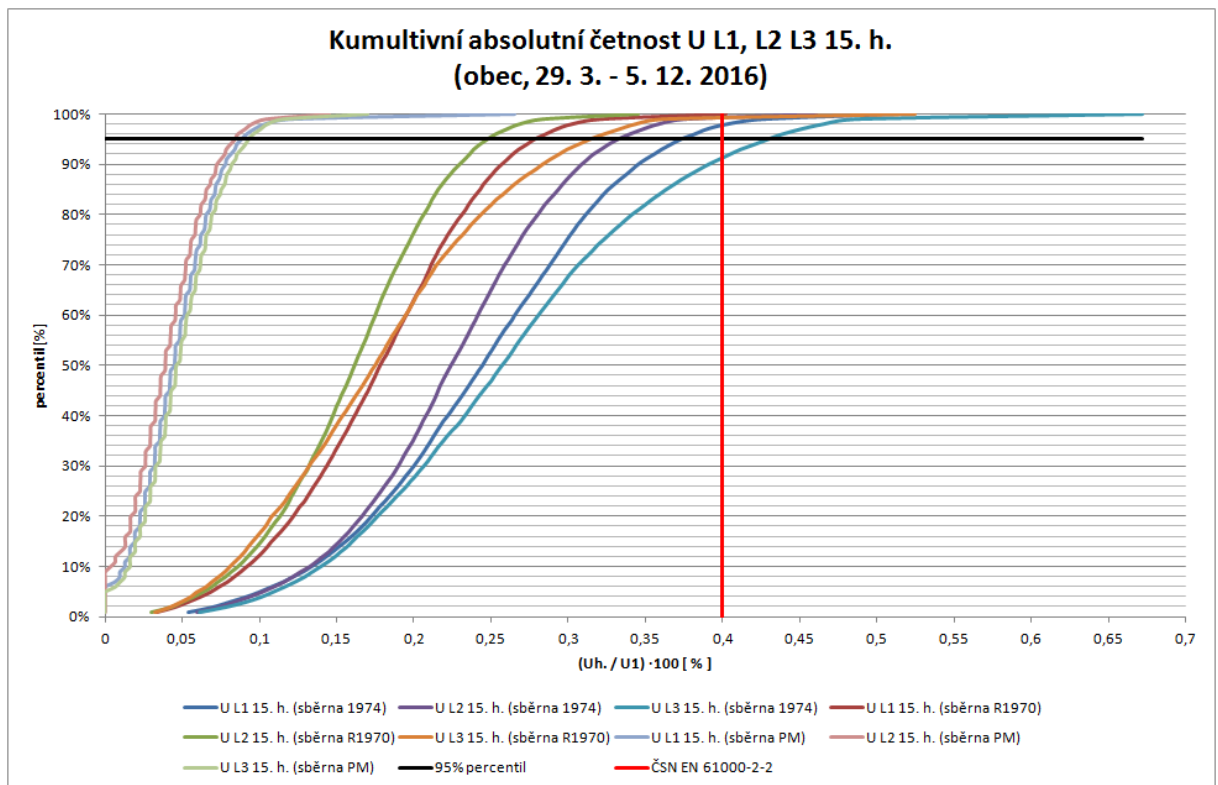
obr. 42 Zobrazení absolutní četnosti 25. harmonické napětí

(obec, sběrna R1974, 29. 3. - 5. 4. 2016)

Zobrazením absolutních četností vybraných harmonických však neposkytuje možnost jednoznačného vzájemného srovnání, je-li četnost určitých tříd hodnot příliš vysoká, nebo v případě, že se minimální a maximální hodnoty rozložení porovnávaných veličin nadmíru liší. Z tohoto důvodu je srovnání 15. harmonické napětí v místech R1974, R1970 a PM provedeno znovu, avšak tentokrát ve všech měřených fázích s použitím absolutní četnosti kumulativní, která může být z uvedených důvodů výhodnější.

8.2 Absolutní kumulativní četnost

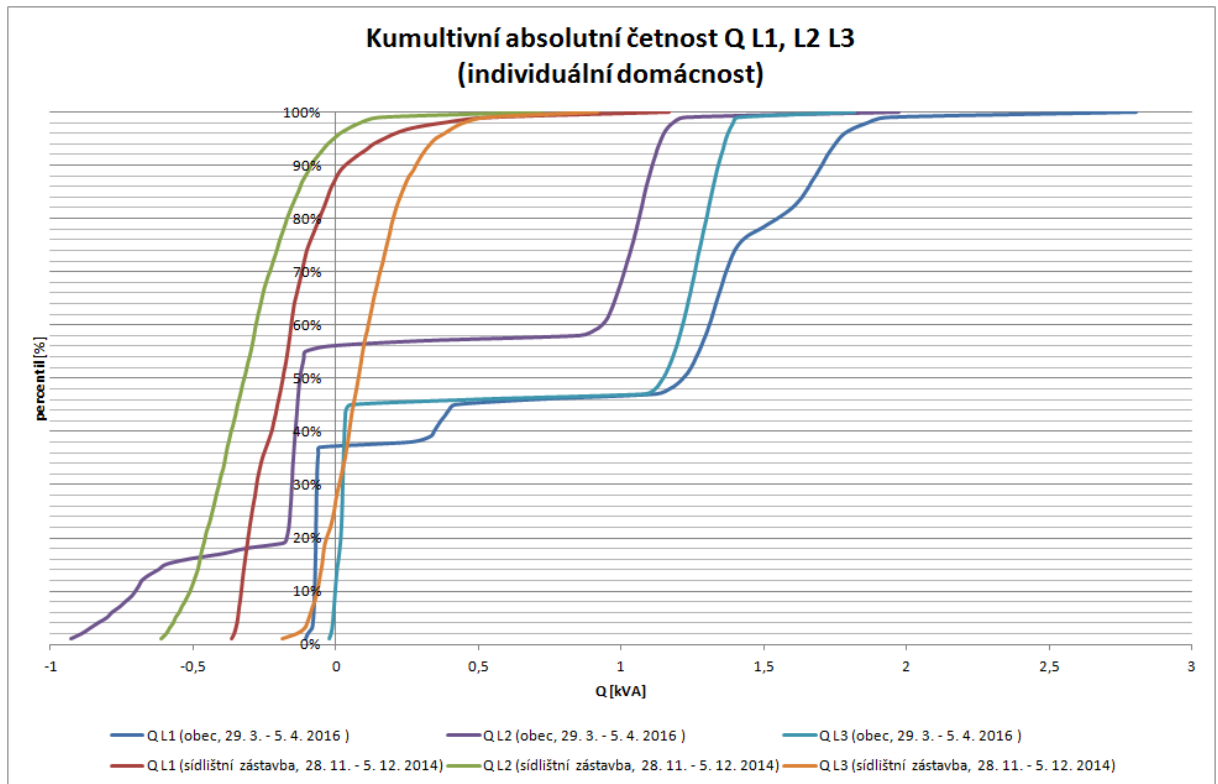
Absolutní kumulativní četnost obsahuje stejně jako dosud provedené četnosti 50 ekvidistantně rozdělených prvků shodného statistického souboru. Závislost je doplněna 95% percentilem a příslušnou kompatibilní úrovní, ovšem nyní pouze v rámci jediného zobrazení.



obr. 43 Zobrazení absolutní kumulativní četnosti 15. harmonické napětí v různých částech obou zkoumaných distribučních systémů (obec, sběrna R1974, 29. 3. - 5. 4. 2016)

Na základě provedené závislosti obr. 43 lze ověřit závěry předchozích kapitol týkající se kritické části sítě z hlediska koncentrace harmonických napětí. Tímto místem je evidentně sběrna R1974. Dále je možné vidět, že normou stanovená kompatibilní úroveň je překročena pouze ve fázi L_3 v místě vzdáleného odběru R1974, konkrétně se 95% percentil této fáze blíží hodnotě 0,43%, zatímco hodnota kompatibilní úrovně (0,4%) odpovídá 91% percentilu zaznamenaných efektivních hodnot zkoumané frekvenční složky.

Další možné využití kumulativní četnosti je zobrazení percentuální rozložení záznamu jalového výkonu ve všech fázích v místě vzdáleného odběru sídlištní zástavby a individuální domácnosti distribuční sítě obce. Lze tedy mimo jiné přesně demonstrovat percentuální zastoupení záporné části jalového výkonu v jednotlivých fázích.



obr. 44 Zobrazení absolutní kumulativní četnosti 15. harmonické napětí v různých částech obou zkoumaných distribučních systémů (obec, sběrna R1974, 29. 3. - 5. 4. 2016)

Jediným zobrazením lze opět ukázat, že zatímco přibližně 96% procent pořízených hodnot jalového výkonu fáze L_2 v místě vzdáleného odběru městské distribuční sítě nabývá záporných hodnot, v případě fáze L_3 je okolo 70% zaznamenaných hodnot kladných. Náznak kapacitního charakteru zátěže se částečně projevil rovněž u hodnot, jenž byly pořízeny v místě připojení rodinného domu zkoumané obecní napájecí sítě. Především ve fázi L_2 je 56% záznamu jalové složky výkonu záporných.

8.2.1 Shrnutí výhod použitého statistického zpracování

Nepochybnou výhodou použití absolutní kumulativní četnosti hodnot je možnost přímého zkoumání procentuálního zastoupení kompatibilních úrovní ve vztahu k celkovému rozsahu hodnot elektromagnetických emisí. Uvedené statistické hledisko dále umožňuje přehledné zobrazení velkého množství dat současně, jejichž libovolné procentuální části mohou být následně vztaženy ke konkrétním hodnotám (např. kompatibilním úrovním). Jinými slovy se lze přímo přesvědčit nejen o konkrétní hodnotě určitého percentilu statistického souboru, ale je rovněž možné přímo stanovit, jakému percentilu odpovídá libovolná hodnota mezi minimem a maximem daného statistického souboru. Jedná se tedy

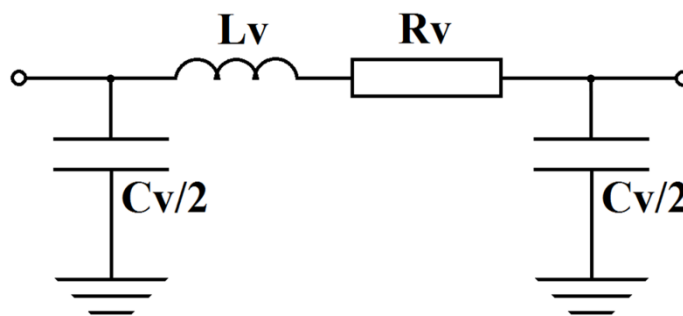
bezpochyby o efektivní statistický prostředek pro hodnocení míry koncentrace elektromagnetických emisí v síti.

9 MODEL REÁLNÉ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ N. N.

9.1 Podklady pro model

Současně s obdrženým záznamem elektromagnetických emisí, jenž je detailně specifikován v úvodní části 5. kapitoly, byly za účelem simulace reálné sítě poskytnuty pro tuto práci rovněž klíčové parametry kabelů a transformátorů nízkonapěťové hladiny zkoumané části veřejné napájecí sítě, společně s parametry sítě napěťových hladin nadřazených. Podrobný seznam dílčích částí modelovaného systému je uveden v příloze A, příslušné parametry jsou popsány v příloze B a C .

Simulace distribuční sítě se dopouští několika zjednodušení. S ohledem na poskytnutá data nezahrnuje orientaci generovaných harmonických složek proudu a je provedena pouze pro fázi L_1 , není proto zohledněno rovněž působení případné nesymetrie mezi ostatními fázemi systému. Jednotlivé úseky vedení jsou modelovány pomocí π -článku, tvořeného podélnou impedancí vedení, která je koncentrována do středu článku mezi příčnou admitancí poloviční velikosti na začátku a konci simulovaného vedení.



obr. 45 π -článek

Dle závěrů práce [19] lze pomocí π -článku nahradit venkovní vedení do 400 km a vedení kabelová, jejichž délka nepřesahuje 200 km. Transformátory jsou reprezentovány sériovou kombinací ideálního rezistoru a induktoru. Všechny vypočtené hodnoty jsou vztaženy ke společné napěťové hladině 0,4 kV.

9.2 Příklad výpočtu individuálních prvků modelu reálné distribuční sítě n. n.

Navzdory nepatrně vyšší hodnotě sdruženého napětí za účelem kompenzace úbytků v síti je s ohledem na místo měření uvažováno $U_n = 400 \text{ V}$. Jednofázový zkratový výkon vvn soustavy 110kV je $S_k = 1644 \text{ MVA}$. Napěťový součinitel c je dle [12] s ohledem na napěťovou hladinu volen $c = 1,1$. Impedance sítě je tedy dána vztahem:

$$Z_S = \frac{c \cdot U_v^2}{S_k} = 1,1 \cdot \frac{400^2}{1644 \cdot 10^6} = 10,71 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (9.1)$$

Jelikož se poskytnutá velikost zkratového výkonu S_k vztahuje stejně jako ostatní poskytnuté parametry k síťové frekvenci 50Hz, lze vzhledem k zanedbatelné velikosti reálné složky impedance sítě, provést odvození velikosti indukčnosti této sítě následovně:

$$L_S = \frac{Z_S}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{10,71 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot f} = 10,71 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (9.2)$$

Příklad výpočtu odporu a indukčnosti jednoho ze dvou transformátorů, jenž jsou v simulované části veřejného napájecího systému zahrnuty, je dále proveden pro transformátor mezi napěťovou hladinou 0,4 a 22 kV. Jmenovitý výkon stroje odpovídá $S_T = 400 \text{ kVA}$, napětí nakrátko $u_k = 26\%$ a ztráty nakrátko a naprázdno jsou $\Delta P_k = 4725 \text{ W}$ a $\Delta P_0 = 529 \text{ W}$.

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_v^2}{S_T} = \frac{26}{100} \cdot \frac{0,4}{400} = 104 \text{ m}\Omega \quad (9.3)$$

$$R_T = \Delta P_k \cdot \frac{U_v^2}{S_T^2} = 4725 \cdot \frac{0,4^2}{400^2} = 4,7 \text{ m}\Omega \quad (9.4)$$

$$L_T = \frac{\sqrt{Z_T^2 - R_T^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{0,104^2 - 0,047^2}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 330,7 \mu\text{H} \quad (9.5)$$

Dále je uveden příklad výpočtu vybraného úseku vedení modelované části distribuční sítě, který je v příloze A na napěťové hladině 22 kV popsán číslem 1. Parametry kabelů nízkonapěťové části sítě byly získány z katalogu výrobce NTK Cables, jehož důležité pasáže obsahuje příloha B. Jelikož závisí parametry simulovaných lan vysokého napětí (typ AlFe) na mnoha faktorech, např. vzájemném geometrickém uspořádání, vzdálenosti od země, vlhkosti vzduchu apod., byly použity běžné parametry lan, jenž obvykle s dostatečnou přesností korespondují s hodnotami skutečnými. Exemplární úsek vedení o délce $l = 263 \text{ m}$, typu 3x1x240/25 AXEKUCEY, je definován indukčností $l_k = 0,64 \text{ mH/km}$, resistancí $r_k = 0,253 \text{ } \Omega/\text{km}$ a kapacitou vedení $c_k = 0,23 \text{ } \mu\text{F/km}$. Jednotlivé prvky modelovaného článku byly proto definovány vztahy:

$$L_v = l_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2 = 0,64 \cdot 10^{-3} \cdot 0,253 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{0,4}{22} \right)^2 = 55,64 \text{ mH} \quad (9.5)$$

$$R_v = r_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2 = 0,253 \cdot 0,253 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{0,4}{22} \right)^2 = 22 \text{ } \mu\Omega \quad (9.5)$$

$$C_v = c_k \cdot l \cdot \frac{1}{p} \cdot \left(\frac{U_v}{U} \right)^2 = 0,23 \cdot 10^{-6} \cdot 0,253 \cdot \frac{1}{1} \cdot \left(\frac{22}{0,4} \right)^2 = 22 \text{ } \mu\Omega \quad (9.6)$$

9.3 Metodika řešení modelu

Model zkoumané části veřejné napájecí sítě n. n. je proveden v programu TINA, jenž umožňuje přehlednou definici amplitudy, kmitočtu a případně také fáze individuálních harmonických složek napětí, nebo proudu pomocí rovnice.

Simulace zahrnuje 35 rodinných domů, jejichž rozmístění v napájecí síti je definováno schématem sítě v kap. 5.1 a příloze A.

V souladu s metodikou modelování sítě, jenž je zatížena nelineární zátěží, reprezentuje elektromagnetické působení jednotlivých domácností dle literatury [1] proudový zdroj, generující jednotlivé harmonické složky proudu do distribučního systému. Ideálním exemplářem pro simulaci individuálního působení samostatného rodinného domu poskytuje záznam ze sběrného místa R1974. Vzhledem ke značné proměnlivosti odebíraných harmonických proudu v čase byl stanoven medián krátkého časového úseku celotýdenního

záznamu, který lze dále porovnat se záznamem odběru celého systému (sběrna PM) během stejného období.

Jelikož není v simulaci zahrnuto působení rozdílné orientace stejných harmonických složek generovaných rodinnými domy, ani různá vzájemná orientace harmonických různých řádů, je v rámci této práce rovněž testován další scénář, který vychází ze záznamu celého systému (sběrna PM). Druhý scénář obsahuje medián výsledných velikostí efektivních hodnot harmonických proudů, jenž byly ve stejnou dobu pořízeny těsně za distribučním transformátorem a vyděleny celkovým počtem připojených domácností.

Výsledné srovnání výsledků modelu s reálným měřením umožňuje ověření platnosti uvedených předpokladů pro obecné modelování elektromagnetického působení ve střídavé napájecí soustavě. S ohledem na nízkou hodnotu mediánu 23., 25. a sudých řádů harmonických proudů byly do sítě v případě prvního scénáře generovány pouze liché řády harmonických, jenž jsou shora omezeny kmitočtem 1050 Hz, tedy 21. harmonickou proudů. V případě scénáře druhého jsou hodnoty injektovaných lichých řádů harmonických proudů do 25. řádu.

Zvolená denní doba byla vzhledem k působení PVE v síti a spotřebiče s dominantním odběrem vybrána mezi 8:00 a 9:00 ve středu 30. 3. 2016. Scénář injektáže harmonických složek proudů jednotlivými domácnostmi je uveden v tab. 5.

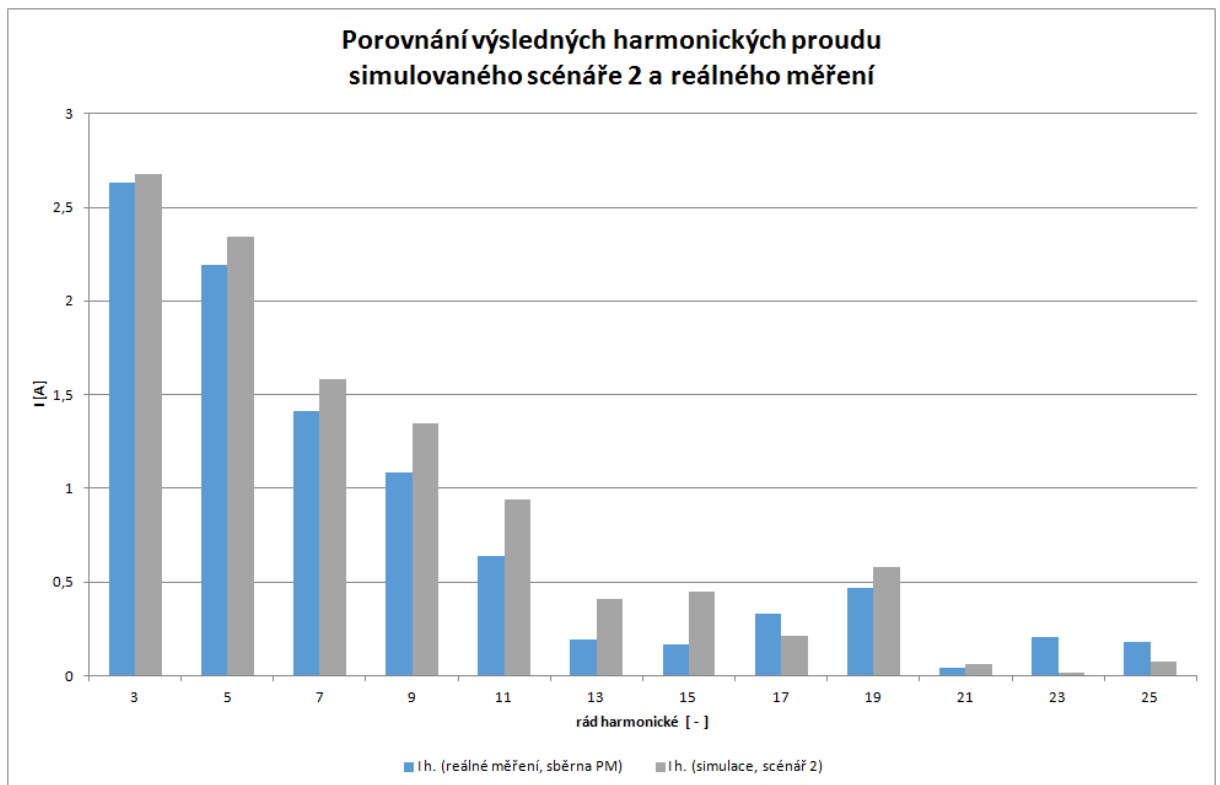
tab. 5 Velikosti vyšších harmonických složek proudů injektovaných do modelovaného systému.

řád harmonické h [-]	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
scénář 1 (R1974) I [A]	0,671	0,441	0,185	0,058	0,066	0,019	0,029	0,036	0,025	0,005		
scénář 2 (PM/35) I [A]	0,075	0,063	0,04	0,031	0,018	0,005	0,005	0,009	0,013	0,001	0,006	0,005

9.4 Diskuse výsledků simulace

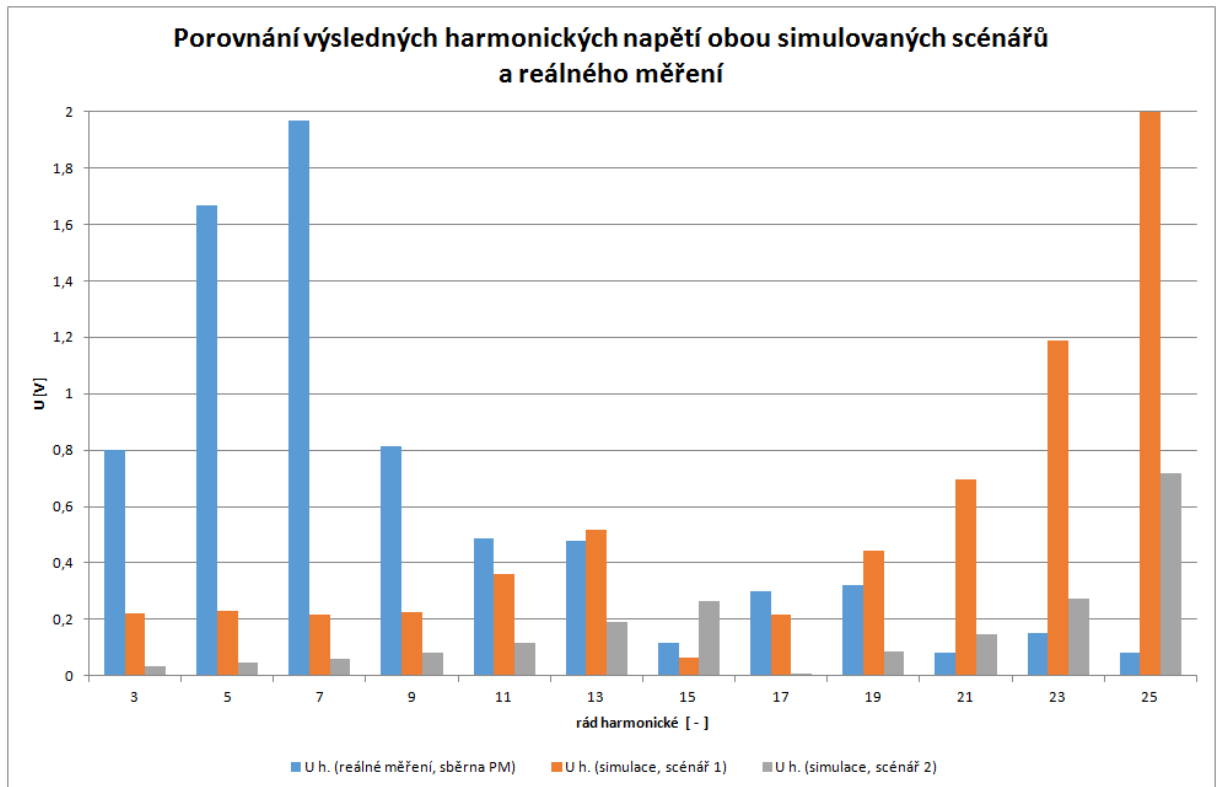
Výsledkem simulace vzájemného spolupůsobení generovaných frekvenčních složek proudů v síti je celková koncentrace harmonických napětí v místě sběrně PM ve vztahu k mediánu reálně změřených efektivních hodnot ze stejného místa, během stejného časového úseku. Prvním krokem je však zobrazení výsledného spolupůsobení injektovaných harmonických složek obou scénářů pro případnou predikci výsledků simulace.

Provedená simulace obou scénářů modelu potvrdila obavy týkající se vzájemného aritmetického součtu jednotlivých harmonických složek proudu, jenž mají v reálné síti jakožto vektorové veličiny přirozeně různou orientaci. V rámci přehledného zobrazení bude tedy demonstrován aritmetický součet injektovaných harmonických složek pouze pro scénář 2, jelikož jsou výsledky scénáře 1 vzhledem k ostatním hodnotám nepoměrně vyšší. Výsledný trend obou scénářů je však samozřejmě stejný a vzájemný poměr výsledků je v obou případech pro všechny harmonické shodný.



obr. 46 Porovnání výsledných harmonických proudu simulovaného scénáře 2 a reálného měření

Simulace harmonických proudu v místě sběrně PM naznačuje možný projev rezonance v oblasti vyšších kmitočtů. Zatímco většina simulovaných lichých harmonických nízkých řádů vykazuje v porovnání s měřením obecně vyšší hodnoty, 23. a 25. harmonická je výrazně nižší. Lze tedy očekávat zvýšené hodnoty výsledných harmonických složek napětí modelu.



obr. 47 Porovnání výsledných harmonických napětí obou simulovaných scénářů a reálného měření

Předpokládaná paralelní rezonance síťových prvků v oblasti vyšších kmitočtů modelované části sítě se skutečně projevila. Dále lze rozeznat značnou rezervu mezi úbytky harmonických proudů na impedanci simulované sítě a výsledků měření reálné koncentrace harmonických napětí v místě sběrně PM.

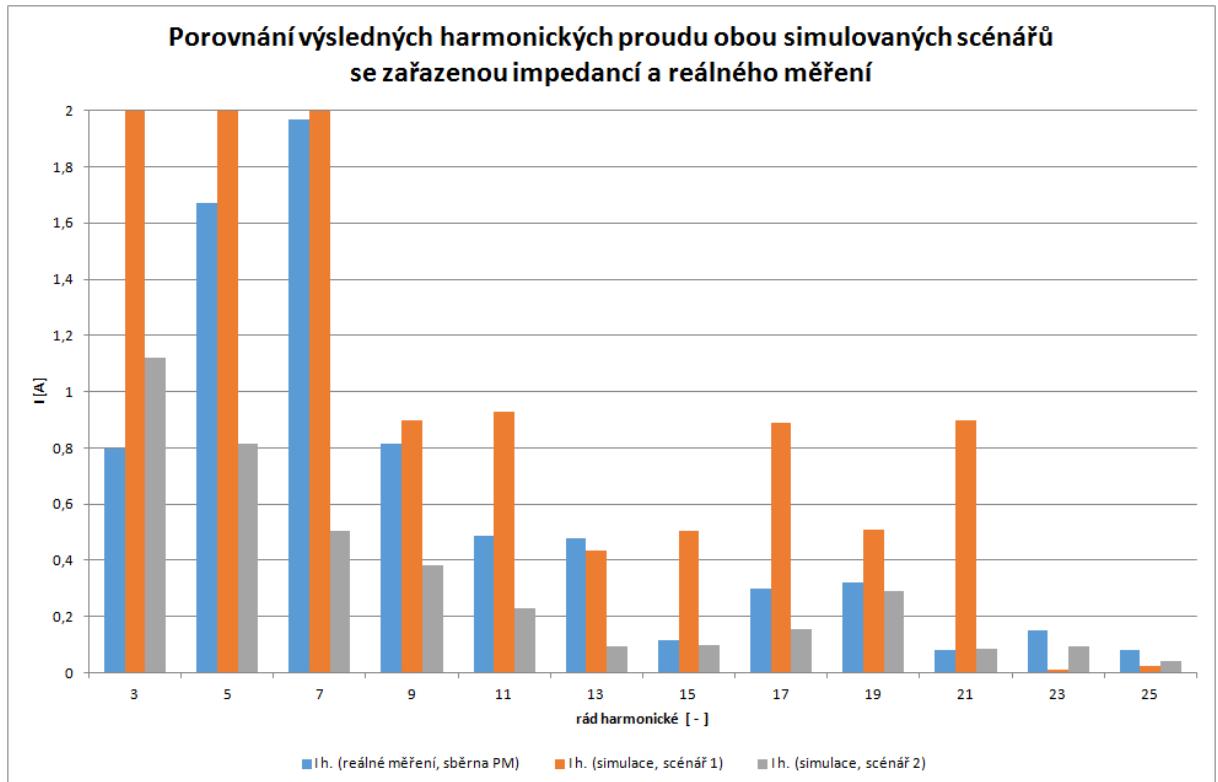
Vzhledem k výrazným rozdílům měření je dále proveden výpočet působení dominantního spotřebiče v odběrném místě R1974, který může případně rozdíly částečně kompenzovat. K tomuto účelu byl využit medián 1. harmonické složky impedance, jenž je připojena k fázi L_1 . Příklad výpočtu jednoho z průměrovaných vzorků je uveden v rovnici 9.7. Zaznamenané efektivní hodnoty základní harmonické složky napětí a proudu byly pořízeny během stejné doby jako injektované složky vyšších harmonických proudů, tedy ve středu 30. 3. 2016 mezi 8:00 a 9:00. Stejně tak hodnoty vzájemného účinníku základní byly stanoveny z činné a jalové složky komplexního výkonu, který byl ve zkoumaném období rodinným domem odebírán.

$$Z_{L_1,1.h.} = \frac{U_{L_1,1.h.}}{I_{L_1,1.h.}} \cdot \cos(\varphi_{L_1,1.h.}) = \frac{239,81}{22,01} \cdot 0,77 = 8,34 + 2,54 \Omega \quad (9.7)$$

$$Z_{L1,1,h.}(median) = 8,5 + 2,4j \Omega \quad (9.8)$$

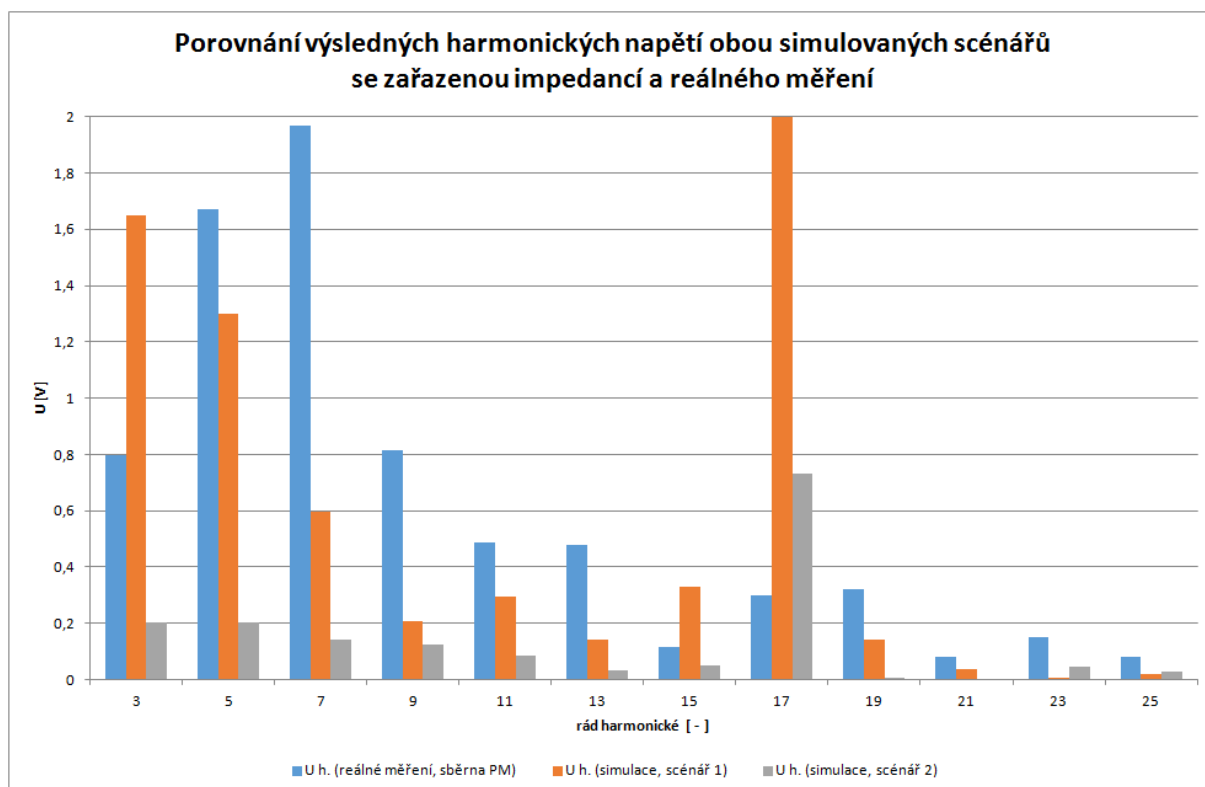
$$\Rightarrow R = 8,5 \Omega \quad (9.9)$$

$$\Rightarrow L = \frac{\text{Im}\{Z_{L1,1,h.}(median)\}}{\omega} = \frac{2,4}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 7,5 \text{ mH} \quad (9.10)$$



obr. 48 Porovnání výsledných harmonických proudů obou simulovaných scénářů se zařazenou impedancí a reálného měření

Zařazením odporu a indukčnosti aktivních spotřebičů během zkoumaného období v místě individuálních domů došlo k výraznému snížení simulovaných hodnot vyšších harmonických složek v místě sběrně PM. Stále však v dochází v případě modelu, vycházejícího z efektivních hodnot, jenž byly reálně zaznamenány v místě připojení individuální domácnosti, k nepoměrně vyšší koncentraci harmonických složek proudu nižších řádů. Zejména 5. a 7. harmonická dosahují dvou až třinásobku změřených hodnot proudu a byly proto v rámci přehlednosti oříznuty.



obr. 49 Porovnání výsledných harmonických napětí obou simulovaných scénářů se zařazenou impedancí a reálného měření

Obecné snížení velikosti harmonických proudů přirozeně zapříčinilo zvýšení harmonických napětí ve stejném místě rozvodu. Dále došlo ke snížení rezonanční frekvence do oblasti blízké 17. harmonické.

Další zvyšování impedance individuálních odběrů modelu evidentně znamená zvýšení úbytků na impedancích v síti, tedy hodnot harmonických napětí, ovšem pouze za cenu snížení hodnot simulovaných velikostí harmonických proudů. Při současném trendu vzájemného pohybu harmonických složek napětí a proudů dané orientace však nelze docílit většinové shody s měřenými hodnotami jednotlivých složek obou sledovaných veličin.

Zařazení vypočítaných hodnot odporu a indukce tedy kýžený efekt bohužel nepřineslo. Všeobecně proto nedochází ke shodě s měřenými výsledky.

9.5 Zhodnocení metodiky modelování sítě

Poskytnutá data efektivních hodnot harmonických napětí a proudů poskytují dobrou představu o pravděpodobném scénáři elektromagnetického působení individuální domácnosti a jeho výsledné úrovni. S pomocí parametrů analyzovaného úseku sítě a jeho dílčích částí lze,

podobně jako během modelování podnikových sítí, vytvořit model, jenž věrohodně definuje vlastnosti prostředí pro šíření konduktivního rušení. Nicméně nelze jednoznačně stanovit výsledné spolupůsobení elektromagnetických emisí v systému bez znalosti fázového posuvu jednotlivých řádů harmonických proudů a jejich vzájemného posuvu vzhledem k frekvenčním složkám, jenž jsou generovány ostatními proudovými zdroji. Výsledná vzájemná kompenzace harmonických proudů uvnitř sledovaného distribučního systému proto nekoresponduje s výsledky zjednodušeného modelu.

10 ZÁVĚR

Diplomová práce se zaměřuje na analýzu chování veřejné distribuční sítě nízkého napětí zatížené velkým počtem nelineárních spotřebičů. Vzhledem k neustále vzrůstající koncentraci elektronických zařízení v domácnostech a zvyšujících se požadavků na kvalitu elektrické energie vzniká evidentní potřeba se danou problematikou zabývat.

V úvodu práce je věnována pozornost běžným metodám pro spojitě a diskrétní zpracování signálu v časové a frekvenční doméně. Dále je diskutována obecná problematika odběru elektrické energie v soustavě zatížené nelineárními spotřebiči. Současně jsou uvedeny rizika, která jsou ve spojitosti s napájením deformovanou sinusovou formou signálu napětí a proudu často spojována. Z hlediska teorie jsou následně uvedeny klíčové normy, jenž jsou v práci použity a diskutovány.

Hlavním cílem práce bylo mimo jiné posouzení míry nízkofrekvenčních elektromagnetických emisí uvnitř zkoumané části distribučního systému nízkého napětí prostřednictvím poskytnutého záznamu dat, jenž pořízen v rámci měření kvality elektrické energie v síti blíže nespecifikované satelitní obce na přelomu konce dubna a začátku března 2016.

Již během prostém zobrazení základních harmonických složek napětí a proudu v čase byl zjištěn značný vliv připojených měničů fotovoltaických jednotek (PVE), jenž byly v síti instalovány. Důkladnou analýzou celkového působení PVE v síti bylo dokázáno a diskutováno ovlivnění účinníku základní harmonické a celkového harmonického zkreslení sinusové formy proudu prostřednictvím dodávaného výkonu. Celkové působení PVE bylo z pohledu nízkofrekvenčního rušení shledáno jako bezproblémové.

Úroveň koncentrace harmonických uvnitř zkoumané části sítě byla posuzována vzhledem příslušným kompatibilním úrovním platných norem. Na základě uvedeného

srovnání bylo zjištěno, že přestože se jedná o důkladně navrženou moderní distribuční síť, dochází k těsnému překročení legislativou stanoveného limitu koncentrace 15. harmonické napětí ve fázi L_2 . Striktní omezování zmíněné harmonické složky je proto následně diskutováno ve vztahu k možným rizikům s ní spojeným.

Jelikož probíhalo měření v různých částech systému bylo provedeno zpracování a srovnání výsledků v různých částech systému se stejným záznamem, který probíhal v městské zástavbě panelových budov během listopadu a prosince 2014. Nabízela se proto možnost srovnání elektromagnetického působení nejen v různých fázích různých částí analyzovaného rozvodu, ale rovněž v odlišných typech obydlí. Závěrem provedené komparace je jednoznačně převažující rušení ve veřejné distribuční síti panelových budov, jejichž instalace není s ohledem na vysokou koncentraci elektromagnetického rušení přirozeně dimenzována v porovnání s moderní napájecí sítí příměstského sídliště.

V rámci této práce byla rovněž zkoumána nová hlediska pro přehledné zhodnocení obsahu harmonických obecného statistického souboru. Efektivním nástrojem pro uvedené účely bylo shledáno zobrazení absolutní kumulativní četnosti, jenž bude případně dále sloužit pro vědeckovýzkumnou činnost katedry elektromechaniky a výkonové elektroniky fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Poslední kapitolou práce je provedení modelu reálné sítě na základě obdržených dat a parametrů sítě. Výchozí hodnoty statisticky zpracovaného záznamu fungují jako vstupní data pro simulaci a zároveň data výstupní pro ověření správné metody realizace modelu. Přestože poskytnuté parametry analyzovaného úseku sítě a jeho dílčích části poměrně podrobně definuje vlastnosti prostředí pro šíření konduktivního rušení, neumožnil rozsah obdržených hodnot dostatek údajů pro vzájemnou korespondenci výsledků reálného měření a simulace. Použitá metoda modelování sítě se proto pro daný objem dat nejeví jako vhodná.

Použitá literatura:

- [1] Kůs V., Skála J., Hammerbauer J. (2013). *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů* (Praha: Technická literatura BEN).
- [2] Kůs V. (2003). *Nízkofrekvenční rušení* (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni).
- [3] Vokál D. (2015). *Hromadné zpracování dat při měření polovodičových měničů* [bakalářská práce] (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni).
- [4] Pikous J. (2015). *Dopady hromadného připojování nelineárních domácích spotřebičů* [diplomová práce] (Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni).
- [5] Universita Palackého v Olomouci (2003). *(Diskrétní) Fourierova transformace*. apfyz.upol.cz . (<http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf>, 18. 5. 2017).
- [6] Hledík S. (2010). *Dodatek D. Fourierova transformace*. (dostupné online: http://nora.fpf.slu.cz/~hledik/pub/teach/classes/latex/output_samples/BryjovaI-AppsDEFG.pdf, 18. 5. 2015).
- [7] ČSN IEC 60050-131: *Mezinárodní elektrotechnický slovník - Kapitola 131: Elektrické a magnetické obvody*. Praha: Český normalizační institut
- [8] ČSN EN 61000-2-2: *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2: Prostředí. Díl: Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut.
- [9] ČSN EN 61000-4-7 ED. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí techniky. Díl 7: Všeobecný pokyn o měření a měřicích přístrojích harmonických a mezipharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich, ve znění pozdějších předpisů*. Praha: Český normalizační institut.

- [10] ČSN EN 61000-3-12 ED. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 3: Meze. Díl 12: Meze harmonických proudů způsobených zařízením se vstupním fázovým proudem $> 16 A$ a $\leq 75 A$ připojeným k veřejným sítím nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut.
- [11] ČSN EN 50160 ED. 3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Český normalizační institut.
- [12] ČSN EN 60909-0 ED. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách . Část 0: Výpočet proudů*. Praha: Český normalizační institut.
- [13] Synek M. (2014). *Analýza účinníku v distribučních sítích* [diplomová práce] (Praha: České vysoké učení technické v Praze).
- [14] Hašpl V. (2008). *Vyšší harmonické a jejich působení na síť*. Elektro. 3. 6. 2008 (<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyssi-harmonicke-a-jejich-pusobeni-na-sit--11949>, 18. 5. 2017).
- [15] Drápela J. (2013). *Důsledky harmonických #4*. Profielektrika, 20. 9. 2013 (<http://elektrika.cz/data/clanky/dusledky-harmonickych-4>, 18. 5. 2017).
- [16] CHAPMAN, D. *Harmonické: Příčiny a účinky*. Přeložil Josef GAVLAS, Miroslav KUŽELA, Pavel SANTARIUS. Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB, Technická Univerzita Ostrava. (<http://copperalliance.eu/docs/librariesprovider3/kvalita-elektrick%C3%A9-energie3-1-pdf.pdf?Status=Master&sfvrsn=0>, 18. 5. 2017).
- [17] Kováč D., Kováčová I., Kaňuch Ján. (2006). *EMC z hlediska teorie a aplikace* (Praha: Technická literatura BEN).
- [18] Svačina J. (2000). *Základy elektromagnetické kompatibility. Část 1: Základní pojmy a členění oboru EMC*. Elektorevue 2000/25 (<http://www.elektorevue.cz/clanky/00025/index.html>).

[19] Girga E. (2008). *Ustálený chod vedení 400 kV* [bakalářská práce] (Brno: Vysoké učení technické v Brně).

[20] *Provozovatelé distribučních soustav ČEZ Distribuce a.s. E.ON Distribuce a.s. PREDistribuce a.s., Pravidla provozu distribučních soustav. Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy* [on line]. Energetický regulační úřad, 7.3. 2009, 52 stran, http://www.cezdistribuce.cz/edee/content/file-other/distribuce/energeticka-legislativa/ppds/2009/ppds_priloha_4_2009.pdf.

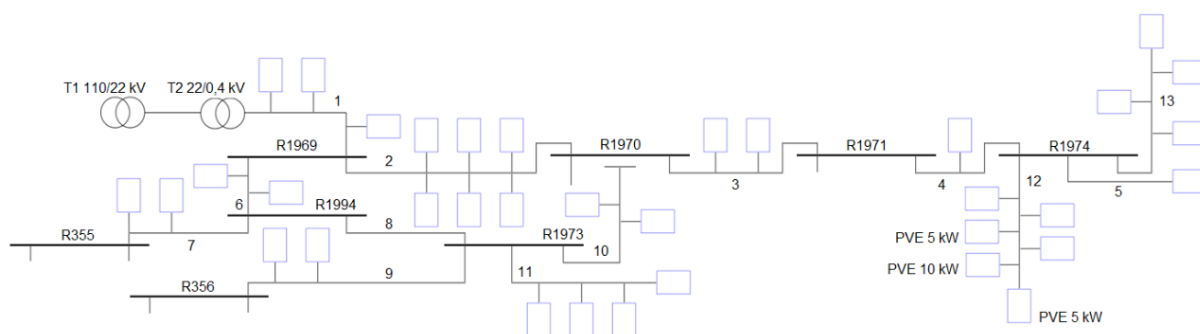
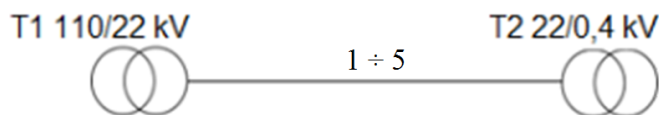
Příloha A - Schéma zkoumané části distribuční sítě, druhy a délky použitých kabelů

Schéma zkoumané části distribučního systému, hladina 0,4 kV

Hladina 0,4 kV

1 - 4x150 E-A2X2Y-JN.....	170 m
2 - 4x150 E-A2X2Y-JN.....	205 m
3 - 4x150 E-A2X2Y-JN.....	156 m
4 - 4x150 E-A2X2Y-JN.....	120 m
5 - 4x150 E-A2X2Y-JN.....	122 m
6 - 4x120 E-A2X2Y-JN.....	65 m
7 - 4x70 E-A2X2Y-JN.....	82 m
8 - 4x120 E-A2X2Y-JN.....	92 m
9 - 4x120 E-A2X2Y-JN.....	116 m
10 - 4x120 E-A2X2Y-JN.....	95 m
11 - 4x35 E-A2X2Y-JN.....	109 m
12 - 4x120 E-A2X2Y-JN.....	156 m
13 - 4x70 E-A2X2Y-JN.....	83 m

Hladina 22 kV

1 - 3x1x240/25 AXEKUCEY.....	263 m
2 - 3x100/22 AlFe6	8491 m
3 - 3x42/7 AlFe6	60 m
4 - 3x35 AlFe6	39 m
5 - 1x240 AXEKCY.....	16 m

Příloha B - Parametry vedení hladiny 0,4 kV



E-A2X2Y 0,6/1 kV

Elektrické vlastnosti

Electrical properties

Počet a průřez žil No. of cores and cross-section	Tvar jádra Shape of conductor	Činný odpor při 20 °C DC resistance at 20 °C (min.)	Indukčnost Inductivity	Zatížitelnost na vzduchu Current carrying cap. in air	Zatížitelnost v zemi Current carrying cap. in ground	Zatahovací síla při instalaci max. Max. permitted pulling force during installation	Ekvivalentní zkratový proud Short circuit current-equiv.	Časová otevlovací konstanta Time heating constant
mm ²		Ω/km	mH/km	A	A	N	kA	sec
4x35	RE	0,868	0,259	136	153	4200	3,309	263
4x50	SE	0,641	0,231	158	178	6000	4,728	397
4x50	SM	0,641	0,228	161	179	6000	4,728	382
4x70	SE	0,443	0,227	201	218	8400	6,619	482
4x70	SM	0,443	0,224	204	220	8400	6,619	466
4x95	SE	0,320	0,220	247	260	11400	8,983	589
4x95	SM	0,320	0,217	253	263	11400	8,983	562
4x120	SE	0,253	0,217	289	297	14400	11,346	684
4x120	SM	0,253	0,215	294	298	14400	11,346	662
4x150	SE	0,206	0,219	331	332	18000	14,183	814
4x150	SM	0,206	0,216	340	335	18000	14,183	773



22-AXEKVCEY

Elektrické parametry:

Electrical properties:

Počet x průřez žil/stínění No. of cores and crosssection (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



22-AXEKCY

Elektrické parametry:

Electrical properties:

Počet x průřez žil/stínění <i>No. of cores and cross-section</i> (mm ²)	Činný odpor při 20°C <i>DC resistance at 20°C (min.)</i> (Ω/km)	Kapacita <i>Capacitance</i> (μF/km)	Indukčnost (v trojúhelníku) <i>Cable inductance (triangle installation)</i> (mH/km)	Indukčnost na vzduchu (paralelně) <i>Cable inductance on air (parallel)</i> (mH/km)	Indukčnost v zemi (paralelně) <i>Cable inductance in ground (parallel)</i> (mH/km)
1x185/25	0.164	0.27	0.36	0.52	0.59
1x240/25	0.125	0.30	0.34	0.50	0.56
1x300/25	0.100	0.32	0.33	0.49	0.55

Příloha C - Parametry lana AlFe

Označení lana AlFe	Ocelová duše						Hliníkový obal						Lano												
	Počet drátů a kóns-trukce	Jme-nový průměr drátu	Vypoč-tený průměr	Mate-riálový průřez	Jmeno-vitá hmot-nost	Mate-riálová hmot-nost	Zaru-čená únos-nost	Počet drátů a kóns-trukce	Jme-nový průměr drátu	Mate-riálový průřez	Jmeno-vitá hmot-nost	Mate-riálová hmot-nost	Zaru-čená únos-nost	Jme-nový průměr	Mate-riálový průřez	Poměr průře-zu S _{Al} :S _{Fe}	Činný odpor lana při 20°C	Jmeno-vitá hmot-nost	Maxi-mální dovolé-né na-tížení	Souči-nitel teplotní roztaž-nosti	Teplota T _{is} =25°C	Teplota T _{os} =40°C	Teplota T _{ov} =70°C	Teplota T _{ov} =70°C	
25/4	1	2,24	2,24	3,94	30,93	5,005	5,00	6	2,24	23,64	64,73	4,019	3,617	6,75	27,58	6,00	1,2058	95,66	118,795	18,714	136				110
42/7	1	3,00	3,00	7,07	55,48	8,98	8,98	6	3,00	42,41	116,11	6,786	6,107	9,00	49,48	6,00	0,6871	171,59	115,806	18,714	191				153
60/14	1+6	1,60	4,80	14,07	114,65	17,87	16,08	9+15	1,80	61,07	168,33	10,993	9,993	12,00	75,14	4,34	0,4662	283,18	131,367	17,946	272				217
70/11	1+6	1,40	4,20	10,78	88,24	13,69	12,32	9+15	1,95	71,68	197,39	12,186	10,967	12,00	82,46	6,65	0,4010	285,63	107,318	19,136	305				245
70/11-1	1+6	1,40	4,20	10,78	88,24	13,69	12,32	6	3,75	66,27	181,51	9,941	8,946	11,70	77,05	6,15	0,4308	289,75	104,891	19,084	248				197
70/11-2	1	3,75	3,75	11,04	86,70	14,02	14,02	6	3,75	66,27	184,30	9,941	8,946	11,25	77,31	6,00	0,4337	271,00	112,894	18,714	248				197
100/25	1+6	2,12	6,36	24,71	202,74	31,38	28,24	12+18	2,06	99,99	275,71	16,998	15,298	14,60	124,70	4,05	0,2843	478,45	132,686	17,740	388				311
110/22	1+6	2,00	6,00	21,99	180,60	27,93	25,14	11+17	2,24	110,34	304,10	18,758	16,882	15,00	132,33	5,02	0,2591	484,90	120,656	18,365	409				328
150/25	1+6	2,12	6,36	24,71	202,74	31,38	28,24	10+16	2,65	143,40	395,06	22,944	20,650	17,00	168,11	5,80	0,1999	597,80	110,519	18,771	475				379
180/59	3+9	2,50	10,39	68,90	483,41	74,80	67,32	15+21	2,50	176,71	487,85	30,041	27,037	20,40	235,61	3,00	0,1593	971,26	152,187	16,846	566				450
185/61	1+6	2,36	7,08	30,62	250,51	38,89	35,00	10+16	3,00	183,78	506,27	29,405	26,464	19,10	214,40	6,00	0,1562	756,78	108,936	18,863	554				441
240/39	1+6	2,65	7,95	38,61	314,69	49,03	44,13	10+16	3,45	243,05	689,48	36,458	32,812	21,75	281,66	6,30	0,1181	984,37	103,807	18,991	657				522
350/59	3+9	2,50	10,39	68,90	483,41	74,80	67,32	11+17	4,00	351,96	969,60	52,779	47,501	26,40	410,76	5,97	0,0816	1453,01	106,225	18,850	835				660
445/74	3+9	2,80	11,63	73,89	604,69	83,84	84,46	11+17	4,50	445,32	1227,12	62,345	56,110	29,65	519,21	6,03	0,0645	1831,81	102,878	18,874	961				759
450/52	3+9	2,36	9,81	52,49	431,49	66,66	59,99	12+18+24	3,25	447,97	1235,97	67,196	60,476	29,35	500,46	8,53	0,0646	1667,42	91,475	19,759	875				725
690/63	1+6+12	2,35	11,80	83,11	684,00	105,50	94,95	12+18+24	4,00	678,58	1872,12	101,787	91,608	35,80	761,69	8,16	0,0425	2556,12	93,094	19,653	1095				909

Příloha D - simulace modelu v programu TINA (z důvodu přehlednosti rozdělena na dvě části v místě sběrně PM0263)

