

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

**Vyšší harmonické v trakčních napájecích
soustavách**

Harmonics in traction distribution systems



Bc. Jakub Rypar

Vedoucí práce: *prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.*

Studijní program: *Elektrotechnika, energetika a management*

Obor: *Elektroenergetika*

2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jakub Rypar**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vyšší harmonické v trakčních napájecích soustavách**

Pokyny pro vypracování:

1. Charakterizujte komponenty ss trakčního napájecího systému.
2. Popište zdroje vyšších harmonických v distribuční části.
3. Určete negativní zpětné vlivy měničenské distribuční transformovny (MDT) na veřejný distribuční rozvod.
4. Na případové studii zhodnoťte zpětné negativní vlivy MDT.

Seznam odborné literatury:

- [1] J. Schlabbach, D. Blume: Voltage Quality in Electrical Power Systems, VDE-Verlag, 2001
- [2] Tlustý J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999
- [3] Hingorani, N., Gyugyi, L.: Understanding FACTS, IEEE Press, New York, 2000
- [4] ČSN EN 50 160

Vedoucí: prof. Josef Tlustý Ing., CSc.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018



doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pávek Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce prof. Ing. Josefovi Tlustému, CSc. za množství nedocenitelných rad a připomínek k jejímu zpracování.

Dále pak mé díky patří pracovním kolegům Josefovi Vinařovi a Janu Jeżowiczovi za postřehy a náměty poskytnuté k realizaci této diplomové práci. Velký dík také patří mé ženě Šárce Ryparové za všeobecnou podporu při studiu.

Název práce: *Vyšší harmonické v trakčních napájecích soustavách*

Autor: *Bc. Jakub Rypar*

Katedra: *Katedra elektroenergetiky*

Vedoucí diplomové práce: *prof. Ing. Josef Tlustý, CSc.*

e-mail vedoucího práce: *tlusty@fel.cvut.cz*

Abstrakt: *Problematika analýzy vyšších harmonických v rozvodnách měnírenských distribučních transformoven pro systém metra nebyla doposud řešena z hlediska procentuálního zastoupení jednotlivých složek, proto jsem se rozhodl tuto kapitolu otevřít a navázat tak na téma své bakalářské práce, která sloužila především pro nově nastupující pohotovostní pracovníky. V práci analyzuji dopad vyšších harmonických z hlediska trakční části, zpětných vlivů vlakové soupravy metra na napájecí stanice a distribuční části.*

Klíčová slova: *MDT, DT, měnírenská transformovna, distribuční transformovna, vyšší harmonické.*

Abstract: *The issues of harmonics analysis in substations and distribution transformer stations has not yet been solved in terms of the percentage of individual components. That's why I decided to choose this as a theme of my thesis, which was primarily intended for newly hired emergency workers. In my thesis I analyze the impact of harmonics on traction, reverse effects metro train sets for power stations and distribution parts.*

Key words: *MDT, DT, substations transformer, distribution transformer, harmonics.*

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 16. 5. 2016

.....
Jakub Rypar

Obsah

1. Úvod	15
2. Vznik vyšších harmonických	15
3. Definice a průběhy harmonických a neharmonických veličin	16
3.1 Fourierova transformace – analytické vyjádření	16
3.1.1 Fourierova transformace – trigonometrické vyjádření	17
3.1.2 Fourierova transformace – komplexní tvar	18
3.2 Fourierova transformace – Numerická metoda.....	18
3.3 Volba frekvence vzorkování	20
4. Vztahy pro výpočty	21
5. Zdroje vyšších harmonických	23
6. Komponenty stejnosměrného ss trakčního napájecího systému	24
6.1 Trakční obvod	24
6.2 Trakční napájecí systém	26
6.2.1 Základní popis šestipulsního usměřovače	26
6.2.2 Usměřovače šestipulsní	27
6.2.3 Usměřovače dvanáctipulsní	28
6.2.4 Základní popis usměřovačového transformátoru	29
6.2.5 Ochrany vývodů pro usměřovačové transformátory	30
6.2.6 Technické údaje usměřovačového transformátoru	31
6.2.7 Vyšší harmonické v transformátorech	31
6.2.8 Transformátor v zapojení Yy	34
6.2.9 Transformátor v zapojení Yd	35
7. Zdroje vyšších harmonických v distribuční části	35
7.1 Distribuční transformátory	35
7.1.1 Ochrany vývodů pro distribuční transformátory	37
7.1.2 Technické údaje	38
7.2 Vyšší harmonické ve střídavých strojích - motorech.....	39

7.3	Vyšší harmonické způsobené měniči	40
7.4	Kompenzační rozváděče s kondenzátory	41
8.	Negativní zpětné vlivy MDT na veřejný distribuční rozvod	42
8.1	Analýza trakčního napájecího systému	42
8.1.1	Základní analýza pro šestipulsní usměrňovač	43
8.1.2	Transformátor Yy a Šestipulsní usměrňovač	45
8.1.3	Analýza problematiky časového proudu	47
8.1.4	Transformátor Dy, Yd a šestipulsní usměrňovač	52
8.1.5	Vliv reaktance transformátoru.....	53
8.1.6	Vlaková souprava vozů	54
8.2	Negativní vlivy napájecí stanice MDT na trakční vedení.....	55
9.	Zhodnocení zpětných negativních vlivů MDT	56
9.1	Měření vyšších harmonických v DT	56
10.	Závěr	58
11.	Seznam literatury	59
12.	Seznam příloh	61

Seznam obrázků

obr. 1: Teoretický maximální obsah harmonických šestipulsního usměrňovače	27
obr. 2: Teoretický maximální obsah harmonických proudu dvanáctipulsního usměrňovače .	28
obr. 3: Schéma zapojení usměrňovačového transformátoru	30
obr. 4: Schéma zapojení distribučního transformátoru	37
obr. 5: Průběh síťového proudu šestipulsního usměrňovače.....	45
obr. 6: Průběhy proudů různých zapojení usměrňovačových transformátorů	47
obr. 7: Simulovaný časový průběh proudu	48
obr. 8: Skládání síťových složek proudu bez komutace.....	52
obr. 9: Náhradní schéma vícefázového usměrňovače s výstupní reaktancí transformátoru .	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Celkový jalový výkon dle zatížení transformátoru v zapojení Dyn	36
--	----

Seznam použitých zkratk

AC	Střídavý proud
a_k	Vyrovňovací proud
A_n	Fourierův koeficient pro n-tou harmonickou
A_0	Fourierův koeficient pro stejnosměrnou složku
B_n	Fourierův koeficient pro n-tou harmonickou
C_n	Amplitudové spektrum
$\cos \varphi$	Účinit
D	Deformační výkon
DC	Stejnoseměrný proud
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
DP	Dopravní podnik
DT	Distribuční transformovna
Dyn	Transformátor v zapojení trojúhelník uzemněná hvězda
e	Ztráty vířivými proudy
e_k	Procentuální napětí nakrátko
$F\{f(t)\}$	Fourierova transformace
$F^{-1}\{G(j\omega)\}$	Zpětná Fourierova transformace
FT	Fourierova transformace
$f(tn)$	Zpětná diskretní Fourierova transformace
f_m	Maximální frekvence
f_v	Frekvence vzorkování
g	Teoretický obsah základní harmonické
$G(j\omega)$	Fourierův obraz funkce

I_A	Proud zařízení vypočtený z jeho výkonu
I_d	Vyhlazený usměrněný proud
i_{D1}	Okamžitá hodnota proudu v diodě, během komutace bude proud klesat
i_{D2}	Okamžitá hodnota proudu v diodě, při komutaci bude proud narůstat
I_k	Proud nakrátko
I_{ln}	Nominální proud strany vysokého napětí
I_n	Proud n-té harmonické
$I_{n\ max}$	Maximální velikost proudu n-té harmonické
$i(t)$	Odebíraný proud ze sítě
$I(\vartheta)$	Zobrazení funkcí proudu dle FT
I_{1f}	Zidealizovaný průběh proudu s použitím Dirichletových podmínek
K	Parametr pro přepočtení transformátoru
K_T	Převod transformátoru
k_{ZI}	Koeficient zkreslení proudu, také označován THDI
k_{ZU}	Koeficient zkreslení napětí, také označován THDU
L_{TT}	Náhradní indukčnost transformátoru zapojená v sérii
MDT	Měničenská distribuční transformovna
N	Počet vzorků
n	n-tý řád harmonických
NALF	Terminál ochrany a komunikace v R22 kV
NN	Nízké napětí
P	Činný výkon
p	Počet pulsů usměrňovače
P_f	Ekvivalentní jalový výkon
PK	Přívodní kolejnice
PRE	Pražská energetika

Q	Jalový výkon
RCA	Rozvaděč kompenzace pro sekci A
RCB	Rozvaděč kompenzace pro sekci B
REF	Terminál ochrany a komunikace v R22 kV
RM	Rozvaděč motorový
RPS	Rozvaděč poruchové signalizace
RU 825	Rozvaděč 825 V stejnosměrných
S	Zdánlivý výkon
S_A	Velikost výkonu pro trakční odběry
S_{kV}	Zkratový výkon
$s(kT)$	Hodnota vzorku
ss	Stejnoseměrný
T	Vzdálenost mezi vzorky
T_l	Délka periody
THDI	Koeficient zkreslení proudu
THDI _A	Celkové harmonické zkreslení proudu zařízení uživatele sítě
THDU	Koeficient zkreslení napětí
U_k	Napětí nakrátko
U_{ln}	Nominální napětí strany vysokého napětí
UPS	Záložní zdroj energie
U_{sdr}	Sdružené napětí
U_2	Efektivní fázová hodnota napájecího napětí
V	Počet vzorků za periodu
VN	Vysoké napětí
X_k	Posloupnost vzorkovaných hodnot
X_T	Rozptylová reaktance usměrňovačového transformátoru

X_2	Reaktance výstupního vinutí transformátoru
Yd	Transformátor v zapojení hvězda trojúhelník
Yy	Transformátor v zapojení hvězda hvězda
γ	Úhel překrytí
λ	Činitel výkonu, opravdový účinník
φ_n	Fázové spektrum
51	Rozvaděč napájení trakčního obvodu v R22 kV
91	Rozvaděč přívodu z PRE v R22 kV
162	Pole vývodů v rozvaděči RS pro sekci B
171	Pole vývodů v rozvaděči RM pro sekci A

1. Úvod

Měnírenská distribuční transformovna slouží k přeměně střídavé elektrické energie na energii stejnosměrnou a k napájení zařízení vlastní spotřeby. Zdrojem pro měnírnu je přívodní kabelové vedení 22 kV od Pražské energetiky, přivedené do přívodního pole rozvaděče R22 kV v systému podélného dělení napájecí soustavy.

Trakční napájecí systém, hlavní zdroj vyšších harmonických, se skládá ze dvou usměrňovačových transformátorů, dvou křemíkových diodových usměrňovačů a rozvaděče napájecích rychlovypínačů. Trakční obvod napájí stejnosměrným napětím přívodní kolejnici příslušného elektrického úseku. Pro každou stopu přívodní kolejnice je určen samostatný napáječ. Napájecí kabelové vedení je připojováno k přívodní kolejnici vždy přes trakční odpojovač s motorovým pohonem, kdy přívodní kolejnice je uspořádána pro spodní odběr proudu sběračem vlakové soupravy. Zdroje vyšších harmonických v trakčním obvodu jsou definovány v kapitole komponenty stejnosměrného ss trakčního napájecího systému.

V této práci jsou analyzovány negativní vlivy vyšších harmonických v stejnosměrném napájecím systému, jakým způsobem ovlivňují trakční obvod jednotlivé komponenty, především usměrňovačový transformátor v zapojení s šestipulsním usměrňovačem. Jak je ovlivněna vlaková souprava zdrojem vyšších harmonických, trakčním obvodem v MDT a naopak, jaké negativní účinky generuje vlaková souprava vozů do trakčního napájecího systému. Dalším bodem zkoumání jsou rušivé elementy vlastní distribuční části transformovny a jejich možná kompenzace.

Stěžejní část této diplomové práce je měření emisních hodnot vyšších harmonických v trakčním napájecím systému, distribuční části a v kompenzačních rozvaděčích. Výsledné měření bylo prováděno při běžném provozu dle grafikonu jízd vlakových souprav a při standardním chodu podružných zařízení napájených z distribuční části.

Téma diplomové práce tematicky navazuje na bakalářskou práci autora, která se věnovala provozu měnírenských a distribučních transformoven a byla určena jako manipulační minimum pro nově nastupující pracovníky.

2. Vznik vyšších harmonických

Pokud zdroje soustavy dodávají pouze sinusové napětí základního kmitočtu, pak aby došlo k napěťové rovnováze mezi sítí a jedním z odběrů, musí protékat proud vyšší harmonické takovou částí obvodu, aby na jeho indukčnostech vzniklo rozdílové napětí. Tato vzniklá napětí se superponují na sinusové napětí síťového kmitočtu.

Překročení napětí vyšší harmonické, přes hodnotu odolnosti proti rušení se u zařízení umístěného v měnírenských a distribučních transformovnách projevuje následujícími způsoby:

1. Poruchami funkce elektronických zařízení
2. Chybnou funkcí ochran v MDT a DT
3. Zapůsobení ochran v přívodních rozvodnách Pražské energetiky

Jelikož jsou vlakové soupravy napájeny stejnosměrným napětím, tak jako jeden z možných rušivých elementů je trakční neřízený usměrňovač, který je vždy nutné připojovat ne přímo k síti, ale přes trakční transformátor. Důležité je tedy připomenout, že pokud se v systému vyskytnou proudy vyšších harmonických, vznikají přídavné činné ztráty v transformátorech a i na vedeních.

Harmonické signály jsou popsány kmitočtovým spektrem. Harmonické frekvence jsou celistvé násobky základní harmonické napájecího napětí, pokud tedy základní harmonická má frekvenci 50 Hz, tak třetí harmonická má frekvenci 150Hz a pátá harmonická 250 Hz.

V lineárních obvodech, které jsou buzeny z periodických zdrojů napětí a proudů, se mění všechny obvodové veličiny v čase periodicky s konstantní amplitudou a stejnou periodou. V nelineárních obvodech, které jsou buzeny z periodických zdrojů napětí a proudů, se vlivem nelinearity mohou vyskytnout samobuzené periodické kmity. Proto periodický ustálený stav v elektrických obvodech analyzujeme z hlediska periodických veličin pomocí harmonických složek.

3. Definice a průběhy harmonických a neharmonických veličin

Rozklad libovolné periodické funkce na konečnou nebo nekonečnou řadu harmonických řeší harmonická analýza na základě tzv. Dirichletovy podmínky:

1. Periodická funkce $f(t)$ je v konečném počtu intervalu spojitá nebo monotónní
2. Má konečný počet minim a maxim (extrémů).

Řadu vzniklou rozkladem periodické funkce nazýváme Fourierovou řadou. Jejími členy jsou jednotlivé harmonické.

Neharmonické nebo také interharmonické jsou tvořeny kmitočtovým spektrem s kmitočty, které nejsou celistvým násobkem základního kmitočtu. Jsou to sice průběhy elektrických veličin, které jsou periodické v určitém časovém intervalu, ale jejich průběh je neharmonický. Jelikož je snazší pracovat s harmonickými průběhy, vyjadřujeme neharmonický průběh jako periodickou harmonickou veličinu, složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech rovných přirozeným násobkům základního kmitočtu.

3.1 Fourierova transformace – analytické vyjádření

Fourierova transformace slouží pro převod signálu z časové oblasti do oblasti frekvencí. Fourierovu transformaci lze použít, pokud známe analytické vyjádření měřeného signálu. Vyjadřujeme tedy časově závislý signál pomocí funkcí sinus a cosinus harmonických signálů. Rozklad Fourierovy transformace se nazývá harmonická analýza.

3.1.1 Fourierova transformace – trigonometrické vyjádření

Podle Fourierova teorému je možné periodickou funkci rozložit v řadu:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n\omega_1 t) + B_n \sin(n\omega_1 t))$$

$$f(\vartheta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n)$$

$$A_0 = \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) dt$$

Fourierovy koeficienty n -tou harmonickou jsou:

Pro $n = 0, 1, 2, \dots$

$$A_n = \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) \cos(n\omega_1 t) dt$$

Pro $n = 1, 2, \dots$

$$B_n = \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) \sin(n\omega_1 t) dt$$

Spektrální tvar Fourierovy řady:

$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{A_n}{B_n}$$

Kde

$C_n \dots$ Amplitudové spektrum, posloupnost amplitud C_n jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$.

$\varphi_n \dots$ je fázové spektrum, posloupnost počátečních fází φ_n jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$.

V praxi se často stává, že mohou nastat případy, že je funkce lichá $f(-t) = -f(t)$, tak pro ni platí, že řada obsahuje pouze liché členy s funkcí sinus.

Pro sudou funkci $f(-t) = f(t)$ platí, že řada obsahuje pouze sudé členy s funkcí cosinus. Dalším případem je aperiodická funkce $f(t) = -f(t + T/2)$.

3.1.2 Fourierova transformace – komplexní tvar

Signál vyjádřený pomocí Fourierovy transformace může být ve spojitém nebo diskrétním čase. Nyní si vyjádříme časově závislý signál pomocí funkcí sinus a cosinus, pomocí funkce komplexní exponenciály.

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

Kde

$F\{f(t)\}$... Fourierova transformace

$G(j\omega)$... Fourierův obraz funkce

Fourierovu transformaci můžeme definovat ve tvarech sinus a cosinus. Pokud funkci definujeme pouze pro $t > 0$ a pro $t < 0$ definujeme, že je funkce nulová, získáme:

Kosinová Fourierova transformace

$$G(j\omega) = \int_0^{+\infty} f(t) \cos(\omega t) dt \quad \text{pro } t > 0$$

Sinová Fourierova transformace

$$G(j\omega) = \int_0^{+\infty} f(t) \sin(\omega t) dt \quad \text{pro } t > 0$$

Zpětná Fourierova transformace

$$F^{-1}\{G(j\omega)\} = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(j\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Zpětná Fourierova transformace pro tvary sinus a cosinus

$$F^{-1}\{G_1(j\omega)\} = f(t) = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_1(j\omega) \cos(\omega t) d\omega \quad \text{pro } t > 0$$

$$F^{-1}\{G_2(j\omega)\} = f(t) = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G_2(j\omega) \sin(\omega t) d\omega \quad \text{pro } t > 0$$

3.2 Fourierova transformace – Numerická metoda

Diskrétní Fourierova transformace je jedna z metod diskrétního zpracování signálu. Tato metoda nahrazuje integrální počty uvedené v předchozí kapitole přibližnými součty tzv. numerickou integrací. Frekvenční spektrum měřeného signálu a průběh zjistíme pomocí vzorkování. Cílem této transformace je transformovat posloupnost diskrétních hodnot do kmitočtové oblasti. Výpočet diskrétní Fourierovy transformace

podle definičního vztahu vyžaduje $N \log_2(N)$ komplexních součinů a $N \log_2(N)$ komplexních součtů. Pokud budeme vycházet z klasické definice Fourierovy transformace, získáváme pro výpočet koeficientů Fourierovy řady:

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{V-1} s(kT)e^{-in\omega T}$$

Kde

$T \dots$ je vzdálenost mezi vzorky

$s(kT) \dots$ je hodnota vzorku

$V \dots$ je počet vzorků za periodu

Po úpravě dostaneme výraz

$$\hat{S}(n\omega_1) = \sum_{k=0}^{K-1} s(kT) \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right]$$

Při porovnání s vztahem

$$f(\vartheta) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n)$$

získáme výrazy

$$\hat{c} = \frac{\hat{S}(n\omega_1)}{K} \quad \hat{C}_n = 2\hat{c}_n \quad C_0 = \frac{s_0}{K}$$

$$\hat{C}_n = \operatorname{Re}\{\hat{C}_n\} + j\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\}$$

$$C_n = \sqrt{(\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\})^2 + (\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\})^2}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}\{\hat{C}_n\}}{\operatorname{Re}\{\hat{C}_n\}}$$

Kde

$C_n \dots$ Amplitudové spektrum, posloupnost amplitud C_n jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$.

$\varphi_n \dots$ je fázové spektrum, posloupnost počátečních fází φ_n jednotlivých harmonických složek dané periodické funkce $f(t)$.

Pokud budeme nahrazovat rovnice zapsané v integrálním tvaru, kde je cílem transformovat posloupnost diskretních hodnot $f(t_n)$, kde $n = 0, 1, 2, 3 \dots N - 1$ kmitočtové oblasti získáváme tyto výrazy:

$$X_k = DFT\{f_k\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) * e^{-jn\frac{2\pi}{N}k} \text{ pro } n = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

Kde

X_k ... je posloupnost vzorkovaných hodnot.

N ... je počet vzorků.

Zpětná Fourierova transformace, která nám převádí transformaci z kmitočtové oblasti do oblasti časové, má tvar:

$$f(t_n) = DFT^{-1}\{f_k\} = \sum_{n=0}^{N-1} F(f_n) * e^{jn\frac{2\pi}{N}k} \text{ pro } n = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

Pokud zavedeme zjednodušení, kdy se sčítá pouze mocninná řada, je nutné zavést proměnnou $W = e^{j\frac{2\pi}{N}}$. Po-té můžeme numerické metody nahradit rovnicemi v integrálním tvaru a napsat vztahy pro diskretní a zpětnou diskretní Fourierovu transformaci.

Diskretní Fourierova transformace

$$X_k = DFT\{f_k\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) * W^{nk} \text{ pro } n = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

Zpětná diskretní Fourierova transformace

$$f(t_n) = DFT^{-1}\{f_k\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F(f_n) * W^{-nk} \text{ pro } n = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

3.3 Volba frekvence vzorkování

Pro frekvenční analýzu je nutná správná volba frekvence vzorkování signálu pro číslicové zpracování signálu. Pokud k – tá spektrální čára odpovídá frekvenci $f_k = \frac{k}{T_0}$, pak můžeme psát:

$$T_0 = T_v N = \frac{N}{f_k} \rightarrow f_k = \frac{k}{T_v N}$$

Pokud dosadíme za hodnotu k -té spektrální čáry hodnotu odpovídajícího počtu vzorku tedy $k = N$, tj. že N -té spektrální čáře odpovídá kmitočet f_v .

$$f_v = \frac{N}{T_v N} = \frac{1}{T_v}$$

Při volbě frekvence vzorkování f_v mohou nastat tyto případy:

1. Při volbě vzorkovací frekvence je dodržen Shannon-Kotělnikovův teorém $f_v > 2f_m$.
2. Při volbě vzorkovací frekvence není dodržen Shannon-Kotělnikovův teorém $f_v < 2f_m$. Kde f_m je maximální frekvence, který je v měřeném spektru ještě obsažen.

4. Vztahy pro výpočty

Nesinusové průběhy proudu a napětí se rozkládají na řadu sinusových průběhů pomocí Fourierova teorému ve tvaru:

Předpokládané napětí

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n})$$

Předpokládaný proud

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^q I_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{I,n})$$

Efektivní hodnota napětí U_n pro $n=1,2,3,\dots$ jednotlivých harmonických

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{n=1}^q U_{nm} \sin(n\omega t + \varphi_{U,n}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^q U_n^2}$$

Efektivní hodnota proudu I_n pro $n=1,2,3 \dots$ jednotlivých harmonických

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^q I_n^2}$$

Obsah základní harmonické proudu

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1}{I}$$

Obsah vyšších harmonických proudů

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I}$$

Koeficient zkreslení proudu k_{ZI}

$$k_{ZI} = THDI = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} * 100$$

Koeficient zkreslení napětí k_{ZU}

$$k_{ZU} = THDU = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} * 100$$

Střední hodnota činného výkonu

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) * i(t) * dt$$

Po dosazení $u(t)$ a $i(t)$, získáme

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n$$

Kde

$$\varphi_n = \varphi_{U,n} - \varphi_{I,n}$$

Pak platí

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} P_n = P_0 + P_1 + P_2 + ..$$

Střední hodnota výkonu střídavého proudu se rovná součtu středních hodnot výkonů jednotlivých harmonických.

Střední hodnota jalového výkonu

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} Q_n = \sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu

$$S = UI = \sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)}$$

Činitel výkonu, opravdový účinník

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n}{\sqrt{\left(\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2\right)}}$$

Zdánlivý výkon také můžeme psát ve tvaru, kde je zahrnut deformační výkon D , který vzniká vlivem efektivních hodnot harmonického řádu včetně jejich součinů se stejnosměrnými složkami napětí a proudů:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Pro ekvivalentní jalový výkon, fiktivní výkon P_f platí:

$$P_f^2 = Q^2 + D^2 = S^2 - P^2$$

Za předpokladu sinusového napětí ve tvaru:

$$u(t) = U_m \sin \omega t$$

Pro opravdový účinník platí:

$$\lambda = \frac{P_1}{S} = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{U_1^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \frac{I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}}$$

5. Zdroje vyšších harmonických

Zdroje vyšších harmonických lze rozdělit do dvou skupin:

1. Zdroje vyšších harmonických napětí
2. Zdroje vyšších harmonických proudů

Zdroje vyšších harmonických napětí jsou točivé elektrické stroje (synchronní a asynchronní motory). Na vznik vyšších harmonických napětí má také vliv nesinusové rozložení magnetického pole v rotoru, které je způsobeno drážkováním v rotoru.

Zdroje vyšších harmonických proudů jsou elektrická zařízení, která mají nelineární voltampérovou charakteristiku. V měničenské distribuční transformovně jsou to například tyto třífázové zátěže:

1. Usměrňovačový transformátor
2. Usměrňovač
3. UPS – záložní jednotka napájení

Posoudíme-li vliv harmonických v transformovnách, tak nás nejvíce zajímají harmonické zdroje proudů, které jsou zdrojem negativních účinků na síť. K posouzení vlivu harmonických průběhů je nutná znalost spektra harmonických proudů. Pro charakterizaci obsahu harmonických se používá činitel harmonického zkreslení (THD). Pokud jednotlivé větve obvodu nejsou navrženy s ohledem na výskyt harmonických proudů, tak se v obvodech šíří jako harmonická napětí. Činitel harmonického zkreslení proudu je označován písmenem I (THDI). Činitel harmonického zkreslení napětí je označen písmenem U (THDU).

6. Komponenty stejnosměrného ss trakčního napájecího systému

6.1 Trakční obvod

Trakční obvod rozdělujeme:

1. Přívodní vedení R22 kV od dodavatele elektrické energie Pražské energetiky, u kterého budeme předpokládat vlastnosti homogenního „elektricky dlouhého“ vedení, napájeného napětím o základní frekvenci 50 Hz. Přívodní kabelová vedení a distribuční kabelová vedení 22 kV vytvářejí napájecí soustavu 22 kV, která jsou provozována v systému podélného dělení napájecí soustavy - napájený úsek ze dvou rozvodů PRE je rozdělen v některé elektrické stanici uvnitř napájecího úseku vypnutím vypínačů v příslušném poli v obou sekcích A a B na dva jednostranně napájené úseky.

2. Stejnoseměrný trakční obvod z hlediska elektromagnetické kompatibility můžeme popisovat takto:
 - a. Měnírenská distribuční transformovna dovoluje vzhledem k zapojení svého diodového neřízeného trakčního usměrňovače pouze průchod výkonu jedním směrem.
 - b. Vzhledem k napájecí straně se chová jako generátor proudových harmonických, produkovaných trakčním diodovým usměrňovačem.
 - c. Vzhledem k elektrickému úseku (trakčnímu vedení) se chová jako generátor napěťových harmonických.
3. Trakční vedení budeme opět předpokládat vlastnosti homogenního „elektricky dlouhého vedení, které je napájeno stejnosměrným napětím z měnírenské distribuční transformovny. Trakční vedení tvoří napájecí vedení, přívodní kolejnice (PK) a trakční odpojovače.
 - a. Vedení slouží pro připojení přívodní kolejnice na napájecí rozváděč měníreny (RU 825). Pro každou stopu přívodní kolejnice je určen samostatný napáječ.
 - b. Napájecí kabelové vedení je připojováno k přívodní kolejnici vždy přes trakční odpojovač s motorovým pohonem, kdy přívodní kolejnice je uspořádána pro spodní odběr proudu. Před možností nebezpečného dotyku i před případnými povětrnostními vlivy je v celé délce chráněna nevodivým krytem.
 - c. Trakční vedení, přívodní kolejnice je za normálního provozního stavu napájena oboustranně, tj. že daný elektrický úsek napájí stejnosměrným napětím dvě sousední měníreny.
 - d. Přívodní kolejnice se dělí mechanicky a elektricky. Mechanické dělení může být totožné s dělením elektrickým. Dělení je provedeno přerušením přívodní kolejnice a to jako dělení překlenutelné nebo dělení nepřeklenutelné dvěma sběrači vozidla.
4. Vlakovou soupravu metra rozdělujeme na:
 - a. Vlakovou soupravu metra v klasické koncepci (s rozjezdovými rezistory) se vůči napájecí soustavě chová jako sériová kombinace indukčností, rezistorů a protinapětí.
 - b. Vlaková souprava s pulzním měničem, jenž napájí asynchronní motor, se jeví vůči soustavě jako svůj vstupní L-C obvod.

- c. Z hlediska Elektromagnetické kompatibility bylo měřením na trakčním vedení eklektického úseku prokázáno, že obě koncepce nevnášejí do trakčního obvodu žádné rušivé vlivy.

Dle výše zmíněného přehledu trakčního obvodu lze jednotlivé části rozdělit na tyto prvky:

1. Pasivní prvky
 - a. Přívodní vedení od dodavatele Pražské energetiky do přívodních polí rozváděče R 22 kV
 - b. Měničrenská distribuční transformovna
 - c. Trakční vedení
2. Aktivní prvky
 - a. Vlakové soupravy metra

6.2 Trakční napájecí systém

Trakční napájecí systém se skládá ze dvou usměrňovačových transformátorů a dvou křemíkových diodových usměrňovačů, jejich součástí jsou skříňové ovládání.

6.2.1 Základní popis šestipulsního usměrňovače

Křemíkový šestipulsní usměrňovač v trojfázovém zapojení se skládá ze dvou skříní vzájemně propojených trojfázovým vedením. Střídavé vývody jsou připojeny hore, trojfázovým vedením od usměrňovačového transformátoru. Stejnoseměrné vývody jsou provedeny spodem, kabelovým vedením k přívodnímu poli rozváděče RU 825 V. Diody jsou namontovány na chladičích pro přirozené proudění vzduchu a chráněny proti zkratu velmi rychlými pojistkami. Jedna skříň obsahuje šest diodových větví. Každá větev je složena z jedné diody v sérii se dvěma pojistkami a osmi diodami paralelně. Skříň tedy obsahuje 48 diod a 96 pojistek. Proti atmosférickému a spínacímu přepětí je usměrňovač chráněn střídavou přepětíovou ochranou, umístěnou přímo v usměrňovači. Přepětíová ochrana se skládá z pojistky, rezistoru a kondenzátoru. Přerušení některé pojistky přepětíové ochrany je místně i dálkově signalizováno. Proti přepětí komutačnímu jsou jednotlivé diody chráněny paralelně připojenými kondenzátory.

Celý usměrňovač je montován izolovaně od země na pertinaxových deskách. Kostra usměrňovače je spojena s uzemněním elektrické stanice přes hlavní nadproudové relé.

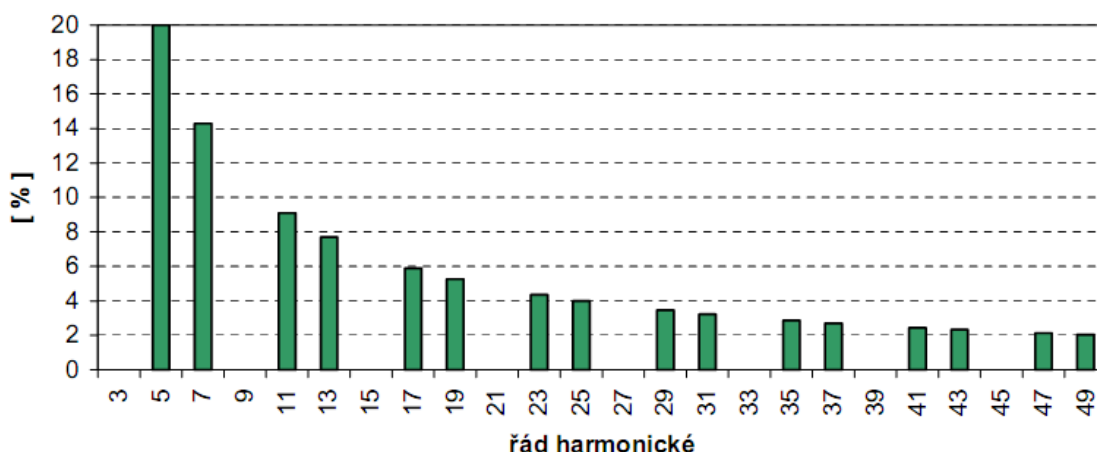
Za chodu může dojít k vypnutí trakčního usměrňovače za těchto příčin:

1. Při působení mžikové nadproudové ochrany v R22 kV.
2. Působením vad proudové ochrany časově se zpožděním 12 sekund.
3. Působením mžikové ochrany v kombinaci s časovým relé se zpožděním 50 sekund.
4. Působením mžikové ochrany spojené v uzlu.
5. Při přerušení pojistky diody.
6. Zapůsobením zemní proudové ochrany, nebo při stisknutí havarijního tlačítka v elektrické stanici.

Usměrňovač musí snášet zatížení tak, jak to vyžaduje skutečný provoz vozidel v napájených úsecích. Křemíkový usměrňovač může být v rozmezí teplot -15°C , 45°C prakticky okamžitě zatěžován až na hodnotu dovoleného přetížení.

6.2.2 Usměrňovače šestipulsní

Harmonické zdroje proudu se v elektrických napájecích obvodech vyskytují již mnoho let. Trakční usměrňovače jsou založeny na principu trojfázového můstku, který je také známý jako šestipulsní, jelikož se generuje šest pulsů za jednu periodu na jeho stejnosměrném výstupu.

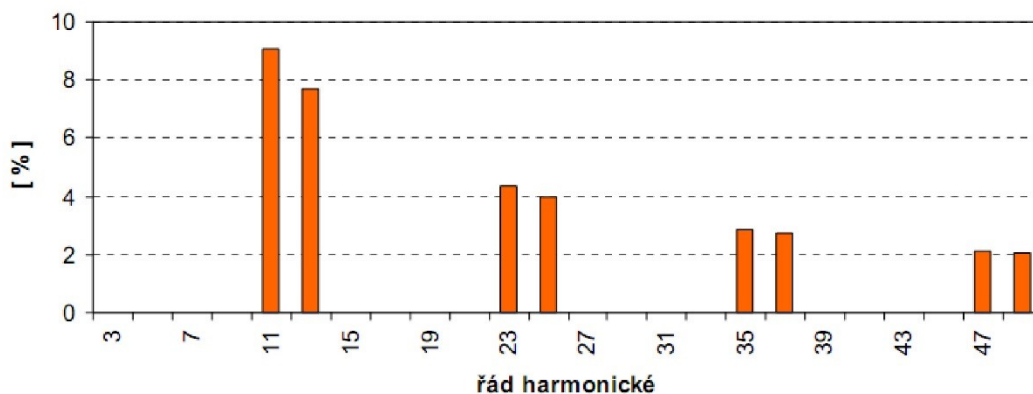


obr. 1: Teoretický maximální obsah harmonických šestipulsního usměrňovače

Šestipulsní trojfázový můstek generuje harmonické v řádu $6n \pm 1$ tj. v řádu o jeden vyšší a o jeden menší než šestinásobek základní harmonické. Velikost každé harmonické je nepřímo úměrná řádu harmonické. Šestipulsní usměrňovač nevytváří harmonické řádu 3 a její násobky. Tyto usměrňovače nalezneme ve většině měničnických distribučních transformoven.

6.2.3 Usměrňovače dvanáctipulsní

Velikost harmonických je výrazně redukována použitím dvanáctipulsního můstku. Tento dvanáctipulsní usměrňovač se skládá ze dvou šestipulsních můstků zapojených paralelně a napájených z usměrňovačového transformátoru zapojeného hvězda / trojúhelník. Dvanáctipulsní usměrňovač produkuje pouze harmonické s nejnižším řádem jedenácté, třinácté a jejich násobky. U tohoto můstku jsou zanedbatelná procentuální zastoupení páté a sedmé harmonické. Harmonický proud pro dvanáctipulsní zapojení není zcela redukován, ale jsou vyprodukovány harmonické proudy vyšších řádů, pro které je návrh kompenzačních filtrů snadnější.



obr. 2: Teoretický maximální obsah harmonických proudů dvanáctipulsního usměrňovače

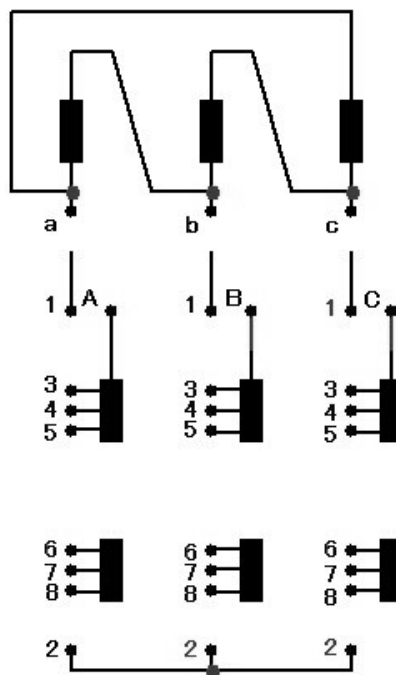
Dvanáctipulsní usměrňovače jsou využívány u zařízení, kde je třeba vysoké vyhlazení stejnosměrného napětí. Avšak hlavním důvodem využití dvanáctipulsních usměrňovačů je nutnost snížení produkce vyšších harmonických do energetické sítě.

6.2.4 Základní popis usměrňovačového transformátoru

Usměrňovačový transformátor napájí křemíkový usměrňovač v třífázovém můstkovém zapojení o výstupním jmenovitém proudu 3000 A a jmenovitém napětí 825 Voltů stejnosměrného napětí.

Z transformátoru jsou vyvedeny odbočky v rozsahu $\pm 2,5 \%$ (nebo $\pm 5\%$) jmenovitého napětí VN (obr. 3). Řízení napětí se provádí na oboustranně odpojeném transformátoru změnou polohy přepojovacích spojek na straně VN. Suché usměrňovačové transformátory jsou konvekčního provedení, tj. nezalité vinutí. Cívkové vinutí se skládá z plochých vodičů navinutých na třech lištách obdélníkového průřezu, které vymezují chladicí kanály vinutí. Výhodnost cívkového vinutí spočívá především ve snížení mezipolohového napětí. Další výhodou je podstatné snížení ztrát způsobené rozptylovým polem vodičů. Ztráty můžeme snížit tím, že lze vinutí symetrizovat ke středu tak, že je vytvořeno ze dvou stejných cívek natočených proti sobě o 180 stupňů.

Trakční transformátory 22 / 0,625 kV jsou v době přepravní výluky odpojeni od sítě a tudíž neodebírají žádný jalový výkon. Pokud by byly připojeny k síti, mohly by částečně přispět k zlepšení účinnosti. Vzhledem k potřebnému jalovému výkonu (například odběr z rozvodny 110/22 kV Praha – Bohdalec je v době přepravní výluky 500 kVAr) však není velikost odebíraného jalového výkonu trakčních transformátorů naprázdno (cca 8 kVAr na jeden trakční transformátor) pro odběrné místo dostačující. Ztráty transformátoru naprázdno jsou v poměru k jalovému výkonu vysoké, a tudíž by nebylo přínosem připojení transformátorů k síti v době přepravní výluky jen z hlediska kompenzace. Při zatížení transformátoru se odběr jalového výkonu zvyšuje díky rozptylové reaktanci indukčností podélných složek. Odebíraný jalový výkon závisí na zatížení kvadraticky. Indukčnost kabelového vedení, distribuční a trakční transformátory dokáží při zatížení kompenzovat kapacitu kabelového vedení.



Yd1

Vyšší napětí				Nižší napětí		
Spojení	U [V]	Přepojení svorek	Připojení	Spojení	U [V]	Připojení
Y	22 550	1-3 , 2-8	A B C	Δ	3x650	a b c
	22 000	1-4 , 2-8				
	21 450	1-5 , 2-7				
	20 900	1-5 , 2-6				

obr. 3: Schéma zapojení usměrňovačového transformátoru

6.2.5 Ochrany vývodů pro usměrňovačové transformátory

Vývody jsou vybaveny nadproudovou mžikovou ochranou, která vypíná při překročení nastavené hodnoty bez časové prodlevy. Dále jsou vybaveny nadproudovou časovou ochranou, která vypíná při přetížení a to v nastaveném čase. Pro ochranu proti dlouhodobému přetížení je určena nadproudová mžiková ochrana, nastavená na menší proud než předešlé ochrany a pracuje ve spojení s časovým strojkem. Časový strojek má dva časy. Při prvním signalizuje a při druhém vypíná.

6.2.6 Technické údaje usměrňovačového transformátoru

Jmenovitý výkon	3000 kVA
Zatížitelnost	100 % trvale 150 % 2 hodiny 200 % 1 minuta 300 % 15 sekund
Napětí primární	3 x 22 kV $\pm 2,5 \% \pm 5 \%$
Napětí sekundární	3 x 650 V
Spojení	Yd1
Kmitočet	50 Hz
Počet fází	3
Napětí nakrátko	$u_k = 9 \% \pm 15 \% \text{ tolerance}$
Ztráty naprázdno	7 kW $\pm 15 \% \text{ tolerance}$
Ztráty nakrátko	16 kW $\pm 15 \% \text{ tolerance}$
Ztráty celkové	23 kW $\pm 10 \% \text{ tolerance}$
Vinutí	Cu
Chlazení	přirozené vzduchové

6.2.7 Vyšší harmonické v transformátorech

Transformátory jsou ovlivňovány harmonickými jednak z hlediska ztrát vířivými proudy a také z hlediska $3n$ harmonickými. U transformátorů je vznik vyšších harmonických způsoben nelineární charakteristikou magnetizačního toku a proudu. Nejvyšší hodnotu magnetického toku v jádře má transformátor při chodu naprázdno. Při chodu naprázdno dochází k největší deformaci proudu.

Ztráty vířivými proudy se v transformátorech pohybují okolo 10 procent ztrát při plném zatížení, avšak pro vyšší harmonické, rostou s jejich kvadrátem. Pokud budeme předpokládat nelineární zátěž, tak ztráty vířivými proudy budou dvojnásobné oproti lineární zátěži.

V měnirenkové distribuční transformovně jsou nejvíce využity dva druhy transformátorů. Usměrňovačový transformátor, jehož zapojení je vinutí hvězda / trojúhelník Yd1 a distribuční transformátor, který je zapojen do trojúhelníka / uzemněná hvězda Dyn1. U vinutí zapojeného do trojúhelníka je spojen vliv s 3n harmonickými. U zapojení do trojúhelníka jsou 3n harmonické ve fázi, tudíž se uzavírají v tomto vinutí a nešíří se do napájecí sítě. Transformátor spojený do trojúhelníka je pro 3n harmonické považován za izolační, zatímco ostatní řády vyšších harmonických transformátorem procházejí.

Stejný efekt izolování 3n harmonických proudů přináší transformátory zapojené do lomené hvězdy. Kde získáváme částečnou vazbu mezi fázovými vinutími.

Pokud je transformátor provozován s nelineární zátěží, je podíl vyšších harmonických na jeho provozu natolik významný, že výkon transformátoru je nutno přepočíst dle parametru K .

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\sum_{h=2}^{h=N} \left[h^q \cdot \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]}{1 + \sum_{h=2}^{h=N} \left[h^q \cdot \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]}}$$

Kde:

e ... vyjadřuje ztráty vířivými proudy způsobené sinusovým proudem se základním kmitočtem 50 Hz, dělené ztrátami způsobenými stejnosměrným proudem rovným efektivní hodnotě sinusového proudu při referenční teplotě, pro běžné transformátory lze brát $e = 1,25$.

$\frac{I_h}{I_1}$... je poměrný obsah h-té harmonické v proudu transformátoru.

Q ... závisí na typu vinutí transformátoru, pro kulaté nebo hranaté vodiče lze vzít $q = 1,7$, pro foliové vinutí nízkého napětí je $q = 1,5$.

N ... je vhodné brát hodnotu $N = 40$.

Vzhledem k snížení jmenovitého výkonu transformátoru tímto parametrem K je nutné příslušný transformátor na tento fakt dimenzovat.

Proud naprázdno transformátoru není sinusový, i když vstupní napětí má sinusový průběh. Průběh proudu lze tedy rozložit na základní a vyšší harmonické řádu n . Z tvaru proudu vyplývá, že Fourierův rozvoj obsahuje liché harmonické řádu $n = 2k - 1$, kde $k = 1, 2, \dots$

Pro proud tedy platí vztah:

$$i = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin n\omega t$$

Pro proudy vyšších harmonických trojfázového systému, které jsou časově posunuté o $\frac{2}{3}\pi$ v jednotlivých fázích platí:

$$i_u = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin n\omega t$$

$$i_v = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} n \left(\sin \omega t - \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$i_w = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} n \left(\sin \omega t - \frac{4}{3}\pi \right)$$

Pro první harmonickou, základní harmonická $n = 1$, vytváří základní pravotočivou soustavu otáčející se rychlostí ω .

$$i_{1u} = I_{m1} \sin n\omega t$$

$$i_{1v} = I_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right)$$

$$i_{1w} = I_{m1} \sin \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right)$$

Třetí harmonická proudu ($n = 3$) vytváří konfázní soustavu s konfázními fázory, které se otáčejí rychlostí 3ω , tzn. že veličiny mají v každém okamžiku stejnou fázi a velikost.

$$i_{3u} = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$i_{3v} = I_{m3} \sin 3 \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) = I_{m3} \sin 3\omega t$$

$$i_{3w} = I_{m3} \sin 3 \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right) = I_{m3} \sin 3\omega t$$

Pátá harmonická složka proudu n vytváří trojfázovou soustavu s opačným sledem fází, tj. že pátá harmonická proudu vytváří levotočivou soustavu otáčející se rychlostí 5ω .

$$i_{5u} = I_{m5} \sin 3\omega t$$

$$i_{5v} = I_{m5} \sin 5 \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right)$$

$$i_{5w} = I_{m5} \sin 3 \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right)$$

Pokud provedeme postupnou analýzu pro další řády harmonických, tak je možné dokázat, že pro n harmonický mají:

$$n = 6k + 1 \text{ mají sled fází pravotočivý}$$

$$n = 6k - 1 \text{ mají sled fází levotočivý}$$

$$n = 3(2k - 1) = 6k - 3 \text{ jsou konfázní}$$

$$\text{kde } k = 1, 2, \dots$$

Nepříznivý vliv na chod transformátoru mají třetí a liché násobky třetích harmonických.

6.2.8 Transformátor v zapojení Yy

U transformátoru, jehož spojení vinutí je Yy bez vyvedeného nulového bodu, nemohou vinutím spojeným do hvězdy protékat třetí a liché násobky třetích harmonických proudu. Jejich součet v každém časovém okamžiku není roven nule, jako je tomu u základní prvé harmonické. Pokud není třetí harmonická ($n = 3$) obsažena v proudu, musí tedy být obsažena v magnetickém toku, což zapříčiní, že časový průběh toku nebude sinusový. Pak tedy třetí harmonická magnetického toku a jimi indukovaná napětí budou pro transformátory jádrového typu způsobovat zvýšené ztráty ve stahovací konstrukci magnetického obvodu. Indukovaná napětí budou malá, jelikož magnetické toky třetí harmonické se budou uzavírat rozptylovými cestami. U transformátoru plášťového typu budou indukovaná napětí vyvolaná třetí harmonickou magnetickou toku velká, jelikož se uzavírají hlavním magnetickým obvodem. Napětí třetí harmonické mezi nulovými body transformátoru a sítě může dosáhnout 12% fázového napětí. Ve sdružených síťových napětích se třetí harmonické neobjeví, protože sdružené napětí

je dáno fázorovým rozdílem dvou fázových napětí, takže složky třetích harmonických se při odečítání zruší.

Třetí harmonické magnetických toků indukují třetí harmonické fázových napětí, která nebudou sinusová. Vliv třetích harmonických fázorových napětí je možno vyjádřit kmitáním nulového bodu, kde fázor napětí třetí harmonické se bude otáčet trojnásobnou rychlostí 3ω , proto mění svoji polohu vzhledem k napětí první harmonické, tj. že fázová napětí budou měnit svoji velikost amplitud během periody, což má za důsledek, že nebudou sinusová.

6.2.9 Transformátor v zapojení Yd

Pro transformátor v zapojení Yd bez vyvedeného nulového bodu nemohou primárním vinutím protékat proudy třetích harmonických, tudíž vznikají třetí harmonické magnetického toku a ty indukují třetí harmonické fázových napětí. Tato indukovaná napětí vyvolávají v sekundárním vinutí spojeném do trojúhelníku třetí harmonické proudy, které svým účinkem kompenzují třetí harmonické magnetického toku. Tedy výsledný magnetický tok a fázová napětí jsou téměř sinusová.

7. Zdroje vyšších harmonických v distribuční části

7.1 Distribuční transformátory

Distribuční transformátory se chovají v síti jako zátěž s induktivním charakterem. Je-li transformátor připojen naprázdno, protéká jeho primárním vinutím proud naprázdno, jehož jalová složka je nazývána magnetizační proud a činná složka respektuje ztráty v železe.

Magnetizační proud transformátoru má poměrně neharmonický průběh, přičemž v každé fázi má proud odlišné hodnoty (mimo jiné také proto, že střední sloupek má nižší magnetický odpor). Na rozdíl od ztrát naprázdno není hodnota proudu naprázdno výrobcem zaručena. Hodnota proudu naprázdno je naměřena až při kusové zkoušce transformátoru ve třech fázích a zaznamená se v protokolu o kusové zkoušce. Výrobce zaručuje pouze ztráty naprázdno. Jalový výkon distribučního transformátoru naprázdno je řádově v jednotkách kVAr.

Distribuční transformátory účinník výrazně nezhoršují. Bude-li například transformátor jmenovitého výkonu $P=1000$ kVA (tab. 1) na sekundární straně plně zatížený zátěží 1000kW s účinníkem $\cos \varphi = 1$, pak na primárním vinutí bude účinník 0,998.

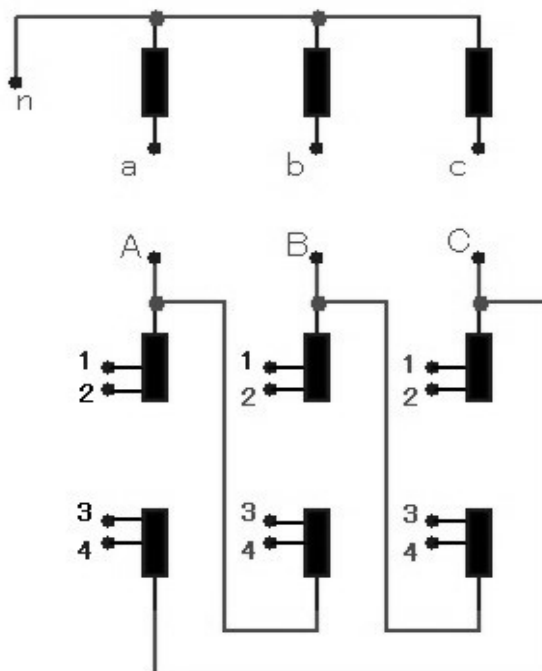
Zatížení transformátoru [%]	Celkový jalový výkon [kVAr]
0	2
25	5,7
50	16,8
75	35,4
100	61,3

Tabulka 1: Celkový jalový výkon dle zatížení transformátoru v zapojení Dyn

Při spojení primárního vinutí do trojúhelníka se proudy třetích harmonických mohou vstupním – primárním vinutím uzavírat, jelikož pro konfázní složky (složky které mají v každém okamžiku stejnou fázi a velikost) znamená zapojení do trojúhelníka zkrat. Tudíž magnetické toky i fázová napětí jsou sinusová. Síťový proud je dán rozdílem fázových proudů, proto neobsahuje třetí harmonickou. Konfázní složky síťového proudu se při odečítání fázových proudů zruší.

Distribuční transformátory rozdělujeme na dva základní typy a to transformátor světelný a transformátor motorový. V základním stavu jsou všechny čtyři transformátory zapnuty. Výkonová velikost je zvolena tak, aby v základním stavu byly transformátory zatíženy na maximální hodnotu padesáti procent. V případě nutného odstavení z důvodu poruchy nebo havárie přebírá jeden z dvojice transformátorů výkon, aniž by byl přetížen. Každý transformátor je vybaven koncovým spínačem, který při otevření předního bloku sepne a transformátor se tak vypne. Distribuční transformátor může tedy vypnout vlivem působení ochrany, při otevření dveří nebo zvýšenou teplotou, než je teplota maximální. Proti tepelnému přetížení je transformátor chráněn termostatem, který je umístěný nad vinutím transformátoru na straně vývodů vysokého napětí. Termostat je nastavený na maximální přípustnou teplotu vystupujícího vzduchu z vinutí, který odpovídá maximálnímu oteplení vinutí. Porucha vypnutí následkem působení ochrany bude signalizována na rozváděči poruchové signalizace RPS. Ostatní poruchy budou signalizovány na rozváděči R22 kV pro daný přívod k transformátoru.

Z transformátoru jsou vyvedeny odbočky v rozsahu $\pm 2,5 \%$ (nebo $\pm 5\%$) jmenovitého napětí VN (obr. 4).



Dyn

Vyšší napětí				Nižší napětí		
Spojení	U [V]	Přepojení svorek	Připojení	Spojení	U [V]	Připojení
Δ	23 100	2 - 3	A	Yn	400/231	n
	22 000	1 - 3	B			a
	20 900	1 - 4	C			b
						c

obr. 4: Schéma zapojení distribučního transformátoru

Řízení napětí se provádí na oboustranně odpojeném transformátoru změnou polohy přepojovacích spojek na straně VN. Vysokonapěťové vinutí je přímo vinuto na vinutí nízkého napětí. Provedení jako vrstvené vinutí, zajišťuje svým lineárním rozložením rázového napětí vynikající odolnost proti přepětí.

7.1.1 Ochrany vývodů pro distribuční transformátory

Tyto vývody jsou vybaveny nadproudovou časovou ochranou. Tato ochrana má dva články $I_n=2A$ zapojené do fází a jeden článek $I_n = 1A$ zapojený do uzlu měřícího transformátoru proudu, zároveň je do proudového okruhu zařazena nadproudová mžiková ochrana, nastavená na vyšší proud, která vypíná bez časové prodlevy.

7.1.2 Technické údaje

Jmenovitý výkon	1000 kVA
Napětí primární	3 x 22 kV
Napětí sekundární	230 / 400 V
Spojení	Dyn
Kmitočet	50 Hz
Počet fází	3
Napětí nakrátko	$u_k = 6 \%$
Proud naprázdno	$i_0 = 11,4 \text{ A}$
Ztráty naprázdno	2443 W $\pm 6 \%$ tolerance
Ztráty nakrátko:	
Při jmen. proudu	9 269 W $\pm 5,96 \%$ tolerance
Při 75 °C	10 939 W $\pm 5,98 \%$ tolerance

Proud nakrátko se kontroluje podle vzorce:

$$I_k = \frac{U \cdot I_{ln}}{U_k} \quad [A, V, A, V]$$

Kde

I_k ... proud nakrátko

U ... napětí zdroje

I_{ln} ... nominální proud strany vysokého napětí

U_k ... napětí nakrátko

Napětí nakrátko se počítá podle následujícího vzorce:

$$U_k = \frac{e_k \cdot U_{ln}}{100} \quad [V, V, \%]$$

Kde

U_k ... napětí nakrátko

U_{ln} ... nominální napětí strany vysokého napětí

e_k ... procentuální napětí nakrátko

7.2 Vyšší harmonické ve střídavých strojích - motorech

Rozděluje do dvou základních skupin:

1. Harmonické časové

Způsobeny vyššími harmonickými proudy ve vinutí, například statorové vinutí je napájeno ze střídače nebo měniče napětí, soft startéru. Při napájení statorového vinutí vznikají dle harmonické analýzy všechny liché harmonické, z nichž vytvářejí točivá pole všechny harmonické krom násobků tří. Uplatňují se tedy harmonické řádu $6n \pm 1$, kde n je celé číslo. V případě, že jsou motory připojeny přímo k rozvodné distribuční síti, bez předřadného měniče, jsou amplitudy časových harmonických ovlivněny pouze zkreslením vstupního napájecího napětí. Pokud vstupní napájecí síť vykazuje předepsané parametry, jsou tyto amplitudy velmi malé a lze je zanedbat.

2. Prostorové harmonické

Prostorové harmonické vznikají prostorovým rozložením vinutí do cívek a jejich uložení do drážek. Na rozdíl od časových harmonických jsou prostorové harmonické vyvolány proudem o frekvenci $f=50$ Hz.

Podle příčiny vzniku prostorových harmonických rozeznáváme dva druhy:

- a. Harmonické magnetomotorického napětí - vznikají rozložením vinutí do drážek.
- b. Harmonické vodivosti vzduchové mezery, jež vznikají drážkováním statoru a rotoru.

Tyto dva druhy vyšších harmonických vyvolávají stupňovitý průběh magnetomotorického napětí nebo změnu magnetické vodivosti drážek podél obvodu stroje (motoru). Tyto harmonické se při stejném kmitočtu liší počtem pólů. Stupňovitý prostorový průběh vyvolá dle Fourierovy analýzy pro trojfázové vinutí liché prostorové harmonické, přičemž točivé magnetické pole vytváří harmonické řádu $6n \pm 1$.

Vzniklé vyšší prostorové harmonické budí v rotoru a poté i v statoru odpovídající proudy vyšších harmonických, které opět vytváří magnetické pole vyšších harmonických. Ve strojích tak vzniká celé spektrum harmonických,

jejichž amplituda rychle klesá s řádem harmonické. Obecně nejvyšší zastoupení mají harmonické řádu 5,7,11 a 13, tyto hodnoty odpovídají doposud naměřeným hodnotám.

Velikost amplitudy vyšších harmonických je přímo úměrná magnetomrické síle, jinak řečeno momentu zatížení ve stroji, které je ovlivněno provozními podmínkami. Tento problém bude nastávat především v úseku pohonu pro eskalátory, kde dochází jednak k pulsujícím momentům zatížení tak i k práci v brzděném režimu.

Pokud tedy nebude tvrdost vstupní napájecí stanice dostačující, může dojít ke zkreslení amplitudy napětí a následně ke vzniku harmonických časových.

7.3 Vyšší harmonické způsobené měniči

Jedná se o elektronicky řízené pohony, kde měniče lze rozdělit do několika skupin:

1. Přímé měniče napětí, soft startéry pro střídavé motory

Zařízení v měnírenské distribuční transformovně, které ve svém zapojení obsahuje soft-startéry, jsou pohony ventilačních jednotek vyvedené z rozváděče motorového (obvykle pod označením vývodu RM 40 nebo RM 43).

Soft-startéry jsou používány pouze při rozběhu ventilace. Jedná se o statický měnič napětí, který se skládá z dvou antiparalelních tyristorů s fázovým řízením, sloužící k omezení záběrného proudu motoru velkých výkonů při jeho rozběhu. Při ukončení rozběhu je elektronická cesta měniče vyřazena paralelním kontraktním systémem (stykačem).

Tyto systémy obecně emitují do nadřazeného napájecího systému celé liché násobky první harmonické řádu $2n + / - 1$. Obecně nejvyšší zastoupení mají harmonické řádu 3,5 a 7. Tyto řády harmonických jsou obtížně vyhodnocovány, protože se jedná o velmi krátký přechodný děj. Jelikož se z principu použití jedná pouze o krátkodobý stav (rozběh), lze pro obsah harmonických v rozmezí činitele harmonického zkreslení THD = 35-40 % hodnoty velmi často zanedbat.

Pro časově dlouhé rozběhy u výkonových motorů může sekundární rušení způsobovat nežádoucí jevy, proto je třeba k rozváděči motorovému do obou sekcí připojit kompenzační zařízení (označované v MDT jako RCA nebo RCB) nebo synchronizační systémy zálohovacích zařízení.

2. Měníče kmitočtu, cyklokonvertory pro střídavé motory
3. Měníče s dvojitou konverzí AC / DC / AC
 - a. Záložní zdroje
 - b. UPS

Je vždy instalována v rozvodně, využívající šestipulsní tyristorový usměrňovač kde obsah harmonických je $THD = 35\%$.

- c. Střídače
4. Malé spínané zdroje
5. Startéry výbojkových svítidel

7.4 Kompenzační rozváděče s kondenzátory

V MDT jsou kompenzační zařízení distribuční části připojeny k rozváděči motorovému (RM). Rozváděče kompenzace jsou označovány jako RCA nebo RCB (podle připojení k příslušné sekci).

Většina kompenzačních rozváděčů centrální kompenzace je v MDT vypnuta, přesto k nedodržení účinníku v odběrném místě (tz. pod hodnotu $\cos \varphi < 0,95$) došlo jen v jediném odběrném místě, když v letních měsících došlo krátkodobě k poklesu až na hodnoty $\cos \varphi = 0,92$. Doposud převládá dodávka jalové energie do sítě (odběr s kapacitním účinníkem), maximum je v době minimální spotřeby činné energie, tedy v době přepravní výluky. V době velké spotřeby činné energie se pak střídá dodávka jalové energie s její spotřebou, přičemž při spotřebě neklesne účinník v předávacím místě (až na výše zmíněnou výjimku) pod $\cos \varphi = 0,95$.

Kompenzační rozváděče dělíme na dva typy:

1. Nehrazená kompenzace

Nehrazená kompenzace vytváří s indukčností sítě rezonanční obvod. Rezananční frekvence závisí na výkonu kompenzace a na zkratovém vý-

konu v místě připojení kompenzace. Protože výkon kompenzace se v důsledku spínání stupňů mění, mění se i rezonanční frekvence. Ke změně rezonanční frekvence dojde i při změně zkratového výkonu změnou způsobu napájení. Pokud se rezonanční frekvence dostane do blízkosti vyšších harmonických (pro řád 5. harmonické – frekvence 250 Hz, pro řád 7. harmonické – frekvence 350 Hz, pro řád 11. harmonické – frekvence 550 Hz) dojde k proudovému přetěžování kondenzátorů.

2. Hrazená kompenzace

Snižuje vliv vyšších harmonických. Použitím tlumivek se sníží rezonanční frekvence pod řád 5. harmonické (250 Hz), pro všechny vyšší harmonické to představuje induktivní zátěž.

Hrazené kompenzace jsou použity v nových stanicích na trase C (MDT Letňany, Prosek, Střížkov) a v některých rekonstruovaných stanicích (MDT Muzeum, Dejvice a MDT pro Centrální dispečink). Přesto i v těchto stanicích dochází ke stejným poruchám kondenzátorů v rozváděčích jako u nehrazených kompenzací. Kondenzátory jsou však vystaveny vysokým teplotám. Vysoké teploty mohou být zapříčiněny vyššími ztrátami v obvodech, nebo nevhodnou instalací kompenzačních rozváděčů z hlediska jejich chlazení. U hrazených kompenzací jsou zdrojem tepla také tlumivky.

8. Negativní zpětné vlivy MDT na veřejný distribuční rozvod

8.1 Analýza trakčního napájecího systému

Pro analýzu chování trakční napájecí stanice (MDT) vůči napájecí síti je nutno vyšetřovat především zapojení trakčního usměrňovače:

1. Pro šestipulsní zapojení, kdy je sekundární vinutí zapojeno do hvězdy nebo do trojúhelníka.
2. Pro dvanáctipulsní zapojení zda je, nebo není použita nulová tlumivka.

Pro další studii se omezíme pouze na analýzu šestipulsního zapojení usměrňovací jednotky, jelikož dvanáctipulsní zapojení není doposud v měnírenských distribučních transformovných realizováno.

8.1.1 Základní analýza pro šestipulsní usměrňovač

Připojený usměrňovač na napájecí síť představuje nelineární zátěž, tj. že při sinusovém napájecím napětí obsahuje proud na střídavé straně usměrňovače základní harmonické, ale také složky vyšších harmonických. Pokud budeme uvažovat transformátor, jehož primární vinutí a sekundární napětí je zapojeno do hvězdy, tak pro třífázový můstkový usměrňovač pomocí Fourierovy analýzy, získáváme výpočet odebíraného proudu ze sítě $i(t)$:

$$i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d K_T \left(\frac{1}{1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5 \omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7 \omega_1 t - \frac{1}{11} \sin 11 \omega_1 t + \dots \right)$$

Kde K_T je převod transformátoru vyjádřený dle vztahu:

$$K_T = \frac{U_{\text{sekundární}}}{U_{\text{primární}}}$$

Rozborem tohoto vztahu zjistíme, že se zde objevují pouze harmonické určitých řádů:

$$h = kp \pm 1$$

kde

k ... je celé číslo.

p ... je počet pulsů usměrňovače.

Harmonické veličiny, které splňují podmínky této rovnice, nazýváme charakteristicky harmonické a pro velikost proudu n -té harmonické platí:

$$I_n = \frac{1}{n} * I_1$$

Tento vztah platí i pro efektivní hodnoty harmonických proudů, avšak zanedbává vliv překrytí na amplitudu vyšších harmonických síťového proudu. Vztah je nazýván amplitudovým zákonem. Hodnoty pro jednotlivá zapojení podle počtu pulsů usměrňovače jsou:

Pro trojpulsní usměrňovač

$$I_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} * I_d$$

Pro šestipulsní usměrňovač

$$I_{max} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} * I_d$$

Pro dvanáctipulsní usměrňovač

$$I_{max} = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} * I_d$$

Výše uvedené vztahy platí pouze za předpokladů:

1. Symetrické trojfázové soustavy
2. Na vstupu usměrňovače je napětí sinusové
3. Indukčnost ve stejnosměrném obvodu je $L_{SS} \rightarrow \infty$
4. Zkratový výkon napájecí soustavy je $S_k \rightarrow \infty$ to znamená, že vstupní indukčnost $L_{vstupní} \rightarrow 0$.
5. Zanedbáme ztráty v usměrňovači.

V praxi nejsou uvedené předpoklady ideálně splněny, proto hodnoty vyšších harmonických řádů dosahují nižších hodnot. Dalším negativním faktorem práce usměrňovače je odběr jalového výkonu usměrňovače.

Pro efektivní hodnotu síťového proudu usměrňovače platí:

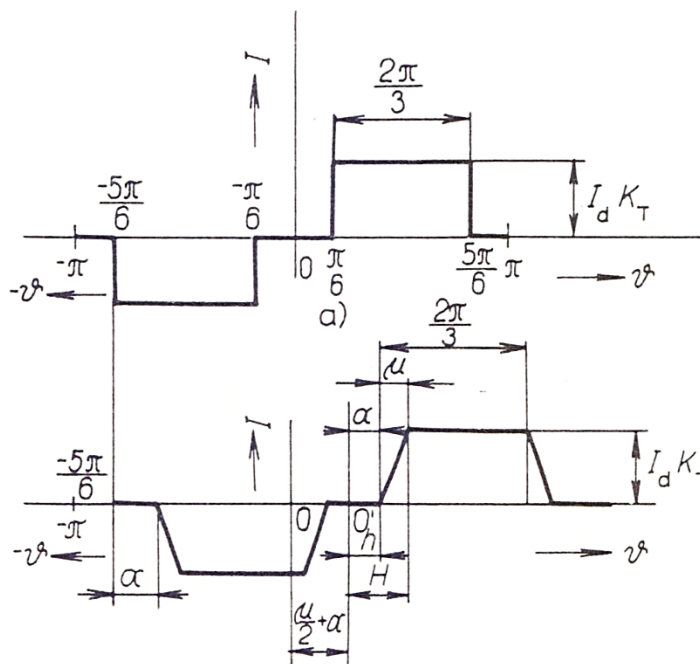
$$I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=kp}^{\infty} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + \sum_{n=kp}^{\infty} \frac{n^2 + 1}{(n^2 - 1)^2}} = I_1 \frac{\pi}{p} \frac{1}{\sin \frac{\pi}{p}}$$

Pro teoretický obsah základní harmonické p- pulsního měniče získáváme vztah:

$$g = \frac{I_1}{I} = \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}$$

8.1.2 Transformátor Yy a Šestipulsní usměrňovač

Zapojení šestipulsního můstkového usměrňovače s transformátorem, jehož primární a sekundární vinutí je zapojeno do hvězdy, má tvarově shodný časový průběh sekundárního a primárního proudu. Ideální průběh proudu diodou je obdélníkový a závisí na převodu transformátoru a jeho zapojení.



obr. 5: Průběh síťového proudu šestipulsního usměrňovače

Pro analýzu neřízeného šestipulsního usměrňovače obr. 5, bude ideální průběh síťového proudu mít čistě obdélníkový tvar, tj. při zanedbání úhlu překrytí proudů při komutaci ($\mu = 0$). Poté pro zobrazení funkcí $I(\vartheta)$ platí:

$$I(\vartheta) = \begin{cases} -I_d K_T & \dots \vartheta \in \langle -\frac{5}{6}\pi; -\frac{\pi}{6} \rangle \\ 0 & \dots \vartheta \in \langle -\pi; -\frac{5}{6}\pi \rangle \langle -\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{6} \rangle \langle \frac{5}{6}\pi; \pi \rangle \\ I_d K_T & \dots \vartheta \in \langle \frac{\pi}{6}; \frac{5}{6}\pi \rangle \end{cases}$$

Pro převod transformátoru platí vztah:

$$K_T = \frac{U_{sekundární}}{U_{primární}}$$

Průběh proudu je funkce souměrná podle počátku a vodorovné osy, Fourierův rozvoj tedy obsahuje pouze koeficienty B_n pro $n = (2k + 1)$ pro $k = 0, 1, 2, \dots, n$, pro koeficienty B_n platí:

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{2}{T_1} \int_{t_0}^{t_0+T_1} f(t) \sin(n\omega_1 t) dt = \frac{2}{\pi} I_d K_t \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin(n\omega_1 t) d\omega_1 t = \\ &= \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \sin(n\vartheta) d\vartheta = \frac{2}{\pi n} \left[\cos n \frac{\pi}{6} - \cos n \frac{5\pi}{6} \right] \end{aligned}$$

Koeficienty B_n nabývají hodnot

$$B_n = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{2}{n} I_d K_T & \text{pro } n = 1, 11, 13, \dots \\ 0 & \text{pro } n = 3, 9, 15, \dots \\ -\frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{2}{n} I_d K_T & \text{pro } n = 5, 7, 17, \dots \end{cases}$$

Rozvoj proudu podle Fourierovy transformace má tvar:

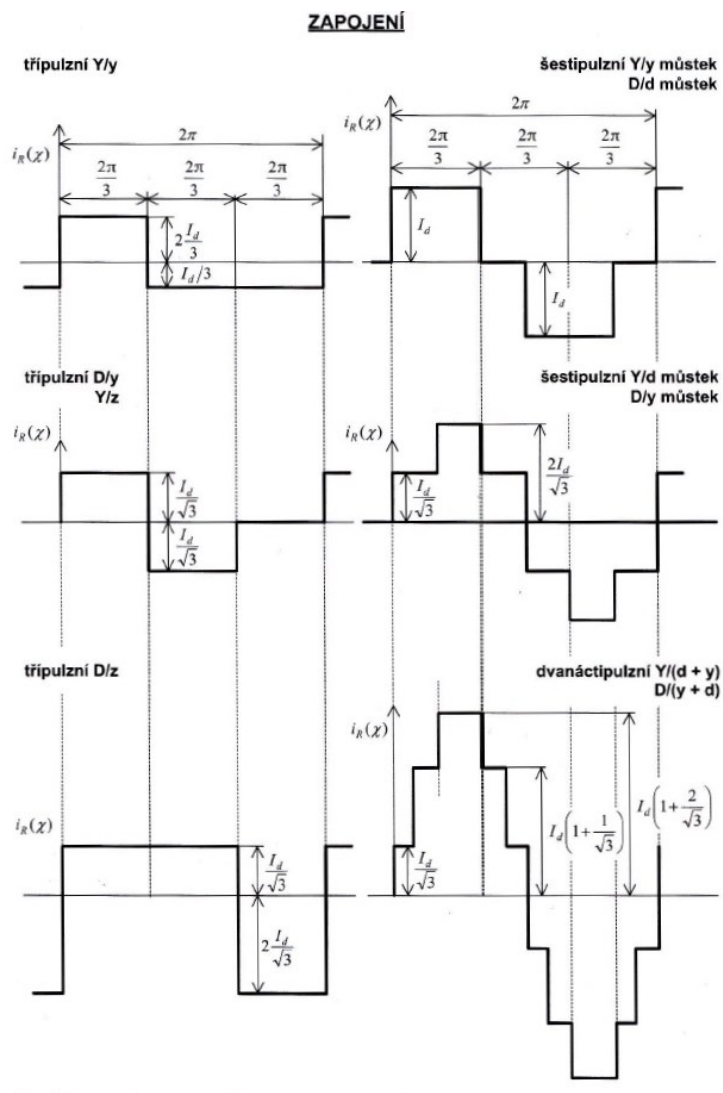
$$\begin{aligned} I(\vartheta) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d K_T \left(\sin \vartheta - \frac{1}{5} \sin 5 \vartheta - \frac{1}{7} \sin 7 \vartheta - \frac{1}{11} \sin 11 \vartheta + \dots \right) = \\ i(t) &= \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d K_T \left(\frac{1}{1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5 \omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7 \omega_1 t - \frac{1}{11} \sin 11 \omega_1 t + \dots \right) \end{aligned}$$

Velikost proudu n -té harmonické je:

$$I_{n \max} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} \frac{2}{n} I_d K_T$$

pro $n = (kp \pm 1)$, kde $k = 0, 1, 2, \dots$

Na obr. 6 jsou uvedeny průběhy proudů, odebíraných primárním vinutím různých kombinací usměrňovačových transformátorů.



obr. 6: Průběhy proudů různých zapojení usměrňovačových transformátorů

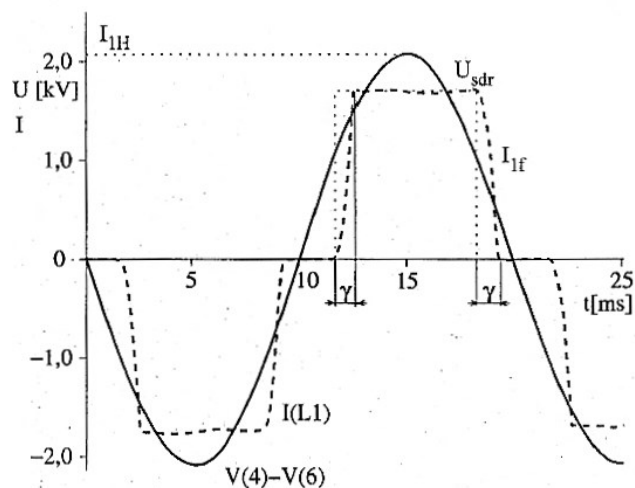
8.1.3 Analýza problematiky časového proudu

V této kapitole provedeme analýzu problematiky časového proudu ve fázi s ohledem na komutaci proudu pro transformátor v zapojení Yy s šestipulsním usměrňovačem.

Sinusový průběh první harmonické sdruženého napětí na výstupu transformátoru, jenž napájí můstkový šestipulsní usměrňovač je znázorněn na obr. 7 jako U_{sdr} . Průběh

proudu I_{1f} je zidealizovaný průběh proudu s použitím Dirichletových podmínek Ampérova zákona, tj. případ při zanedbání rozptylové reaktance transformátoru usměrňovače, kdy je možný strmý nárůst proudu po otevření příslušných diod můstku.

Reálný stav, jež reprezentuje v obr. 7 čárkovaný průběh proudu, je průběh proudu bez zanedbání úhlu překrytí.



obr. 7: Simulovaný časový průběh proudu

Úhel překrytí neboli doba komutace z hlediska reaktance transformátoru je podrobněji popsána v kapitole Vliv reaktance transformátoru.

Velikost překrytí γ je dána zatížením trakčního usměrňovače a především rozptylovou reaktancí usměrňovačového transformátoru. Pokud bychom tedy zanedbali rozptylovou reaktanci usměrňovačového transformátoru, byl by úhel překrytí roven nule a nárůst primárního by byl skokový.

Pokud budeme předpokládat poháněnou vlakovou soupravu nacházející se na elektrickém úseku, která má charakter RL obvodu, v takovém případě se především uplatňuje úhel překrytí fázových proudů trakčního usměrňovače. Vycházíme-li z předpokladu, že usměrňovačový transformátor je zatěžován symetricky, ve všech fázích stejně, tj. že polovinu úhlu překrytí určuje svým účínkem ($\cos \gamma$) velikost trakčního odběru.

Existence úhlu překrytí má dva následky. Časový průběh fázového proudu nemůže mít pravoúhlý průběh. Sinusový průběh první harmonické o frekvenci 50 Hz fázového proudu je zpožděn vůči napájecímu napětí o úhel φ , tzn. že účíník základní harmonické

trakčního usměrňovače, bude nabývat $\cos \varphi < 1$ a bude vykazovat zásadně indukční charakter.

Při rozboru prvního řešení bude zřejmé, že procentuální hodnoty jednotlivých harmonických složek spektra primárního proudu budou menší než řešení, které bychom prováděli pouze pomocí amplitudového zákona, který za zjednodušujících podmínek předpokládá obdélníkový průběh odebíraného proudu ze sítě při zanedbání rozptylové reaktance transformátoru a ztrát způsobených usměrňovačem. První řešení tedy udává nejvyšší teoreticky možné hodnoty:

$$I_n \leq \frac{100}{n} \%$$

kde

n ... je řád sledované harmonické.

Z hlediska rozboru zapojení usměrňovačového transformátoru a s přístupem prvního důsledku existence úhlu překrytí lze konstatovat, že pro teoretické řešení primárního proudu v šestipulsním usměrňovači má složky (5., 7., 11., 13., 17., 19 atd.) harmonické.

Druhý důsledek existence úhlu překrytí nám dokazuje přímou souvislost mezi úhlem φ a úhlem překrytí γ , lze vyjádřit vztahem:

$$\varphi = \frac{2}{3} \gamma$$

Tento vztah platí pro reálný časový průběh proudu během komutace. Jelikož velikost úhlu překrytí γ roste se zatěžovacím proudem usměrňovače, bude pro šestipulsní usměrňovač účinnost klesat.

Pokud budeme považovat odebíraný usměrňovaný proud za dobře vyhlazený (vlivem indukčnosti sériového reaktoru, trakčního vedení nebo vlakové soupravy metra) je možné považovat část časového průběhu proudu za vodorovný.

Vedení proudu fázovým vinutím usměrňovače rozdělujeme na dvě části, první v kladné polaritě proudu, druhé v záporné polaritě proudu rozdělených vždy po 120° elektrických. Zidealizovaný časový průběh, který je na obr. 7, nemůže mít v reálném stavu tvar obdélníka se strmým nárůstem, jelikož každý transformátor obsahuje

nenulovou hodnotu rozptylové reaktance. Pro šestipulsní usměrňovač bude úhel překrytí dán výrazem:

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2I_d X_T}{U_2 \sqrt{6}}$$

Kde

I_d ... je usměrněný proud [A]

X_T ... je rozptylová reaktance usměrňovačového transformátoru [Ω]

U_2 ... je efektivní fázová hodnota napájecího napětí [V]

Hodnota úhlu překrytí γ závisí na součinu usměrněného proudu a rozptylové reaktanci transformátoru. Pro jmenovité zatížení trakčního usměrňovače v MDT je předpokládáno, že se úhel překrytí pohybuje v okolí hodnoty $\gamma = 25$ elektrických stupňů.

Fázová sdružená napětí u_R a u_S s posuvem 120 elektrických stupňů:

$$u_R - u_S = -\sqrt{6}U_2 \sin(\omega t)$$

Kde

U_2 ... je efektivní hodnota fázového napětí

Pro okamžitou hodnotu fiktivního zkratového proudu, která bude dána sdruženým napětím přiloženým na dvě náhradní indukčnosti transformátoru L_{TT} (zapojené v sérii) bude platit diferenciální rovnice:

$$u_R - u_S - L_{TT} \frac{di_{D1}}{dt} + L_{TT} \frac{di_{D2}}{dt} = 0$$

Kde

i_{D1} ... je okamžitá hodnota proudu v diodě, ve které během komutace bude proud klesat.

i_{D2} ... je okamžitá hodnota proudu v diodě, ve které během komutace bude proud narůstat.

L_{TT} ... náhradní indukčnost transformátoru zapojená v sérii.

Za předpokladu vyhlazeného usměrněného proudu I_d trakčního usměrňovače, tj. že proud $I_d \cong \text{konstantní}$ platí vztah:

$$I_d = i_{D1} + i_{D2}$$

Po dosazení získáme:

$$\frac{di_{D1}}{dt} = -\frac{\sqrt{6}U_2 \sin(\omega t)}{2L_{TT}}$$

Po integraci vztahu dostaneme:

$$\frac{di_{D1}}{dt} = -\frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_{TT}} * \cos(\omega t) + 1K$$

Kde

$1K$... je integrační konstanta, kterou pro další vztah určíme z podmínky $\omega t = 0$, pro velikost usměrněného proudu platí že $I_d = i_{D1}$ a dostaneme

$$1K = I_d - \frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_{TT}}$$

Pro proud diody platí:

$$i_{D1} = \frac{\sqrt{6}U_2}{2\omega L_{TT}} [1 - \cos(\omega t)]$$

Pro vyšetření komutace, z okamžiku kdy začala $\omega t = 0$ a pro okamžik, kdy skončila $\omega t = \gamma$ pro $i_{D1} = 0$ za předpokladu $I_d = i_{D2}$ dostaneme pro délku proudu vztah, který odpovídá výrazu pro úhel překrytí šestipulsního usměrňovačového transformátoru:

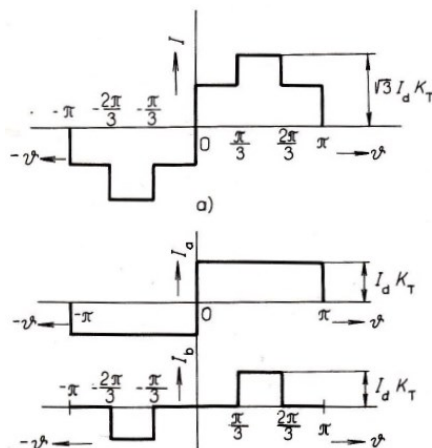
$$\cos \gamma = 1 - \frac{2\omega L_{TT}}{U_2 \sqrt{6}} I_d$$

Celkový obraz měnírenské distribuční transformovny nám ukazuje výhodné hodnoty účinníku $\cos \varphi$, jenž se pohybuje pro zátěže větší než 1 MVA nad hodnotou 0,97 a pro výkon zátěže v okolí 3 MVA v maximu 0,978, pro tuto hodnotu maxima účinníku je započítáno snížení vlivem úhlu překrytí.

Oblast výkonů pohybujících se především pod 1 MVA, tj. při poklesu hodnoty účinníku $\cos \varphi$ můžeme tento stav značit jako chod MDT prakticky naprázdno, kdy se usměrňovačové (trakční) transformátory projevují svojí magnetizační větví jako reaktory, při nezanedbání rozptylové reaktance transformátoru. Přesto však nominální hodnota neutrálního účinníku při chodu MDT naprázdno nepoklesne pod účinník 0,95. Tato hodnota je podkročena pouze v minimu situací.

8.1.4 Transformátor Dy, Yd a šestipulsní usměrňovač

V této kapitole je provedena analýza můstkového zapojení usměrňovače v zapojení s transformátorem hvězda trojúhelník.



obr. 8: Skládání síťových složek proudu bez komutace

Časový průběh proudu rozložíme na dvě funkce $I_a(v)$ a $I_b(v)$

$$I_a(\vartheta) = \begin{cases} I_d K_T \dots \vartheta \in \langle 0; \pi \rangle \\ -I_d K_T \dots \vartheta \in \langle -\pi; 0 \rangle \end{cases}$$

$$I_b(\vartheta) = \begin{cases} I_d K_T \dots \vartheta \in \langle \frac{\pi}{6}; -\frac{2}{3}\pi \rangle \\ 0 \dots \vartheta \in \langle -\pi; -\frac{2}{3}\pi \rangle \langle -\frac{\pi}{3}; \frac{\pi}{3} \rangle \langle \frac{2}{3}\pi; \pi \rangle \\ -I_d K_T \dots \vartheta \in \langle -\frac{2}{3}\pi; \frac{\pi}{3} \rangle \end{cases}$$

z kterého vypočteme Fourierovy koeficienty $B_n = B_{an} + B_{bn}$

$$B_n = B_{an} + B_{bn} = \frac{4}{\pi n} I_d K_T \left[1 + 0,5 \left(\cos n \frac{\pi}{3} - \cos n \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

B_n nabývá hodnot

$$B_n = \begin{cases} \frac{6}{\pi} \frac{1}{n} I_d K_T & \text{pro } n = 1, 5, 7, \dots \\ 0 & \text{pro } n = 3, 9, 15, \dots \end{cases}$$

Rozvoj proudu podle Fourierovy transformace má tvar:

$$I(\vartheta) = \frac{6}{\pi} I_d K_T \left(\sin \vartheta - \frac{1}{5} \sin 5 \vartheta - \frac{1}{7} \sin 7 \vartheta - \frac{1}{11} \sin 11 \vartheta + \dots \right) =$$

$$i(t) = \frac{6}{\pi} I_d K_T \left(\frac{1}{1} \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5 \omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7 \omega_1 t - \frac{1}{11} \sin 11 \omega_1 t + \dots \right)$$

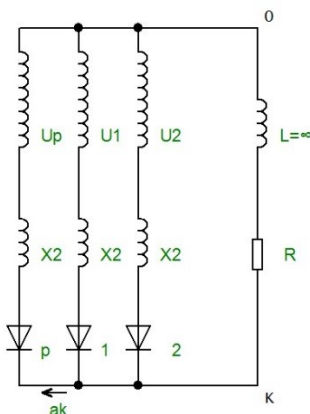
Velikost amplitudy síťového proudu n -té harmonické platí:

$$I_{n \max} = \frac{6}{\pi} \frac{1}{n} I_d K_T$$

$$\text{pro } n = (kp \pm 1), \text{ kde } k = 0, 1, 2, \dots$$

8.1.5 Vliv reaktance transformátoru

V praxi se vlivem reaktance transformátoru mění tvar proudu ve vinutí, tudíž i průběh a doba usměrněného napětí. Pro první zkoumání budeme předpokládat, že celá rozptylová reaktance je soustředěna ve výstupním vinutí pro případ p -fázového usměrňovače. V době, kdy příslušné výstupní napětí má z ostatních nejvyšší hodnotu, tak bude vést příslušná dioda. Pokud bude reaktance ve vinutí transformátoru zanedbatelná, klesne v průsečíku dvou vstupních napětí jeden z ventilových proudů na nulu a druhý nabyde své maximální hodnoty. Výměna proudů tak bude probíhat náhle a odehraje se v současném okamžiku.



obr. 9: Náhradní schéma více-fázového usměrňovače s výstupní reaktancí transformátoru

V skutečném případě bude mít výstupní vinutí transformátoru reaktanci X_2 , a proto není náhlá výměna proudů možná, jelikož indukčnost vinutí okamžitou výměnu nepřipustí. Ventilové proudy se tedy ve skutečnosti nebudou vyměňovat náhle, ale po tzv. dobu komutace, bude proud v uhasínajícím ventilu klesat a ve ventilu následujícím současně stoupat. Pak tedy po dobu komutace budou oba komutující ventily současně otevřeny.

Komutace ustane za dobu, nazývanou úhel překrytí, za níž proud jedním ventilem klesne k nule a proud druhého ventilu dosáhne velikosti usměrněného stejnosměrného proudu. Celková doba ventilových proudů se tedy proti celkové době bez reaktance prodlouží a těžiště ventilových proudů se posune poněkud doprava.

Komutující fáze výstupního vinutí jsou v době komutace přes reaktanci spojena do krátka, což má za následek vyrovnávací proud a_k , který tímto obvodem protéká. Velikost vyrovnávacího zkratového proudu a_k je tedy dána podílem dvojnásobku rozptylové výstupní reaktance $2X_2$. To má za následek, to že pokud bude rozptylová reaktance velká, bude vyrovnávací proud malý a komutace bude trvat déle.

V kapitole, Analýza problematiky časového proudu jsme řešili velikost překrytí γ , která je dána zatížením trakčního usměrňovače. Zvýší-li se tedy stejnosměrné zatížení usměrňovače I_d , bude pokles proudu ventilem k nule trvat déle než při malém zatížení a doba komutace (úhel překrytí) bude velmi krátká. Doba komutace (úhel překrytí) poroste s velikostí výstupní reaktance transformátoru a také se zatížením.

8.1.6 Vlaková souprava vozů metra

Kolejové vlakové soupravy prvního typu, napájené z měnírenské distribuční transformovny, byly vůči elektrizační soustavě metra považovány za neutrální, tento jev platil především pro klasické schéma trakčního obvodu hnací soupravy s odporovou regulací. První typ, nyní označován jako typ „R“ - po rekonstrukci je charakterizován použitím rozjezdových rezistorů a sériových trakčních motorů s jejich skupinovým řazením během rozjezdu. Při podrobné analýze této vlakové soupravy bylo zjištěno, že se vůči trakční napájecí soustavě chovají hnací vozidla jako R – L obvod, přičemž složka R představuje trakční odběr vlakové soupravy z napětí 825 V, složka L se uplatní ve výstupním napětí s ohledem na střídavou superpozici.

Moderní soupravy metra, napájené stejnosměrným rozváděčem RU 825 V, využívají v trakčním obvodu pulsní měnič. Technologie hnacích vlakových souprav je řešena pomocí střídavé trakční výzbroje, jež je osazena součástkami IGBT s trakčním asynchronním motorem s výkonem $P = 4 \times 141 \text{ kW}$ na jeden vůz soupravy. Pracovní frekvenci jejich pulsních měničů je nutné zvolit tak, aby bylo eliminováno nebezpečí rušení kolejových obvodů zabezpečovacího zařízení. Používá se proto skupina přepínatelných kmitočtů (30 Hz, 100 Hz a 250 Hz) přičemž pulsní měniče pracují v protifázi, tudíž ve zpětném proudu vedení (v MDT rozváděč RUZ 825) se objevují pouze složky 60 Hz, 200 Hz a 500 Hz, což neovlivní elektrický úsek kolejového obvodu.

Vlakové soupravy pro systém metra s pulzními měniči nemusí obsahovat sériovou tlumivku, jelikož zabezpečovací systém není citlivý na frekvenci 50 Hz, která by mohla být generována MDT pro daný napájecí úsek. Pro snížení indukční reaktance napájecí soustavy je na vstupu soupravy metra paralelně připojen výkonový kondenzátor, který zajišťuje spolehlivou funkci pulsního měniče vozidla. Měření také prokázalo, že frekvence pulsního měniče se v proudu elektrického úseku neobjevuje v měřitelné úrovni hlavně především díky vstupnímu výkonovému kondenzátoru. Při podrobné analýze elektrického úseku bylo zjištěno, že vzrostly harmonické složky proudu produkované trakčním usměrňovačem v MDT. Tyto složky jsou však zkratované vstupním výkonovým kondenzátorem soupravy, jelikož jeho impedance je nepřímo úměrná kmitočtu.

Měřírenské distribuční transformovny, napájecí stanice stejnosměrného trakčního vedení používají doposud jen šestipulsní zapojení trakčního usměrňovače. Toto zapojení má ve svém výstupním napětí frekvenční složky, které jsou generovány trakčním usměrňovačem jakožto napěťovým zdrojem do trakčního obvodu. Avšak frekvenční složky jsou prakticky zkratované vstupním výkonovým kondenzátorem vlakové soupravy, jelikož jeho impedance je nepřímo úměrná kmitočtu.

8.2 Negativní vlivy napájecí stanice MDT na trakční vedení

Pokud budeme analyzovat výstupní napětí trakčního usměrňovače z hlediska trakčního vedení, získáme tyto složky:

- a) Složka stejnosměrná – trakční napětí ss 825 V.

Stejnoseměrná složka je definovaná střední hodnotou zvlněného vstupního napětí usměrňovače.

b) Složka střídavé superpozice

Efektivní hodnoty složek střídavé superpozice výstupního napětí rostou s úhlem překrytí a jsou stanovené pro jmenovité zatížení šestipulsního zapojení v procentech napětí naprázdno.

Pro tyto složky se trakční napájecí stanice MDT jeví jako zdroj napětí, takže hodnoty složek proudu těchto frekvencí jsou závislé na impedanci vnějšího trakčního obvodu.

9. Zhodnocení zpětných negativních vlivů MDT

9.1 Měření vyšších harmonických v DT

Cílem měření bylo zjištění napěťových a proudových poměrů v rozvodně nízkého napětí stanice a to zejména vzhledem k výskytu vyšších harmonických. Měření bylo provedeno mimo běžný provoz (za napěťové výluky) za účelem manipulace s jednotlivými vývody rozvodny. Jedná se zejména o vývody hlavního větrání, eskalátorů a provozních čerpadel. Vzhledem k tomu, že je rozvodna rozdělena z hlediska odběru na dvě identické sekce A a B. Měření bylo provedeno v noční výluce ze dne 22. 2. 2016 na 23. 2. 2016. Celé měření bylo prováděno bez připojení kompenzace RCA, aby se vyloučil vznik rezonančních jevů.

Označení vývodů v DT je označeno takto:

1. Vývody pro vzduchotechniku RM 52 – RM 54
2. Vývody pro eskalátory RM 80 – RM 84
3. Vývody pro provozní čerpadla RM 40 – RM 70

Tabulky naměřených hodnot, harmonickou analýzu napětí a proudů pro jednotlivé vývody jsou zaznamenány aparaturou FRAKO EMA, EMZ v přílohách č. 1-9.

V průběhu měření jednotlivých vývodů do přidružených technologií úseků nebyly shledány žádné anomální hodnoty napětí nebo proudu. Výsledky provedené harmonické analýzy jak napětí, tak proudu potvrzují charakter daných spotřebičů v jednotlivých vývodech motorické zátěže. Překročení mezních hodnot harmonických nedošlo ani při přechodných jevech (rozběhy asynchronních motorů). Na závěr měření bylo provedeno zapnutí obou kompenzačních jednotek, přičemž měření potvrdilo snížení jalového výkonu přenášeného z transformátoru a tedy i snížení celkového zdánlivého

výkonu distribučního transformátoru. Časový průběh monitorovaných veličin z rozváděče RCA (s připojením kompenzace 3 a 4 stupně) je zaznamenán v přílohách č. 19-21.

Po odhalení náhodných poruch (harmonických v síti) bylo nadále provedeno dlouhodobé měření přímo na hlavním vývodu z distribučního transformátoru. Na záznamovou aparaturu byly napojeny oba regulátory kompenzačních stanic. Stav kdy se začaly objevovat zvýšené hodnoty páté, sedmé a jedenácté harmonické byl zaznamenán od 27.2.2016 22:38. Tyto hodnoty se s různou amplitudou objevují až do 4. 3. 2016. Po obdržení hlášení z dispečinku lze s určitostí usoudit, že výskyt vyšších harmonických v rozvodné síti stanice MDT souvisí s odstavením VN trafostanice Rozvodna PRE Praha Střed a následnému připojení na rozvodnu Pražáčka a také Běchovice. Časy jednotlivých manipulací s těmito rozvodnami Pražské energetiky přesně odpovídají s časy naměřenými aparaturou FRAKO EM 9001-5. Viz příloha č. 22.

Závěrečné shrnutí měření:

1. Jednotlivé technologické úseky napájené z hlavní rozvodny v distribuční transformovně, nejsou zdrojem vyšších harmonických.
2. Vyšší harmonické se do rozvodu dostávají z následujících příčin:
 - a. Z nadřazené VN sítě
 - b. Elektromagnetickou indukcí na souběžných vedeních
 - c. Uzemňovací soustavou
3. Doporučeno zatlumení kompenzačních rozváděčů
 - a. Především náhrada stávajících kompenzací nehrazených za hrazené použitím kompenzační jednotky jiného typu (FRAKO – hrazená kompenzace), jenž má uvnitř implementovanou vnitřní indukčnost (tlumivku) v každém výkonovém stupni.
 - b. Dozbrojení stávajících kompenzací tlumícími členy $p=7\%$ pro frekvenci 189 Hz a kompenzačními stykači pro hrazené kompenzace. Vlastní provedení je nutné vzhledem k rozměrům a umístění použitých skříní řešit individuálně pro jednotlivé stanice.
4. Postupně proměřit celý rozvod od zdroje až ke spotřebiči, vyselektovat největší zdroje rušení a instalovat potřebné aktivní filtry vyšších harmonických.

10. Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření analýzy vyšších harmonických z hlediska trakční části, zpětných vlivů vlakové soupravy na napájecí stanice a distribuční části, které napájí motorové a světelné zařízení.

V jednotlivých kapitolách jsem charakterizoval zdroje vyšších harmonických v měničenských a distribučních transformovných, analyzoval negativní zpětné vlivy MDT na veřejný distribuční rozvod. V kapitole Zhodnocení zpětných negativních vlivů MDT jsem analyzoval výsledky měření zkreslení sítě v místě připojení MDT k distribuční soustavě, harmonického zkreslení MDT a měření vyšších harmonických v distribuční transformovně.

Stejnoseměrný trakční obvod se vzhledem k elektrickému úseku chová jako generátor napěťových harmonických. Zdrojem těchto frekvenčních napěťových složek je zapojení šestipulsního trakčního usměrňovače, avšak tyto složky jsou zkratované vstupním výkonovým kondenzátorem vlakové soupravy. Z hlediska Elektromagnetické kompatibility bylo také měřením na trakčním vedení elektrického úseku prokázáno, že vlakové soupravy neemitují do trakčního obvodu žádné rušivé vlivy. Negativní vliv stejnosměrného trakčního obvodu byl prokázán měřením vůči napájecí straně, kde se trakční diodový usměrňovač chová jako generátor proudových harmonických.

Z měření napěťových a proudových poměrů v rozvodně nízkého napětí stanice vyplývá, že jednotlivé technologické úseky, napájené z hlavní rozvodny v distribuční transformovně, nejsou zdrojem vyšších harmonických. Avšak z mnohačetného výskytu poruch v rozváděči kompenzace NN byla doporučena výměna stávajících nehrazených kompenzačních rozváděčů za hrazené s použitím kompenzační jednotky, která má uvnitř implementovanou vnitřní indukčnost v každém výkonovém stupni.

11. Seznam literatury

- [1] J. Schlabbach, D. Blume: *Voltage Quality in Electrical Power Systems*, VDE-Verlag, 2001
- [2] Tlustý J.: *Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích*, ČVUT, 1999
- [3] Hingorani, N., Gyugyi, L.: *Understanding FACTS*, IEEE Press, New York, 2000
- [4] *Elektrická trakční zařízení pražského metra*. Sborník, ČSVTS DaS, Praha, 1991.
- [5] *Ústřední ovládání energetických zařízení v dopravě*. Sborník, ČSVTS DT Ostrava, 1980.
- [5] *Pravidla technického provozu metra*. Praha: DP hl.m , 1973
- [7] ing. HAJŽMAN, Josef. *Provozní příručka pro pracovníky metra*. Praha: DP hl.m. Prahy, 1987
- [8] Voženílek Petr, Novotný Vladimír, Mindl Pavel, *Elektromechanické měniče*, Česká republika – nakladatelství ČVUT 2011, ISBN 978-80-01-04875-7
- [9] HLAVA, K. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. 1. vyd. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
- [11] KLOSS, A. *Polovodičové usměrňovače pro dráhové měřírny*. Praha: ČKD, 1968. 56 s.
- [12] KŮS, V. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2005, 182 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [13] Chapman, D. *Kvalita elektrické energie- průvodce, Harmonické- Příčiny a účinky*, [online].
- [14] MAČÁT, J., VACULÍKOVÁ, P., ZÁVIŠKA, O. *Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 292 s.
- [15] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2002, 184 s. ISBN 80-7300-062-8.
- [16] PNE 33 3430-0: *Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav*.

- [17] Rypar, *Provoz měnírenských a distribučních transformoven pro stanice metra*.
Bakalářská práce, 2014.

12. Seznam příloh

1. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 40.
2. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 52.
3. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 70.
4. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 53.
5. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 80.
6. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 81.
7. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 54.
8. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 83.
9. Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 84.
10. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM40 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
11. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM52 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
12. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM70 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
13. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM53 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
14. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM80 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
15. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM81 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
16. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM54 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
17. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM83 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
18. Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM84 dle měřicí aparatury FRAKO EMA, EMZ.
19. Časový průběh měření vyšších harmonických proudů IL_1 z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.
20. Časový průběh měření vyšších harmonických proudů IL_2 z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.

21. Časový průběh měření vyšších harmonických proudů IL_3 z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.
22. Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru z 28.2.2016 – 4.3.2016.

Příloha 1.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 40.

RM 40															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	232,3	0,7	1,4	0,6	0,1	0,1	255	0,7	2,9	0,5	0,3	0	146	101
	2	232,4	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	257	0,7	3	0,5	0,3	0	148	101
	3	232,3	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	256	0,6	3	0,4	0,3	0,1	147	101
	4	232,3	0,7	1,4	0,6	0,1	0,1	259	0,8	3	0,4	0,3	0	149	102
	5	232,3	0,7	1,4	0,6	0,1	0,1	257	0,7	3	0,4	0,3	0	147	102
	6	232,4	0,7	1,4	0,6	0,1	0,1	255	0,8	2,9	0,4	0,3	0	146	101
	7	232,4	0,8	1,5	0,6	0,1	0,1	255	0,8	2,9	0,5	0,3	0	146	102
L2	1	231,1	0,7	1,9	0,5	0,1	0,1	265	2,1	2,4	0,5	0,3	0,1	150	106
	2	231,2	0,6	1,9	0,5	0,1	0,1	266	2,2	2,4	0,6	0,3	0,1	151	106
	3	231,1	0,6	1,8	0,6	0,1	0,1	265	2,2	2,4	0,4	0,3	0,1	150	106
L3	1	231,9	1,2	1,7	0,6	0,1	0,1	258	1,8	2,4	0,5	0,2	0	144	108
	2	231,9	1,2	1,7	0,6	0,1	0,1	259	1,7	2,5	0,5	0,2	0	145	108
	3	232,0	1,2	1,7	0,6	0,1	0,1	259	1,7	2,5	0,5	0,3	0	145	108

Příloha 2.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 52.

RM 52															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	235,2	1	1,5	0,7	0,2	0,1	34	1	2,3	0,6	0,3	0,2	23	5
	2	235,3	0,6	1,4	0,7	0,1	0,1	33	1,3	2,2	0,6	0,3	0,2	23	5
	3	234,6	0,9	1,6	0,6	0,1	0,1	33	1,1	2,3	0,5	0,3	0,2	23	5
	4	235,3	1	1,5	0,7	0,2	0,1	33	0,9	2,2	0,6	0,3	0,1	23	5
L2	1	233,6	0,6	2	0,6	0,2	0,1	30	1,5	1,8	0,7	0,1	0,2	20	5
	2	233,8	0,5	1,9	0,5	0,1	0,1	30	1,8	1,6	0,6	0,2	0,1	20	6
	3	234,3	0,7	2	0,5	0,2	0,1	30	1,4	1,9	0,8	0,1	0,2	21	5
L3	1	234,7	1,2	2	0,6	0,1	0,1	30	1,5	2,1	0,5	0,3	0	20	6
	2	233,9	1,2	2,5	0,6	0,3	0,1	30	2,4	2,3	0,8	0,1	0,3	20	6
	3	235,2	1,2	1,4	0,4	0,1	0,1	30	2	1,9	0,6	0,2	0,2	20	6

Příloha 3.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 70.

RM 70															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	233,7	0,7	1,5	0,6	0,1	0,1	154	1,5	4	0,8	0,2	0,1	95	51
	2	233,8	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	140	1,6	4,4	0,9	0,2	0,1	85	49
	3	233,8	0,8	1,5	0,6	0,1	0,1	137	1,4	4,4	0,9	0,2	0,1	83	49
	4	233,8	0,7	1,5	0,6	0,1	0,1	136	1,5	4,2	0,8	0,2	0,1	83	47
L2	1	232,7	0,6	2	0,5	0,2	0,1	138	3,8	3,1	0,9	0	0,1	82	51
	2	232,7	0,6	2	0,5	0,2	0,1	139	3,8	3,1	0,9	0,2	0,1	82	51
L3	1	233,4	1,3	1,8	0,5	0,1	0,1	129	2,4	3,9	1,1	0,3	0,1	75	50
	2	233,5	1,3	1,8	0,5	0,1	0,1	131	2,3	3,9	1	0,2	0,1	77	50
	3	233,6	1,3	1,8	0,5	0,1	0	129	2,2	3,8	1,1	0,3	0,2	75	50

Příloha 4.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 53.

RM 53															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	234,9	0,7	1,5	0,5	0,1	0,1	29	1,4	4,5	0,5	0,5	0,2	10	18
	2	235,3	0,6	1,5	0,6	0,1	0,1	29	1,2	4,8	0,4	0,3	0,2	10	18
	3	235,3	0,8	1,6	0,5	0,1	0,1	29	1,5	4,8	0,4	0,3	0,2	9	18
	4	235,2	0,6	1,5	0,7	0,1	0	29	1,1	4,8	0,4	0,2	0,2	10	18
	5	234,7	0,8	1,6	0,6	0,1	0,1	29	1,3	4,6	0,4	0,3	0,2	9	18
L2	1	233,6	0,6	2,1	0,5	0,2	0,1	28	3,6	4,1	0,5	0,5	0,2	9	18
	2	233,5	0,6	2	0,5	0,2	0,1	28	3,4	4,1	0,6	0,3	0,2	9	18
L3	1	234,5	1,2	1,9	0,5	0,2	0,1	30	1,9	3,9	0,4	0,3	0	9	19
	2	235,0	1,3	2	0,4	0,2	0	30	2,3	4,1	0,3	0,3	0,2	9	19
	3	234,4	1,4	2	0,5	0,1	0	30	2	4,2	0,4	0,2	0,4	9	19

Příloha 5.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 80.

RM 80															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	231,6	0,6	1,3	0,5	0,1	0,1	183	1,9	5,2	1,1	0	0,2	39	121
	2	233,2	0,7	1,3	0,5	0,1	0,1	183	1,6	5,3	0,6	0,2	0,1	42	120
	3	233,7	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	94	2,2	5,6	0,8	0,9	0,2	24	62
	4	233,7	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	535	1,2	2,5	0,4	0,1	0,1	280	240
	5	232,7	0,8	1,3	0,5	0,1	0,1	185	1,8	5,2	0,8	0,2	0,1	40	123
	6	229,4	0,8	1,2	0,5	0,1	0,1	374	1,5	4,6	0,6	0,2	0,1	163	202
	7	231,3	0,7	1,3	0,5	0,1	0,1	278	1,6	4,8	0,6	0,2	0,1	59	184
	8	231,4	0,7	1,2	0,5	0,1	0,1	280	1,6	4,7	0,8	0,3	0,1	61	185
L2	1	230,3	0,7	1,6	0,5	0,1	0	302	3,8	3,6	0,5	0,1	0,1	59	200
	2	230,3	0,7	1,6	0,5	0,2	0,1	301	3,7	3,6	0,7	0,2	0	57	200
	3	230,3	0,7	1,6	0,5	0,1	0	300	3,5	3,4	0,8	0,2	0,1	57	199
	4	230,4	0,7	1,6	0,5	0,1	0	301	3,5	3,5	0,4	0,2	0,1	58	200
	5	230,4	0,6	1,6	0,5	0,1	0,1	299	3,4	3,4	0,8	0,1	0,1	56	199
L3	1	231,0	1,2	1,5	0,5	0,1	0	283	2,5	3,7	0,7	0,1	0,1	45	191
	2	231,1	1,2	1,5	0,5	0,1	0	282	2,4	3,6	0,7	0,2	0,1	44	191
	3	231,2	1,2	1,5	0,5	0,1	0	285	2,4	3,8	0,6	0,1	0,1	46	192

Příloha 6.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 81.

RM 81															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L1	1	234,3	0,8	1,5	0,6	0,1	0,1	34	3,1	6,4	1,1	0,3	0,2	9	22
	2	234,2	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	33	3,1	6,4	1,3	0,2	0,1	10	21
	3	234,1	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	33	2,9	6,2	1	0,2	0	9	21
L2	1	232,8	0,6	1,4	0,5	0,2	0,1	54	5	4,2	1	0,2	0,1	13	35
	2	232,7	6	1,9	0,5	0,1	0,1	54	5	4,1	1	0,3	0	14	35
L3	1	233,4	1,2	1,8	0,5	0,1	0,1	52	3,1	4,8	1	0,2	0	11	35
	2	233,5	1,2	1,7	0,5	0,1	0,1	52	3,1	5	1	0,2	0,1	12	34
	3	233,5	1,2	1,8	0,5	0,1	0	52	3,3	4,9	1,1	0,2	0,1	11	35

Příloha 7.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 54.

RM 54															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L ₁	1	234,8	0,9	1,4	0,5	0,1	0,1	20	0	0	0	0	0	9	11
	2	234,8	0,8	1,5	0,5	0,1	0,1	20	0	0	0	0	0	9	11
	3	234,8	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	20	0	0	0	0	0	9	11
	4	234,7	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	20	0	0	0	0	0	9	11
L ₂	1	233,6	0,7	2	0,5	0,2	0,1	17	0	0	0	0	0	7	9
	2	233,5	0,7	1,9	0,5	0,2	0,1	17	0	0	0	0	0	7	9
L ₃	1	234,5	1,3	1,8	0,6	0,1	0,1	24	0,9	2,3	0,1	0,3	0,3	14	10
	2	234,8	1,2	1,3	0,7	0	0,2	19	0	0	0	0	0	8	10
	3	234,3	1,3	1,9	0,6	0,1	0,1	19	0	0	0	0	0	8	10
	4	234,3	1,3	1,8	0,5	0,1	0	19	0	0	0	0	0	8	10

Příloha 8.

Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 83.

RM 83															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L ₁	1	233,83	0,7	1,4	0,5	0,1	0,1	82	0,9	4,3	1,4	0,8	0,9	16	55
	2	232,44	0,7	1,4	0,5	0,1	0,1	214	1,4	4,3	0,6	0,3	0,1	102	109
	3	233,02	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	146	1,9	4,1	0,6	0,2	0,2	31	97
	4	232,96	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	339	1,1	2,7	0,8	0,1	0,1	156	176
	5	232,04	0,7	1,3	0,5	0,1	0,1	219	1,6	3,4	0,7	0,2	0,2	48	145
L ₂	1	230,94	0,7	1,7	0,5	0,1	0,1	226	2,9	3,1	0,4	0,2	0,2	36	152
	2	230,94	0,6	1,8	0,6	0,1	0,1	227	3	2,7	1,1	0,1	0,1	35	153
	3	230,88	0,6	1,7	0,5	0,1	0	226	3,2	2,8	0,4	0,1	0,1	37	152
	4	230,82	0,6	1,8	0,5	0,1	0,1	226	3,4	2,5	1,1	0,1	0,1	38	152
L ₃	1	231,75	1,2	1,7	0,5	0,1	0,1	217	1,9	3,5	1	0,1	0,1	27	148
	2	231,69	1,2	1,6	0,5	0,1	0,1	218	1,7	3,2	0,3	0,4	0,2	26	149
	3	231,86	1,2	1,7	0,5	0,1	0	217	2,3	3,2	1,2	0,1	0,1	28	148

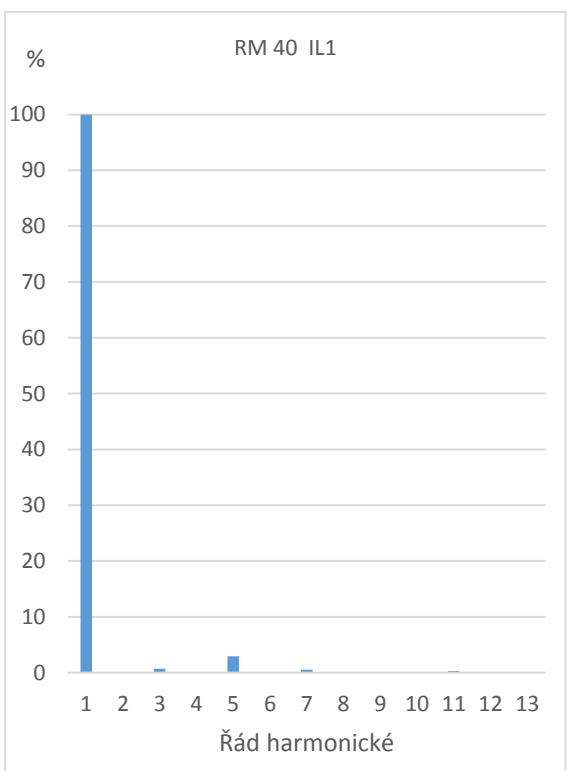
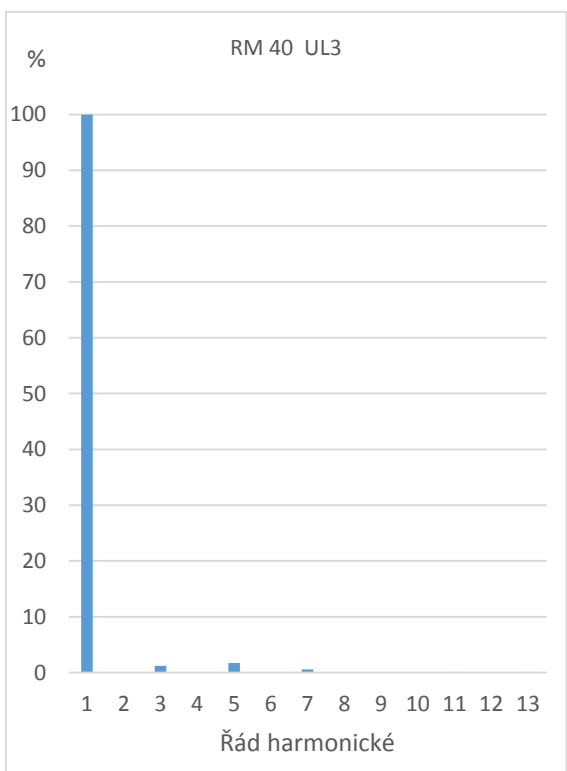
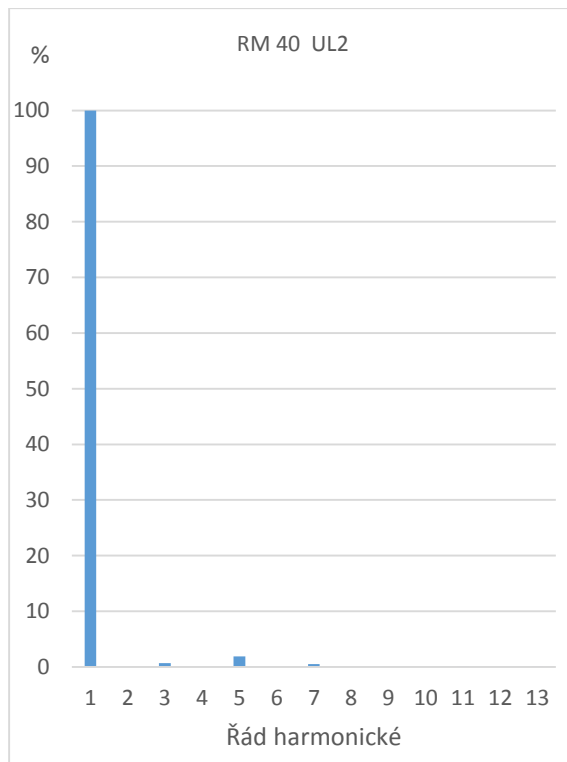
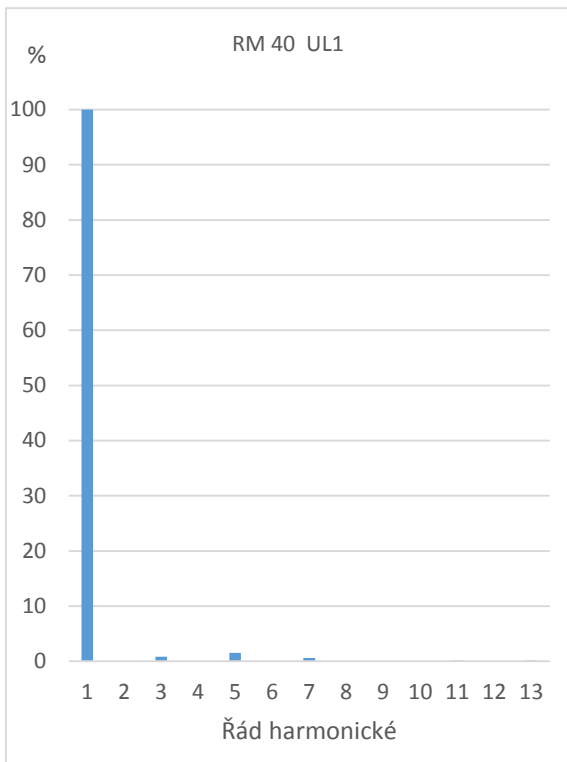
Příloha 9.

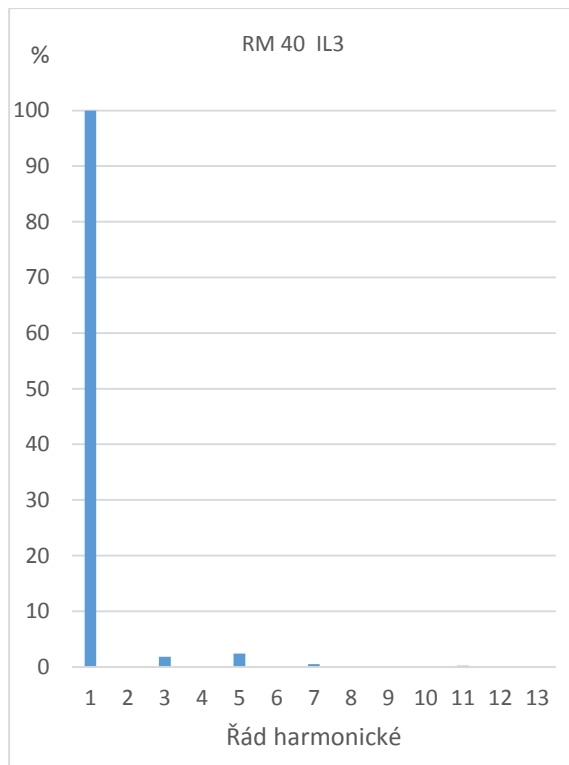
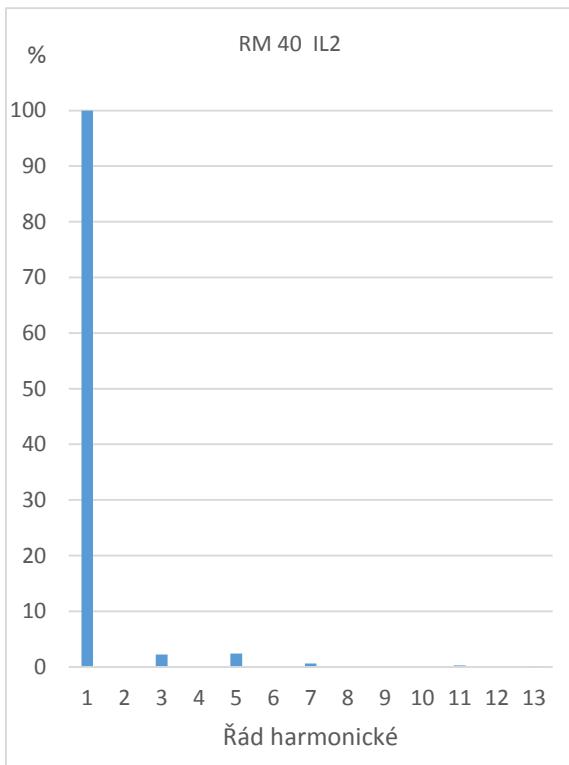
Tabulka naměřených hodnot vývodu RM 84.

RM 84															
Fáze	č.měření	U [V]	U ₃ [%]	U ₅ [%]	U ₇ [%]	U ₁₁ [%]	U ₁₃ [%]	I [A]	I ₃ [%]	I ₅ [%]	I ₇ [%]	I ₁₁ [%]	I ₁₃ [%]	P [kW]	Q [kVAr]
L ₁	1	234,3	0,8	1,5	0,5	0,1	0,1	45	2,1	5,2	1,3	0,2	0	13	29
	2	234,0	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	45	1,9	5,3	1,3	0,3	0,1	13	29
	3	234,1	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	45	2	5,3	1,2	0,3	0,1	13	29
	4	234,2	0,8	1,4	0,5	0,1	0,1	45	2	5,2	1,3	0,3	0,1	13	29
	5	234,2	0,8	1,4	0,6	0,1	0,1	45	2,1	5,3	1,3	0,3	0,1	12	29
L ₂	1	233,0	0,6	1,8	0,5	0,2	0,1	48	4	3,6	1,2	0,3	0,1	13	31
	2	232,9	0,6	1,9	0,5	0,2	0,1	48	4	3,8	1,2	0,3	0,1	14	31
	3	233,0	0,6	1,8	0,5	0,2	0,1	48	4,1	3,8	1,2	0,2	0,1	14	30
L ₃	1	233,8	1,3	1,8	0,5	0,1	0,1	47	3,1	4,4	1,3	0,3	0,1	11	31
	2	233,8	1,3	1,8	0,5	0,1	0,1	47	3	4,5	1,3	0,3	0,1	12	31
	3	233,7	1,2	1,7	0,5	0,1	0,1	47	3	4,3	1,2	0,2	0,1	11	31

Příloha 10.

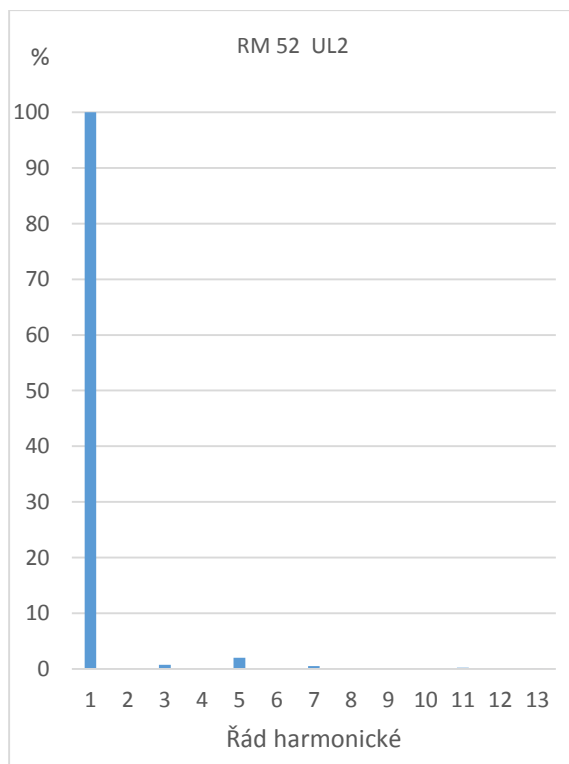
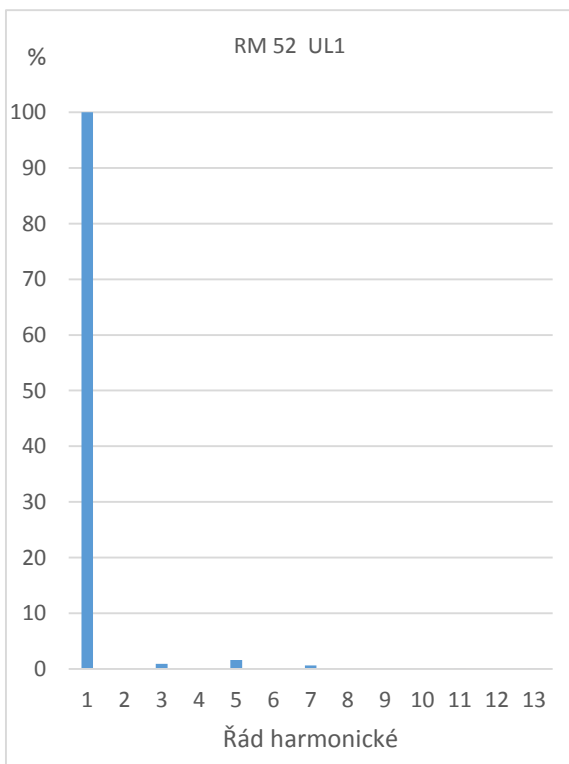
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM40 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

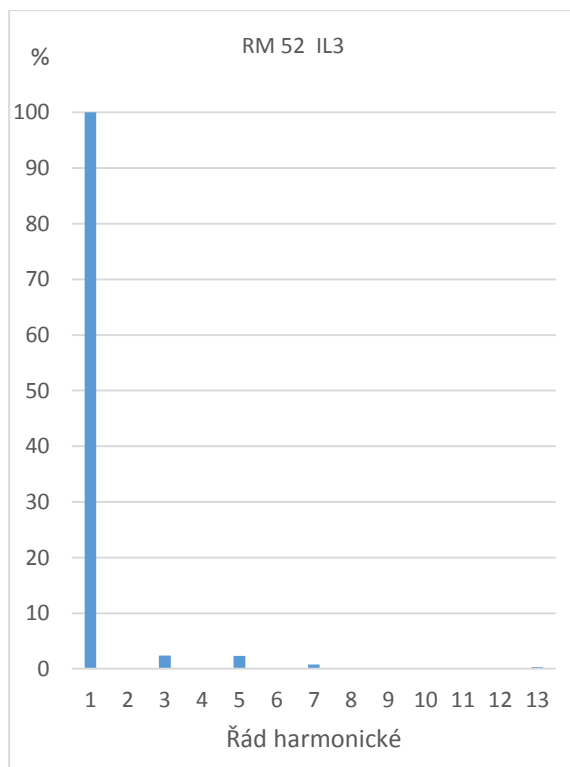
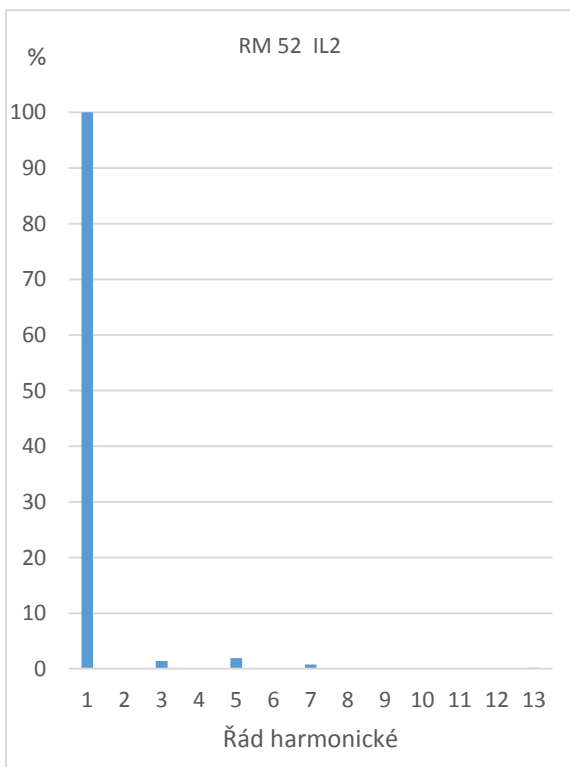
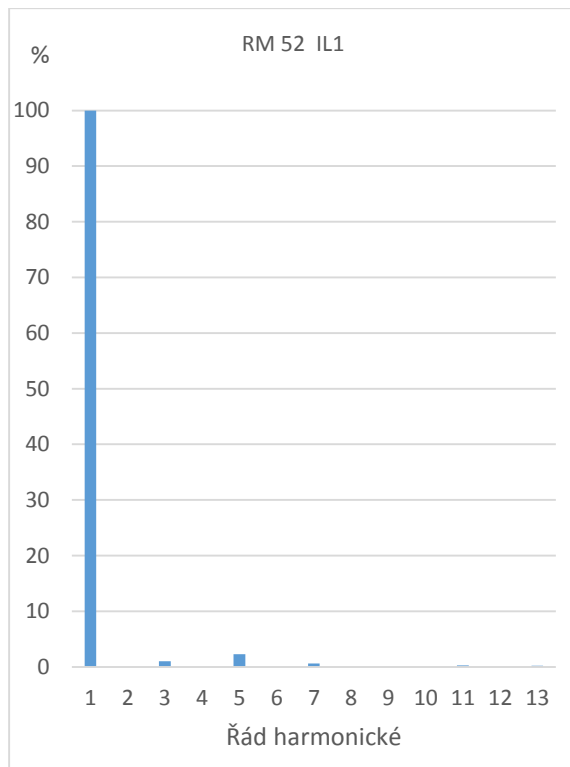
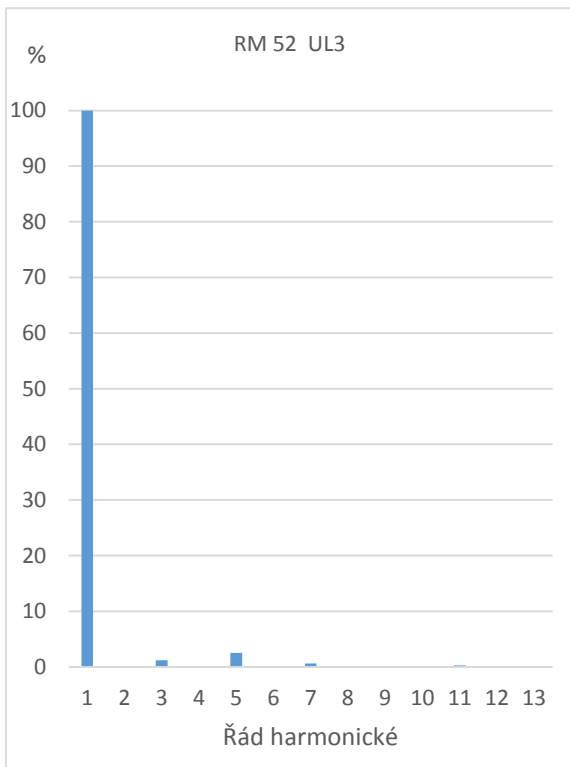




Příloha 11.

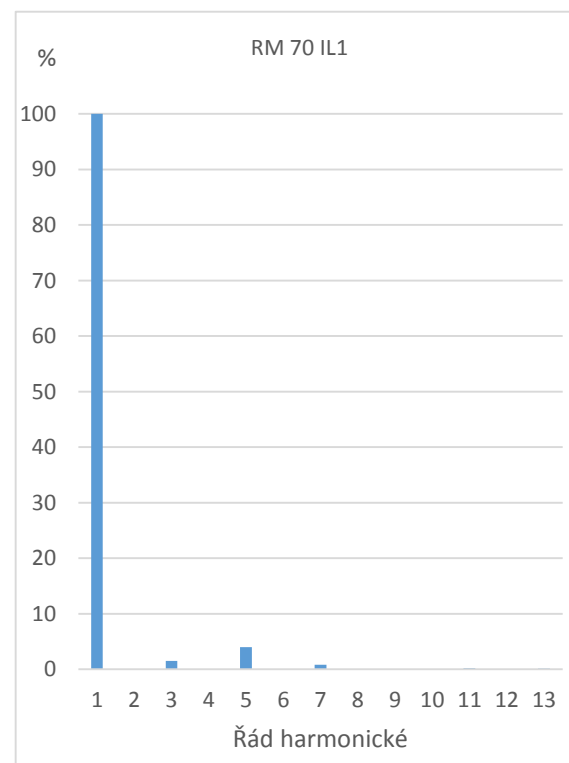
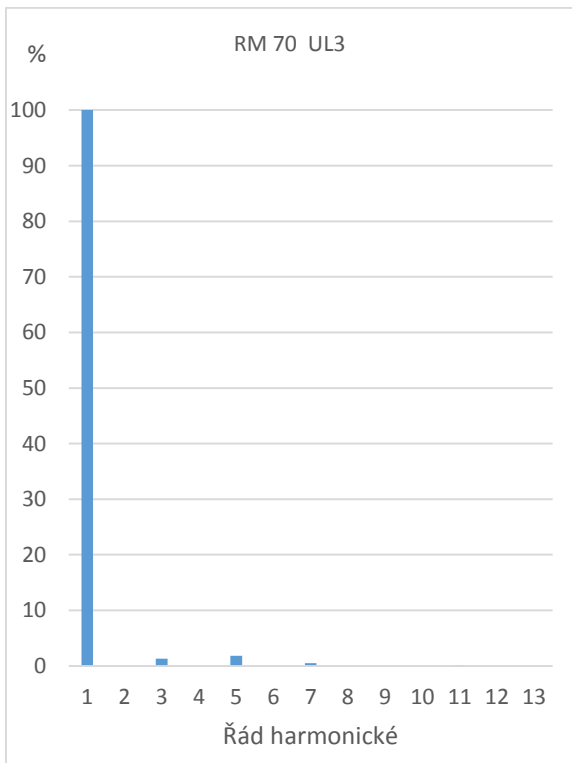
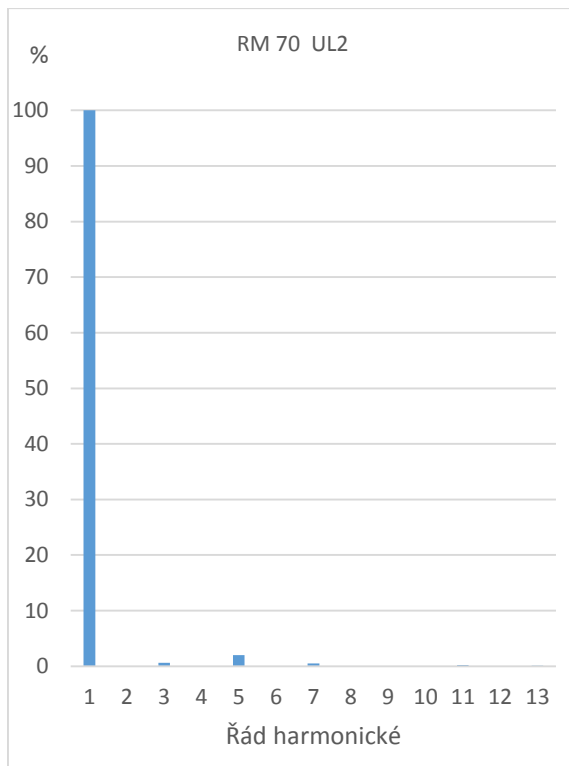
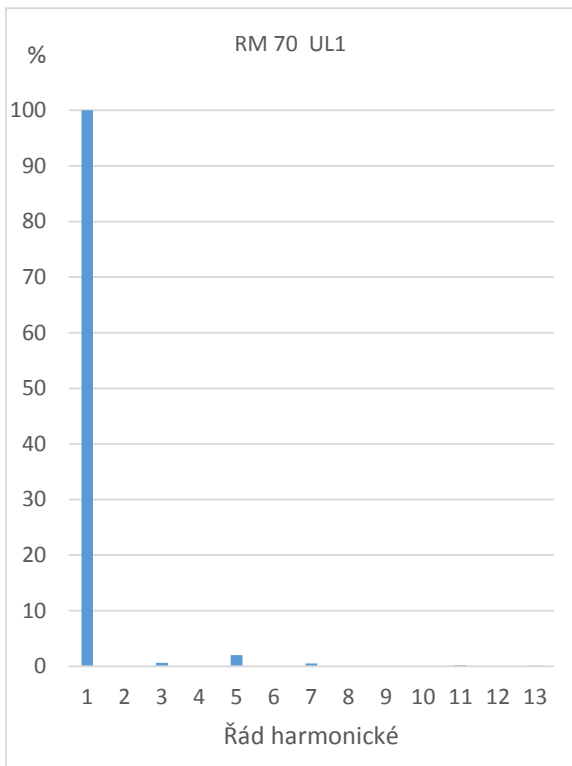
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM52 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

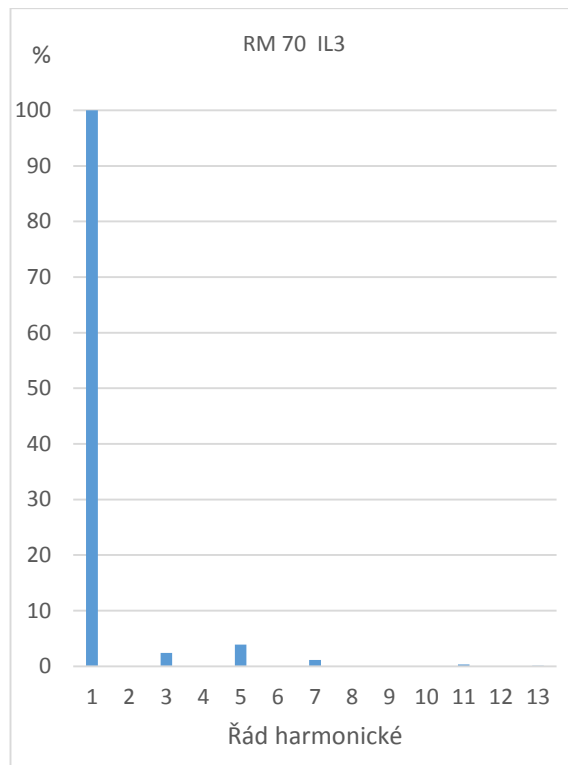
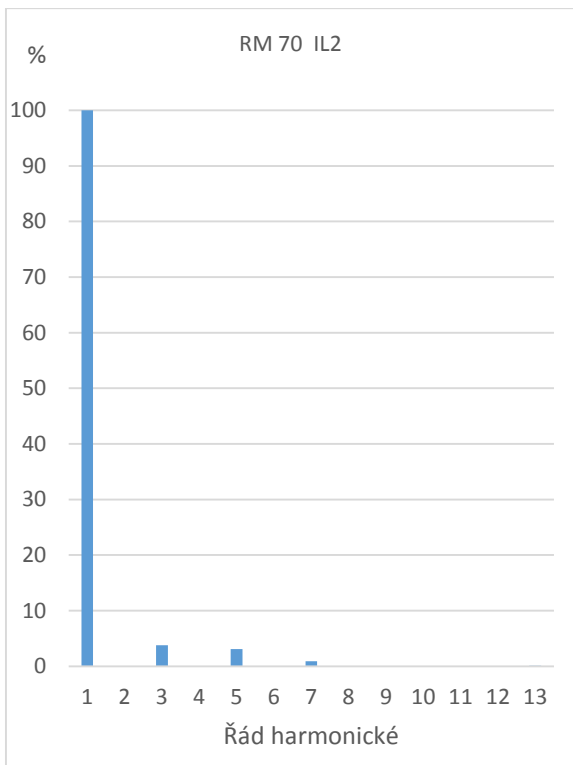




Příloha 12.

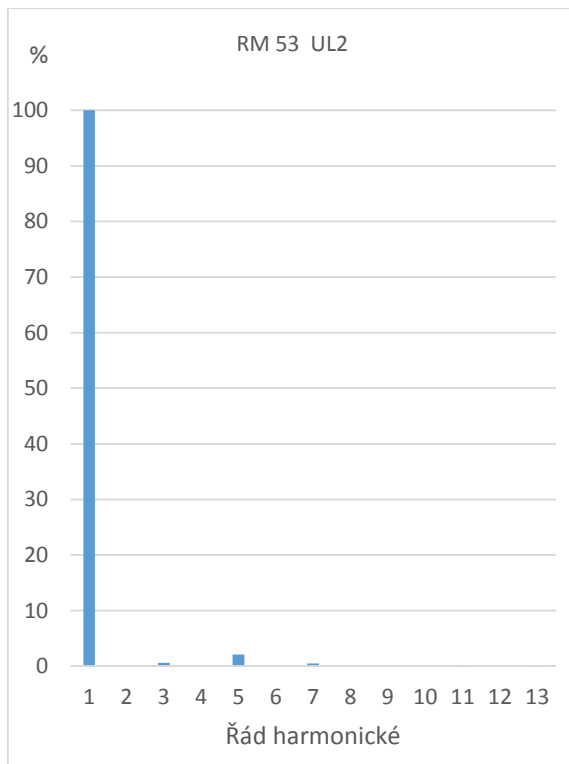
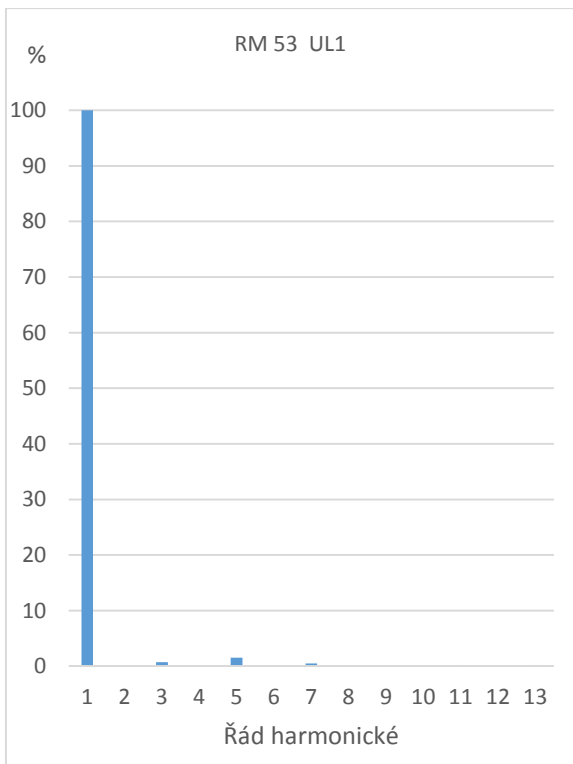
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM70 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

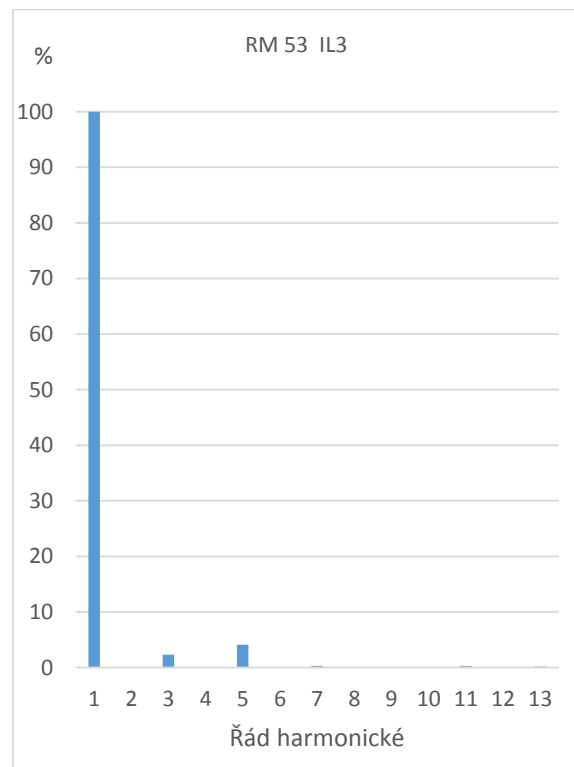
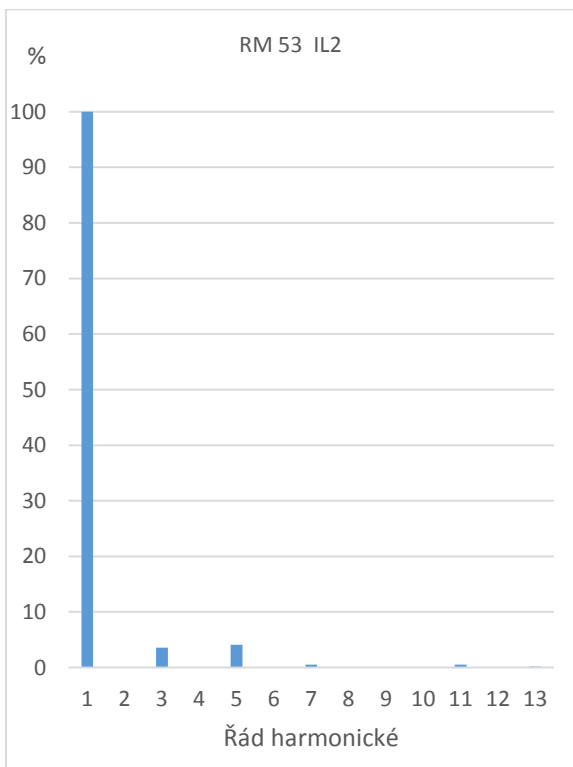
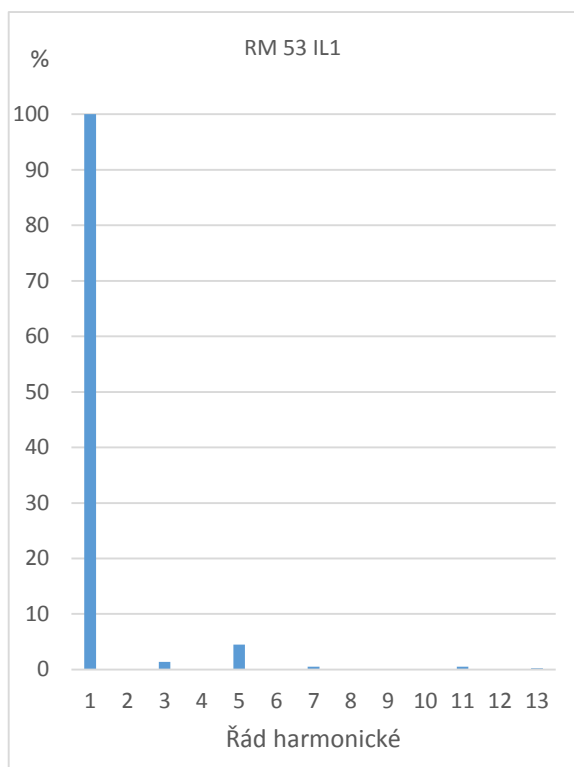
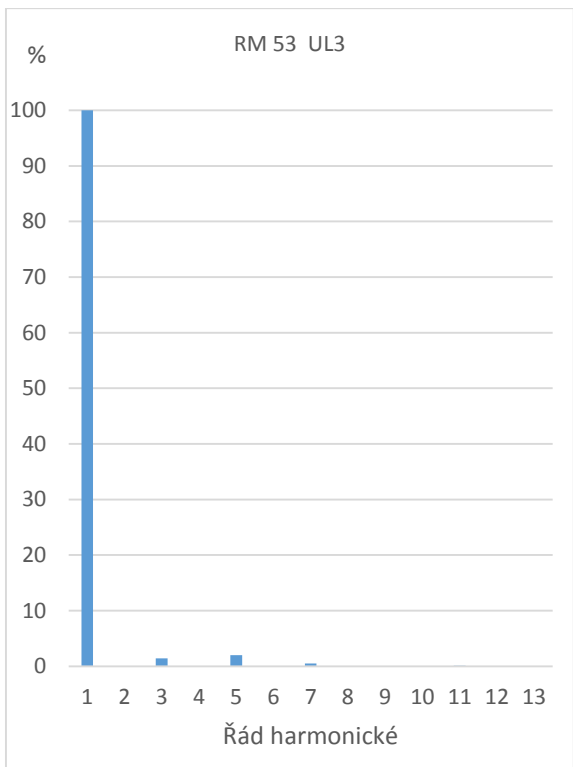




Příloha 13.

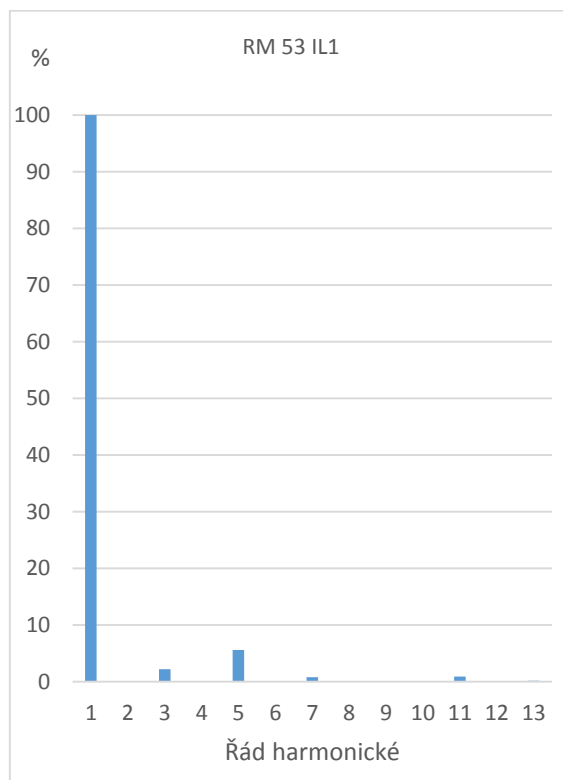
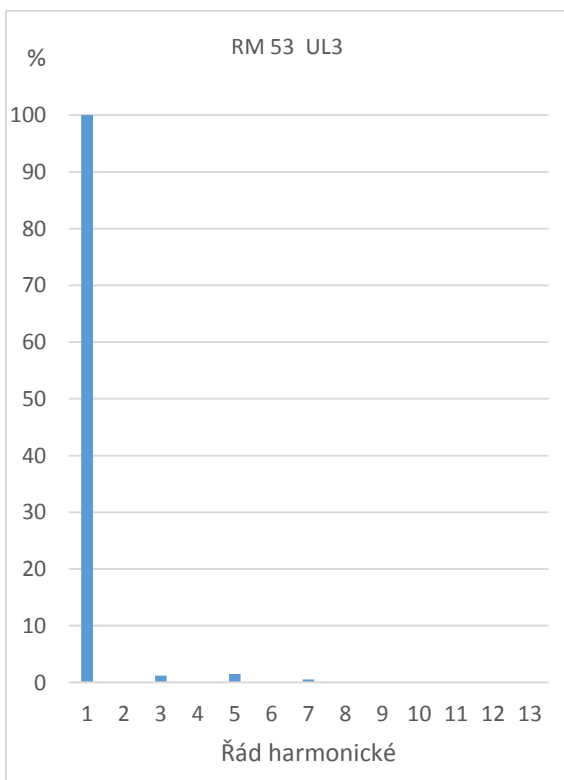
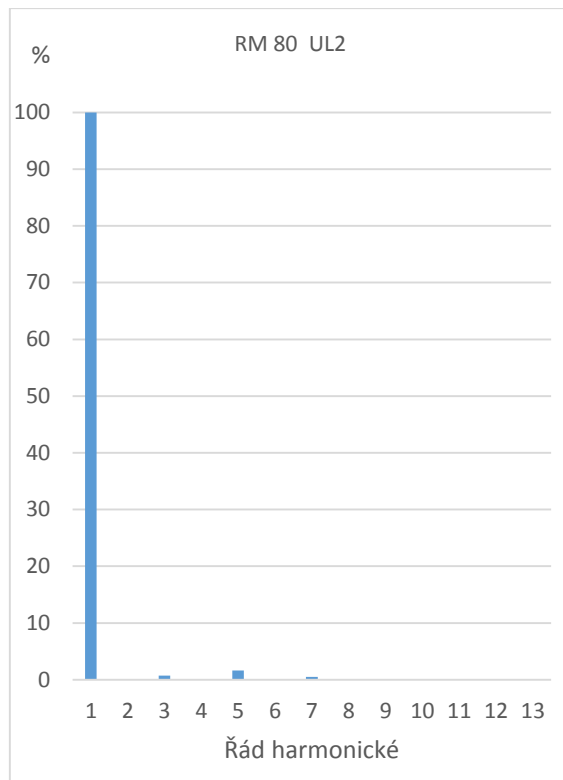
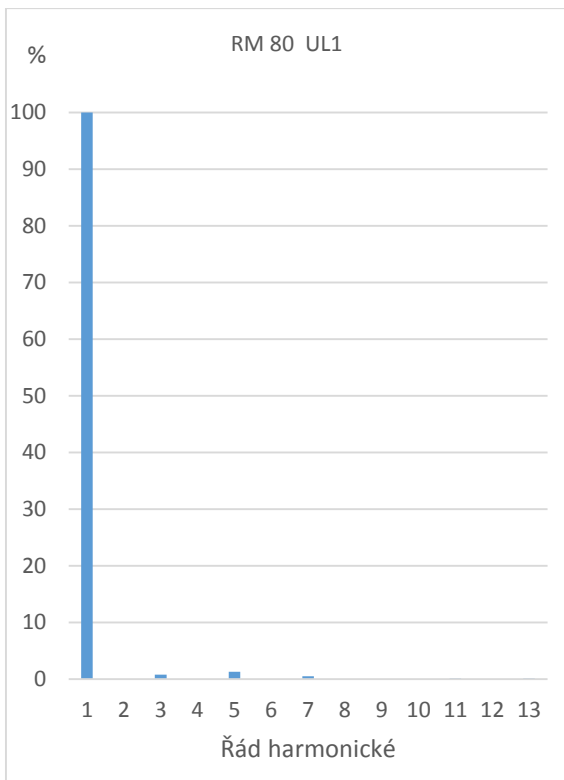
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM53 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

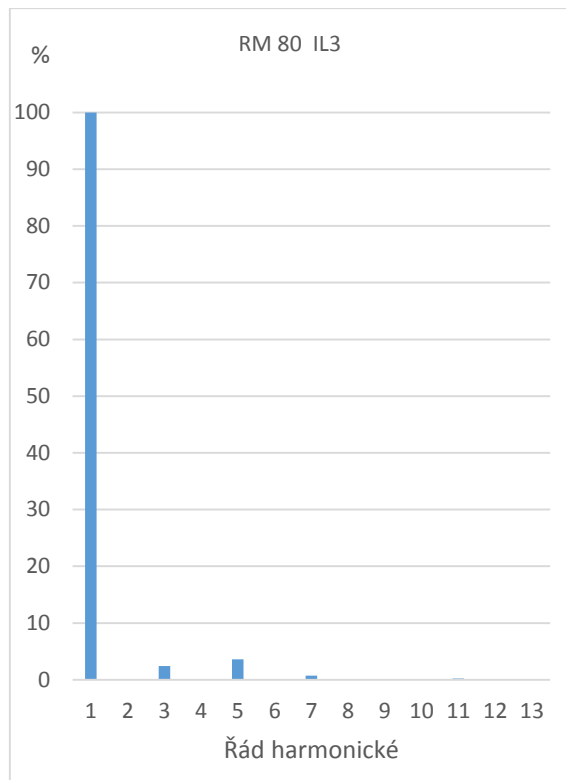
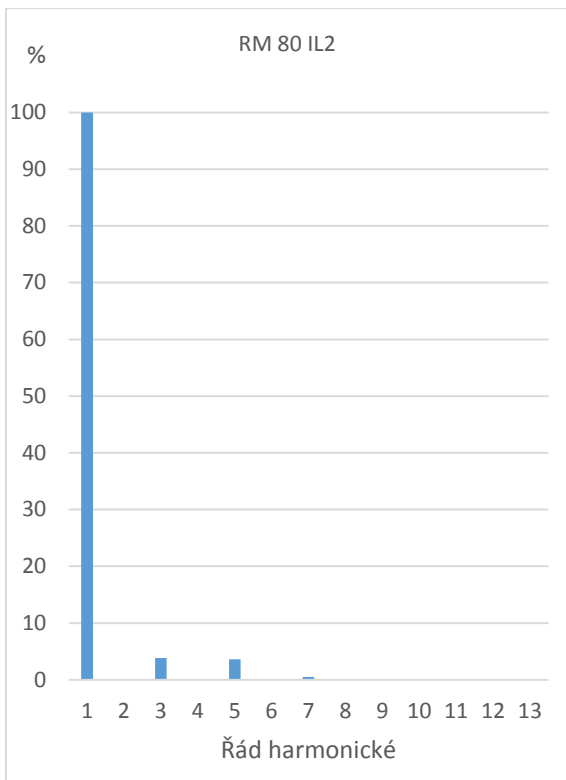




Příloha 14.

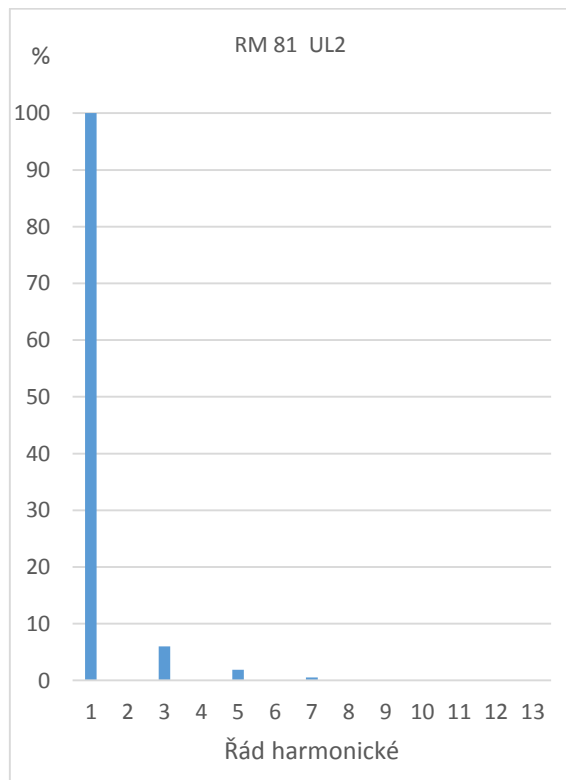
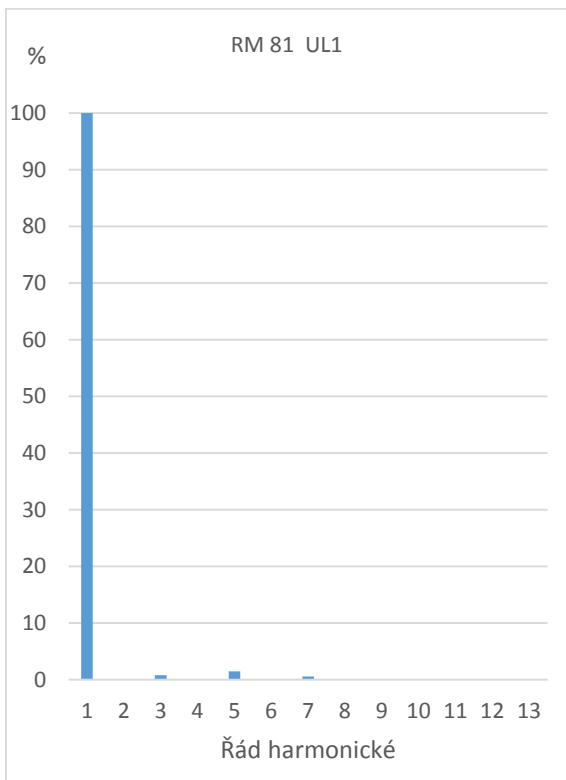
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM80 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

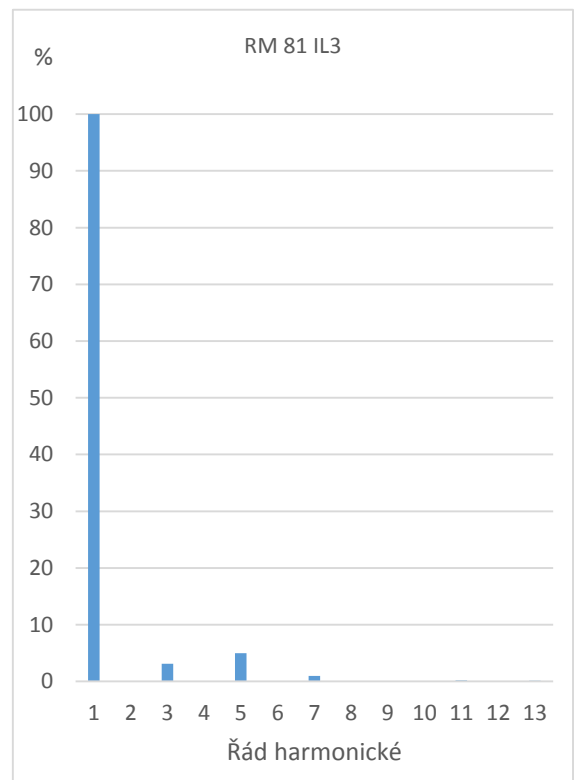
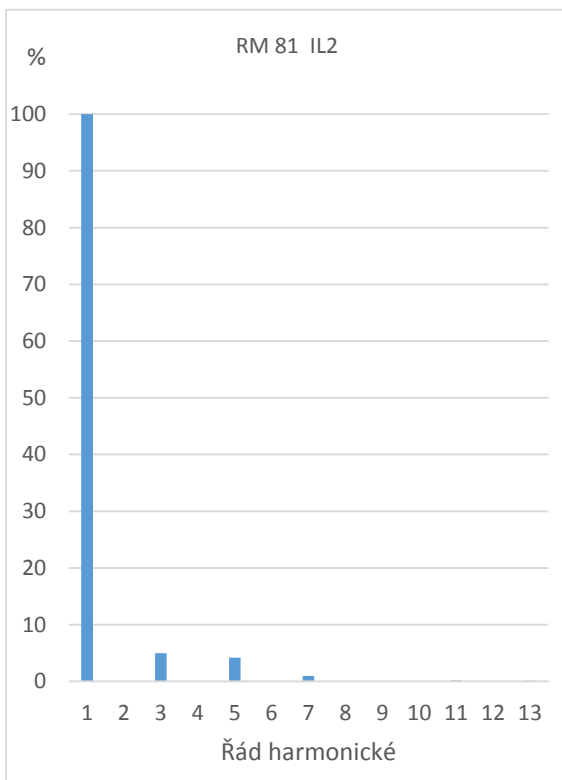
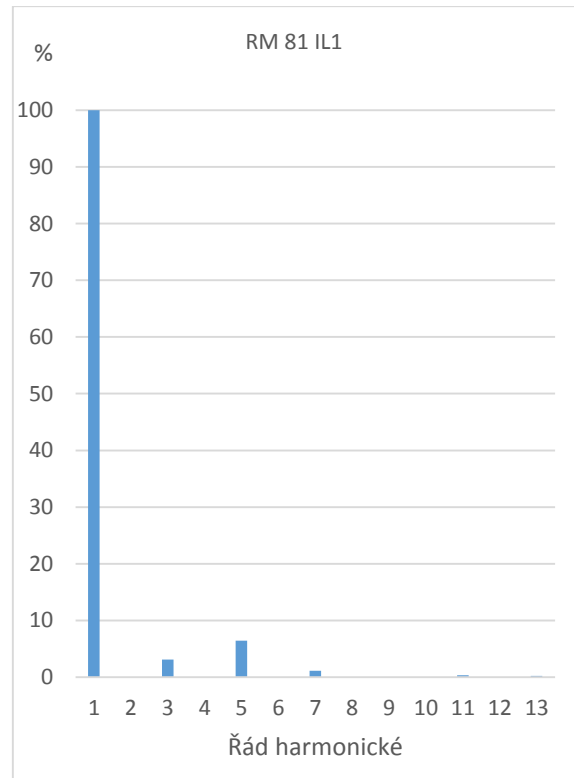
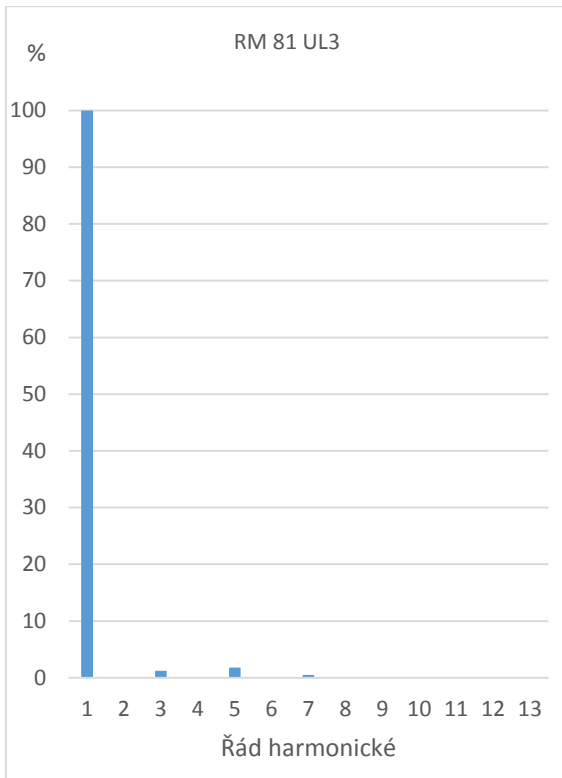




Příloha 15.

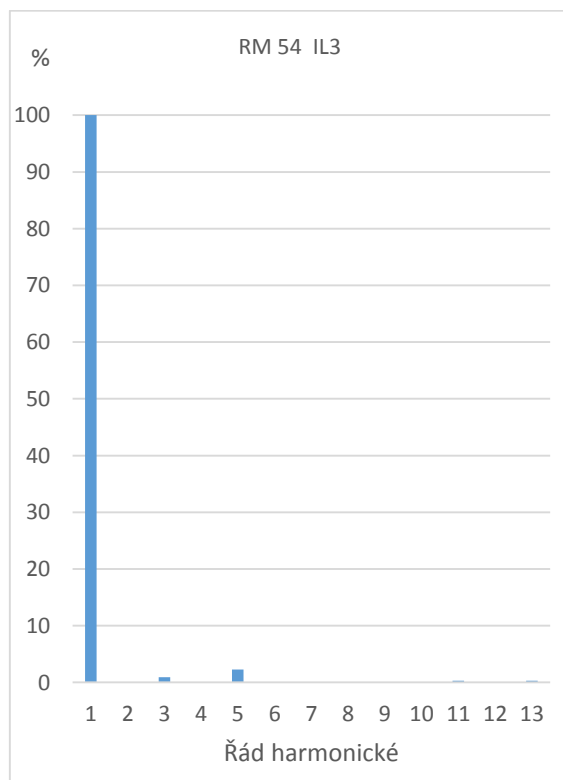
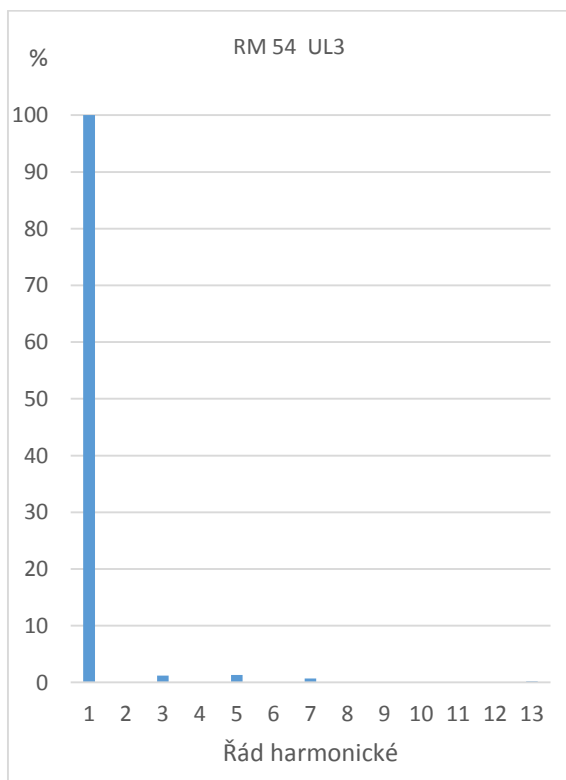
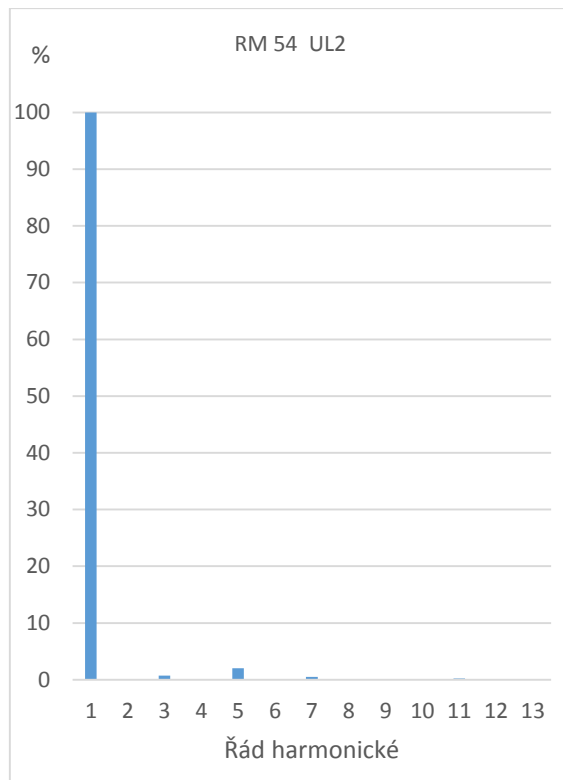
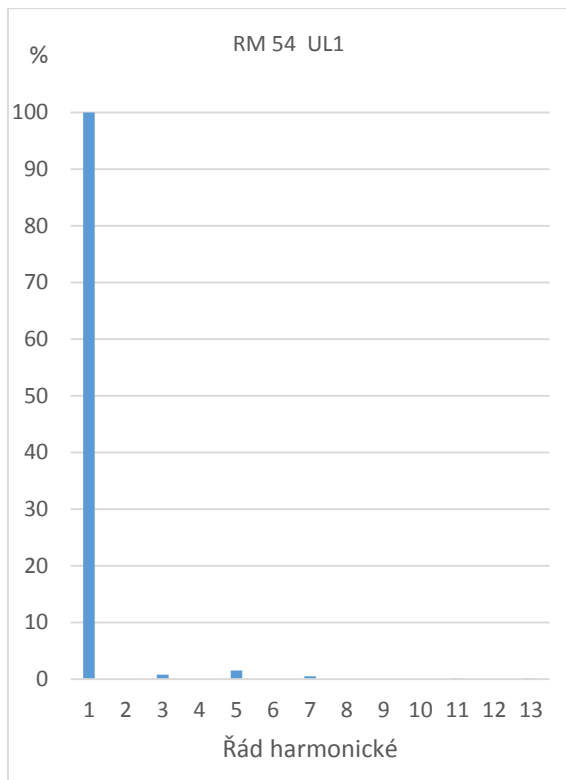
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM81 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.





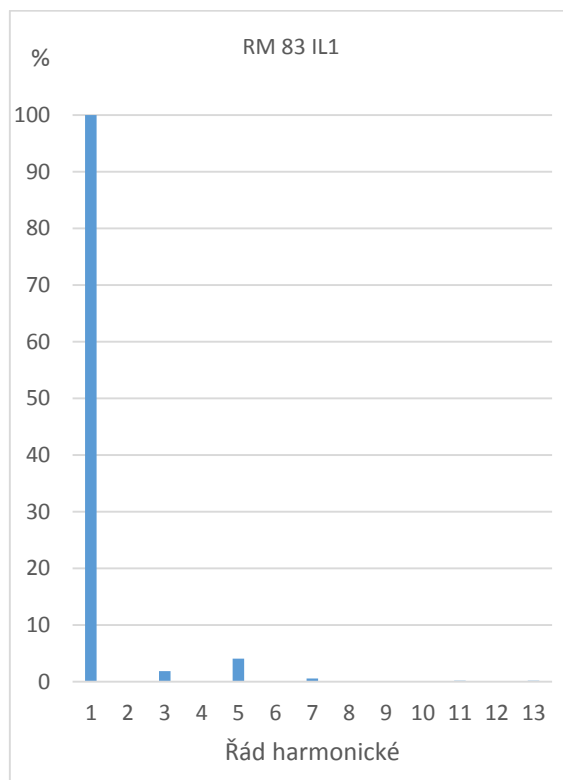
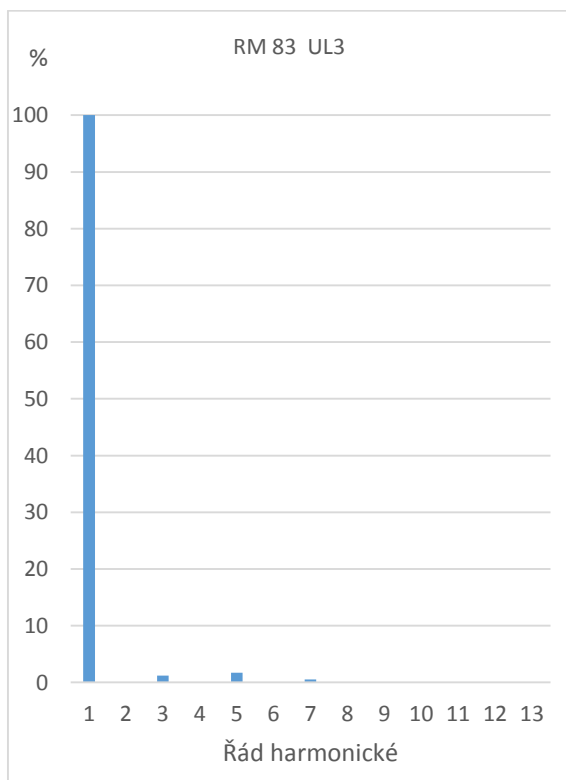
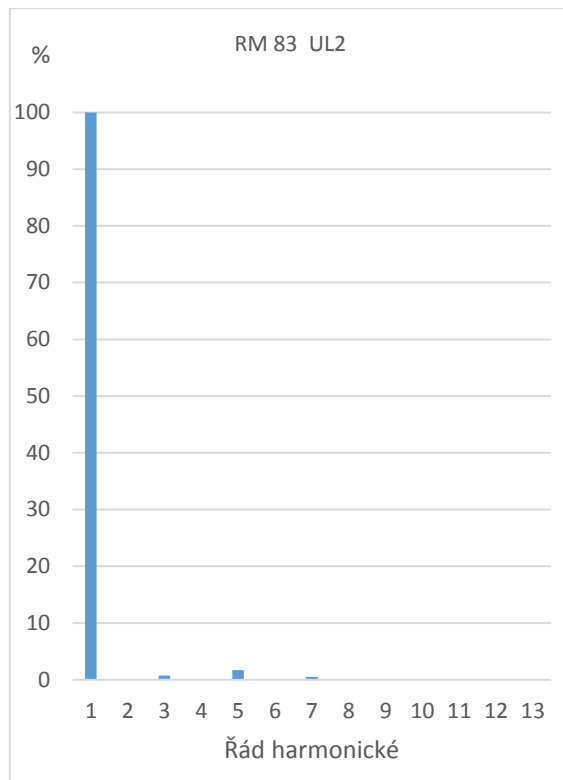
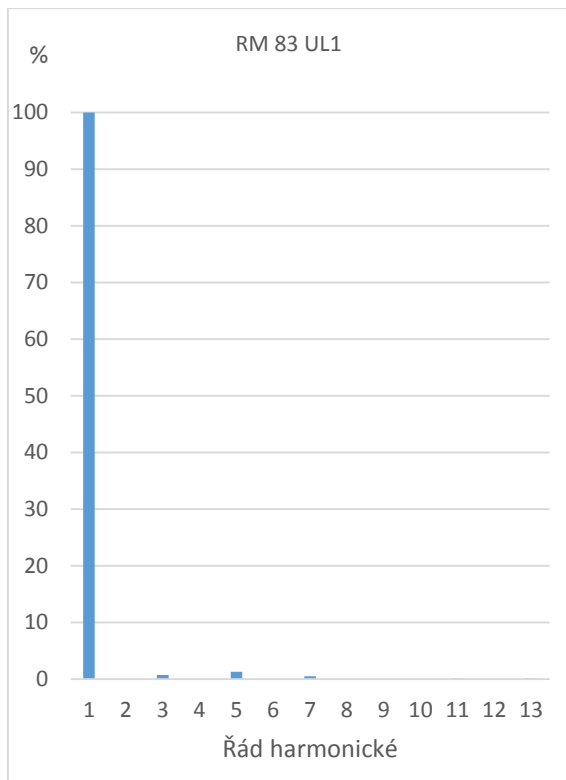
Příloha 16.

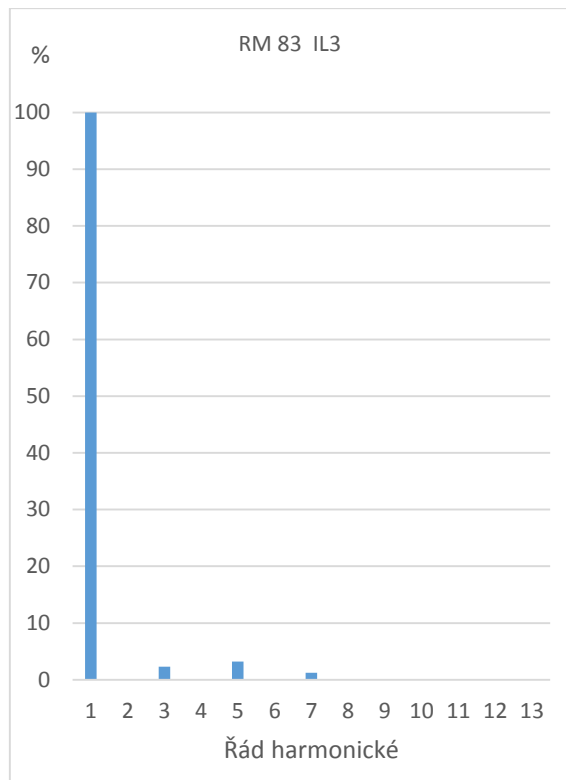
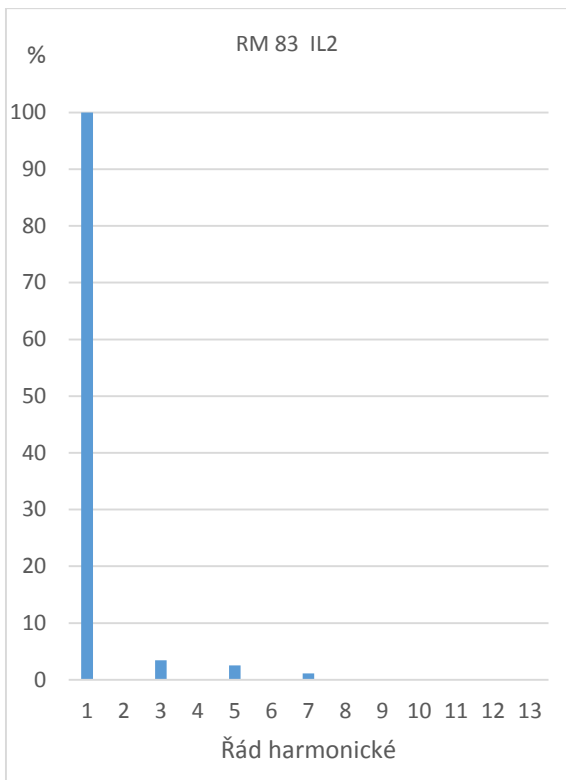
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM54 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.



Příloha 17.

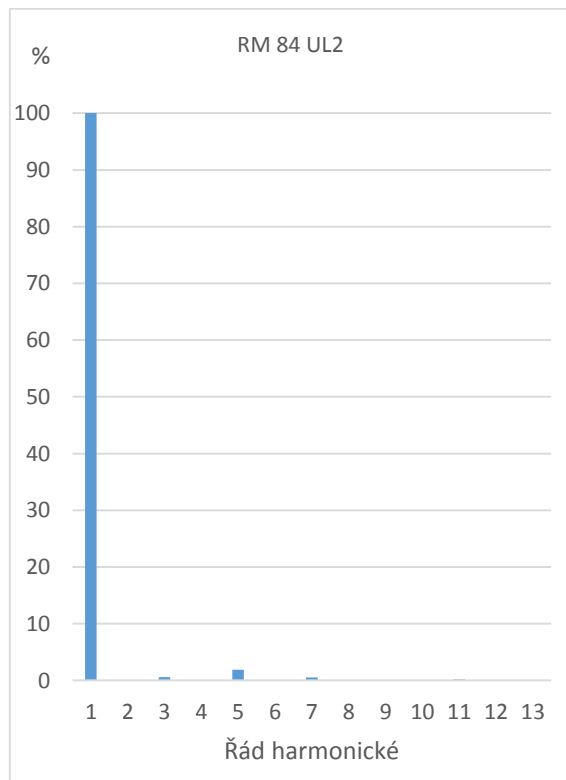
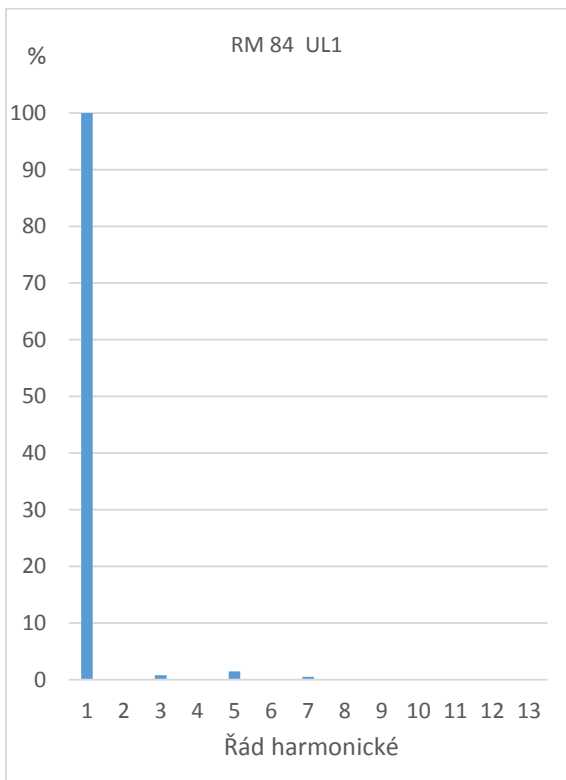
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM83 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.

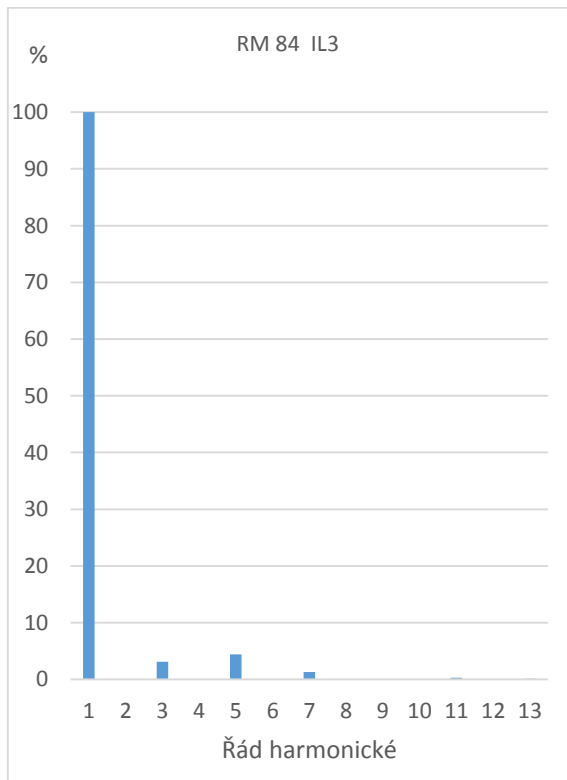
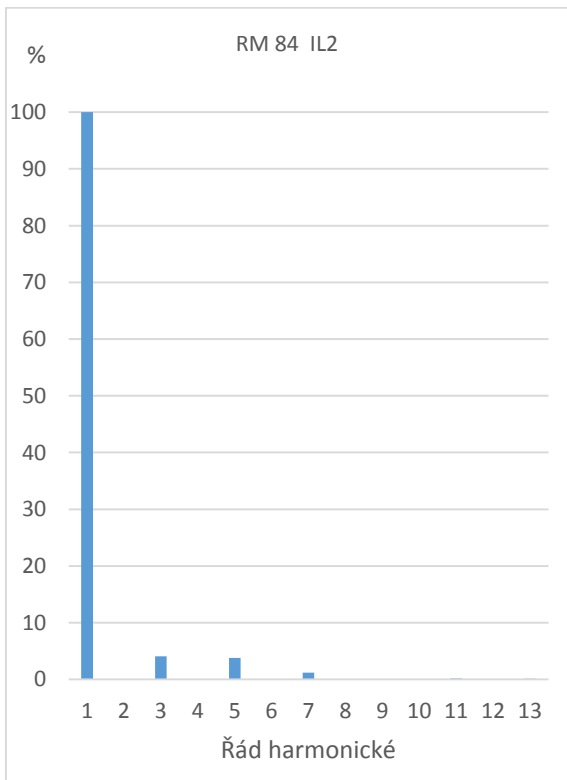
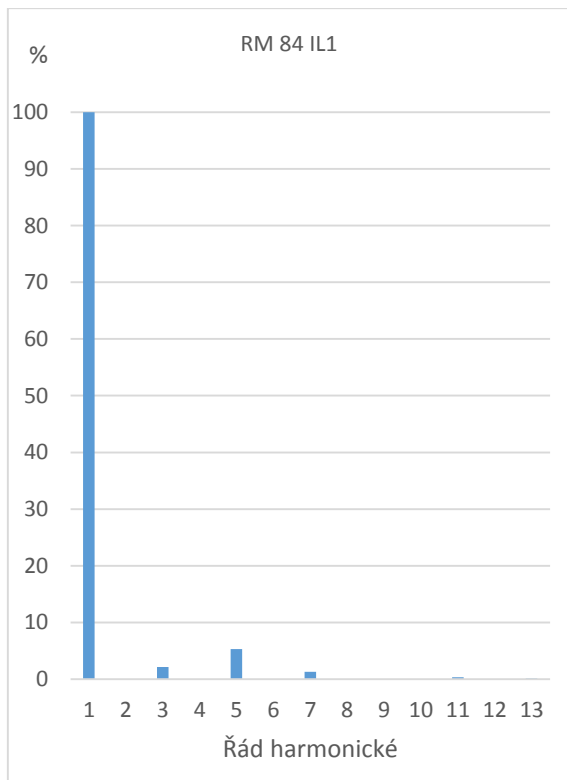
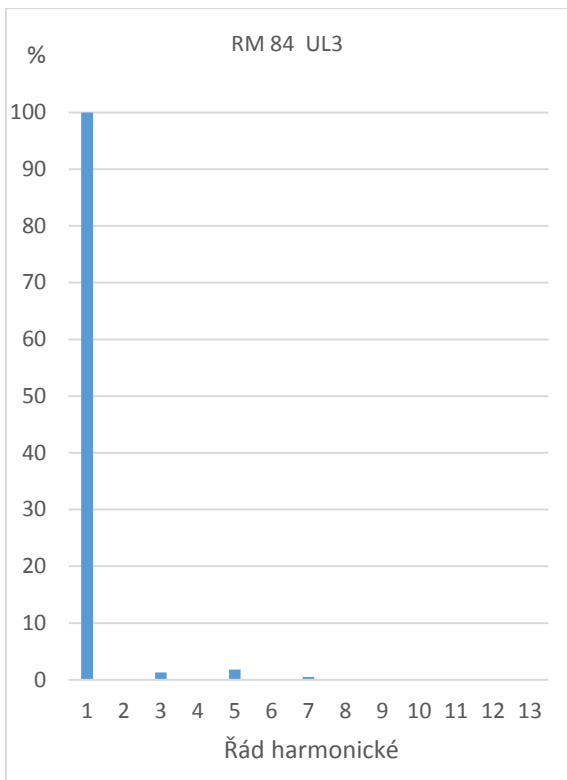




Příloha 18.

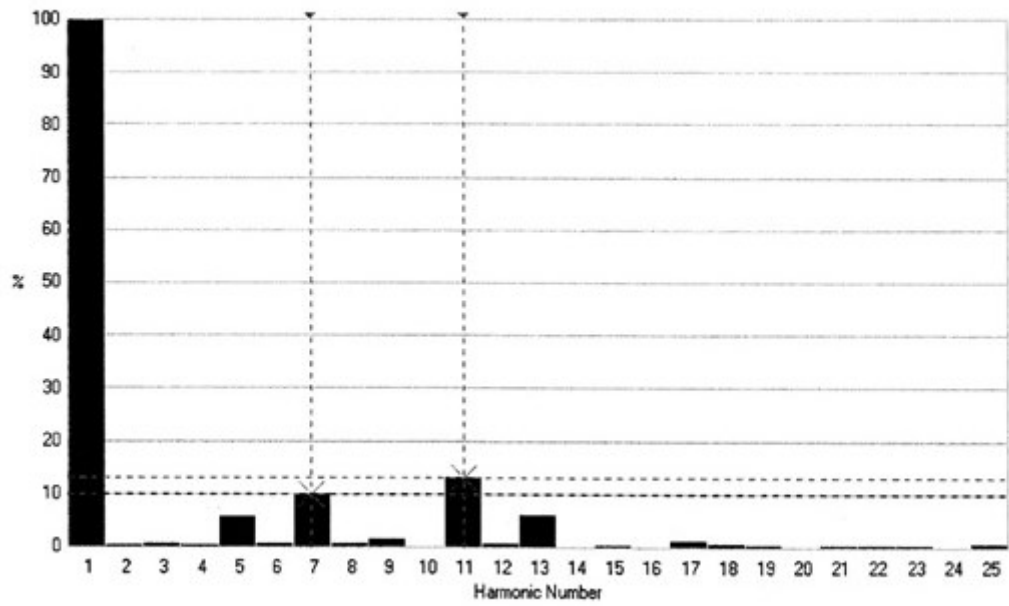
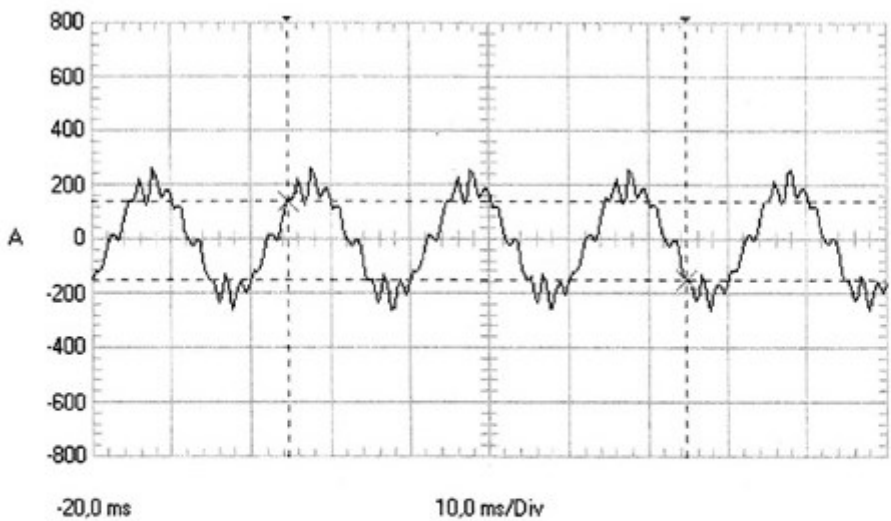
Procentuální zastoupení proudových a napěťových harmonických v rozváděči RM84 dle měřící aparatury FRAKO EMA, EMZ.





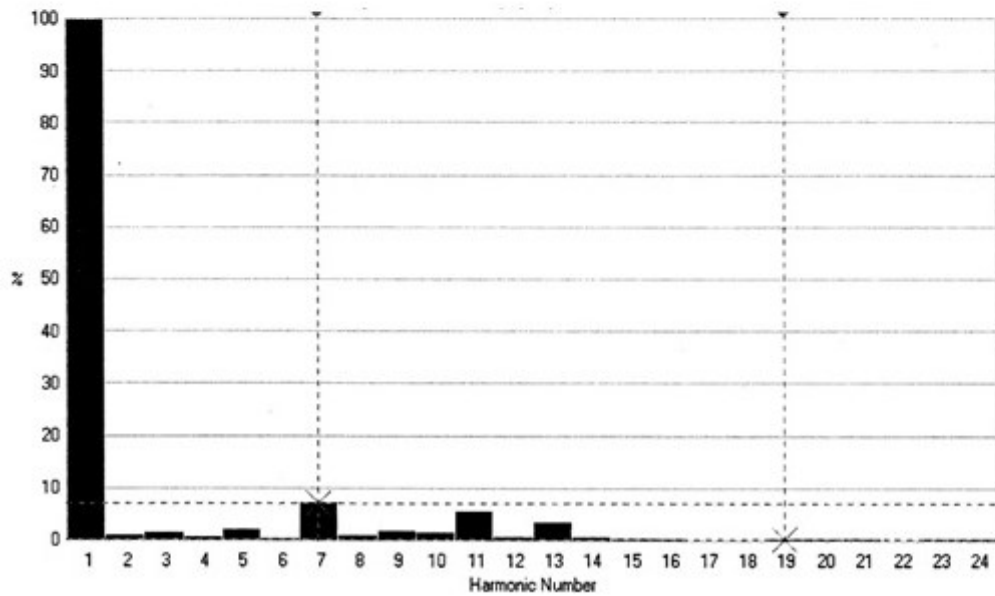
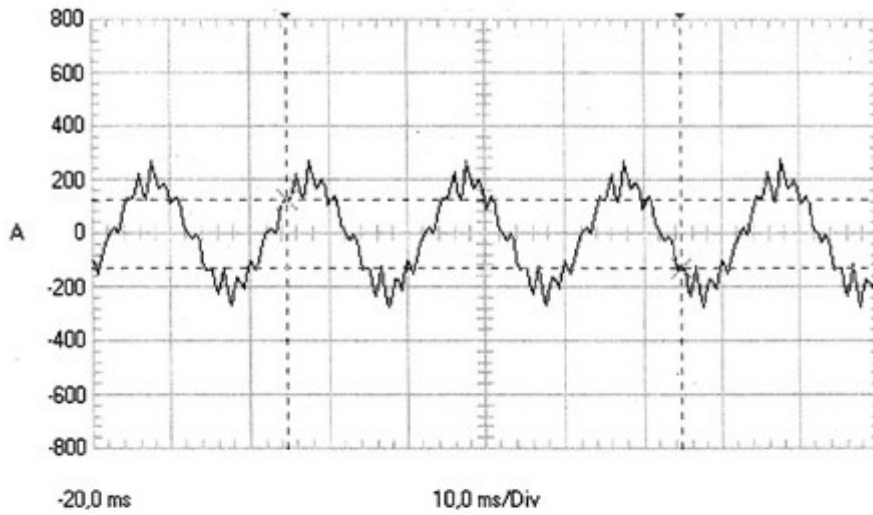
Příloha 19.

Časový průběh měření vyšších harmonických proudů I_{L1} z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.



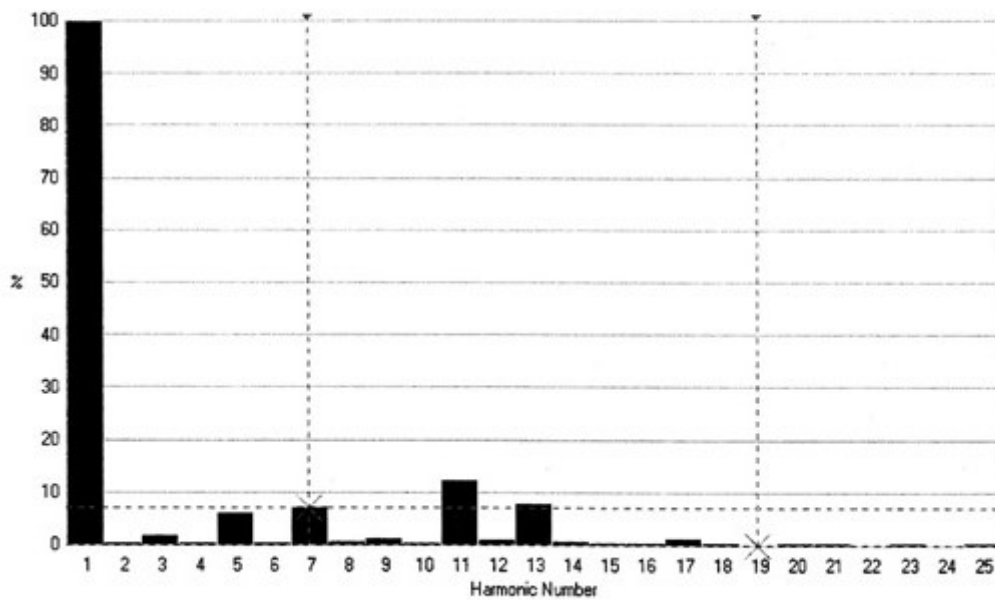
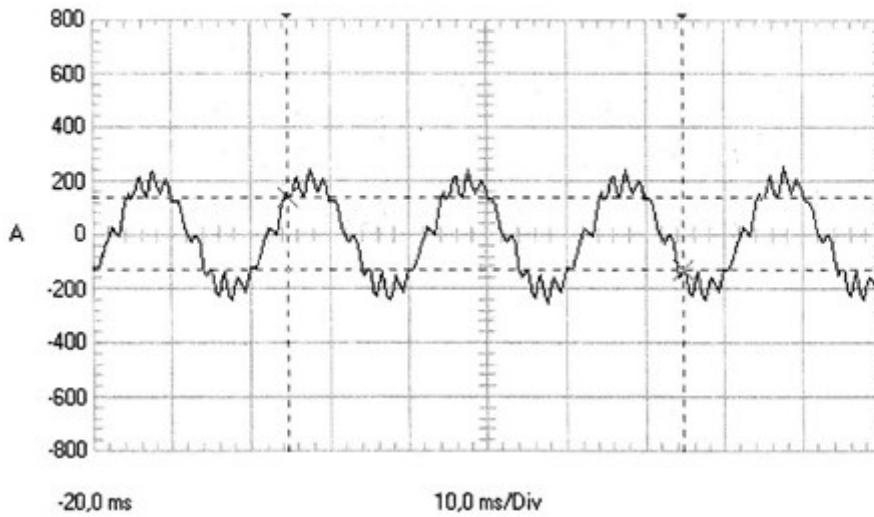
Příloha 20.

Časový průběh měření vyšších harmonických proudů I_{L2} z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.



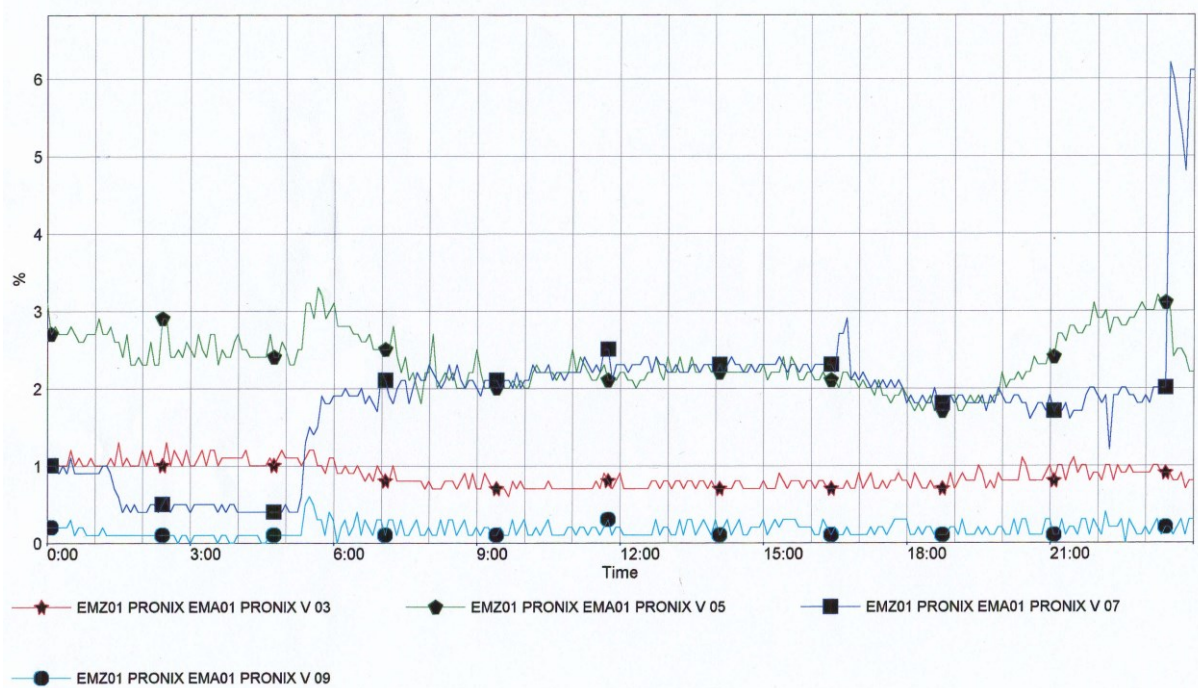
Příloha 21.

Časový průběh měření vyšších harmonických proudů I_{L3} z vývodu rozváděče kompenzace RCA s připojením kompenzace 3. a 4. stupně.

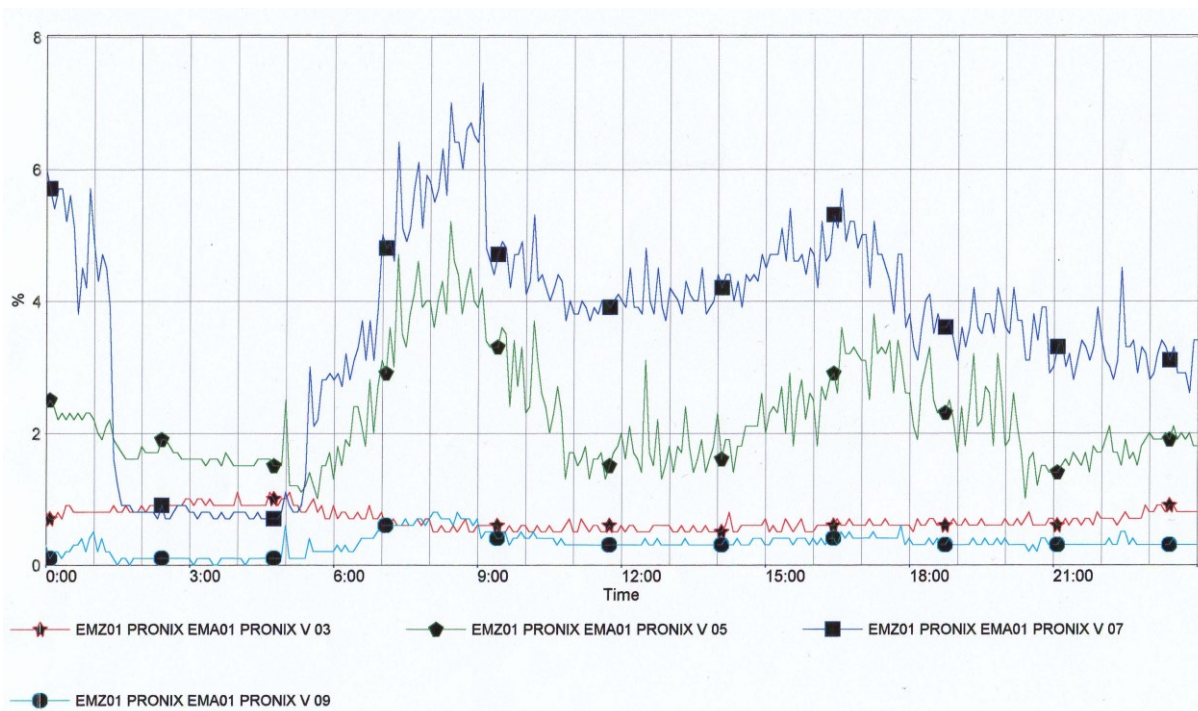


Příloha 22.

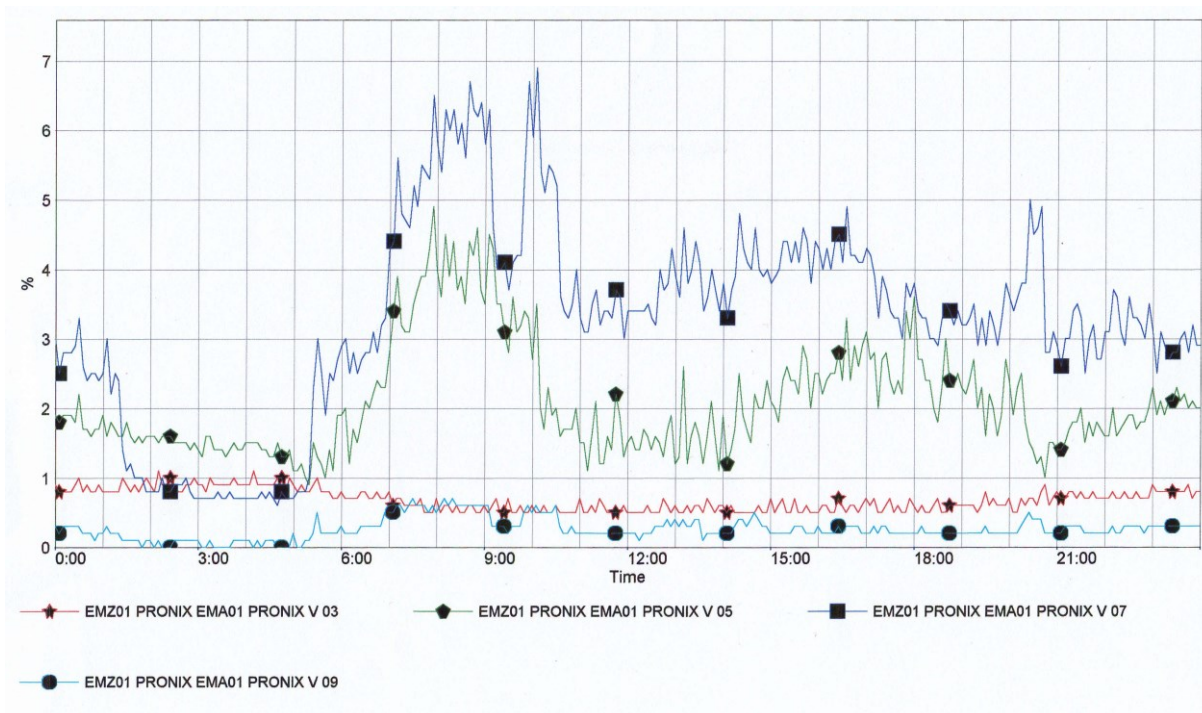
Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 28.2.2016.



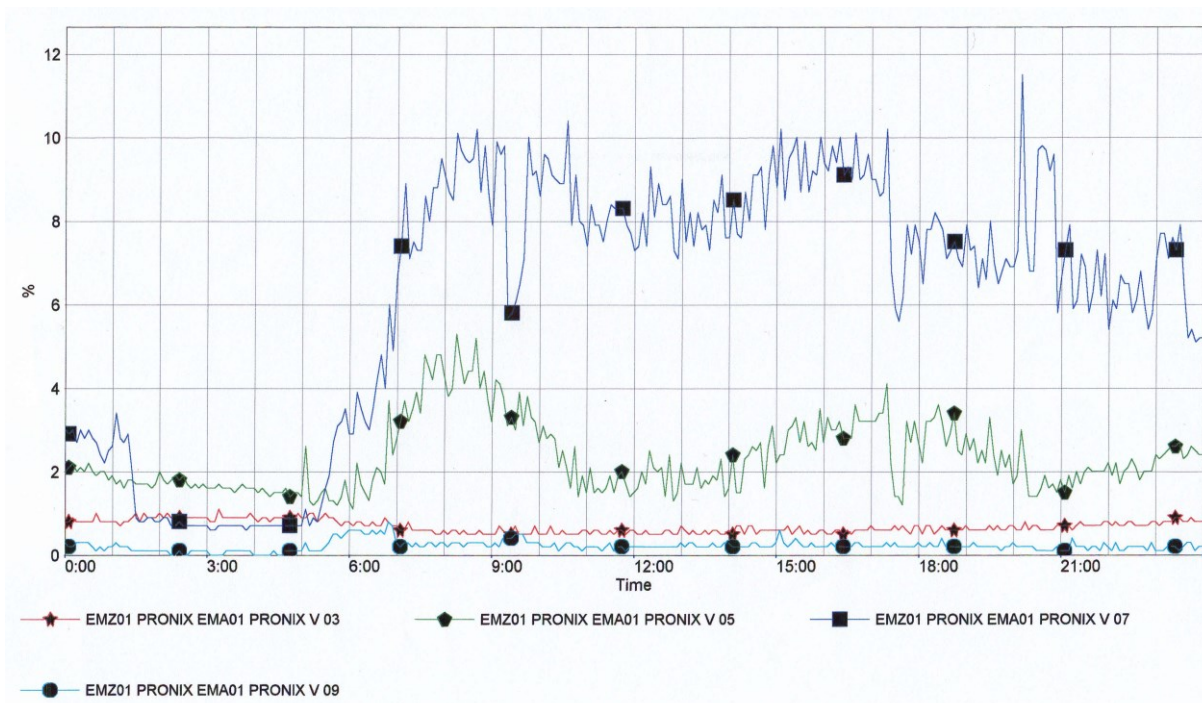
Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 29. 2. 2016.



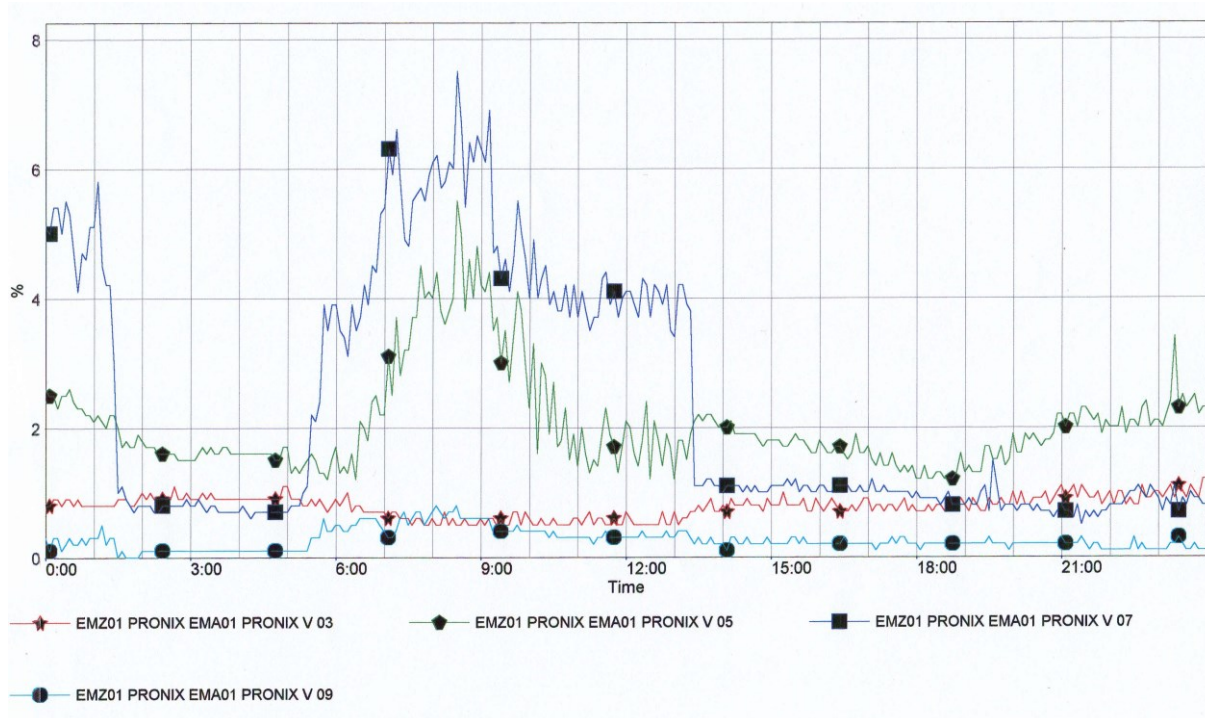
Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 1.3.2016.



Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 2.3.2016.



Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 3.3.2016.



Časový průběh měření vyšších harmonických z vývodu distribučního transformátoru ze dne 4.3.2016.

