

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Bc. Jakub Novotný

UNIVERZITA PARDUBICE  
Dopravní fakulta Jana Pernera

# **Vliv nesinusového primárního napětí na trojfázový můstkový usměrňovač**

**Bc. Jakub Novotný**

Diplomová práce  
2010

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub NOVOTNÝ**  
Osobní číslo: **D07847**  
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**  
Název tématu: **Vliv nesinusového primárního napětí na trojfázový můstkový usměrňovač**  
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě**

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

- 1) Popis schématu trojfázového trakčního usměrňovače
- 2) Analýza tvaru napětí na sekundárním vinutí transformátoru usměrňovače
- 3) Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky
- 4) Harmonická analýza proudu odebíraného usměrňovačem

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- 1) Kůs V.: Rušivé vlivy měničů a jejich omezování, Západočeská univerzita Plzeň, 1996
- 2) Zahrádka Z.: Vliv nesinusového primárního napětí na dvojitý trojfázový můstkový usměrňovač, diplomová práce Západočeské univerzity Plzeň, 1998
- 3) Hlava K.: Vliv nesinusového primárního napětí na dvojitý trojfázový můstkový usměrňovač, Sborník prací Výzkumného ústavu dopravního Praha, sv. 1, 1957, str. 17 - 29

Vedoucí diplomové práce:

**doc. Ing. Karel Hlava, CSc.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání diplomové práce: **16. prosince 2008**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2010**

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2010

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Hradci Králové dne 15. 5. 2010

.....

Jakub Novotný

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Karlu Hlavovi, CSc. za trpělivé a odborné vedení mé práce, za povzbuzující podporu, cenné rady a připomínky při zpracování diplomové práce.

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá vlivem nesinusového primárního napětí na trojfázový můstkový usměrňovač. Zkoumán byl vliv fáze páté a sedmé harmonické v energetické síti 22 kV na výstupní napětí trakčního usměrňovače. Jako doplňující byly provedeny simulace vlivu amplitudy. Studium závislostí bylo provedeno pomocí programu PSPICE.

**Klíčová slova:** trakční usměrňovač, harmonická frekvence, transformátor, zkreslení, napětí, proud, spektrální složení

## **Annotation**

This thesis deals with the effect of the non-sinusoidal primary voltage on three-phase Graetz connection. The influence of the fifth and the seventh harmonic phases in 22 kV power network on the output voltage of the traction rectifier was examined. For completion, simulations of the amplitude effect were made. The research of the dependence was made by means of the PSPICE program.

**Keywords:** traction rectifier, harmonic frequency, transformer, distortion, tension, flow, spectral distribution



# Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. POPIS SCHÉMATU TROJFÁZOVÉHO TRAKČNÍHO USMĚRŇOVAČE .....</b>	<b>13</b>
1.1 Zásady pro napájení stejnosměrné soustavy 3 kV .....	13
1.2 Trakční měnič .....	14
1.3 Trakční usměrňovač .....	16
1.3.1 Historie trakčních usměrňovačů .....	16
1.3.2 Popis zapojení trakčního usměrňovače .....	17
1.3.3 Činnost neřízeného šestipulzního usměrňovače .....	17
1.3.4 Komutace .....	19
1.3.5 Neřízený usměrňovač- úhel překrytí .....	20
1.3.6 Amplitudový zákon .....	23
1.4 Náhradní schéma transformátoru usměrňovače .....	24
1.5 Náhradní schéma zátěže trakčního usměrňovače .....	25
<b>2. PŘÍČINY DEFORMACE SÍŤOVÉHO NAPĚTÍ .....</b>	<b>26</b>
2.1 Technické příčiny deformace sinusovky napětí sítě 22 kV harmonickými ..	26
2.2 Zdroje vyšších harmonických .....	28
2.3 Vznik vyšších harmonických napětí .....	30
2.4 Možné problémy způsobené harmonickými .....	30
2.4.1 Přetížení středního vodiče .....	30
2.4.2 Vlivy na transformátory .....	32
2.4.3 Snížení jmenovitého výkonu transformátoru .....	32
2.5 Kvalita elektrické energie dle PNE .....	33
2.6 Odhad hodnot emitovaných vyšších harmonických dle PNE .....	35
2.7 Omezení zpětných vlivů na HDO dle PNE333430-6 ed.2 .....	36
2.7.1 Zařízení odběratelů se společným napájecím bodem v síti 110 kV .....	37
2.8 Omezování vyšších harmonických .....	38

<b>3. ANALÝZA TVARU NAPĚTÍ .....</b>	<b>42</b>
3.1 Analýza tvaru napětí na sekundárním vinutí trakčního transformátoru .....	42
3.2 Stejnosečná složka výstupního napětí usměřovače .....	43
3.3 Harmonická analýza sekundárního napětí .....	44
<b>4. SIMULAČNÍ STUDIE .....</b>	<b>45</b>
4.1 Vliv vyšších harmonických v síti 22 kV na výstupní napětí usměřovačového transformátoru .....	46
4.2 Vliv vyšších harmonických v síti 22 kV na proud odebíraný usměřovací jednotkou .....	48
4.3 Vliv vyšších harmonických v síti 22kV na výstupní napětí usměřovací jednotky .....	49
4.3.1 Vliv fáze vyšších harmonických v energetické síti 22 kV na výstupní napětí usměřovací jednotky .....	50
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>53</b>
<b>SEZNAM LITERATURY .....</b>	<b>54</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM VYOBRAZENÍ.....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>60</b>

## ÚVOD

Trakčních měření se užívá k přeměně střídavé elektrické energie na energii stejnosměrnou. Jako zdroj pro měření je použito hlavního rozvodu elektrické energie na území České republiky, a to rozvodné sítě 110 kV. Z dané rozvodné sítě jsou přes rozvodny a distribuční transformátory napájeni všichni odběratelé v republice. Každý ze spotřebičů připojený do elektrické sítě je odběratelem elektrické energie a také, což je velmi důležité, je zdrojem rušení a potažmo potencionálním zdrojem vyšších harmonických, které „vysílá“ do energetické sítě. Jedná se o nelineární zátěže, jako jsou pulzní zdroje, různé proudové a napěťové regulátory, frekvenční měniče apod. V ideálním případě by mělo mít síťové napětí, které distribuují dodavatelé elektrické energie pro domácnosti, podniky a průmysl, čisté sinusové napětí s konstantní amplitudou a frekvencí. Nelineární spotřebiče však odebírají ze sítě nesinusový (neharmonický) zátěžový proud. Takovéto typické zatížení sítě vytvoří nejčastěji používaný jednofázový a třífázový usměrňovač. Z toho vyplývají odchylky od ideální sinusové formy, čemuž se dnes v napájecí síti nedá vyhnout.

Při posouzení kvality sítě se v současnosti bere v úvahu rozsah do 2,5 kHz odpovídající 50. harmonické. Vyšší harmonické s nejsilnějšími účinky jsou 5. a 7., tedy frekvence 250 a 350 Hz. Příliš velká deformace, popř. příliš velký obsah vyšších harmonických vede k tomu, že např. citlivá elektronická zařízení, jako jsou počítače, senzory či regulátory – nebudou fungovat bezchybně. Dokonce mohou být poškozené i nechráněné kompenzační stanice jalového proudu.

Tato diplomová práce se ve své úvodní části zabývá popisem trojfázového trakčního usměrňovače. Je zde popsána stejnosměrná trakční soustava 3 kV a celý řetězec trakčního měření od trakčního transformátoru až po zátěž měření. Ve zkratce tu jsou uvedeny jevy vyskytující se v trakčním usměrňovači, jako je komutace nebo úhel překrytí. V další kapitole jsou popsány technické příčiny deformace síťového napětí distributora elektrické energie a parametry dodávané elektrické energie, které musí dodavatel plnit, a které vyplývají z podnikových norem energetiky (PNE). Z části je zde zmíněn vliv vyšších harmonických na hromadné dálkové ovládání (HDO) i možné problémy vznikající s jejich výskytem.

V jedné z kapitol je řešena analýza tvaru napětí a spektrální složení na sekundární straně trakčního transformátoru při přítomnosti vyšších harmonických na jeho primární straně. Analýza je provedena taktéž pro stejnosměrnou složku výstupního napětí usměrňovače.

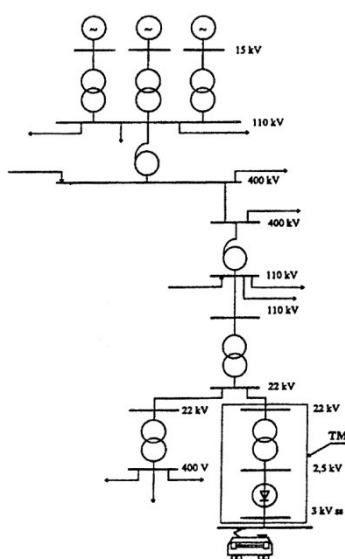
Stěžejní část této diplomové práce je simulace trakčního usměrňovače a vliv vyšších harmonických přicházejících z energetické sítě na tvar a na spektrální složení proudů a napětí na něm. Simulace zkoumala jak vliv efektivní hodnoty, tak hlavně vliv fáze vyšších harmonických na výstupní napětí trakčního usměrňovače.

## 1. POPIS SCHÉMATU TROJFÁZOVÉHO TRAKČNÍHO USMĚRŇOVAČE

Značný vliv na zavedení stejnosměrné trakční soustavy 1500 V měl na našem území Ing. František Křížík, který obecně prosazoval stejnosměrný proud z důvodu obloukových lamp, a v té době počátkem 20. století hojně používané stejnosměrné motory s komutátorem. Původní výhody nižšího napětí jako jsou paralelní provoz trakčních motorů a tím dosažení lepších adhezních vlastností a snadné zhášení elektrického oblouku při zkratu, nemohly obstát v potřebě těžkého nákladního provozu na železnici, kdy vznikaly velké proudy v trakčním vedení (TV). V 30. letech byl ukončen vývoj soustavy 1500 V a přešlo se na napěťovou hladinu 3000 V. Nevýhody vyššího napětí, špatné zhášení oblouku, nutnost mít stále zařazeny dva trakční motory v sérii a tím zhoršení adhezních podmínek, byly vykompenzovány dominantní výhodou nižších proudů v trakčním vedení a tím umožnění stavět měnírny ve větších vzdálenostech od sebe.

### 1.1 Zásady pro napájení stejnosměrné soustavy 3 kV

Charakter časového průběhu trakčního zatížení měnírny je určen polohou hnacího vozidla vůči měnírně. Např. při poloze uprostřed mezi měnírnami je trakční proud, odebíraný hnacím vozidlem, rovnoměrně rozdělen mezi obě sousední měnírny pracující do daného úseku trakčního vedení. Tímto je sníženo namáhání (tepelné) usměrňovacích diod v měnírnách a současně se snižuje úbytek napětí na trakčním vedení.



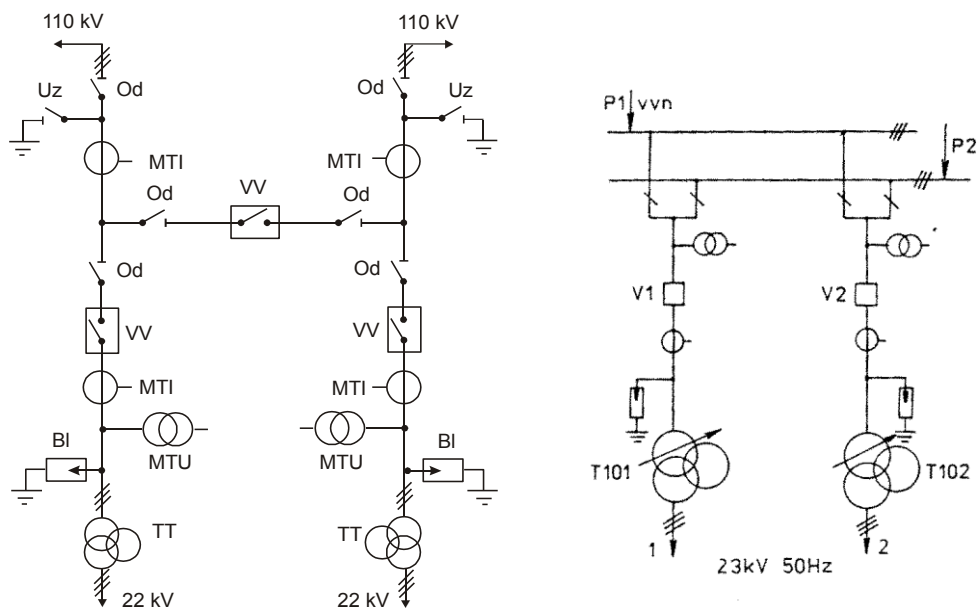
obr. 1 Schéma napájení elektrických drah systému 3 kV

Z výše napsaného je patrné, že trakční vedení stejnosměrné soustavy 3 kV je výhradně napájeno oboustranně. Napáječové rychlovyvínače sousedních měníren, pracujících do téhož TV, jsou galvanicky vázány tzv. „vazbou napáječů“. Vypnutí jednoho rychlovyvínače nadproudovou spouští nutí přes tuto přímou vazbu k vypnutí i druhý rychlovyvínač, který nadproud ještě ani nezaznamenal. Tímto způsobem se chráněná délka TV zkracuje na polovinu meziměřírenské vzdálenosti. Jednou z nevýhod stejnosměrné trakce, pokud se pro napájení používají diodové trakční usměrňovače, je neschopnost rekuperovat energii získanou při brzdění nebo jízdě z kopce zpět do sítě dodavatele elektrické energie.

## **1.2 Trakční měnírna**

Trakční měnírna slouží k přeměně energie. Mění se energie střídavého proudu na energii stejnosměrnou o požadovaném napětí 600 V, 750 V, 1500 V, 3000 V. Jiným druhem jsou měírny měnící průmyslový kmitočet na jiný, jako je tomu na německých železnicích DB. Tento druh měníren je zcela odlišný, tudíž se jimi nebudu zabývat. Změna charakteru proudu se děje v usměrňovačích, které jsou popsány v následující kapitole 1.3.

Trakční napájecí stanice (TNS) se skládá z několika částí. Jako první směrem od dodavatele el. energie je rozvodna 110 kV. Tuto část některé TNS vůbec nemají z důvodu blízké rozvodny dodavatele, a proto jsou přívody taženy dvěma samostatnými vysokonapěťovými kabely 22 kV přímo z rozvodny. Rozvodny 110 kV se v dnešní době budují jako zapouzdrěné, malých rozměrů a s využitím plynů SF<sub>6</sub>. Tímto se dosahuje malých rozveden tvaru „H“ se zachováním dvoustranného napájení. Ze svorek sekundárního vynutí je napětí přiváděno kabely do vnitřní rozvodny 22 kV. Uvnitř rozvodny je realizován rozvod k jednotlivým trakčním transformátorům a transformátorům vlastní spotřeby. Samostatnou částí je pak rozvodna 6 kV napájecí zabezpečovací zařízení.



obr. 2 Jednopolové schéma rozvodny 110 kV, 22 kV

Další částí trakční napájecí stanice, navazující na rozvodnu 22 kV, jsou usměrňovací skupiny složené z trakčních transformátorů, které následně napájejí trakční usměrňovače. Trakční transformátory nejčastěji mění třífázový proud na šestifázový a následně se dvanáctipulzním usměrňovačem usměrní. Tento případ je nejčastěji používán u ČD. Jedná se v podstatě o dva šestipulzní usměrňovače pracující paralelně. Tématem této diplomové práce je ale šestipulzní zapojení, tudíž se budu dále zabývat výhradně šestipulzní zapojením.

## 1.3 Trakční usměrňovač

### 1.3.1 Historie trakčních usměrňovačů

Usměrňovače jsou polovodičová zařízení měnící energii střídavého proudu na energii stejnosměrnou. V prvopočátku bylo místo polovodičů používáno rtuťových usměrňovačů. Nevýhodou těchto historických součástek byla jejich velká náročnost při výrobě, použití velkého množství nebezpečné rtuti, velké rozměry, potřeba značného příslušenství jako výkonné chlazení, vývěv apod. V porovnání s polovodiči byl nevýhodou komplikovanější provoz a horší vlastnosti samotných ventilů. V prvopočátcích, kdy bylo používáno vodních chlazení, musela být v měnirně trvalá obsluha, ale časem se přešlo na chlazení vzduchové se zatavenými rtuťovými ventily, kde odpadá nutnost použití příslušenství pro udržení vakua.

Modernější provedení s polovodiči značně snížilo jednoduchost obsluhy, významně se zmenšila velikost usměrňovacích jednotek a hlavně odpadlo rozsáhlé a energeticky náročné příslušenství. S instalací polovodičů sice vyvstaly nové problémy ohledně nadproudů, ale ty byly v brzké době vyřešeny instalací dostatečně rychlých nadproudových ochran, které nové usměrňovací jednotky dostatečně ochránily.

První polovodičové usměrňovače ČKD byly vyvinuty v roce 1956. Tehdy se jednalo ještě o germaniové prvky. První československý křemíkový usměrňovač na napětí 3300 V byl dán do provozu v roce 1966. Se zavedením křemíkových usměrňovačů se objevily nové problémy doposud neřešené. V první řadě se jednalo o přepětí vznikající na trakčním vedení během bouřek. Nové usměrňovače byly velmi náchylné na přepětí šířící se po vedení k měnirně. I když byly osazeny bleskojistky a přepětěvé ochrany, nejednalo se o spolehlivou ochranu, jelikož nebyla dostatečně rychlá a citlivá pro potřeby křemíku. Těmito přepětími jsou křemíkové ventily silně namáhány a při nedostatečných ochranách mohou být i zničeny.

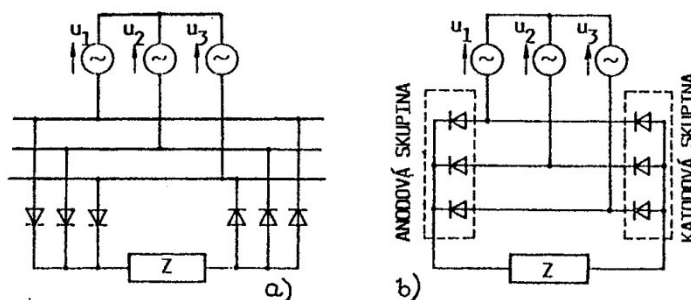
Dalším problémem byla zkratová odolnost křemíkových ventilů, jelikož jsou zkraty na dráze častý jev a je třeba s nimi počítat. V roce 1964 bylo provedeno několik zkratových zkoušek v měnirně Ústí nad Orlicí se zaměřením na dimenzování polovodičových ventilů z hlediska zkratové odolnosti.



Zkoušky prokázaly, že křemíkové ventily lze bezpečně chránit rychlovypínači v případě, že je v obvodu zařazen reaktor omezující počáteční rychlost nárůstu zkratového proudu o indukčnosti alespoň 4 mH. [4]

### 1.3.2 Popis zapojení trakčního usměrňovače

Aplikace usměrňovačů pro dráhové měničny využívají z pravidla můstkové zapojení usměrňovačů. Jako zdroj střídavého napájecího napětí slouží rozvodná, třífázová soustava. Pomocí transformátoru je hodnota napětí upravena na požadovanou hodnotu. Usměrňovač v můstkovém zapojení je v podstatě sériové zapojení dvou uzlových usměrňovačů jak je vidět na obrázku níže.



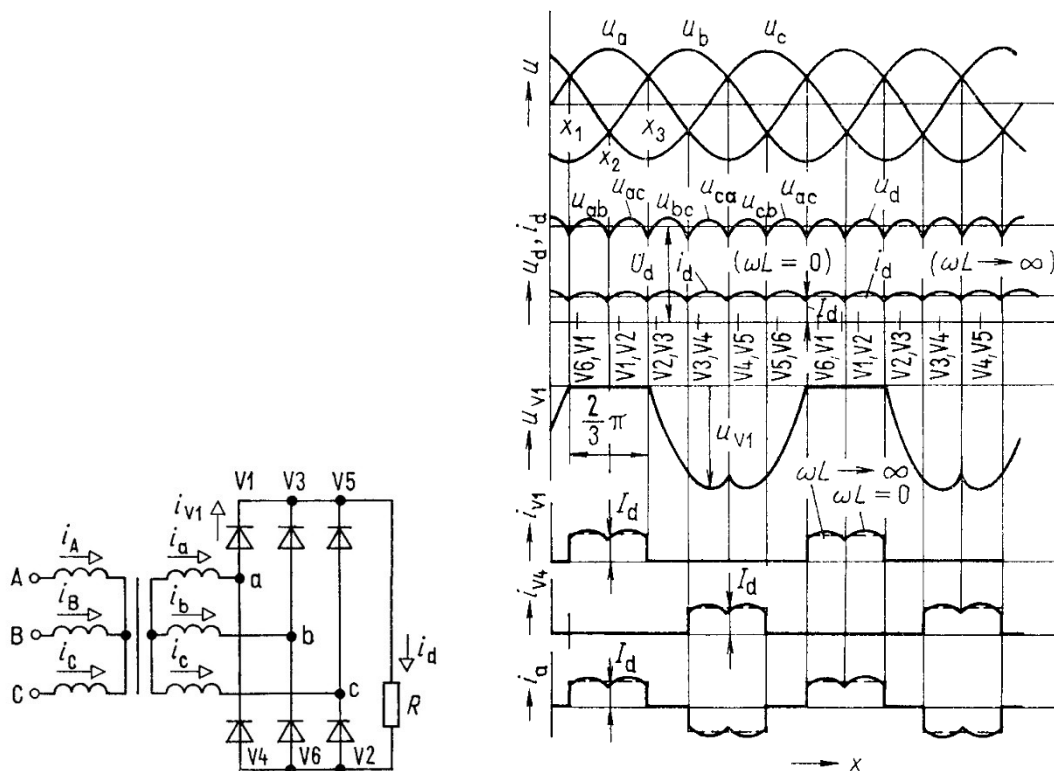
obr. 3 Trojfázový můstek a) sériové zapojení dvou uzlových usměrňovačů  
b) obvyklý způsob kreslení třífázového můstku [8]

Z obrázku je patrné, že proud prochází jednotlivými fázemi v obou směrech na rozdíl od uzlového zapojení. Z obrázku je též patrné rozdělení diod do dvou skupin. Jedna skupina je tvořena diodami připojenými ke zdroji svými katodami, proto ji nazýváme katodovou skupinou. Druhá skupina je tvořena diodami připojenými ke zdroji svými anodami, tudíž se jedná o anodovou skupinu.

### 1.3.3 Činnost neřízeného šestipulzního usměrňovače

Schéma usměrňovače a průběhy jednotlivých veličin na něm jsou vyobrazeny na obr. 4, ze kterého bude vycházet následující popis funkce šestipulzního neřízeného usměrňovače. V prvopočátku předpokládáme zatížení usměrňovače pouze činným odporem a okamžik kdy  $x=x_1$ . Proud prochází pouze diodami V1 a V6. Na zátěži R je v tento okamžik sdružené napětí  $u_{ab}$ . Proud  $i_d$  se uzavírá přes vinutí fáze a > diodu V1 > zátěž R > diodu V6 > vinutí fáze b.

Tento děj trvá do okamžiku daného bodem  $x_2$  a doba jeho trvání činí  $120^\circ$  el. V bodě  $x_2$  se stane uzel b můstku kladným oproti potenciálu uzlu c. Od daného okamžiku je napětí  $u_{bc}$  kladné čímž uvádí diodu V2 do blokovacího stavu. Jestliže při  $x=x_2$  sepne dioda V2, dojde k rozepnutí diody V6. Tento jev bývá označován jako tzv. "komutace". V tomto případě nastane komutace diod V6 a V2.



obr. 4 Trojfázový neřízený můstkový usměrňovač.

Jeho zapojení a průběhy proudů a napětí na něm [10]

Napětí  $u_{ab}$  uvádí diodu V6 do závěrného stavu. Pro interval  $x_3 > x > x_2$  jsou sepnuty diody V1 a V2. V okamžiku určeném bodem  $x_3$  sepne dioda V3 zatímco dioda V1 vypne, protože potenciál uzlu b je vyšší než potenciál uzlu a. Obdobným způsobem dojde postupně ke komutacím diod V2/V4, V3/V5, V4/V6, V5/V1. Během jedné periody síťového napětí nastává u šestipulzního usměrňovače celkem šest komutací. Použité označení a symboly slouží pouze k popisu zmíněného obr. 4 a dále v textu mohou mít jiný význam.

Proud prochází každou z diod pouze třetinu periody. Zbylé dvě třetiny periody zůstává dioda v uzavřeném stavu a je namáhána napětím skládající se ze dvou částí sdružených napětí sekundární strany síťového transformátoru.

Střední hodnotu výstupního napětí třífázového můstkového usměrňovače určíme ze vztahu [10]

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{6} U_2 \sin x \, dx = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_2 \quad (1.1)$$

kde  $U_2$  je efektivní hodnota fázového napětí sekundární strany transformátoru.

Pro proud diodou můžeme psát

$$I_D = \frac{\sqrt{6} \cdot U_2}{2 \cdot \omega \cdot L_{TT}} [1 - \cos(\omega \cdot t)] \quad (1.2)$$

kde  $L_{TT}$  je náhradní indukčnost trakčního transformátoru přepočtená na jeho sekundární stranu.

$$L_{TT} = \frac{U_{TT}^2 \cdot u_K}{100 \cdot \pi \cdot p^2 \cdot S_{TT} \cdot 100} \quad (1.3)$$

$U_{TT}$  napětí primárního vinutí

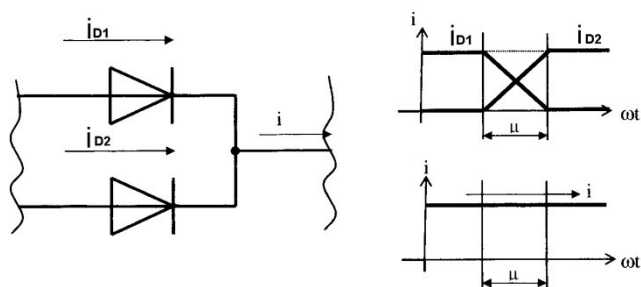
$u_K$  napětí transformátoru nakrátko

$p$  závitový převod transformátoru

$S_{TT}$  jmenovitý výkon transformátoru

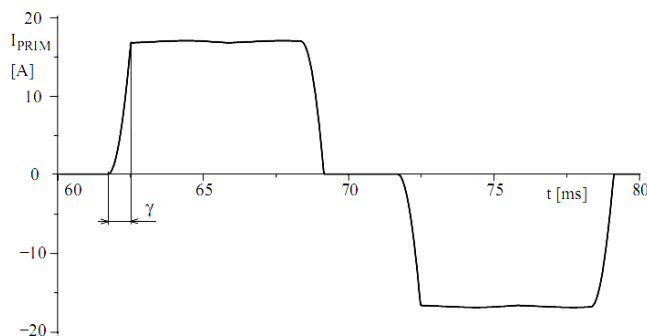
### 1.3.4 Komutace

V případě usměrňovačů mluvíme o komutaci, jestliže proud procházející jednou usměrňovací diodou přejde na druhou diodu, aniž by byl přerušen proud tekoucí ze společného uzlu, do kterého jsou obě diody připojeny. Názorněji je to vidět na obr. 5.



obr. 5 Komutace větví usměrňovače

Jestliže uvažujeme třífázový můstkový usměrňovač, který je napájen transformátorem zapojeným YY, bude proud primárním vinutím tohoto transformátoru shodný s obr. 6.

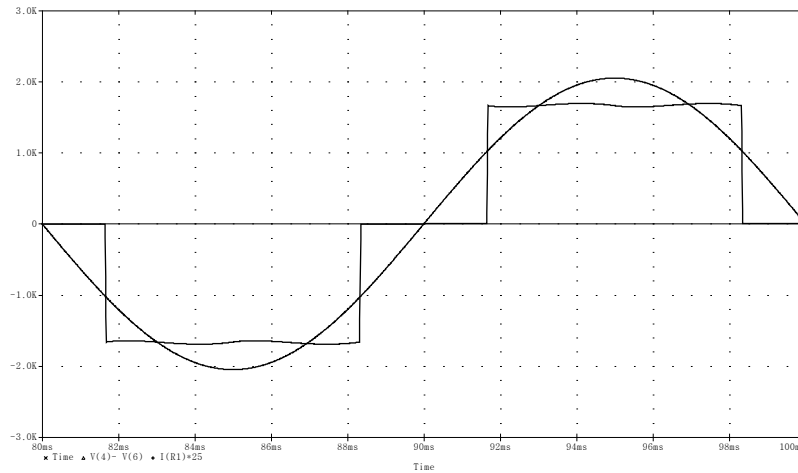


obr. 6 Primární proud šestipulzního usměrňovače s vinutím do hvězdy [8]

Komutaci rozeznáváme vnější a vlastní. Vnější komutace se vyznačuje tím, že zdroj komutačního napětí leží mimo měnič. Sem patří běžné, neřízené usměrňovače. Dříve se používalo označení přirozená komutace. Vlastní komutace se vyznačuje zdrojem komutačního napětí umístěným přímo v obvodu měniče. Dříve používané označení nucená komutace.

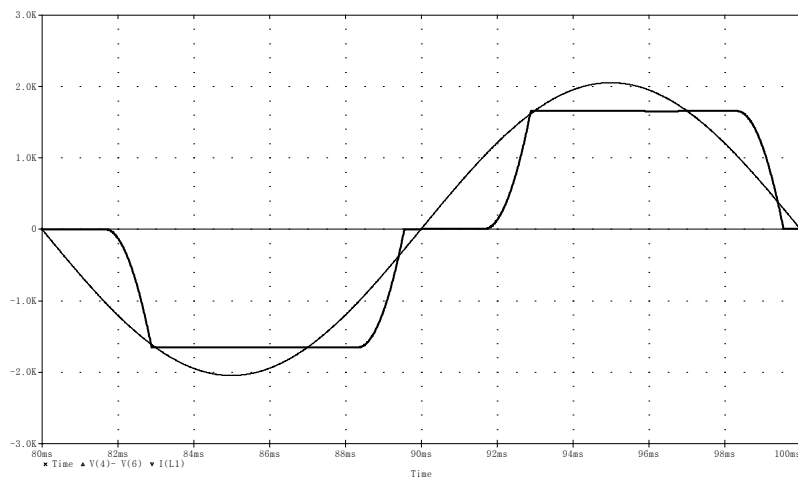
### 1.3.5 Neřízený usměrňovač- úhel překrytí

Vlastnosti trojfázového usměrňovače v oblasti EMC vůči napájecí síti jsou do jisté míry dány i charakterem zátěže připojené na výstupu usměrňovače. Jako zátěž je obvykle považován trakční motor hnacího vozidla, který má charakter RL obvodu. V takovém případě se uplatňuje především úhel překrytí fázových proudů trakčního usměrňovače. Velikost tohoto překrytí je dána jednak zatížením trakčního usměrňovače a hlavně na fázovou reaktanci trakčního usměrňovačového transformátoru viz. kapitola 1.4. V případě, že by byla zanedbána rozptylová reaktance transformátoru, byl by nárůst primárního proudu skokový a úhel překrytí by byl roven nule, jak je vidět na obr. 7.



obr. 7 Průběh komutace při zanedbání rozptylové reaktance transformátoru

Z obrázku je patrná téměř skoková změna proudu fází L1 sekundárního vinutí transformátoru znázorněno plnou čarou a čistě sinusový průběh fázového napětí fáze L1 zobrazen čerchovanou čarou. V případě uvažování rozptylové reaktance transformátoru je průběh obou veličin poněkud odlišný což je vidět na obr. 8.



obr. 8 Průběh komutace při uvažování rozptylové reaktance transformátoru

Čím větší je zatížení usměrňovače, a čím větší je reaktance trakčního usměrňovačového transformátoru, tím je úhel překrytí vyšší. Protože trakční transformátor je zatěžován symetricky ve všech fázích stejně, určuje polovina úhlu překrytí svým kosinem účinník trakčního odběru.

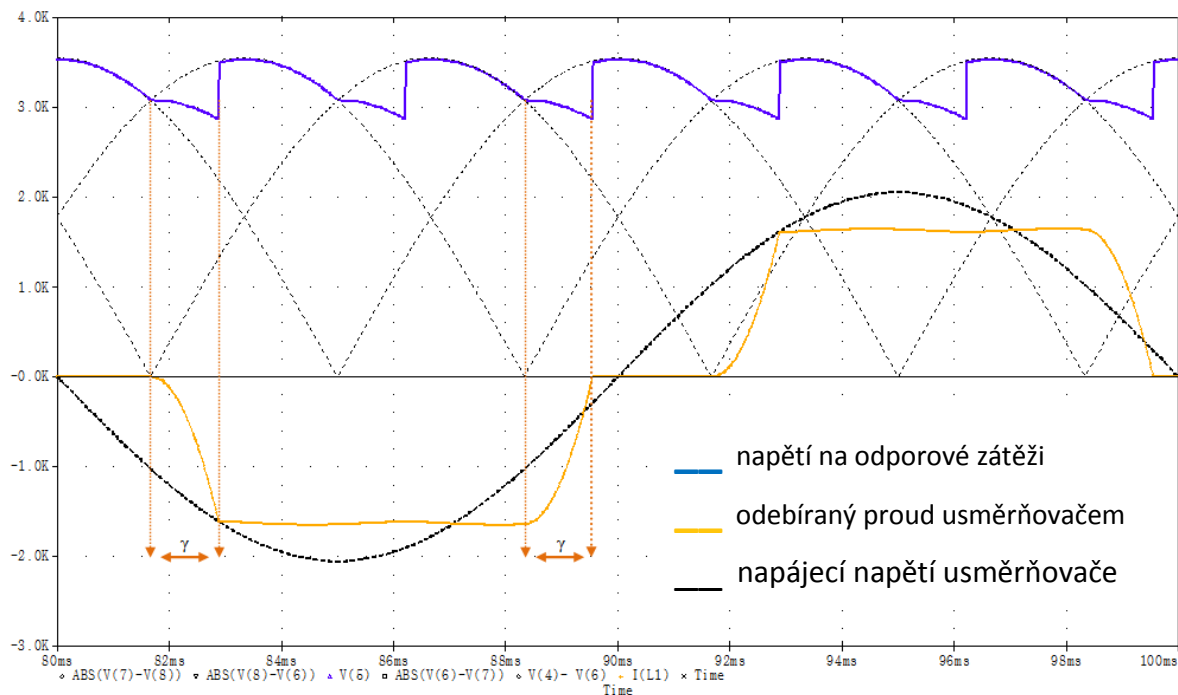
Úhel překrytí  $\gamma$  pro šestipulzní trakční usměrňovač lze psát ve tvaru

$$\cos \gamma = 1 - \frac{2 \cdot I_{DC} \cdot X_A}{U_2 \cdot \sqrt{6}} \quad (1.4)$$

$I_{DC}$  hodnota usměrněného proudu

$X_A$  rozptylová reaktance transformátoru usměrňovače

$U_2$  efektivní fázová hodnota napájecího napětí



obr. 9 Zobrazení úhlu komutace v simulovaném obvodu

Účinník základní harmonické má vždy induktivní charakter. Napětí nakrátko trakčního transformátoru bývá vždy voleno tak, aby při jmenovitém zatížení byl úhel překrytí roven cca 25 elektr. stupňů, z čehož nám pak vychází účinník trakčního odběru při jmenovitém zatížení TNS zhruba 0,976.

### 1.3.6 Amplitudový zákon

Provedením Fourierovy analýzy odebíraného proudu dostaneme pro třífázový můstkový usměřňovač

$$i_{R(t)} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left( \sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \frac{1}{11} \sin 11\omega_1 t + \dots \right) \quad (1.5)$$

Rozborem daného vztahu zjistíme, že se zde objevují pouze harmonické určitých řádů  $h$

$$h = pl \pm 1 \quad (1.6)$$

kde  $l$  je celé číslo a  $p$  pulznost usměřňovače. Harmonické, které splňují podmínky dané rovnice, nazýváme charakteristické harmonické. Pro jejich velikost platí

$$I_h = \frac{1}{h} \cdot I_1 \quad (1.7)$$

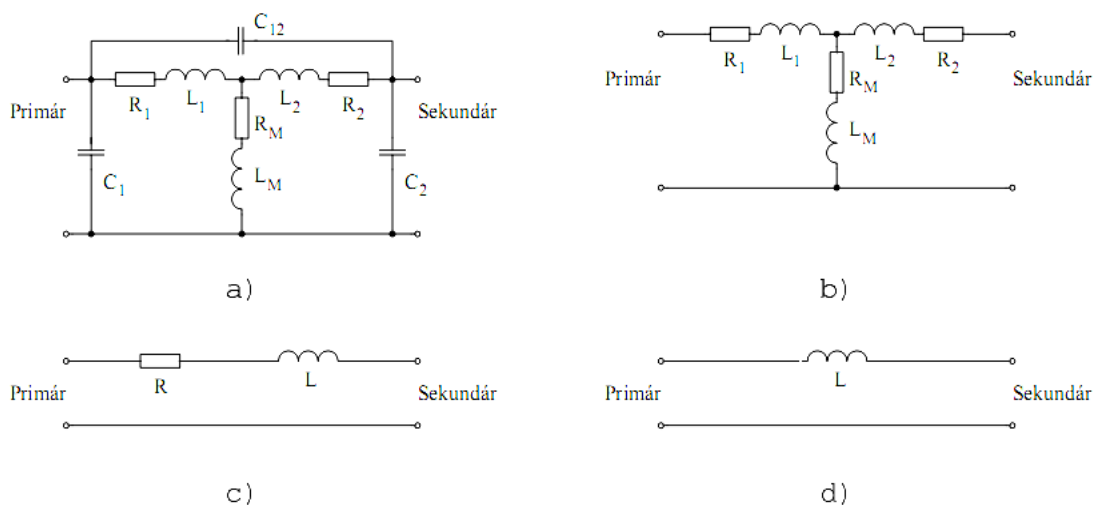
Tento vztah je označován také jako amplitudový zákon a platí i pro efektivní hodnoty vyšších harmonických proudů. Amplitudový zákon obecně platí pro všechny usměřňovače za předpokladu jistých podmínek:

- napájecí soustava je symetrická
- na vstupu usměřňovače je napětí sinusového průběhu
- indukčnost ve stejnosměrném obvodu  $L_{SS}$  je blízká  $\infty$
- zkratový výkon napájecí soustavy  $S_{KS}$  je blízký  $\infty$  tj. vstupní indukčnost blízká 0
- zanedbáme ztráty usměřňovače

Amplitudový zákon předpokládá obdélníkový průběh odebíraného proudu ze sítě a udává tedy nejvyšší teoreticky možné hodnoty.

## 1.4 Náhradní schéma transformátoru usměrňovače

Vezmeme-li trakční transformátor z pohledu EMC, lze na něj po značném zjednodušení pohlížet jako na podélnou indukčnost danou napětím nakrátko daného transformátoru. Postup zjednodušení je patrný z následujících obrázků.



obr. 10 Náhradní schéma transformátoru z pohledu energetických harmonických [2]

Na obrázku 10a je úplné náhradní schéma trakčního transformátoru z pohledu energetických harmonických. Na druhém dílčím obrázku „b“ jsme zanedbali veškeré kapacity.

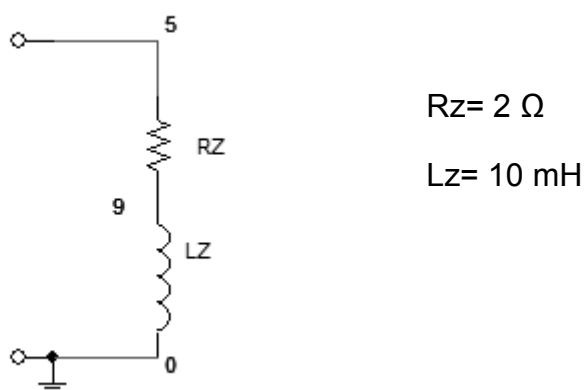
Třetí dílčí obrázek „c“ vypouští vliv příčné magnetizační větve, jelikož při použití moderních magnetických materiálů jsou magnetizační proudy a ztráty zanedbatelné, a proto lze v takovém případě sloučit primární a sekundární rozptyly i ohmické složky do společných prvků.

Konečný obrázek „d“ dává nejjednodušší možné náhradní schéma usnadňující veškeré výpočty a simulace. Veškeré zanedbané prvky uvedené výše se ve sledované frekvenční oblasti neuplatňují, což dokazuje řada teoretických i experimentálních studií. [4]



### 1.5 Náhradní schéma zátěže trakčního usměrňovače

Po prostudování řady materiálů a po dohodě s vedoucím práce doc. Hlavou jsme pro případ simulací přistoupili k návrhu náhradní zátěže usměrňovače, kde se vyskytuje pouze indukčnost, nahrazující indukčnost trakčního vedení a hlavně stejnosměrného trakčního motoru lokomotivy a činný odpor nahrazující stejnosměrný odpor trakčního motoru. Zvolené hodnoty byly vybrány jako kompromis mezi skutečnými hodnotami a hodnotami vhodnými pro simulaci, protože tématem této práce není řešení konkrétního, skutečného zapojení, ale jedná se o simulační studii daného problému.

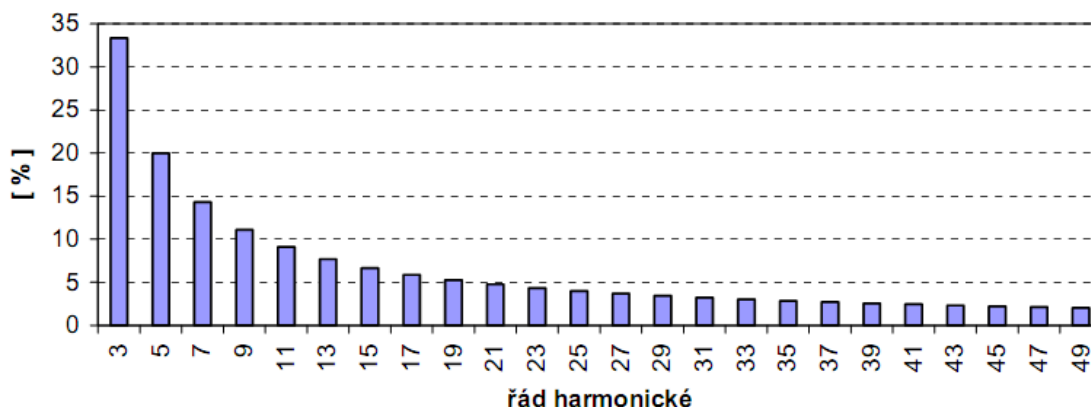


obr. 11 Schéma náhradní zátěže trakčního usměrňovače

## 2. PŘÍČINY DEFORMACE SÍTOVÉHO NAPĚTÍ

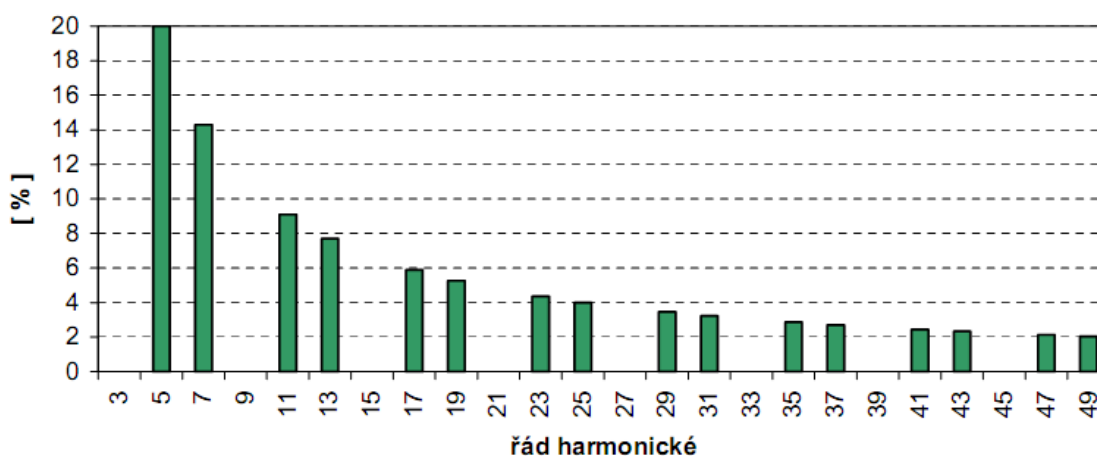
### 2.1 Technické příčiny deformace sinusovky napětí sítě 22 kV harmonickými

Technickými příčinami deformace jinak sinusového průběhu napětí v síti 22 kV jsou právě provozy jiných šestipulzních usměrňovačů. Může se jednat jak o jiné sousední měřírny, tak i o řadu jiných menších odběrů s usměrňovači.



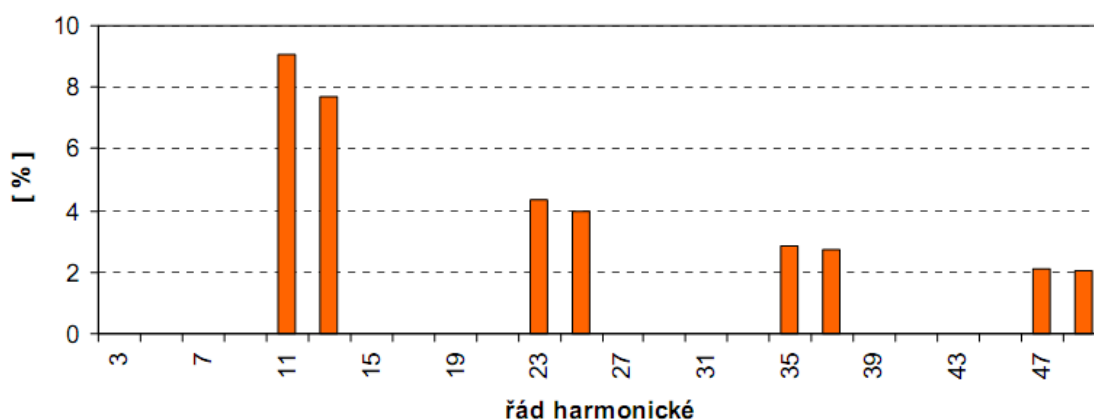
obr. 12 Teoreticky maximální obsah proudových harmonických jednofázového usměrňovače

Z obr. 12 je patrné, že jednofázový usměrňovač produkuje na straně napájení všechny liché harmonické. Jednofázové usměrňovače jsou v dnešní době obsaženy téměř v každém spotřebiči obsahujícím nějakou elektroniku. Převážně se jedná o pulzní zdroje, které mají na svém vstupu právě jednofázový usměrňovač.



obr. 13 Teoreticky maximální obsah harmonických šestipulzního usměrňovače

Šestipulzní usměrňovač jak je vidno neprodukuje na straně napájení harmonické řádu 3 a jejich násobky. Množství ostatních harmonických je stejné jako u jednofázového usměrňovače. Tyto usměrňovače lze nalézt v třífázových spotřebičích, které potřebují pro svojí činnost usměrněné stejnosměrné napětí. Dobrým příkladem jsou v tomto velké třífázové invertory na svařování, kde na vstupu je třífázový můstkový usměrňovač.



obr. 14 Teoreticky maximální obsah harmonických proudů dvanáctipulzního usměrňovače

Dvanáctipulzním usměrňovačem jsou produkovány pouze harmonické s nejnižším řádem 11 a 13 dále pak už pouze jejich násobky. Použití dvanáctipulzního usměrňovače v běžných zařízeních není příliš časté a je používáno u zařízení, která potřebují vysoké vyhlazení stejnosměrného napětí. Příkladem může být třeba citlivá elektronika apod. Druhým případem využití dvanáctipulzních usměrňovačů je potřeba snížit emisi vyšších harmonických do energetické sítě, a to hlavně u velkých odběrů jako jsou frekvenční měniče a jiné velké usměrňovací jednotky.

Jedním z důvodů nárůstu rušení v energetice je zvyšování výkonů a hustoty rozvodných sítí a velké změny v charakteru spotřebičů elektrické energie. Dříve byly hlavními odběrateli elektřiny točivé stroje a tepelné spotřebiče. V dnešní vyspělé době, kdy je elektronikou protkán snad každý spotřebič, se jedná hlavně o odběry nelineární, jako jsou měniče pro pohony i velkých výkonů, elektrické pece, statické regulátory, zářivky a výbojky, tak i v neposlední řadě drobné spotřebiče s pulzními zdroji. Vždyť téměř každý zdroj používaný v elektronice je pulzní a od klasických

se ve velké míře upouští. V neposlední řadě se jedná i o odběry trakčních měníren pro MHD, metro, doly či ČD. Důsledkem změn charakteru spotřebičů jsou zvýšené odběry jalové složky výkonu, což má za následek zvýšení energetických ztrát jak v rozvodu, tak i ve výrobě elektrické energie. Dalšími důsledky je deformace časového průběhu napětí rozvodné sítě s následky zvýšení energetických ztrát v rozvodu a výrobě elektrické energie, zvýšení energetických ztrát ve spotřebičích, problémy v regulačních prvcích a v neposlední řadě ve snižování typového výkonu výkonových transformátorů. Další příčinou je nesouměrné zatížení třífázové soustavy jednofázovými odběry jako jsou například trakční napáječky soustavy 25 kV 50 Hz ČD. Následky nesymetrického odběru se mohou projevit rozdílným fázovým napětím a tím i změněnou funkčností třífázových spotřebičů.

## 2.2 Zdroje vyšších harmonických

Harmonické proudy jsou generovány nelineárními zdroji jako například:

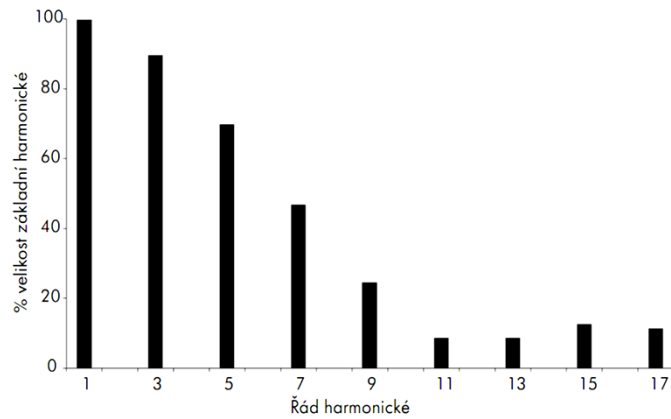
Jednofázové

- spínané napájecí zdroje
- elektronické předřadníky kompaktních svítidel
- malé zdroje nepřerušovaného napájení(UPS)

Třífázové

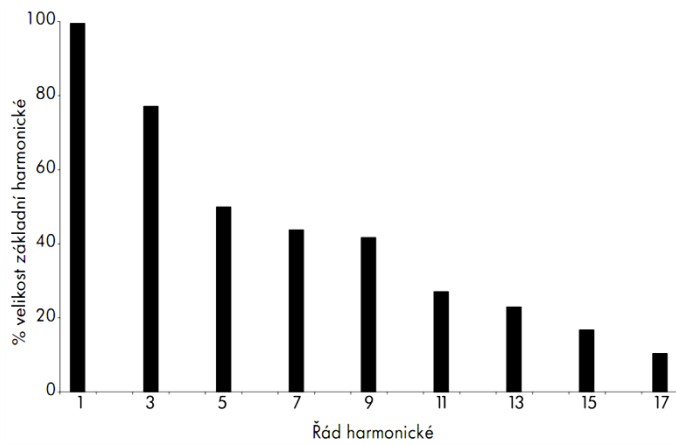
- elektronické regulační pohony
- velké UPS jednotky

Většina moderních elektronických zařízení dnes používá spínané napájecí zdroje. Výhodou těchto zdrojů je značné zmenšení rozměrů, hmotnosti a snížení ceny oproti klasickému napájecímu zdroji. Značnou nevýhodu mají v nelineárním pulsujícím odběru proudu se značným obsahem třetí a dalších vyšších harmonických, jak ukazují obr. 15 a 16. V podstatě stejné chování mají i zmiňované jednofázové UPS. V poslední době se sice objevují napájecí jednotky s tzv. vstupem s kompenzovaným účinníkem. Cílem je docílit odběru proudu jakoby se jednalo o odporovou zátěž. Tato technologie je značně nákladná a u běžných zařízení pro domácnosti a "normální" použití, kde je cílem co nejnižší cena, nemají prozatím šanci uspět.



obr. 15 Spektrum harmonických standardního PC [13]

Kompaktní svítidla (CFL) dnes, také díky nátlaku EU, nahrazují klasické žárovky s wolframovým vláknem. Miniaturní elektronický předřadník je umístěn v patici svítidla do které je umístěna zářivková trubice. Svítidla s výkonem 11 W jsou prodávána jako náhrada za 60W žárovku a udávaná životnost převyšuje 8000 hodin. Spektrum harmonických odebíraných takovýmto svítidlem je na obr. 16.



obr. 16 Spektrum odebíraného proudu typické "úsporné" žárovky [13]

Masové nasazení těchto svítidel bude v budoucnu znamenat nemalé problémy pro distributora elektrické energie.

U třífázových spotřebičů je problém vyšších harmonických o něco zjednodušen. Většina takovýchto spotřebičů v sobě obsahuje třífázový můstkový neboli šestipulzní usměrňovač. Každý takovýto usměrňovač je zdrojem páté a sedmé harmonické a jejich celistvými násobky. Tímto jsou vyrušeny některé frekvence harmonických a rušení je o něco nižší. Na druhou stranu je zase nutno poznamenat, že u třífázových spotřebičů se jedná o podstatně větší odběry než-li u jednofázových.

### 2.3 Vznik vyšších harmonických napětí

Uvažujeme-li polovodičový usměrňovač jako proudový zdroj vyšších harmonických proudů, znamená to, že je do sítě dodáván konstantní proud a napětí vyšších harmonických stoupá úměrně s impedancí zátěže

$$\overline{U}_h = \overline{Z}_h \cdot \overline{I}_h \quad (2.1)$$

Toto napětí se pak skládá s napětím první harmonické z napěťových zdrojů a důsledkem je zkreslení křivky napětí.

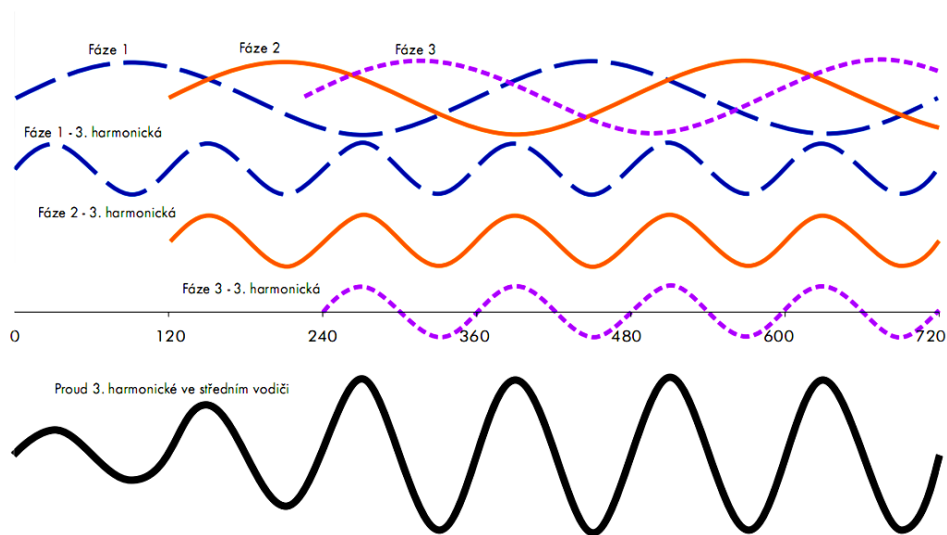
### 2.4 Možné problémy způsobené harmonickými

Přenosová síť, připojené transformátory nebo kompenzační zařízení v průmyslu jsou přepočítané a dimenzované na jmenovitou frekvenci sítě, tj. např. 50 Hz. Vysokofrekvenční podíly, jež představují vyšší harmonické, v provozech značně zvyšují náklady. Vyšší pořizovací náklady na elektrickou energii, větší ztráty na přenosových cestách, zvýšené náklady kvůli většímu zatížení jalovým výkonem a nutnost předimenzování komponent a částí zařízení jsou jen některé z nich. Kvůli tomuto dodatečnému zatížení se mohou dokonce přístroje přehřát a vypadnout.

#### 2.4.1 Přetížení středního vodiče

V třífázové soustavě jsou jednotlivá napětí fází vzájemně posunuta po 120 °. V případě symetrického zatížení všech tří fází neteče středním vodičem žádný proud. Jestliže nastane stav, kdy některá z fází nebo i více fází je zatížena jinak, začne středním vodičem protékat proud, který je vektorovým součtem všech tří fázových proudů a který je menší než proudy fázové. Z tohoto důvodu se v minulosti používaly v třífázovém rozvodu elektrické energie kabely se středovým vodičem o nižším průřezu než byly průřezy fázových vodičů.

Pakliže se při symetrickém zatížení třífázového rozvodu ve středním vodiči proud základní harmonické neobjeví, nelze to samé tvrdit o proudech vyšších harmonických. Proudů třetí harmonické a jeho celistvé násobky se ve středovém vodiči sčítají. Velmi dobře je to vidět na následujícím obr. 17.



obr. 17 Sčítání vyšších harmonických proudů ve středním vodiči [13]

V tomto případě 70 % proudu třetí harmonické má v každé fázi za následek 210 % fázového proudu ve středním vodiči. Studie v komerčních budovách ukazují, že proud vyšších harmonických ve středových vodičích se pohybují mezi 150 % až 210 % hodnoty fázového proudu základní harmonické 50 Hz. [13]

Při návrhu elektrických rozvodů musí být brán zřetel i na charakter zátěží. Jestliže se bude jednat o zdroje vyšších harmonických, musí s tím být počítáno a kabelové trasy musejí být dimenzovány na vyšší zatížení, než kdyby se jednalo o lineární spotřebiče.

## 2.4.2 Vlivy na transformátory

Transformátory jsou ovlivňovány vyššími harmonickými tak, že zvyšují ztráty vířivými proudy, které jsou za běžných okolností 10 % při plném zatížení transformátoru. Tyto ztráty rostou s kvadrátem řádu harmonických. V případě transformátoru zatíženého plně nelineární zátěží jako jsou IT technologie, mohou být ztráty až dvojnásobné oproti ztrátám s lineární zátěží. Výsledkem je pak nadměrné oteplování transformátoru a snížení jeho životnosti.

## 2.4.3 Snížení jmenovitého výkonu transformátoru

V případě provozu transformátorů s nelineární zátěží mohou nastat situace, kdy vliv vyšších harmonických je natolik významný, že jeho jmenovitý výkon na jmenovité frekvenci musí být snížen o činitel K. Činitelem K se pak násobí jmenovitý výkon transformátoru výrazem  $1/K$ . Parametr K lze vypočítat následovně

$$K = \sqrt{1 + \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\sum_{h=2}^{h=N} \left[ h^q \cdot \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \right]}{1 + \sum_{h=2}^{h=N} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2}} \quad (2.2)$$

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  $N=40$

V praxi to má za následek snížení typového výkonu transformátoru a při nerespektování tohoto faktu je transformátor přetěžován čímž se rapidně snižuje jeho životnost.



## 2.5 Kvalita elektrické energie dle PNE

Při připojování velkých odběrů do distribuční sítě je potřeba splnit určité předem dané podmínky dodavatele elektrické energie na charakter odebíraného výkonu. Při nesplnění jeho požadavků má právo potenciačního odběratele nepřipojit do energetické sítě, proto je dobré znát předem charakter připojeného zařízení a jeho chování vůči elektrické síti, které je následně po připojení ověřováno příslušnými orgány.

Výrazem kvalita elektrické energie je souhrn následujících technických parametrů

- kmitočet sítě
- velikost napětí
- odchylky napětí
- kolísání napětí
- krátkodobé poklesy napětí
- krátká přerušení napětí
- dlouhodobá přerušení napětí
- dočasná nadpětí síťového kmitočtu
- přechodná přepětí
- nesymetrie napětí trojfázové soustavy
- harmonické
- mezipharmonické
- napětí síťového signálu (HDO)

PNE 33 3430-7 udává úroveň jednotlivých napěťových harmonických v předávacím místě. Předávacím místem je myšlen bod sítě, kde je připojen daný odběratel k síti dodavatele. Velikost úrovní se liší v závislosti na napěťové hladině. Pro napěťové úrovně NN a VN platí následující údaje:

řád harmonické	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
[ % ]	5,0	6,0	5,0	1,5	3,5	3,0	0,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5

tab. 1 Úroveň napěťových harmonických dle PNE 33 3430-7

Mimo hodnot předepsaných pro jednotlivé harmonické musí být současně splněna podmínka hodnoty celkového činitele zkreslení THD menšího nebo rovno 8 %. THD zahrnuje všechny harmonické složky až do řádu 40. Definován je následovně

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{25} U_h^2}}{U_1} \quad (2.3)$$

Efektivní hodnota proudu  $I$  je dána

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h \rightarrow \infty} I_h^2} \quad (2.4)$$

kde  $I_h$  jsou efektivní hodnoty jednotlivých složek řádu  $h$ .

Obsah harmonických například proudu je dán vztahem

$$\sqrt{\sum_{h=2}^{h \rightarrow \infty} I_h^2} \quad (2.5)$$

Činitel harmonického zkreslení proudu  $\mu$  vypočteme následovně

$$\mu = \frac{I_1}{I} = \frac{DF}{\text{THD}} \quad (2.6)$$

kde  $I_1$  je efektivní hodnota základní harmonické.

Činitel harmonického zkreslení například proudu

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=25} I_h^2}}{I} \quad (2.7)$$

Opravdový účinník PF označovaný  $\lambda$  je dán vztahem

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.8)$$

Pro účinník základní harmonické DPF označovaný  $\cos \varphi$  lze psát

$$DPF = \frac{PF}{\mu} \quad (2.9)$$

Dle [8] platí, že činný výkon neharmonického proudu a napětí je roven součtu činných výkonů jednotlivých harmonických.

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_k(t) \cdot i_l(t) dt \quad (2.10)$$

Po úpravách lze poté napsat vztah

$$P = P_0 + P_1 + P_3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} P_k \quad (2.11)$$

Zdánlivý výkon je pak následně zaveden pouze jako pomocná veličina z výpočtových důvodů.

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (2.12)$$

Jalový výkon je zase veličina udávající množství energie kmitající mezi zdrojem a spotřebičem

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \sin \varphi_k \quad (2.13)$$

U neharmonických průběhů dochází k nerovnosti čtverců výkonů

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (2.14)$$

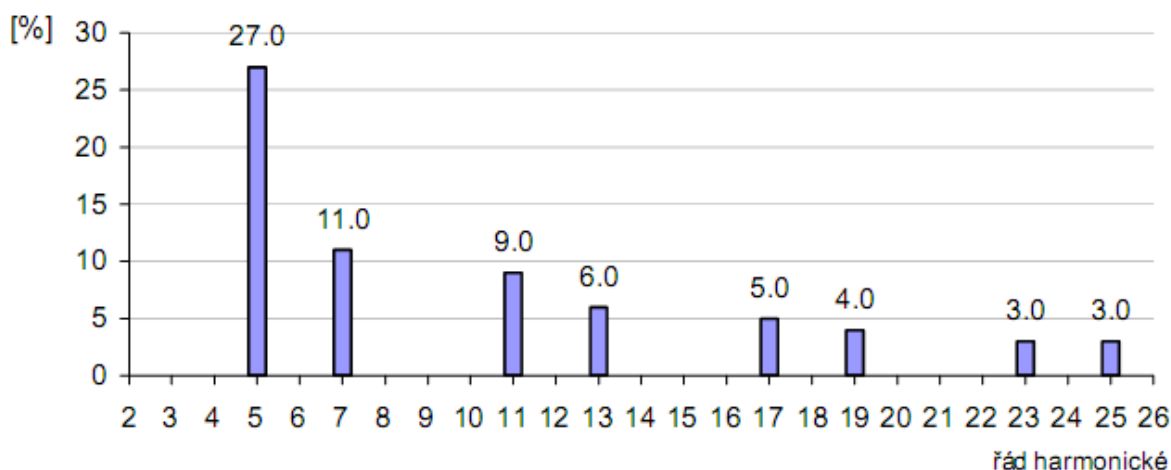
proto se zavádí deformační výkon

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (2.15)$$

Deformační výkon je obdobně jako jalový neúčinný a zvyšuje ztráty v přenosových sítích.

## 2.6 Odhad hodnot emitovaných vyšších harmonických dle PNE

Norma PNE 33 3430-0 se zabývá odhadem hodnot vyšších harmonických emitovaných do energetické sítě usměřovači s indukční filtrací, což odpovídá případu trakčních usměřovačů. Hodnoty uvedené v příslušné normě nejlépe vystihuje následující obr. 18.

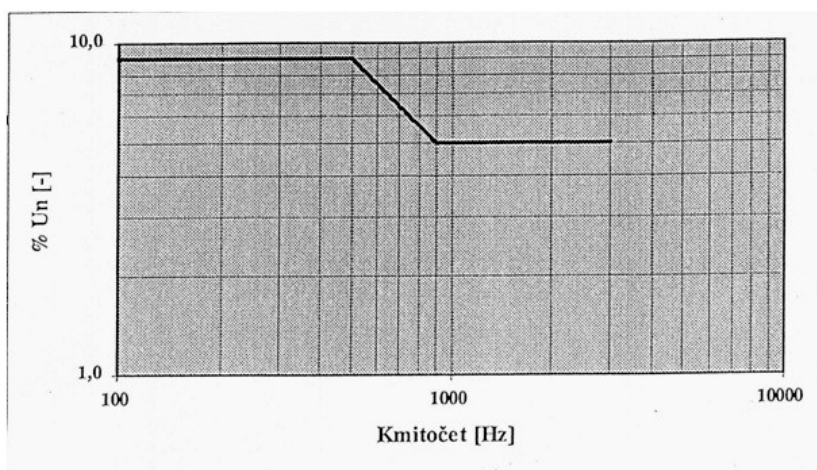


obr. 18 Odhad maximálního obsahu vyšších harmonických proudů dle PNE 33 3430-0, emitovaných trakčním transformátorem do energetické sítě

## 2.7 Omezení zpětných vlivů na HDO dle PNE333430-6 ed.2

Nemá-li docházet k nepřijatelnému ovlivňování systému HDO odběrateli a jejich zařízeními připojenými na distribuční síť, musejí být hodnoceny jejich vlivy jako je změna úrovně signálu, zatížení vysílačů a emise rušivých napětí. Při posuzování je třeba brát celkový vliv celého zařízení na distribuční síť nikoli vliv jednotlivých částí zařízení. Výchozí hodnota pro posouzení vlivu je změřená úroveň signálu HDO ve společném napájecím bodě bez nově připojeného zařízení odběratele. Zároveň je třeba brát v úvahu úroveň signálu HDO při nestandardních konfiguracích sítě distributora. Vysílače signálu HDO se dimenzují dle výsledné impedance distribuční sítě na kmitočtu vysílaném HDO, kdy tato impedance je složena z impedancí zařízení jednotlivých odběratelů a impedance zařízení distributora. Vliv odběratelů elektrické energie na signál HDO může být tím větší, čím větší je smluvní výkon daného odběratele.

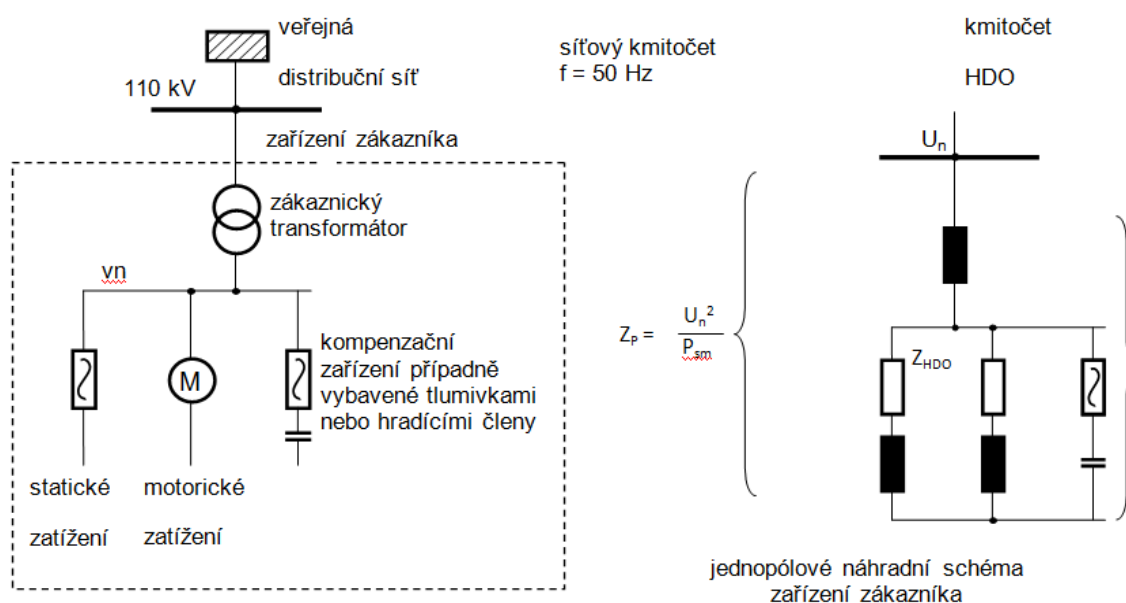
Příliš vysoké úrovně signálu HDO mohou způsobovat rušení elektronických zařízení a jiné další problémy. Maximální úrovně signálu HDO jsou stanoveny Meisterovou křivkou.



obr. 19 Meisterova křivka průběhu maximálních hodnot signálů HDO v sítích nn a vn, kde  $U_n$  je jmenovité napětí sítě

## 2.7.1 Zařízení odběratelů se společným napájecím bodem v síti 110 kV

Jestliže distributor provozuje vysílače HDO do úrovně 110 kV a je-li společný napájecí bod rovněž v této síti musí být impedance zařízení odběratele v něm připojená dostatečně vysoká jinak dojde k nedovolenému snížení úrovně signálu HDO. V případě dostatečného signálu HDO ve společném napájecím bodě se jeho ovlivnění posuzuje podle hodnoty impedančního činitele  $\alpha$ .



obr. 20 Zařízení zákazníka se společným napájecím bodem v síti 110 kV

$$\alpha = \frac{Z_{HDO}}{Z_p} = \frac{Z_{HDO}}{U_n^2 / P_{sm}} \quad (2.16)$$

$\alpha$  impedanční činitel zařízení odběratele

$Z_{HDO}$  absolutní hodnota impedance zařízení odběratele na kmitočtu HDO

$Z_p$  připojovací impedance zařízení odběratele na kmitočtu 50 Hz

$U_n$  jmenovité napětí sítě

$P_{sm}$  smluvní výkon odběratele

Minimální hodnota impedančního činitele  $\alpha$  činí 0,8. V odůvodněných případech a za jistých předem daných okolností může distributor stanovit vyšší hodnotu  $\alpha$ . Například odběratel požaduje připojení ze sítě 110 kV o nasmlouvaném výkonu 12,5 MW.

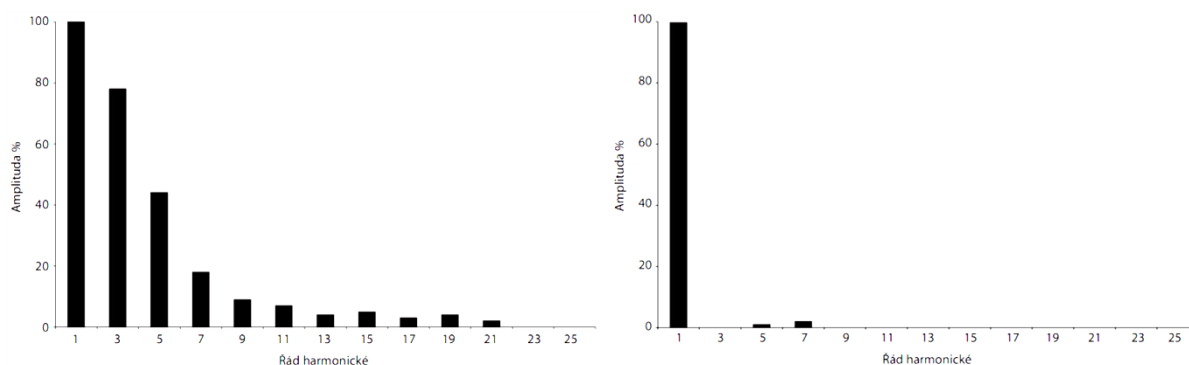
Aby byla dodržena minimální hodnota činitele  $\alpha$ , předepíše distributor následující hodnotu impedance zařízení ve společném napájecím bodě vztaženou k úrovni 110 kV.

$$Z_{HDO} = \frac{\alpha \cdot U_n^2}{S_{sm}} = 0,8 \cdot \frac{110^2}{12,5} = 774,4 \Omega \quad (2.17)$$

Tato hodnota bude jedním z podkladů pro návrh daného zařízení. Po jeho uvedení do provozu se hodnota impedance ověří měřením.

## 2.8 Omezování vyšších harmonických

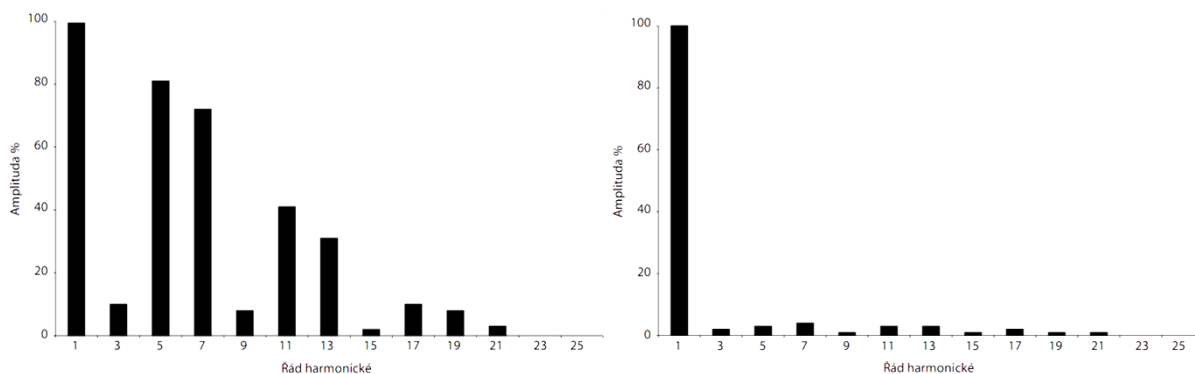
Možná opatření lze rozdělit na aktivní a pasivní. Do pasivních lze zařadit specificky působící absorpční obvody, pasivní filtry s vyššími harmonickými a v neposlední řadě použití 12-ti nebo 18-ti pulzní zapojení usměrňovačů. Novou a účinnou metodou je použití aktivních filtračních systémů. Na základě stálého měření parametrů sítě, napětí a proudů, přepočítává aktivní filtr doplňky k aktuálním vyšším harmonickým. Následně cíleně napojí aktivním zdrojům proud tak, že součtem všech proudů vznikne opět sinusová forma proudu. V porovnání s pasivními systémy je konstrukce aktivních filtračních systémů značně finančně nákladná. Vyžaduje velmi rychlé zaznamenávání naměřených údajů, vysoký výpočetní výkon regulátoru a taky rychlé spínací IGBT. Ztrátový výkon je v porovnání k pasivním filtrům vyšších harmonických při podobném vysokém stupni účinnosti výrazně nižší.



obr. 21 a) Nefiltrované spektrum proudu odebíraného PC (personal computer)

b) Plně filtrované spektrum proudu odebíraného PC [14]

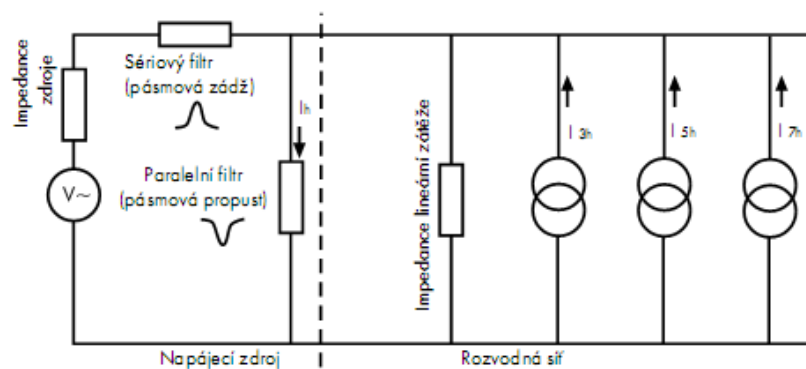
Z obr. 21 je patrné, jak velký je rozdíl mezi proudem odebíraným samostatným PC a mezi tím samým odběrem ovšem filtrovaným aktivním filtrem. Harmonické zkreslení proudu je díky aktivnímu filtru sníženo z 93 % na cca 3 % a efektivní hodnota proudu se snížila o 21 %.



obr. 22 a) Spektrum odebíraného proudu nefiltrované zátěže s regulovanými pohony  
b) Spektrum s využitím aktivních filtrů [14]

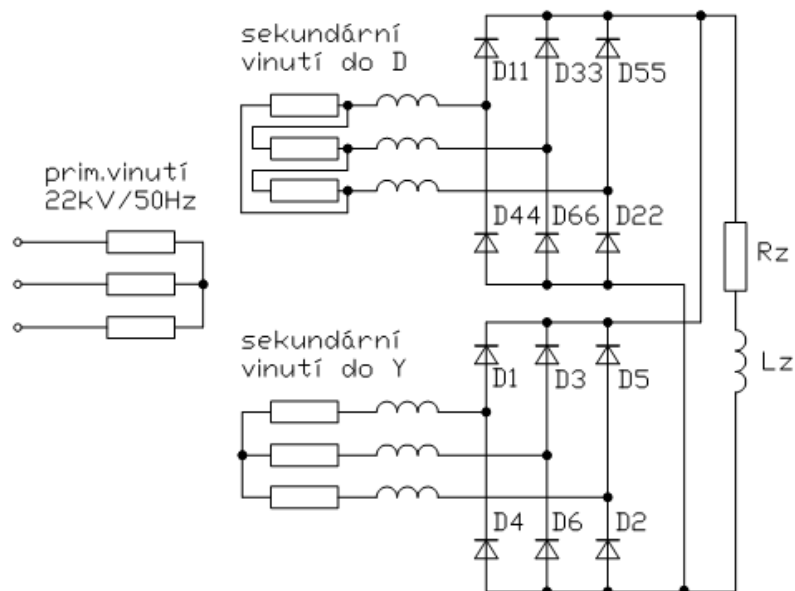
Pro aplikace drážních zařízení je zajímavější obr. 22. Zde je znázorněno spektrum odebíraného proudu částečně zatíženým regulovaným pohonem. Přidáním aktivního filtru harmonického kondicionéru se spektrum z obr. 22a změní na obr. 22b. Celkové harmonické zkreslení THD se sníží ze 124 % na pouhých 13,4 % a efektivní hodnota proudu se sníží o 30 %.

Pasivní filtry se používají v podstatě tak, aby zajistily cestu s nízkou impedancí pro proudy harmonických, které by se normálně uzavíraly někde v energetické síti. V tomto případě se jedná o paralelní filtr. Paralelní filtry se řadí paralelně k spotřebiči. Díky těmto filtrům se proud vyšších harmonických uzavírá přes laděné obvody, které mohou být navrhovány pouze pro jednu harmonickou nebo jako širokopásmové. Sériové filtry jsou navrhovány tak, aby blokovaly harmonické proudy. Řadí se v sérii se zátěží. Na obr. 23 je znázorněno zapojení sériového a paralelního pasivního filtru v jednom obvodu.



obr. 23 Aplikace sériového a paralelního filtru najednou [13]

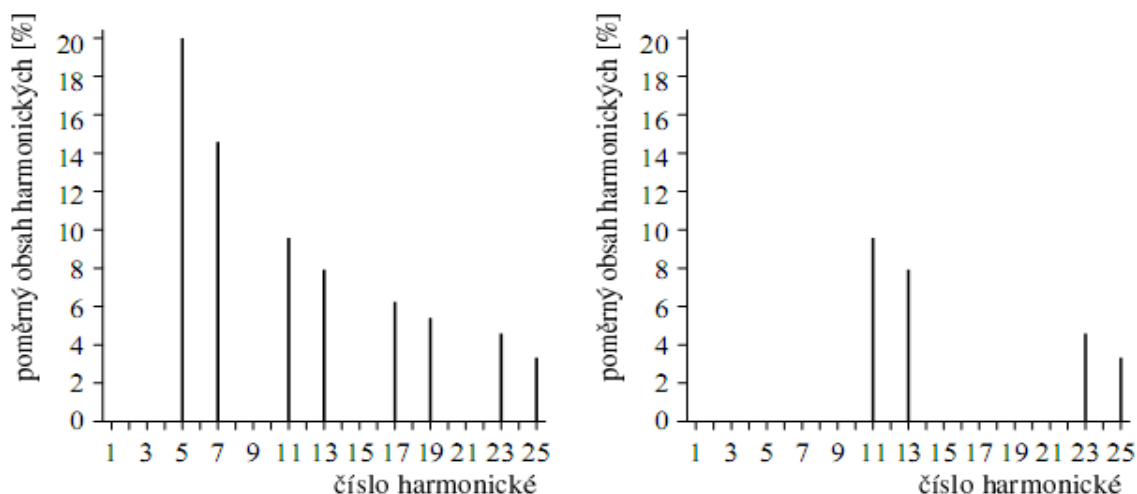
Omezování vyšších harmonických v prostředí ČD se děje hlavně používáním dvanáctipulzních usměrňovačů v dráhových měničích. V podstatě se jedná o dva šestipulzní můstkové usměrňovače zapojené paralelně. Výkonový transformátor má kromě primárního vinutí 22 kV dvě sekundární vinutí. Jedno vinutí je spojeno do hvězdy a druhé do trojúhelníka. Tímto je zajištěn posun sdružených napětí obou sekcí o 30 elektrických stupňů.



obr. 24 Zapojení dvanáctipulzního usměrňovače



Výstupní stejnosměrné napětí obsahuje superponovanou harmonickou složku 600 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz atd. Oproti šestipulznímu zapojení tedy neobsahuje složky 300 Hz, 900 Hz či 1500 Hz. Právě složka 900 Hz je nejdůležitější pro telefonní provoz. Je v podstatě nejvíce rušící a nejvíce slyšitelná.



obr. 25 Spektrum primárního proudu usměrňovače  
a) šestipulzního b) dvanáctipulzního [2]

Neméně podstatnou výhodou použití dvanáctipulzního usměrňovače je podstatné omezení harmonických na straně 22 kV kde se objevuje až 11. a 13. harmonická a dále pak až 23. a 25., čímž odpadá použití filtrů na potlačení vyšších harmonických.

### 3. ANALÝZA TVARU NAPĚTÍ

Vzorečky použité v této kapitole a jejich odvození byly z velké části přežaty z práce doc. Hlavy viz. [3] a diplomové práce pana Zahradky viz. [12]. Celý postup odvození a jednotlivé výpočty musely být poupraveny a překontrolovány, jelikož obě zmíněné práce se zabývají dvanáctipulzním zapojením oproti šestipulznímu zapojení v této diplomové práci.

#### 3.1 Analýza tvaru napětí na sekundárním vinutí trakčního transformátoru

Pro analýzu tvaru napětí na sekundárním vinutí trakčního transformátoru budeme předpokládat usměrňovač nezatížený stejnosměrným proudem. Za tohoto předpokladu bude fázové napětí sítě 22 kV dáno výrazem

$$u_1 = \sqrt{2}U_1\{\sin \omega t + \sum_h w_h \sin[h(\omega t + \xi_h)]\} \quad (3.1)$$

kde  $w_h$  je poměrná amplituda h-té harmonické daná výrazem  $w_h = \frac{U_h}{U_1}$  a  $\xi_h$  je fáze h-té harmonické vzhledem k základnímu kmitočtu. Pro zjednodušení budeme také počítat převod transformátoru roven jedné. Za tohoto předpokladu máme pro sdružené napětí sekundární části transformátoru spojené do hvězdy výraz

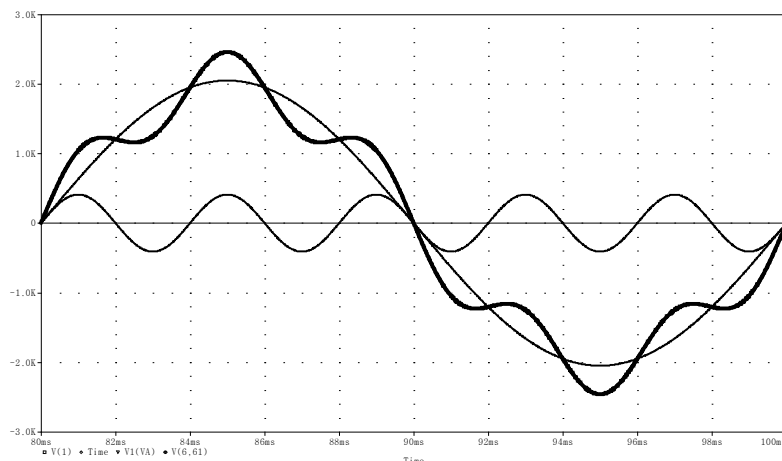
$$u_y = u_1(\omega t) - u_1(\omega t - 120^\circ) \quad (3.2)$$

který se použitím výrazu před tím upraví na výraz

$$\frac{u_y}{u_1} = \sqrt{6} \cos(\omega T - 90^\circ) + \sqrt{2} \sum_h 2w_h \sin(h \cdot 60^\circ) \cos[h(\omega T + \xi_h) - h \cdot 90^\circ] \quad (3.3)$$

Kde pro zjednodušení zavedeme  $\omega T = \omega t + 30^\circ$ . Výraz podléhající sumaci dále upravíme a dostaneme rovnici ve tvaru

$$\frac{u_y}{u_1} = \sqrt{6}\{\sin(\omega T) + \sum_h (-1)^l w_h \sin[h(\omega T + \xi_h)]\} \quad (3.4)$$



obr. 26 Průběh napětí na sekundární straně trakčního transformátoru při 20 % obsahu 5. harmonické

Na sekundárním vinutí transformátoru se vyšší harmonické z energetické sítě 22 kV přenesou v poměru závitů stejně jako základní kmitočet sítě 50 Hz.

### 3.2 Stejnosemřná složka výstupního napětí usměrňovače

Nyní určíme vliv obsahu vyšších harmonických primárního napětí na stejnosměrnou složku výstupního napětí trakčního usměrňovače a vliv těchto harmonických na charakteristiku napětí, proudu. Použijeme zde novou veličinu  $U_{di}$  rovnající se stejnosměrné složce výstupního napětí usměrňovače při ideálním sinusovém napětí.

$$U_{di} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_1 \quad (3.5)$$

Stejnosemřná složka je dána vztahem

$$U_{diy} = \frac{3}{\pi} \int_{60^\circ}^{120^\circ} u_y(\omega T) d(\omega T) \quad (3.6)$$

který po dosazení vzorce (3.1) přejde na tvar

$$\frac{U_{diy}}{U_{di}} = 1 + \sum_h (-1)^l \frac{1}{h} w_h \cdot \cos(h \cdot \xi_h) \quad (3.7)$$

Ze vzorce výše plyne, že stejnosměrná složka výstupního napětí není závislá pouze na poměrné amplitudě jednotlivých vyšších harmonických, ale též závisí na jejich fázi  $\xi_h$  vůči základní frekvenci.

### 3.3 Harmonická analýza sekundárního napětí

Rovnice sekundárního napětí usměrňovače je dána

$$\frac{u_y}{U_1} = \sqrt{6} \{ \sin(\omega t) + \sum_h (-1)^l w_h \sin[h(\omega T + \xi_h)] \} \quad (3.8)$$

kde  $\omega T = \omega t + 30^\circ$ .

Analyzované napětí předpokládáme ve tvaru

$$\frac{u_{dy} - U_{diY0}}{\sqrt{6}U_1} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{a_k}{\sqrt{6}U_1} \cos(6k\omega T) + \frac{b_k}{\sqrt{6}U_1} \sin(6k\omega T) \right] \quad (3.9)$$

kde  $U_{diY0}$  značí stejnosměrnou složku výstupního napětí.

Nyní určíme oba koeficienty  $a_k$  a  $b_k$

$$\frac{a_k}{\sqrt{6}U_1} \cdot \frac{\pi}{6} = \int_{60^\circ}^{120^\circ} \{ \sin \omega T + \sum_h w_h \sin[h(\omega T + \xi_h)] \} \cdot \cos(6k\omega T) \cdot d(\omega T) \quad (3.10)$$

řešením dostaneme

$$\frac{a_k}{\sqrt{6}U_1} = \frac{6}{\pi} \left[ \frac{1}{1-(6k)^2} + \sum_h w_h \frac{h}{h^2-(6k)^2} \cos(h\xi_h) \right] \quad (3.11)$$

Pro druhý koeficient lze psát

$$\frac{b_k}{\sqrt{6}U_1} \cdot \frac{\pi}{6} = \int_{60^\circ}^{120^\circ} \{ \sin \omega T + \sum_h w_h \sin[h(\omega T + \xi_h)] \} \cdot \sin(6k\omega T) \cdot d(\omega T) \quad (3.12)$$

a jeho řešením

$$\frac{b_k}{\sqrt{6}U_1} = -\frac{6}{\pi} \sum_h w_h \frac{6k}{h^2-(6k)^2} \sin(h\xi_h) \quad (3.13)$$

Oba výsledky dosadíme do rovnice (3.9)

$$\begin{aligned} \frac{u_{dy} - U_{diY0}}{\sqrt{6}U_1} = & \frac{6}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{1-(6k)^2} \cos(6k\omega T) + \right. \\ & \left. + \sum_n w_n \frac{1}{h^2-(6k)^2} [h \cos(h\xi_h) \cdot \cos(6k\omega T) - 6k \cdot \sin(n\xi_h) \cdot \sin(6k\omega T)] \right\} \quad (3.14) \end{aligned}$$

Následně zavedeme pomocný úhel  $\psi_h$  a pomocnou veličinu  $H_h$ .

$$H_h \cdot \cos \psi_h = h \cdot \cos(h\xi_h) \quad H_h \cdot \sin \psi_h = 6k \cdot \sin(h\xi_h) \quad (3.15)$$

kde  $H_h$  je označení pro výraz

$$H_h = \sqrt{h^2 \cdot \cos^2(h\xi_h) + (6k)^2 \sin^2(h\xi_h)} = h \cdot \cos(h\xi_h) \cdot \sqrt{1 + \left[ \frac{6k}{h} \operatorname{tg}(h\xi_h) \right]^2} \quad (3.16)$$

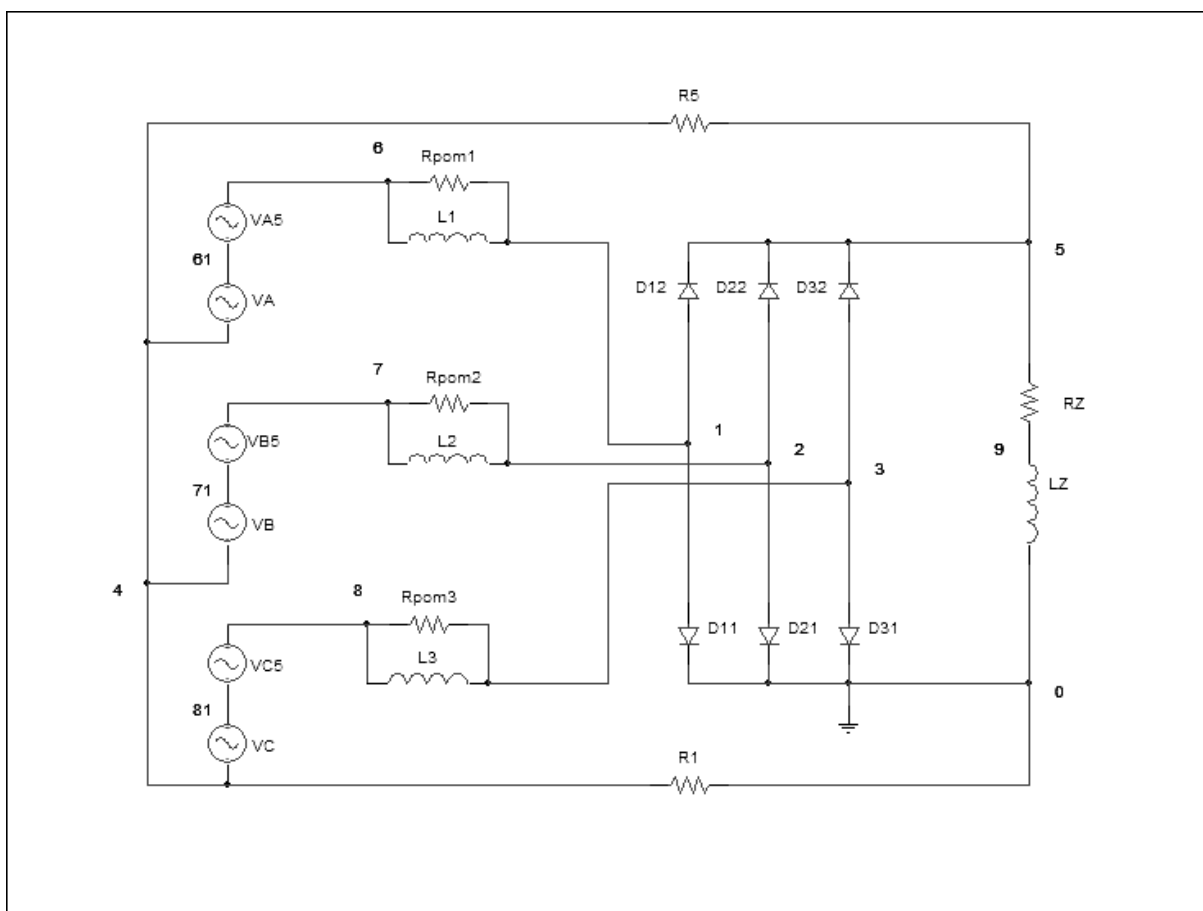
Tímto se původní rovnice zjednoduší a pro výstupní napětí usměrňovače dostaneme harmonický rozvoj ve tvaru

$$\frac{u_{dy} - U_{diY0}}{\sqrt{6}U_1} = \frac{6}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{1-(6k)^2} \cos[6k(\omega T)] + \sum_h (-1)^l \frac{w_h}{h^2-(6k)^2} \cdot H_h \cdot \cos[6k(\omega T) + \psi_h] \right\} \quad (3.17)$$

#### 4. SIMULAČNÍ STUDIE

Simulační studie se zabývala zapojením dle obr. 27, kde simulovaný obvod začíná napěťovými zdroji základní harmonické 50 Hz „VA“ zapojenými v sérii s napěťovými zdroji vyšších harmonických „VA5“. Dále obvod pokračuje sekundárním vinutím transformátoru nahrazeným podélnou indukčností L, následně zapojený trojfázový můstkový usměrňovač, který je zatížen sériovou kombinací odporu  $R_z$  a indukčností  $L_z$ . Primární vinutí je uvažováno v zapojení do hvězdy. Oproti idealizovanému zapojení jsou v obvodu navíc zapojeny pomocné rezistory  $R_{pom1,2,3}$ ,  $R_5$  a  $R_1$ , které jsou zde z důvodu úspěšné simulace, jelikož bez nich by simulace nekonvergovala a program PSPICE by ji ani úspěšně nedokončil.

Obr. 27 vystihuje celé schéma použité při simulaci. Číslice v uzlových spojeních udávají označení pořadí daného uzlu použitého v tzv. netlistu.



obr. 27 Schéma zapojení pro simulaci

V některých případech odmítal program PSPICE při daných parametrech konvergovat, proto musely být některé hodnoty nepatrně pozměněny. Například hodnota efektivního napětí zdroje páté harmonické musela být snížena z 205 V, kdy simulace odmítala konvergovat na hodnotu 204 V, kdy simulace proběhla bez problémů. Porovnáním průběhů při hodnotách 204 V a 206 V byly zjištěny minimální rozdíly mezi nimi, tudíž nahrazení hodnoty 205 V hodnotou 204 V lze považovat za zanedbatelné. V jiných případech stačilo změnit některou z hodnot např. na úrovni setin. Vždy byla simulace provedena při hodnotách, co nejbližší hodnotě při které simulace nekonvergovala a následným porovnáním bylo rozhodnuto, zda náhradní hodnotu lze použít. Ve všech případech bylo tuto náhradu možné provést.

#### **4.1 Vliv vyšších harmonických v síti 22kV na výstupní napětí usměrňovačového transformátoru**

Jako první byla provedena simulace vlivu amplitudy 5. a 7. harmonické v energetické síti 22 kV na tvar a spektrální složení výstupního sdruženého napětí usměrňovačového transformátoru. Množství a hodnoty jednotlivých kroků byly zvoleny s ohledem na přehlednost a názornost výsledných grafů. Procentní hodnoty zdrojů vyšších harmonických jsou vztaženy na amplitudu základní harmonické 50 Hz, která je rovna 2050 V což představuje 100 %.

V příloze č. 3 na obrázku p3.1 je zobrazen průběh sekundárního sdruženého napětí transformátoru při změně amplitudy 5. harmonické v síti 22 kV. Z obrázku je patrné jak je toto sdružené napětí značně ovlivněno množstvím 5. harmonické v energetické síti 22 kV, kdy vyšší harmonická je superponována na základní harmonickou. Čím vyšší je hodnota 5. harmonické v síti 22 kV, tím vyšší je deformace sekundárního sdruženého napětí transformátoru.

Po provedení rychlé Fourierovy transformace (FFT) průběhů z obr. p3.1 dostaneme spektrální složení sekundárního napětí transformátoru zobrazené na obrázku p3.2. Hodnoty jednotlivých harmonických jsou vyjádřeny v procentech amplitudy základní harmonické 50 Hz, která činí přibližně 3,5 kV.

Stejně jako pro 5. harmonickou byla simulace provedena i pro obsah 7. harmonické v síti 22 kV. Zde se vyskytl problém s konvergencí a krok 307.5 musel být změněn na hodnotu 305, kdy simulace proběhla už bez problémů.

Průběh sekundárního sdruženého napětí transformátoru je vyobrazeno v příloze č. 4 na obrázku p4.1 a spektrální složení daného průběhu po provedení FFT na obrázku p4.2. Oproti průběhům v příloze č. 3 je na první pohled vidět výskyt menšího množství vyšších harmonických, kdy jsou hodnoty 9. , 15. a 21. harmonické výrazně nižší. Ve spektru se vyskytují v obou případech pouze liché harmonické.

Kompletní výpis programu pro simulaci změny fáze, tzv. netlist, je v příloze č. 2. Pomocí parametru „STEP“ je zde měněna fáze 5. harmonické v rozmezí  $0^\circ$  do  $315^\circ$  s krokem  $45^\circ$ . Na konci netlistu je provedena rychlá Fourierova analýza (FFT) proudu jednou fází trakčního transformátoru, v tomto případě proudu indukčností L1, fázového napětí mezi uzlovými body 1 a 2 a nakonec napětí na výstupu usměrňovače, tedy mezi uzly 5 a 0. Základní harmonická pro FFT byla nastavena 50 Hz a analýza byla provedena do hodnoty 25. harmonické (1250 Hz).

V příloze č. 5 je na obrázku p5.1 zobrazen průběh výstupního sdruženého napětí transformátoru v závislosti na fázi 5. harmonické v síti 22 kV s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz. Amplituda 20 % byla zvolena záměrně dostatečně velká, aby vliv fáze vyšších harmonických byl na první pohled zřejmý. Na obrázku p5.2 je provedena FFT průběhů z obrázku p5.1. Z obrázku je dobře vidět nemalý vliv fáze vyšších harmonických v síti 22 kV na efektivní hodnotu jednotlivých harmonických výstupního napětí transformátoru. Dobře je to vidět na obsahu 5. harmonické ve výstupním napětí transformátoru, kdy se její hodnota, v závislosti na fázi, mění v rozsahu od cca 450 V do cca 820 V.

Stejně jako pro 5. harmonickou byla simulace provedena i pro 7. harmonickou s obsahem 20 % základní harmonické. Výsledný průběh a spektrální složení výstupního napětí transformátoru je v příloze č. 6. Vliv fáze je zde nejvíce patrný na obrázku p6.2. Hodnota 7. harmonické se zde mění v závislosti na fázi 7. harmonické v síti 22 kV v rozsahu 450 V až 750 V.

## 4.2 Vliv vyšších harmonických v síti 22 kV na proud odebíraný usměrňovací jednotkou

Při zkoumání proudu odebíraného usměrňovací jednotkou bylo použito stejné zapojení jako v kapitole 4.1 a také stejný netlist. Rozdíl byl pouze v zobrazení jiných veličin a v použití jiných dat pro provedení FFT. Pro získání hodnot proudu odebíraného jednotkou byla vzata hodnota proudu tekoucího indukčností  $L_1$ . Proud tekoucí paralelně připojeným odporem má lineární závislost a je natolik bezvýznamný, že ho lze pro případ našich simulací zanedbat.

Prvně byl opět zkoumán vliv amplitudy vyšších harmonických v síti 22 kV na průběh a spektrální složení proudu odebíraného usměrňovací jednotkou. Stejně jako v kapitole 4.1 byla zvolena hodnota amplitudy 5. a 7. harmonické 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz.

V příloze č. 7 je na obrázku p7.1 průběh proudu odebíraného usměrňovačem v závislosti na amplitudě 5. harmonické. Z obrázku vidíme, že průběh proudu se nijak zásadně nemění. Na obrázku p7.2 je spektrální složení proudu z obrázku p7.1. Hned na první pohled je vidět, že usměrňovač je zdrojem lichých harmonických.

Stejně jako pro 5. harmonickou v energetické síti byla provedena simulace i pro 7. harmonickou. Průběh odebíraného proudu a jeho spektrální složení je v příloze č. 8. Na obrázku p8.2 je velmi dobře vidět značně menší obsah vyšších harmonických oproti obrázku p7.2. Při nulovém obsahu vyšších harmonických v síti 22 kV je usměrňovač zdrojem proudu vyšších harmonických řádu 5, 7, 11, 13.

Pro simulaci vlivu fáze 5. a 7. harmonické byl použit netlist z přílohy č. 2. Simulace proběhla opět při amplitudě harmonických 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz. Fáze byla měněna stejně jako v kapitole 4.1 v rozmezí  $0^\circ$  až  $315^\circ$  s krokem  $45^\circ$ . Výsledky simulace vlivu fáze 5. harmonické na proud odebíraný usměrňovací jednotkou jsou v příloze č. 9 a pro 7. harmonickou v příloze č. 10.



### 4.3 Vliv vyšších harmonických v síti 22 kV na výstupní napětí usměrňovací jednotky

V této kapitole jsem se zabýval vlivem vyšších harmonických v síti 22 kV na výstupní napětí usměrňovací jednotky. Simulace se také zabývala vlivem amplitudy vyšších harmonických, ale hlavním cílem bylo zjištění vlivu fáze. Grafy jsou uvedeny v příloze č. 11 pro vliv amplitudy 5. harmonické a v příloze č. 12 pro vliv amplitudy 7. harmonické.

Z obrázku p11.2 je velmi dobře vidět, že trakční usměrňovač je vůči straně usměrněného napětí zdrojem sudých harmonických napětí. Z téhož obrázku vidíme, že pokud se na vstupu usměrňovače objeví 5. harmonická s amplitudou 20 % základní harmonické, projeví se to na straně usměrněného napětí výskytem harmonických, které se při čistě sinusovém napájení téměř nevyskytovaly. Nejlépe je to pozorovatelné na obrázku p11.2 u harmonické řádu 4. Při nulové amplitudě 5. harmonické v síti 22 kV se na straně usměrněného napětí 4. harmonická téměř neobjevuje. Oproti tomu při amplitudě 20 % 5. harmonické se v síti 22 kV na straně usměrněného napětí objeví 4. harmonická s amplitudou téměř 600 V. Obdobný projev je možno pozorovat též u harmonické řádu 10 v usměrněném napětí. Při čistě sinusovém napájení jsou na straně usměrněného napětí dominantní pouze napěťové složky řádu 6 a jejich celistvé násobky.

Při obsahu 7. harmonické v síti 22 kV se spektrum usměrněného napětí tolik nemění jak je vidět z obrázku p12.2. Největší vliv amplitudy 7. harmonické se projevuje na straně usměrněného napětí u složky 6. harmonické. Amplituda se z cca 300V, při nulovém obsahu 7. harmonické v napájecím napětí, změní více jak dvojnásobně, jestliže obsah 7. harmonické zvýšíme na 20 %. Oproti obrázku p11.2 jsou zde na obrázku p12.2 dominantní složky 6. řádu a jeho celistvé násobky. Ostatní složky jsou výrazně potlačeny.

#### **4.3.1 Vliv fáze vyšších harmonických v energetické síti 22 kV na výstupní napětí usměrňovací jednotky**

Cílem této práce bylo zjistit jaký vliv má změna fáze vyšších harmonických v energetické síti 22 kV na výstupní napětí trakční usměrňovací jednotky. Stejně jako v celé kapitole 4 bylo použito schéma pro simulaci dle obr. 27 a netlist uvedený v příloze č. 2. Díky programu PSPICE byly získány průběhy výstupního napětí a pomocí FFT, kterou provedl již zmíněný program PSPICE, bylo možno, po převedení dat do tabulkového editoru EXCEL, vytvořit spektrální složení zmíněných průběhů výstupního napětí.

Vyšší harmonické v elektrických sítích mohou mít na jednotlivých frekvencích rozličné amplitudy a co je také velmi důležité i rozdílné fáze oproti základní harmonické. Následující část simulací se tedy věnovala vlivu fáze.

Vliv fáze vyšších harmonických byl nejdříve zkoumán velmi podrobně. Změna fáze byla vždy provedena s krokem  $1^\circ$ . Porovnáním průběhů a následným zvyšováním kroku a zohlednění přehlednosti výsledných průběhů jsem rozhodl o základním kroku  $45^\circ$ . Fáze byla vždy měněna od  $0^\circ$  do  $315^\circ$ . Simulace byla pokaždé provedena pro rozdílné amplitudy dané harmonické. Zvolené amplitudy byly zvoleny stejné jako při simulaci vlivu změny amplitudy, pouze s vynecháním kroku 15 % z důvodu nadbytečnosti a snížení počtu příloh.

V přílohách č. 13 až 15 jsou vyobrazeny změny průběhů výstupního napětí v závislosti na změně fáze 5. harmonické v síti 22 kV. Pod každým z těchto obrázků je navíc vyobrazeno spektrální složení daného průběhu výstupního napětí. Simulace provedené ve výše uvedených přílohách byly provedeny pro rozdílné amplitudy 5. harmonické v síti 22 kV. Použité hodnoty byly zvoleny 5, 10 a 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz. Pro nulovou hodnotu lze průběhy a spektrální složení nalézt v části simulace změny amplitudy.

V přílohách č. 16 až 18 jsou vyobrazeny změny průběhů výstupního napětí v závislosti na změně fáze 7. harmonické v síti 22 kV. Postup simulace byl totožný jako pro 5. harmonickou popsány v předchozím odstavci. Na obrázku p17.2 je vidět u 6. harmonické významný vliv změny fáze, kdy při  $135^\circ$  klesla amplituda již zmíněné 6. harmonické na hodnotu cca 50 V, oproti 500 V při fázi  $0^\circ$ . Z obrázku je opět dobře patrná dominance harmonických řádu 6 a jejich celistvé násobky.

Jako nejlépe vypovídající a tudíž jako výsledné závislosti byly použity grafy v přílohách č. 19 a 20. Všechny grafy jsou dány do příloh z důvodu větší přehlednosti a lepšího porovnání mezi sebou. Jako proměnná byla zvolena změna fáze harmonické v síti 22 kV. Hodnoty vynesené na svislou osu jsou amplitudy jednotlivých harmonických obsažených ve výstupním napětí usměrňovače. Pro každou ze zmíněných harmonických byl sestaven samostatný graf. Po domluvě s vedoucím práce doc. Hlavou byly zvoleny frekvence 100, 200, 300, 400, 500 a 600 Hz. Parametrem v těchto grafech byla amplituda vyšší harmonické v síti 22 kV. Pro přílohu č. 19 se jednalo o 5. harmonickou a pro 7. harmonickou v příloze č. 20.

Z obrázků v příloze č. 19 můžeme vidět vliv na výstupní napětí usměrňovací jednotky při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV. Jak je vidět na obrázcích p19.3 a p19.6 tak i při nulovém obsahu vyšších harmonických v napájecí síti jsou složky 300 a 600 Hz přítomny v usměrněném napětí. Z těchto obrázků je vidět nepřímá úměra mezi amplitudou 5. harmonické v síti 22 kV a složkami 300 a 600 Hz obsažených ve výstupním napětí usměrňovače. Naproti tomu na ostatních obrázcích v příloze č. 19 je vidět, že se stoupajícím obsahem 5. harmonické v síti 22 kV, stoupá i obsah ostatních harmonických, tedy 100, 200, 400, 500 Hz. Největší změnu vykazuje složka 200 Hz, která se změní z nuly až na hodnotu téměř 600 V. Na všech obrázcích v příloze č. 19 je vidět, že i při nulovém obsahu vyšších harmonických v energetické síti je obsah složek 100 až 600 Hz nenulový. Zmíněný jev byl několikrát kontrolován, simulace provedeny znovu a nebyla shledána žádná chyba v postupu. Zmíněný jev je zřejmě způsoben chybou v simulaci programem PSPICE.

Vliv na výstupní napětí usměrňovací jednotky při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV je vyobrazen v příloze č. 20. Jak je vidět, tak až na složky 300 a 600 Hz, není vliv 7. harmonické v síti 22 kV tolik výrazný jako vliv 5. harmonické. Průběhy jsou pro všechny výstupní harmonické, až na drobné odlišnosti, totožné. Hodnoty vyšších harmonických na výstupu usměrňovače nepřesáhnou hodnoty cca 25 V. Pro složku 300 Hz je zřejmé, že její hodnota je nejnižší pokud fáze 7. harmonické v síti 22 kV dosáhne hodnoty  $135^\circ$  a je jedno jak vysoký je její obsah. Zmíněná závislost je vyobrazena na obrázku p20.3 v příloze č. 20.

Při nulovém obsahu 7. harmonické je obsah složky 300 Hz přibližně 280 V v celém rozsahu fází. Pro variantu složky 600 Hz ve výstupním napětí usměrňovače platí obrázek č. p20.6 přílohy č. 20. Tato složka 600 Hz na výstupu usměrňovače dosahuje svého minima při fázi  $270^\circ$  a všech hodnotách 7. harmonické v síti 22 kV. Při nulovém obsahu dosahuje hodnoty přibližně 80 V.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit jaký vliv má změna fáze 5. a 7. harmonické v energetické síti 22 kV na výstupní napětí šestipulzního trakčního usměrňovače. Myslím si, že cíl práce byl naplněn. Výsledné závislosti zjištěné při simulaci jsou vidět na obrázcích v přílohách č. 19 a 20. Z těchto příloh je jasně vidět podstatně větší vliv fáze 5. harmonické nežli vliv fáze 7. harmonické.

Fáze 7. harmonické má viditelný vliv pouze na složky 300 a 600 Hz ve výstupním usměrněném napětí. Pro složky 100, 200, 400, 500 Hz jsou grafy téměř identické. S rostoucí fází klesá podíl jednotlivých složek jen nepatrně. Složka 300 Hz dosahuje svého minima při fázi 135 °. Například pro 20% obsah 7. harmonické se mění složka 300 Hz z hodnoty 700 V při nulové fázi na své minimum 380 V při fázi 135 ° a dále stoupá až na hodnotu 850 V při fázi 315 ° jak je vidět na obr. p20.3. Složka 600 Hz dosahuje svého minima při fázi 270 °. Pro 20% obsah 7. harmonické se mění hodnota složky 600 Hz ze 160 V při fázi 0 ° na maximální hodnotu 200 V při 90 ° a následně klesá na své minimum až na 20 V při fázi 270 °.

Fáze 5. harmonické má rozdílný vliv na všechny složky 100 až 600 Hz výstupního usměrněného napětí jak je vidět v příloze č. 19. Se zvyšující se hodnotou 5. harmonické klesají podíly složek 100, 200, 400, 500 Hz ve výstupním usměrněném napětí. Pro složky 300 a 600 Hz je tendence opačná, tedy rostoucí. Každá ze složek 100 až 600 Hz při daném obsahu 5. harmonické má rozdílný průběh závislosti na změně fáze 5. harmonické. Žádný z průběhů v příloze č. 19 není identický, čili změna fáze 5. harmonické v síti 22 kV má na jednotlivé složky 100 až 600 Hz výstupního napětí usměrňovače různý vliv.

Hodnota cca 15 V u složek 100, 200, 400, 500 Hz i při nulovém obsahu 5. nebo 7. harmonické v síti 22 kV je z největší pravděpodobností způsobena chybou simulace. V tomto případě by měly mít všechny tyto složky nulovou hodnotu a vyskytovat by se měly pouze u frekvencí 300 a 600 Hz.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHOŇ, M., IBL, J., SKŘIVÁNEK, J. *Dráhové měnírny*. 2. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1962. 396 s.
- [2] HLAVA, K. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. 1. vyd. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2004. 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
- [3] HLAVA, K. Vliv nesinusového primárního napětí na dvojitý trojfázový můstkový usměrňovač. In *Sborník prací Výzkumného ústavu dopravního* Praha: 1957. Svazek 1. s. 17-29.
- [4] KLOSS, A. *Polovodičové usměrňovače pro dráhové měnírny*. Praha: ČKD, 1968. 56 s.
- [5] KŮS, V. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2005, 182 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [6] KŮS, V. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2003, 196 s. ISBN 80-7082-976-1.
- [7] KŮS, V. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2002, 184 s. ISBN 80-7300-062-8.
- [8] KŮS, V. *Výkonová elektronika svazek IV Rušivé vlivy měničů a jejich omezování*. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 1996. 84s. ISBN 80-7082-272-4.
- [9] MAČÁT, J., VACULÍKOVÁ, P., ZÁVIŠKA, O. *Zpětný vliv výkonových polovodičových měničů na napájecí síť*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978, 292 s.
- [10] ROZANOV, J.K. *Základy výkonové měničové techniky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 348 s.
- [11] VONDRÁŠEK, Fr. *Výkonová elektronika svazek II Měniče s vnější komutací*. 2. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 149 s. ISBN 80-7082-695-9.
- [12] ZAHRÁDKA, Z. *Vliv nesinusového primárního napětí na dvojitý trojfázový můstkový usměrňovač*. Diplomová práce. Plzeň, ZČU, 1998.
- [13] Chapman, D. *Kvalita elektrické energie- průvodce, Harmonické- Příčiny a účinky*, [online]. [cit. 20. ledna 2010]. Dostupné na [http://www.medportal.cz/files/file/3\\_1\(1\).pdf](http://www.medportal.cz/files/file/3_1(1).pdf)

- [14] Chapman, D. *Kvalita elektrické energie- průvodce, Harmonické- Aktivní harmonické kondicionéry*, [online]. [cit. 20. ledna 2010].  
Dostupné na [http://www.medportal.cz/files/file/lpq\\_cz/3\\_3\\_3.pdf](http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/3_3_3.pdf)

## SEZNAM ZKRATEK

$\alpha$	impedanční činitel zařízení odběratele
Bl	bleskojistka
$\gamma$	úhel překrytí
ČD	České dráhy
DF	činitel harmonického zkreslení
DPF	účiník základní harmonické
h	řád vyšší harmonické
HDO	hromadné dálkové ovládání
$H_h$	pomocná veličina
l	je celé číslo, $l=1, 2, 3, \dots$
$I_1$	proud první harmonické
$I_d$	proud diodou
$I_{DC}$	je hodnota usměrněného proudu [A]
$I_h$	proud harmonické řádu -h
$I_l$	l-tá harmonická střídavého proudu zdroje
k	sčítací index harmonické analýzy
$L_{ss}$	indukčnost stejnosměrného obvodu
$L_{TT}$	náhradní indukčnost trakčního transformátoru přepočtená na jeho sekundární stranu
MTI	měřicí transformátor proudu
MTU	měřicí transformátor napětí
$\xi_h$	fáze h-té harmonické vzhledem k frekvenci základní
Od	odpojovač
P	činný výkon
p	pulznost usměrňovače
PF	opravdový účinník
PNE	podnikové normy energetiky
$P_k$	k-tá harmonická činného výkonu
$P_{sm}$	smluvní výkon odběratele
Q	jalový výkon
$Q_k$	k-tá harmonická jalového výkonu
S	zdánlivý výkon
$S_{TT}$	jmenovitý výkon transformátoru



$t$  čas  
 THD celkový činitel zkreslení  
 TNS trakční napájecí stanice  
 TT trakční transformátor  
 TV trakční vedení  
 $u_1, U_1$  fázové napětí primární sítě- okamžitá hodnota, efektivní hodnota  
 $U_2$  efektivní hodnota fázového napětí sekundární strany transformátoru  
 $U_d$  střední hodnota výstupního napětí třífázového můstkového usměrňovače  
 $U_{di}$  střední hodnota usměrněného napětí  
 $U_{diY}$  stejnosměrná složka výstupního napětí  
 $U_{diY0}$  stejnosměrná složka výstupního napětí při chodu na prázdko  
 $U_h$  napětí harmonické řádu -h  
 $U_k$  k-tá harmonická střídavého napětí zdroje  
 $u_K$  napětí transformátoru nakrátko  
 $U_n$  jmenovité napětí sítě  
 $U_{TT}$  napětí primárního vinutí  
 $u_y$  okamžitá hodnota napětí sekundární sekce zapojené do Y  
 $U_z$  uzemňovač  
 VV vakuový vypínač  
 $w_h$  poměrná amplituda h-té harmonické  
 $X_A$  rozptylová reaktance transformátoru usměrňovače [ $\Omega$ ]  
 $\psi_h$  pomocný úhel  
 $Z_{HDO}$  absolutní hodnota impedance zařízení odběratele na kmitočtu HDO  
 $Z_p$  připojovací impedance zařízení odběratele na kmitočtu 50 Hz  
 $\omega$  úhlový kmitočet

## SEZNAM VYOBRAZENÍ

- obr. 1** Schéma napájení elektrických drah systému 3 kV
- obr. 2** Jednopolové schéma rozvodny 110 kV, 22 kV
- obr. 3** Trojfázový můstek a) sériové zapojení dvou uzlových usměrňovačů  
b) obvyklý způsob kreslení třífázového můstku
- obr. 4** Trojfázový neřízený můstkový usměrňovač  
zapojení a průběhy proudů a napětí na něm
- obr. 5** Komutace větví usměrňovače
- obr. 6** Primární proud šestipulzního usměrňovače s vinutím do hvězdy
- obr. 7** Průběh komutace při zanedbání rozptylové reaktance transformátoru
- obr. 8** Průběh komutace při uvažování rozptylové reaktance transformátoru
- obr. 9** Zobrazení úhlu komutace v simulovaném obvodu
- obr. 10** Náhradní schéma transformátoru z pohledu energetických harmonických
- obr. 11** Schéma náhradní zátěže trakčního usměrňovače
- obr. 12** Teoreticky maximální obsah proudových harmonických jednofázového  
usměrňovače
- obr. 13** Teoreticky maximální obsah harmonických šestipulzního usměrňovače
- obr. 14** Teoreticky maximální obsah harmonických proudu dvanáctipulzního  
usměrňovače
- obr. 15** Spektrum harmonických standardního PC
- obr. 16** Spektrum odebíraného proudu typické "úsporné" žárovky
- obr. 17** Sčítání vyšších harmonických proudů ve středním vodiči
- obr. 18** Odhad maximálního obsahu vyšších harmonických proudu dle  
PNE 33 3430-0 emitovaných trakčním transformátorem  
do energetické sítě
- obr. 19** Meisterova křivka průběhu maximálních hodnot signálů HDO v sítích nn a  
vn, kde  $U_n$  je jmenovité napětí sítě
- obr. 20** Zařízení zákazníka se společným napájecím bodem v síti 110 kV
- obr. 21** a) Nefiltrované spektrum proudu odebíraného PC (personal computer)  
b) Plně filtrované spektrum proudu odebíraného PC

- obr. 22** a) Spektrum odebíraného proudu nefiltrované zátěže s regulovanými pohony  
b) Spektrum s využitím aktivních filtrů
- obr. 23** Aplikace sériového a paralelního filtru najednou
- obr. 24** Zapojení dvanáctipulzního usměrňovače
- obr. 25** Spektrum primárního proudu usměrňovače a) šestipulzního  
b) dvanáctipulzního
- obr. 26** Průběh napětí na sekundární straně trakčního transformátoru při 20 % obsahu 5. harmonické simulace
- obr. 27** Schéma zapojení pro simulaci

## SEZNAM PŘÍLOH

- 1 Netlist pro simulaci změny amplitudy vyšších harmonických
- 2 Netlist pro simulaci změny fáze vyšších harmonických
- 3 Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na sekundární sdružené napětí transformátoru
- 4 Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na sekundární sdružené napětí transformátoru
- 5 Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na sekundární sdružené napětí transformátoru
- 6 Vliv fáze 7. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na sekundární sdružené napětí transformátoru
- 7 Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na proud odebíraný usměrňovací jednotkou
- 8 Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na proud odebíraný usměrňovací jednotkou
- 9 Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na proud odebíraný usměrňovací jednotkou
- 10 Vliv fáze 7. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na proud odebíraný usměrňovací jednotkou
- 11 Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 12 Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 13 Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 5 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 14 Vliv fáze 5. harmonické, s amplitudou 10 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 15 Vliv fáze 5. harmonické, s amplitudou 20 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 16 Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 5 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky

- 17** Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 10 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 18** Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 20 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky
- 19** Závislost obsahu jednotlivých složek ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV
- 20** Závislost obsahu jednotlivých složek ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV

**Netlist pro simulaci změny amplitudy vyšších harmonických**

```
*SESTIPULZNI MUSTKOVY USMERNOVAC ZMENA AMPLITUDY
R1 4 0 10G
R2 4 5 10G
RZ 5 9 2
Lz 9 0 10m

L1 1 6 250u
L2 2 7 250u
L3 3 8 250u
D12 1 5 D
D11 0 1 D
D22 2 5 D
D21 0 2 D
D32 3 5 D
D31 0 3 D

VA 61 4 sin(0 2050 50 0 0 0)
VB 71 4 sin(0 2050 50 0 0 120)
VC 81 4 sin(0 2050 50 0 0 240)
VA5 6 61 sin(0 {0+{Pprom1}} 150 0 0 0)
VB5 7 71 sin(0 {0+{Pprom1}} 150 0 0 120)
VC5 8 81 sin(0 {0+{Pprom1}} 150 0 0 240)

.param Pprom1=0
.step param=Pprom1 list 102.5 205 307.5 410
RPOM1 1 6 50
RPOM2 2 7 50
RPOM3 3 8 50
.model D d
.probe
.tran 1.000m .1 .08 10.000u
.four 50 25 I(L1) V(5) V(1,2)
.end
```

## Netlist pro simulaci změny fáze vyšších harmonických

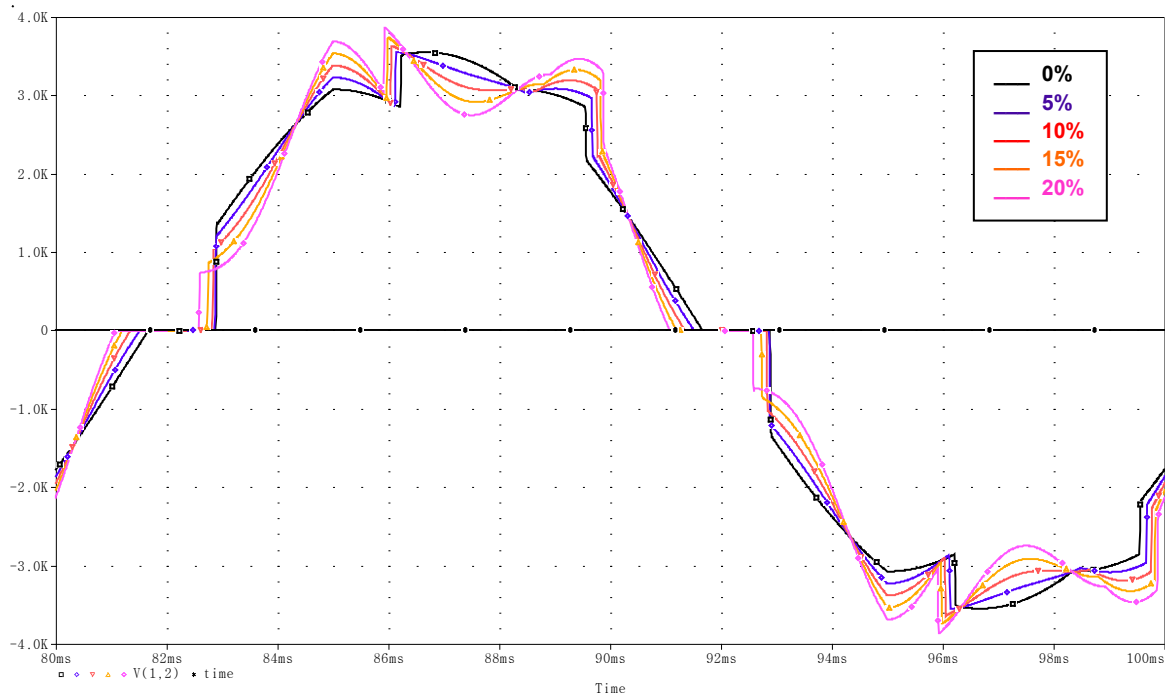
```
*SESTIPULZNI MUSTKOVY USMERNOVAC-ZMENA FAZE
R1 4 0 10G
R2 4 5 10G
RZ 5 9 2
Lz 9 0 10m

L1 1 6 250u
L2 2 7 250u
L3 3 8 250u
D12 1 5 D
D11 0 1 D
D22 2 5 D
D21 0 2 D
D32 3 5 D
D31 0 3 D

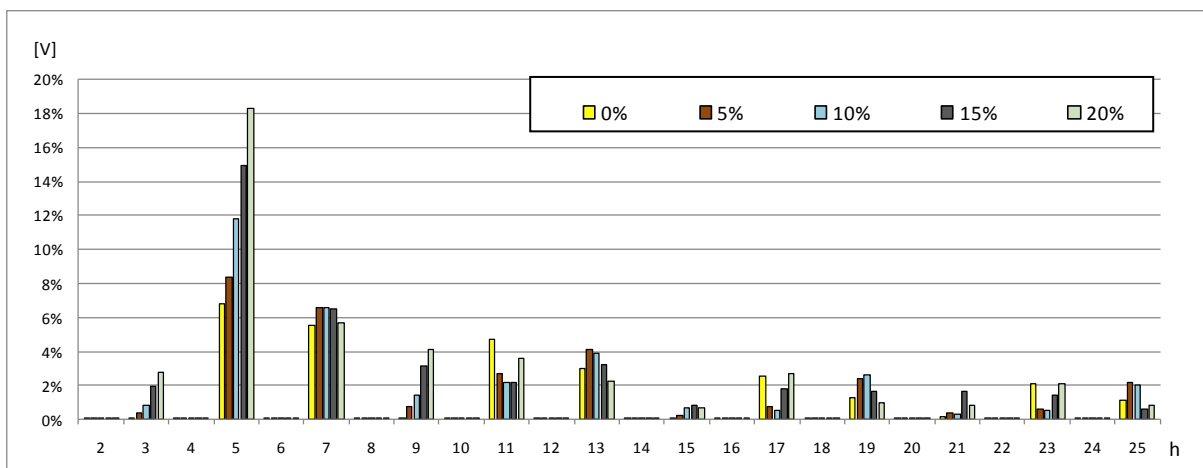
VA 61 4 sin(0 2050 50 0 0 0)
VB 71 4 sin(0 2050 50 0 0 120)
VC 81 4 sin(0 2050 50 0 0 240)
VA5 6 61 sin(0 205 250 0 0 {0+{Pprom1}})
VB5 7 71 sin(0 205 250 0 0 {120+{Pprom1}})
VC5 8 81 sin(0 205 250 0 0 {240+{Pprom1}})

.param Pprom1=0
.step param Pprom1 0 315 45
RPOM1 1 6 50
RPOM2 2 7 50
RPOM3 3 8 50
.model D d
.probe
.tran 1.000m .1 .08 10.000u
.four 50 25 I(L1) V(5) V(1,2)
.end
```

### Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na sekundární sdrúžené napětí transformátoru



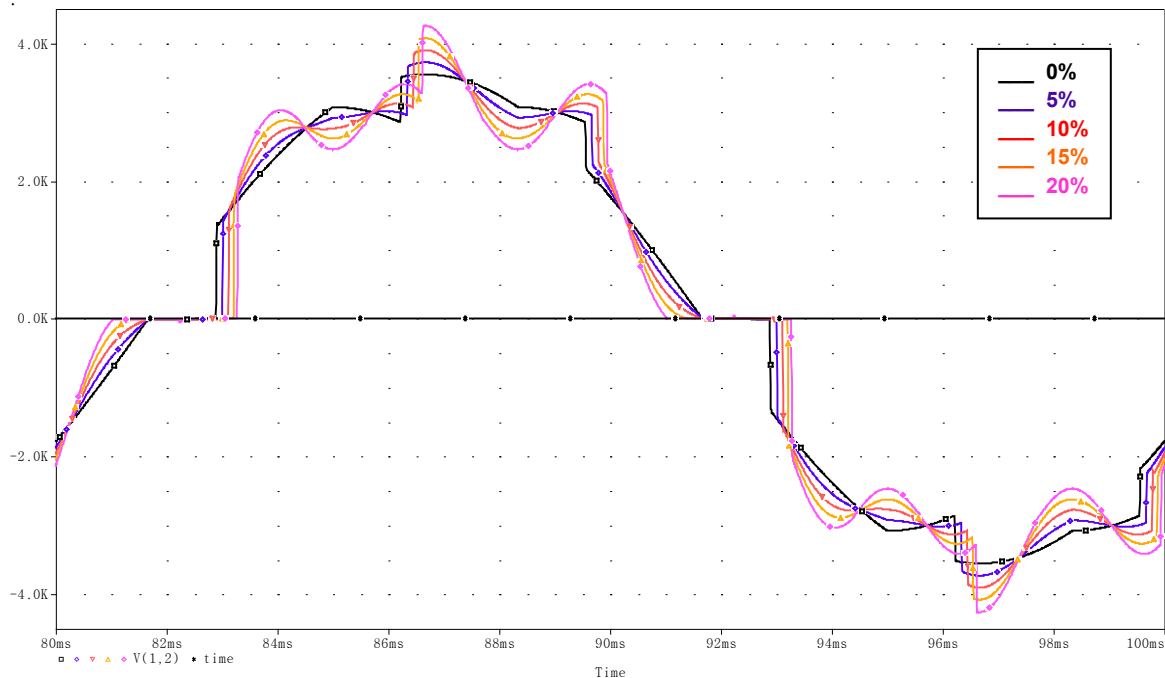
obr. p3.1 Průběh sekundárního sdrúženého napětí transformátoru při změně amplitudy 5. harmonické v síti 22 kV



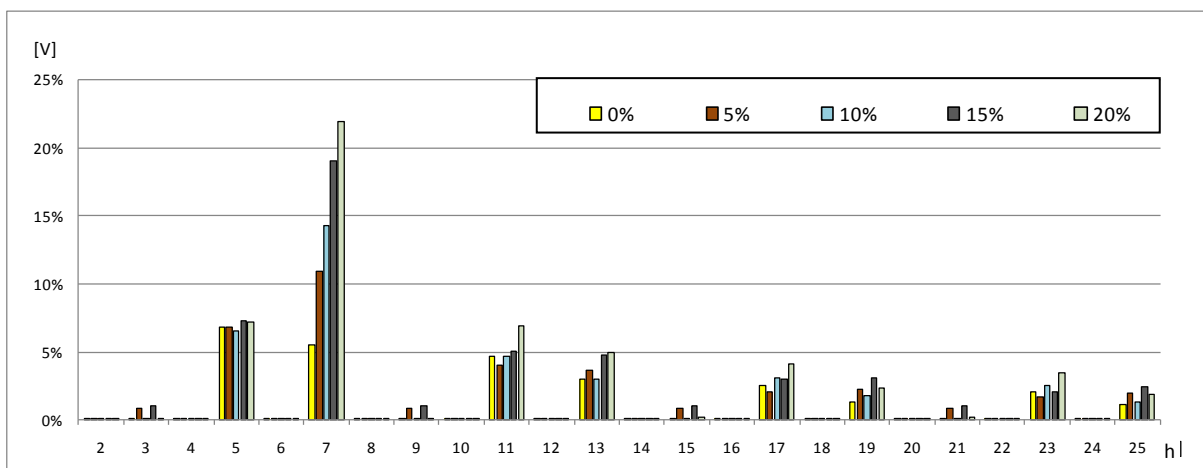
obr. p3.2 Spektrální složení sekundárního sdrúženého napětí transformátoru při změně amplitudy 5. harmonické v síti 22 kV



**Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na sekundární sdrúžené napětí transformátoru**

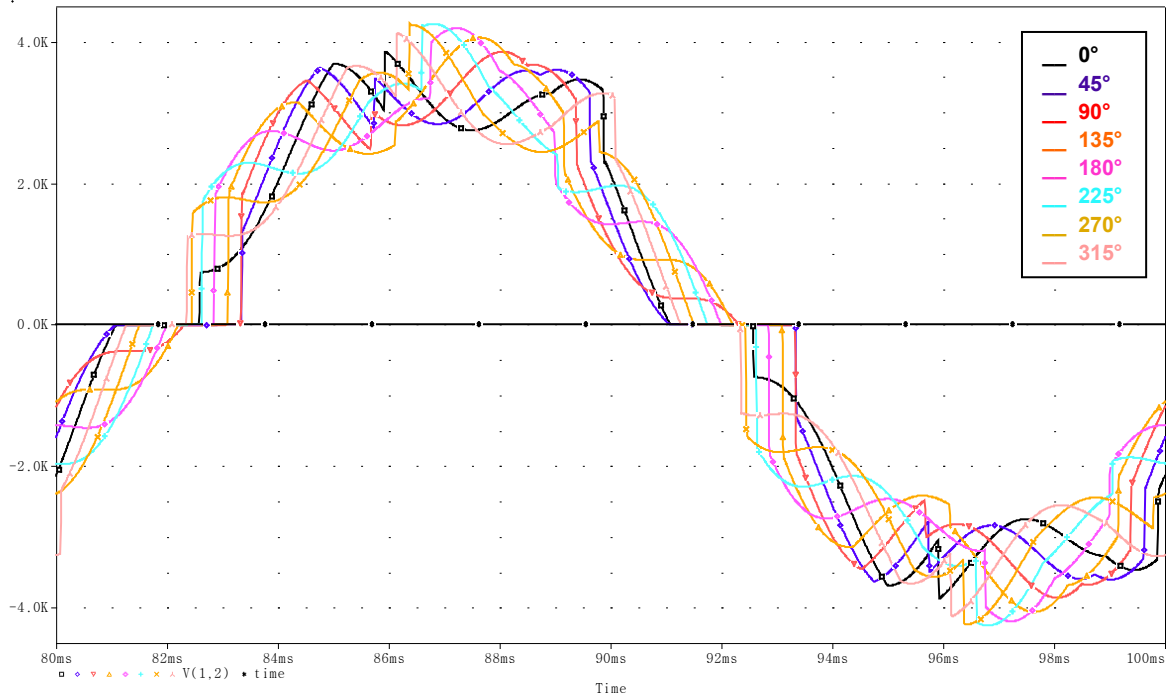


obr. p4.1 Průběh sdrúženého sekundárního napětí transformátoru při změně amplitudy 7. harmonické v síti 22 kV

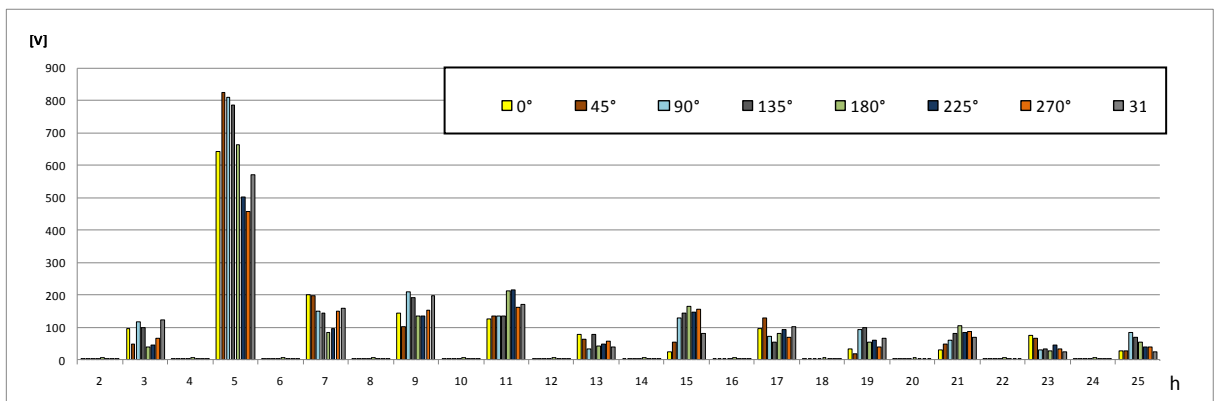


obr. p4.2 Spektrální složení sdrúženého sekundárního napětí transformátoru při změně amplitudy 7. harmonické v síti 22 kV

**Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na sekundární sružené napětí transformátoru**

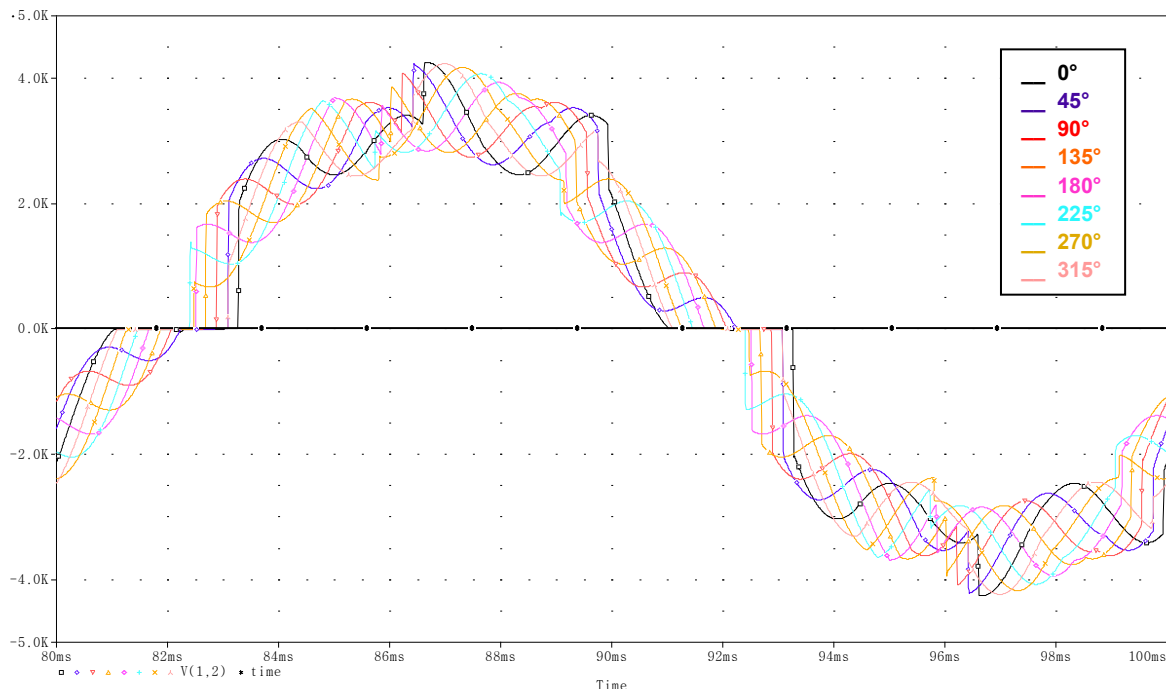


obr. p5.1 Průběh sruženého sekundárního napětí transformátoru v závislosti na fázi 5. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz

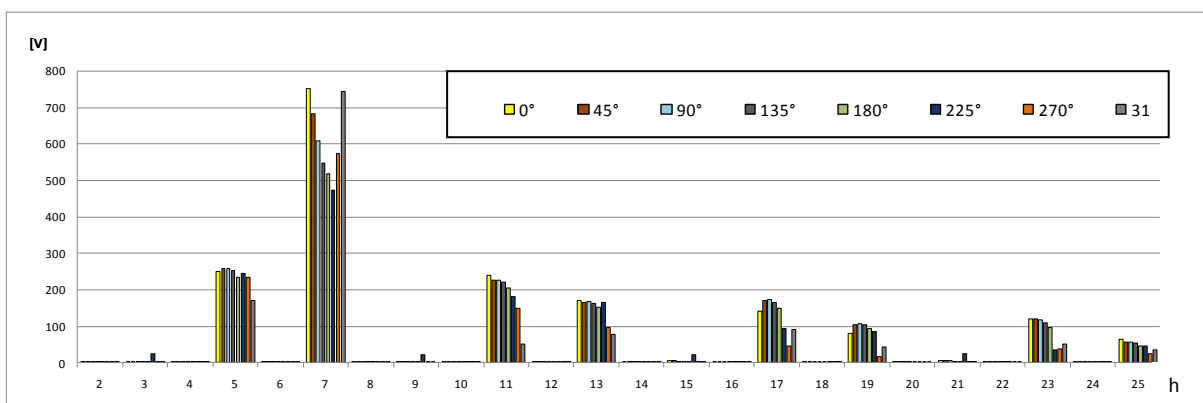


obr. p5.2 Spektrální složení sruženého sekundárního napětí v závislosti na fázi 20 % 5. harmonické

**Vliv fáze 7. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na sekundární sdružené napětí transformátoru**

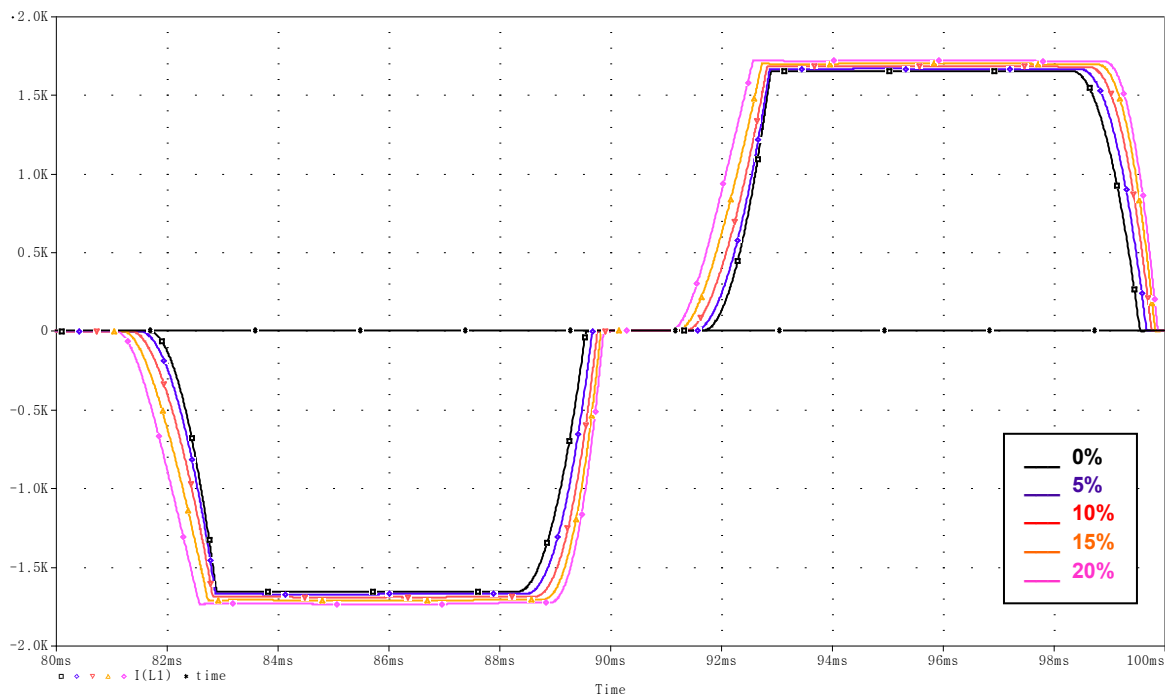


obr. p6.1 Průběh sdruženého sekundárního napětí transformátoru při změně fáze 7. harmonické v síti 22 kV

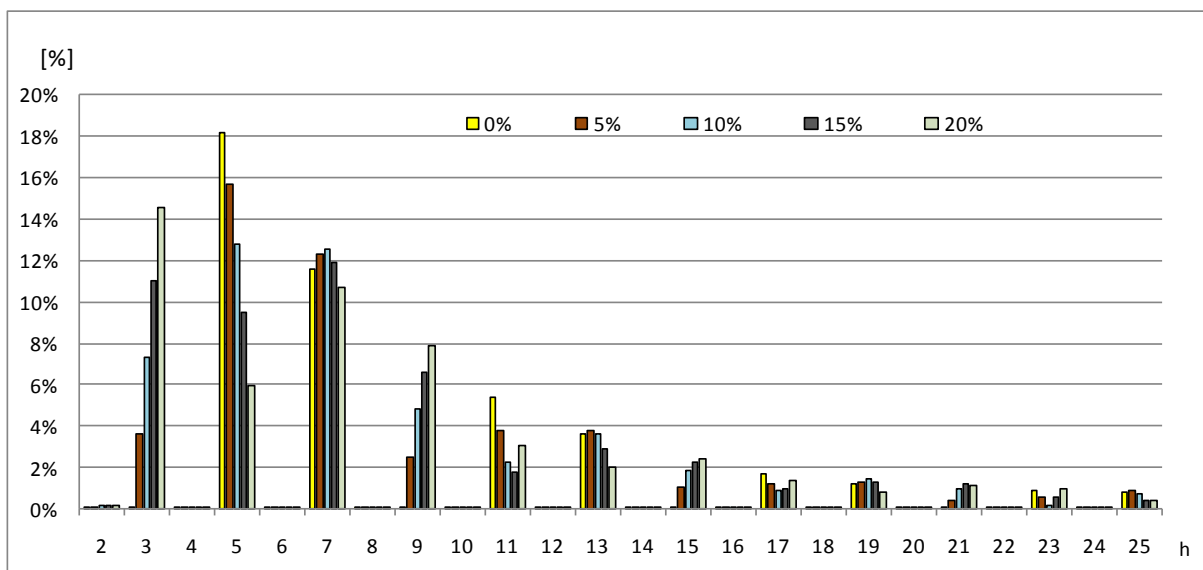


obr. p6.2 Spektrální složení sdruženého sekundárního napětí transformátoru při změně fáze 7. harmonické v síti 22 kV

**Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na proud odebíraný usměrňovací jednotkou**

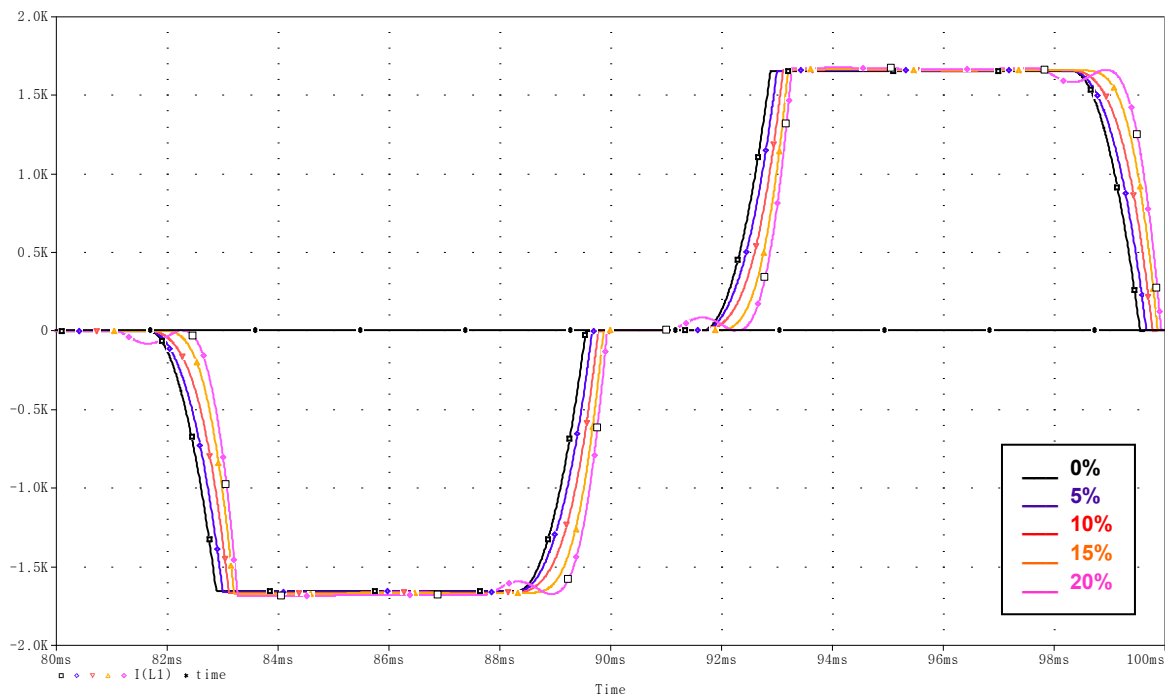


obr. p7.1 Průběh proudu odebíraného usměrňovací jednotkou při změně amplitudy 5. harmonické na jejím vstupu

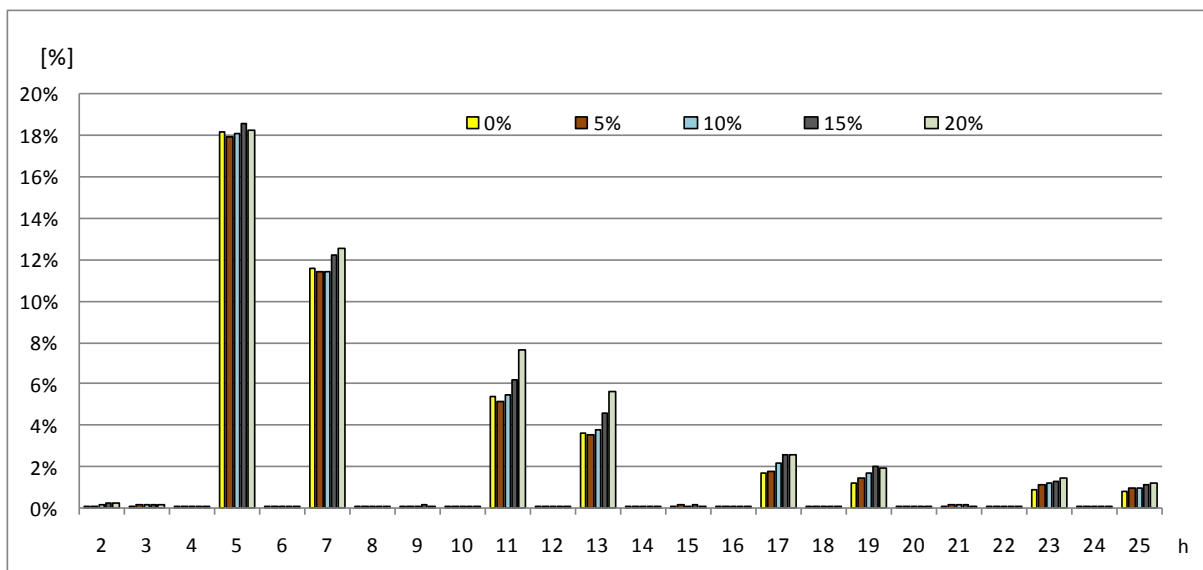


obr. p7.2 Spektrální složení proudu odebíraného usměrňovací jednotkou při změně amplitudy 5. harmonické na jejím vstupu

### Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na proud odebíraný usměrňovací jednotkou

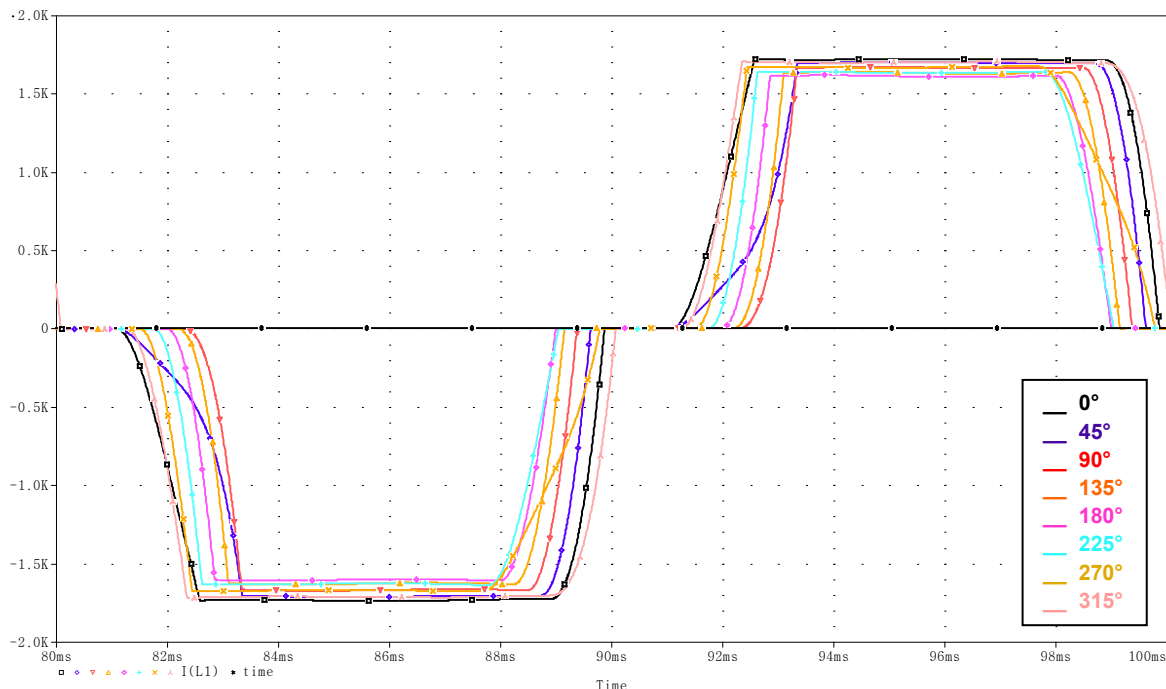


obr. p8.1 Průběh proudu odebíraného usměrňovací jednotkou při změně amplitudy 7. harmonické na jejím vstupu

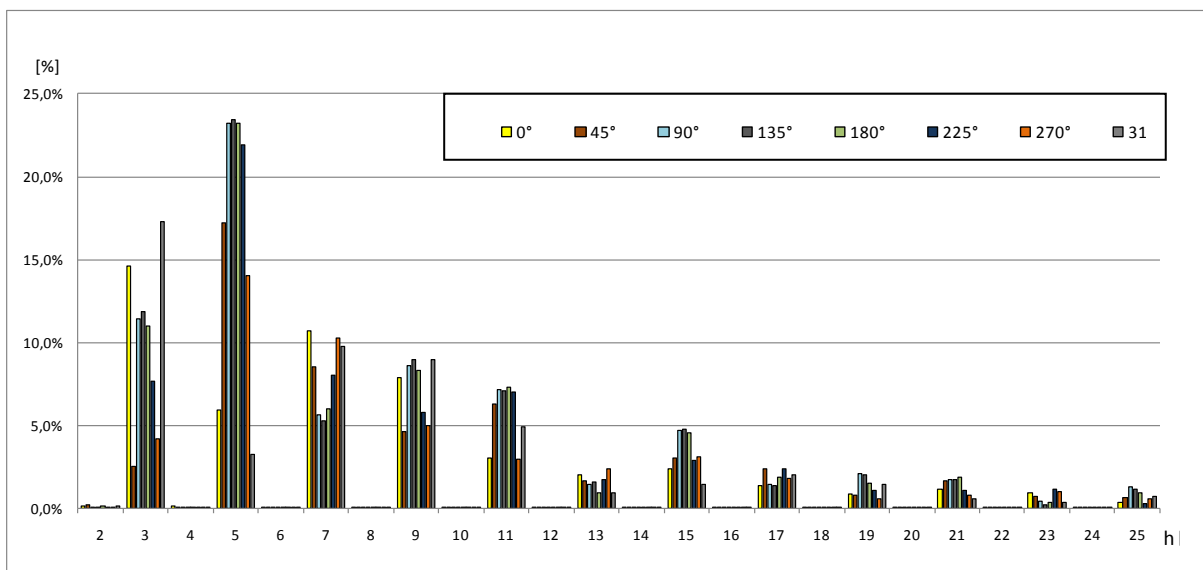


obr. p8.2 Spektrální složení proudu odebíraného usměrňovací jednotkou při změně amplitudy 5. harmonické na jejím vstupu

**Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na proud odebíraný usměřňovací jednotkou**

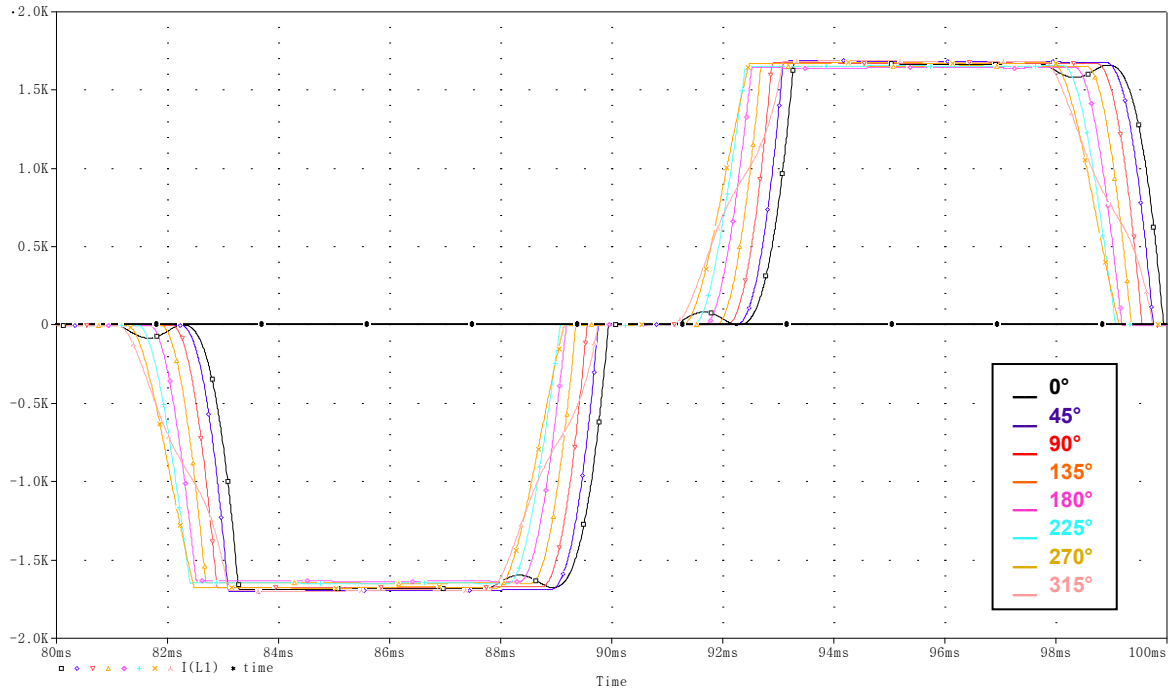


obr. p9.1 Průběh proudu odebíraného usměřňovací jednotkou v závislosti na fázi 5. harmonické na jejím vstupu

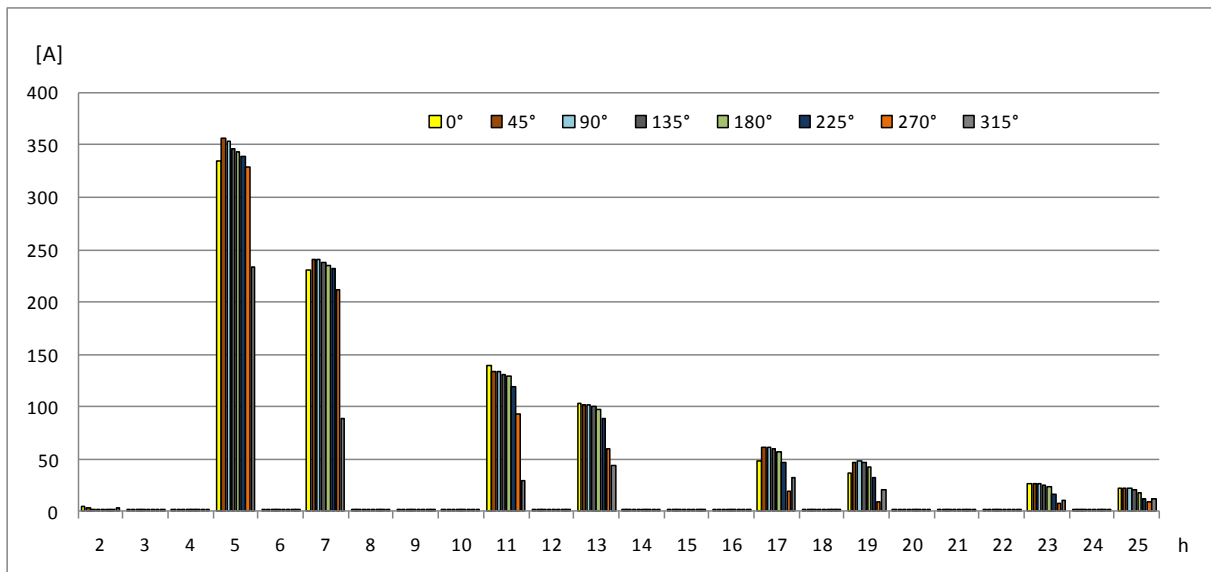


obr. p9.2 Spektrální složení proudu odebíraného usměřňovací jednotkou v závislosti na fázi 5. harmonické na jejím vstupu

**Vliv fáze 7. harmonické s amplitudou 20 % amplitudy základní harmonické 50 Hz na proud odebíraný usměrňovací jednotkou**

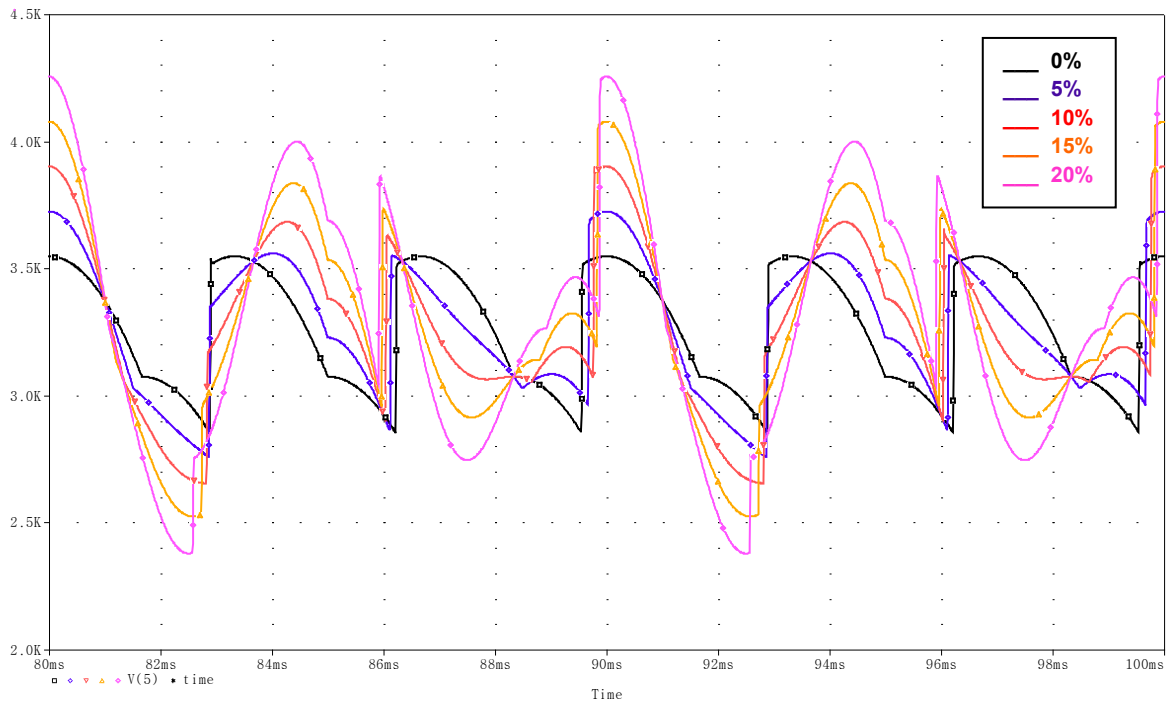


obr. p10.1 Průběh proudu odebíraného usměrňovací jednotkou v závislosti na fázi 5. harmonické na jejím vstupu

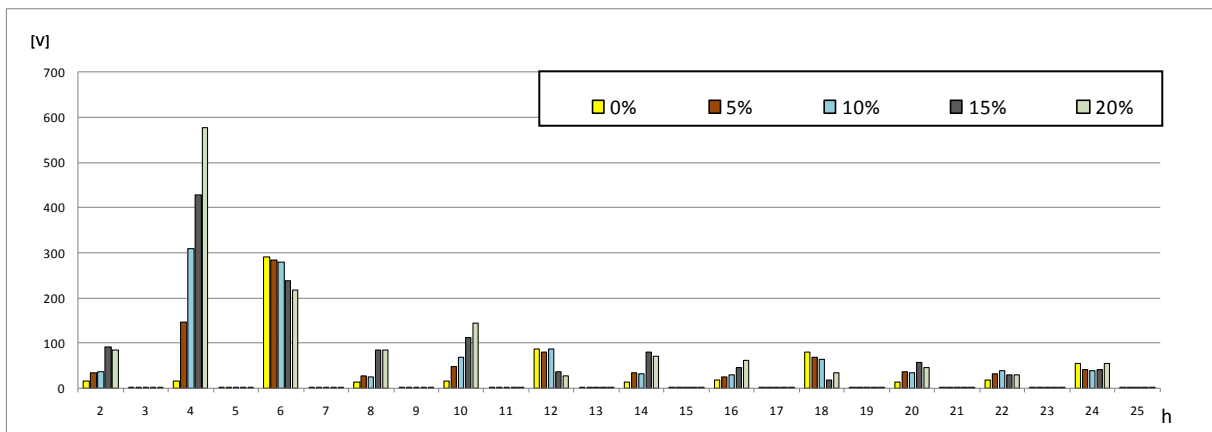


obr. p10.2 Spektrální složení proudu odebíraného usměrňovací jednotkou v závislosti na fázi 5. harmonické na jejím vstupu

**Vliv efektivní hodnoty 5. harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky**



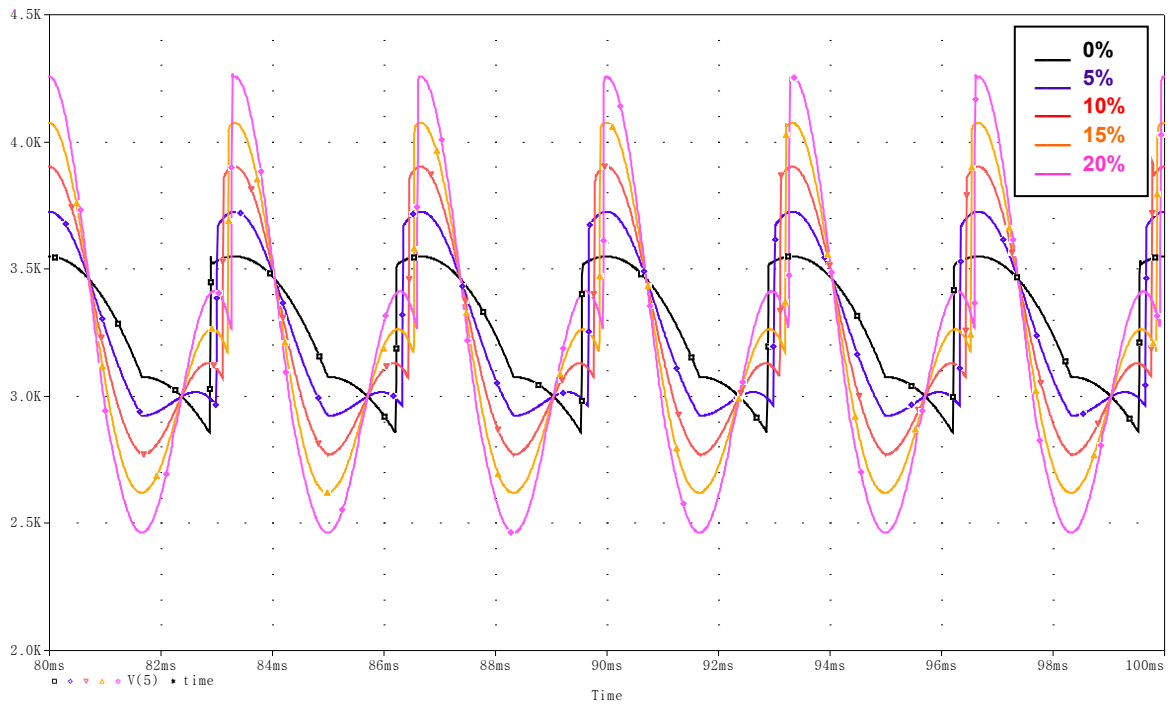
obr. p11.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky při změně amplitudy 5. harmonické na jejím vstupu



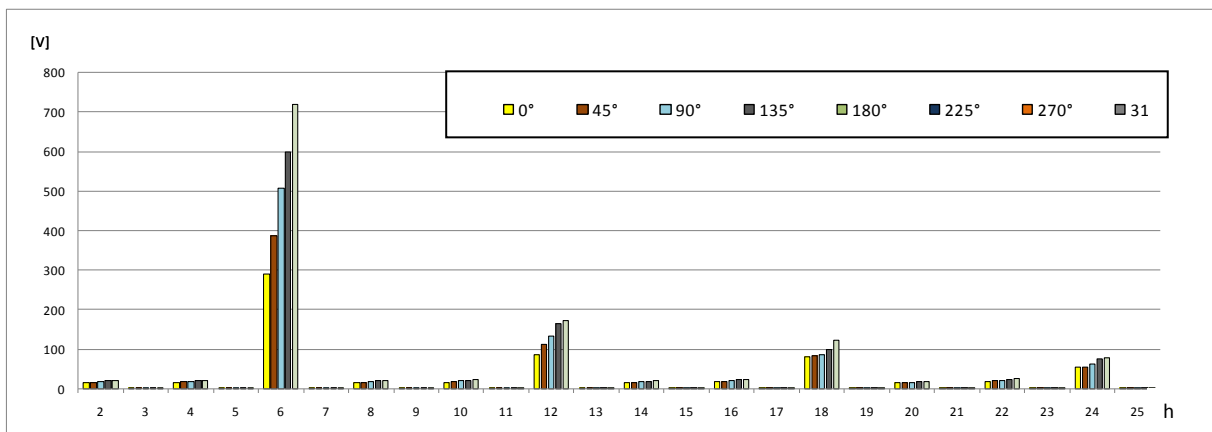
obr. p11.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky při změně amplitudy 5. harmonické



Vliv efektivní hodnoty 7. harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky

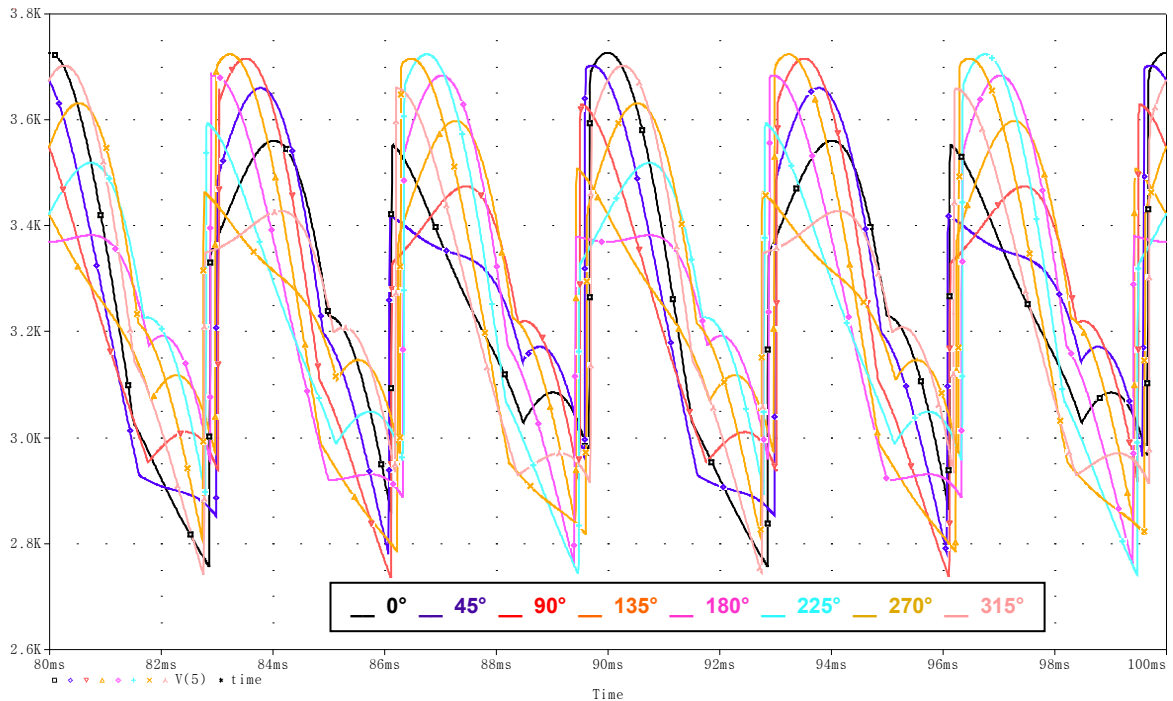


obr. p12.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky při změně amplitudy 7. harmonické na jejím vstupu

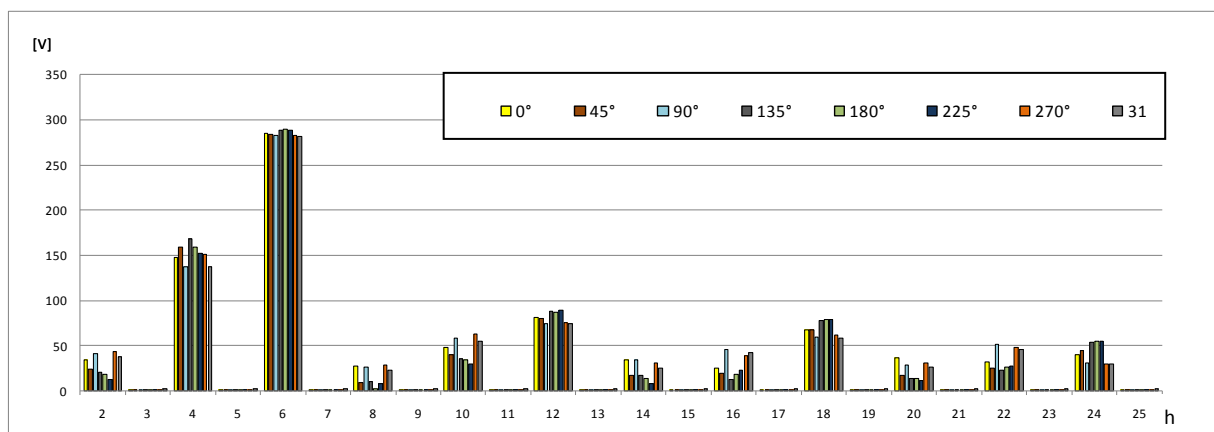


obr. p12.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky při změně amplitudy 7. harmonické

### Vliv fáze 5. harmonické s amplitudou 5 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky

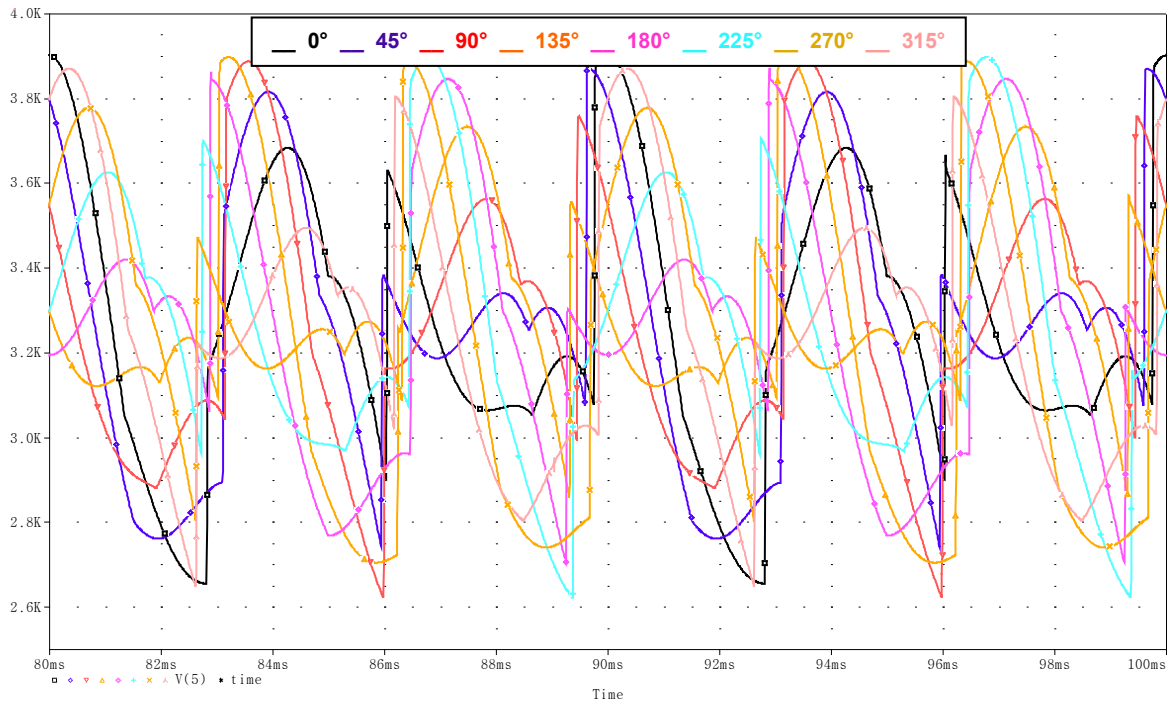


obr p13.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 5 % 5. harmonické

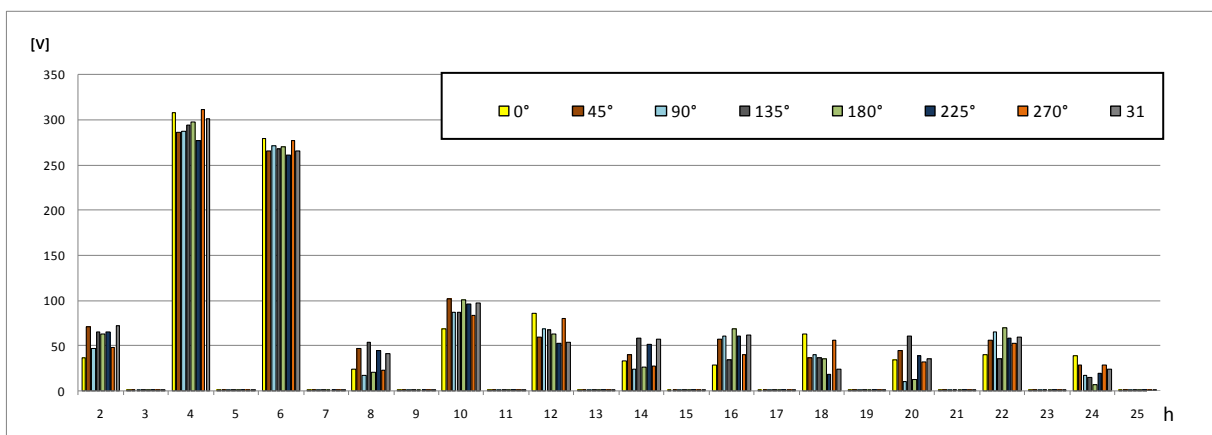


obr. p13.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 5 % 5. harmonické

**Vliv fáze 5. harmonické, s amplitudou 10 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky**

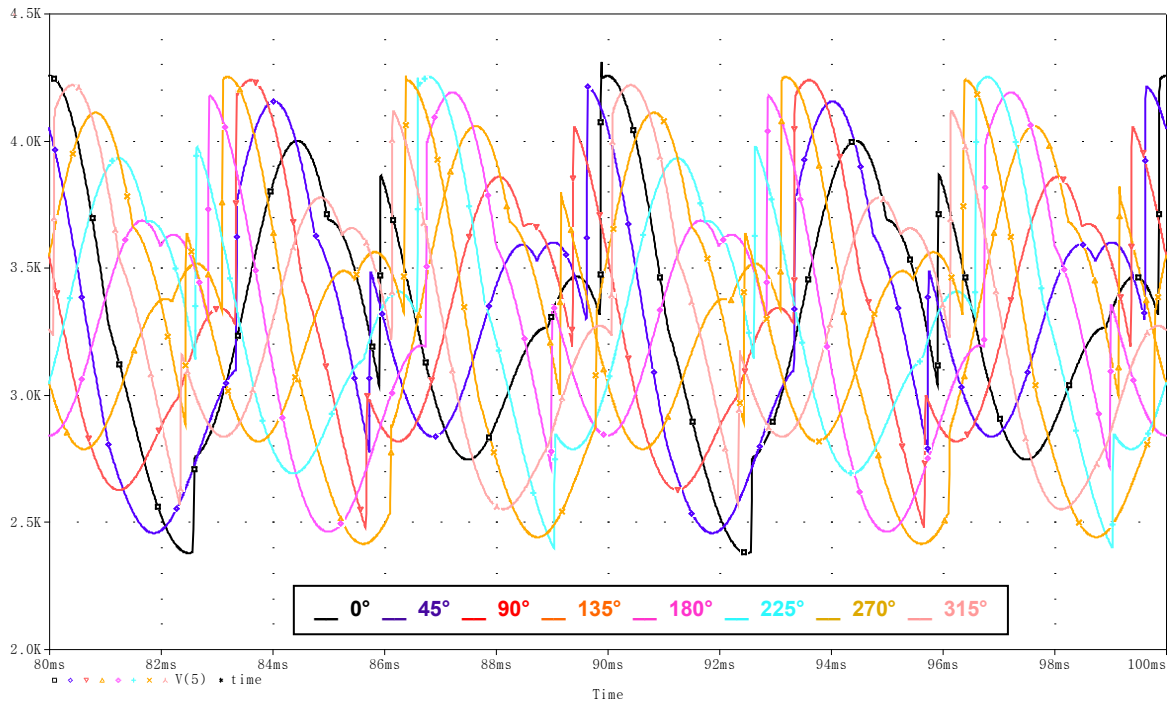


obr. p14.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 10 % 5. harmonické

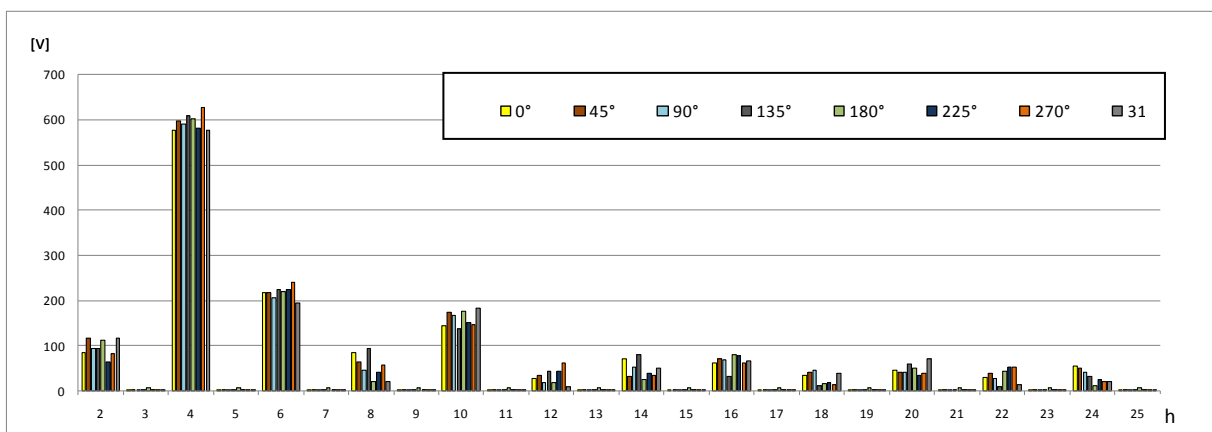


obr. p14.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 10 % 5. harmonické

**Vliv fáze 5. harmonické, s amplitudou 20 % základní harmonické na výstupní napětí usměrňovací jednotky**

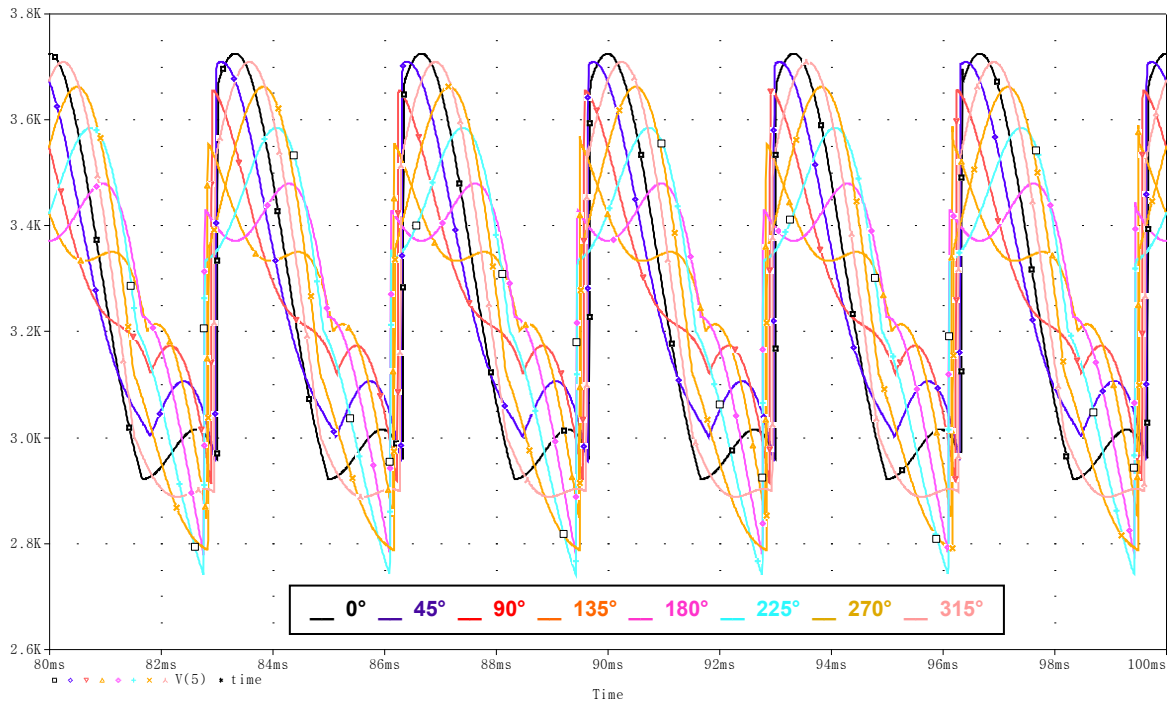


obr. p15.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 20 % 5. harmonické

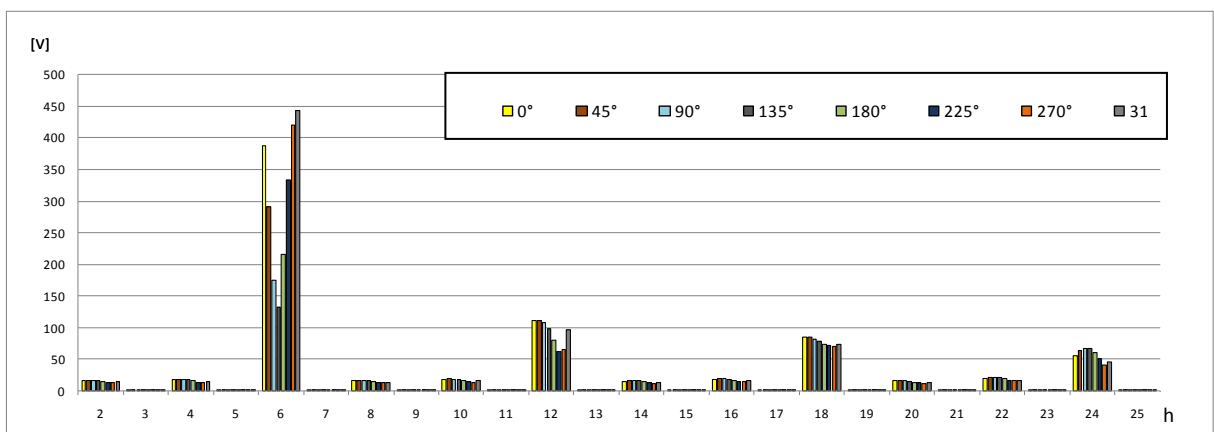


obr. p15.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 20 % 5. harmonické

### Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 5 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky

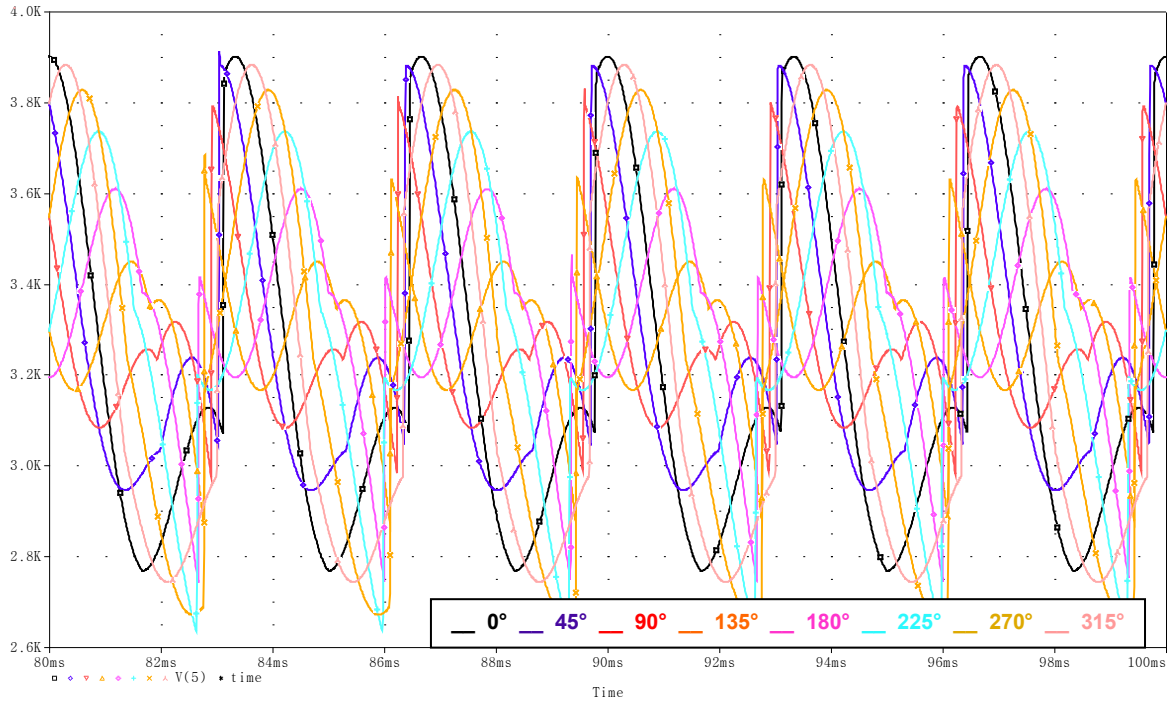


obr. p16.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 5 % 7. harmonické

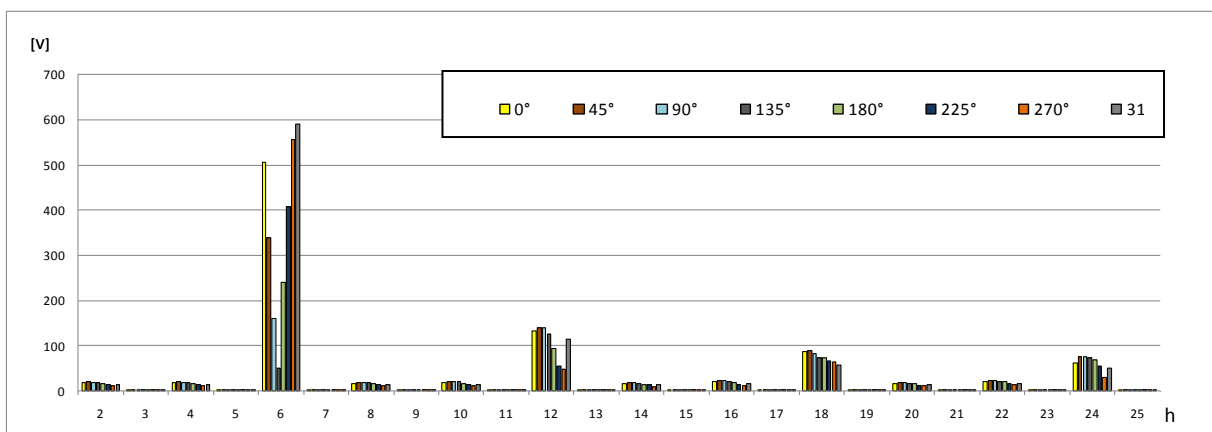


obr. p16.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 5 % 7. harmonické

### Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 10 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky

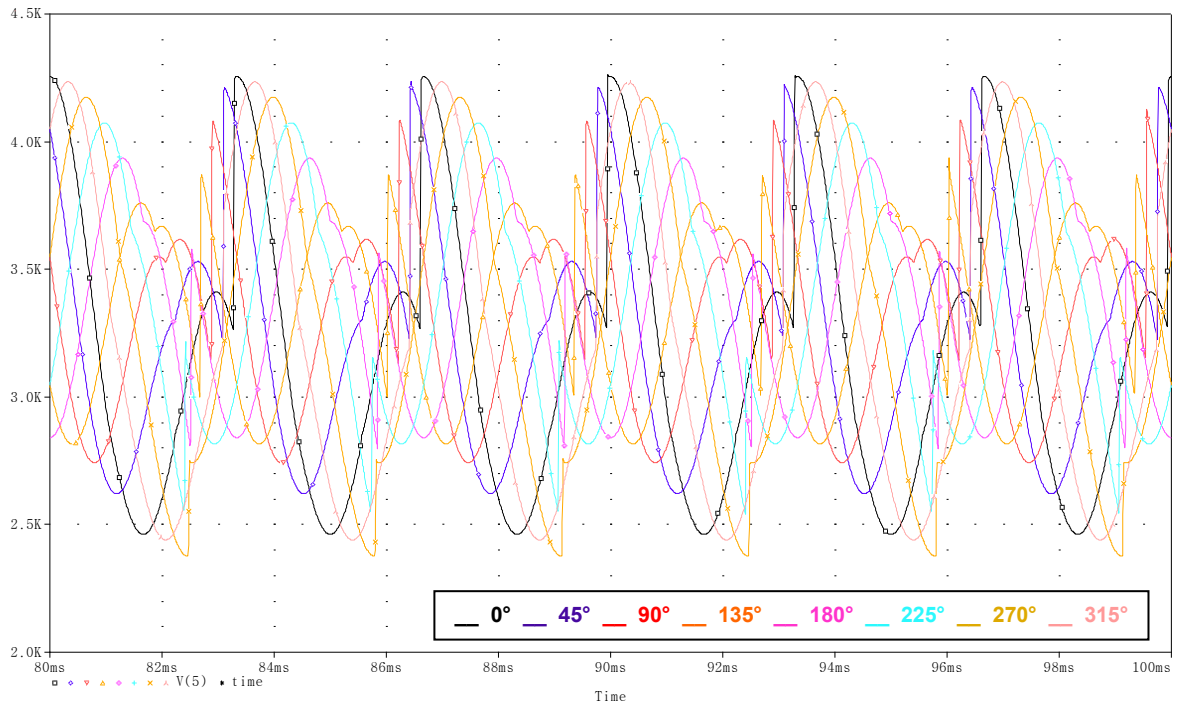


obr. p17.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 10 % 7. harmonické

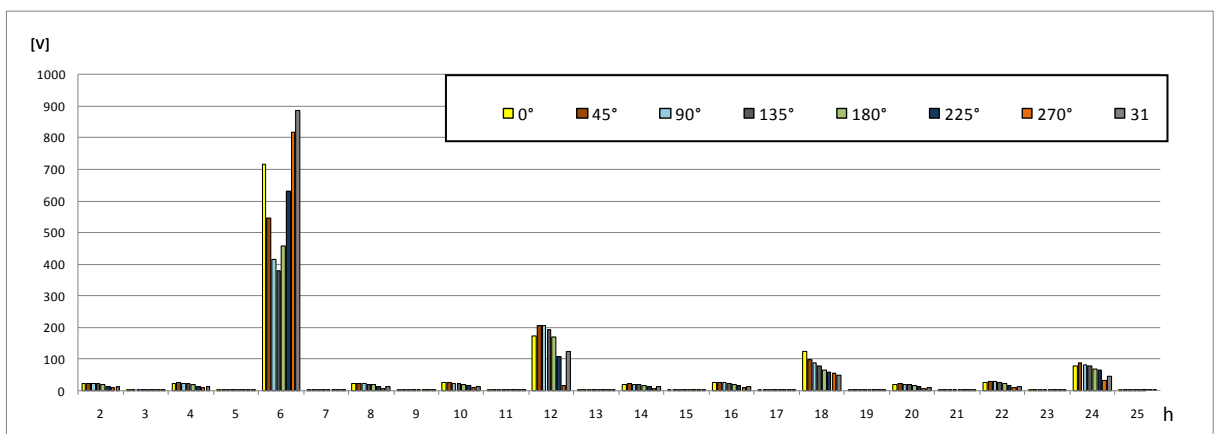


obr. p17.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 10 % 7. harmonické

### Vliv fáze 7. harmonické, s amplitudou 20 % základní harmonické, na výstupní napětí usměrňovací jednotky

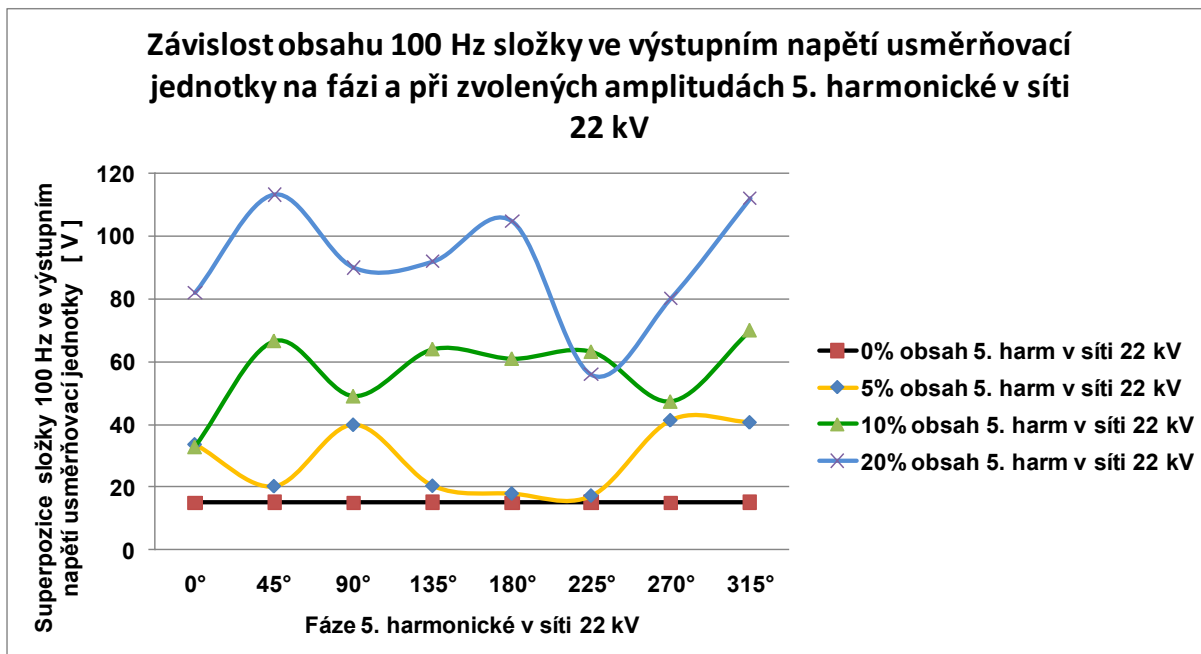


obr. p18.1 Průběh výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 20 % 7. harmonické

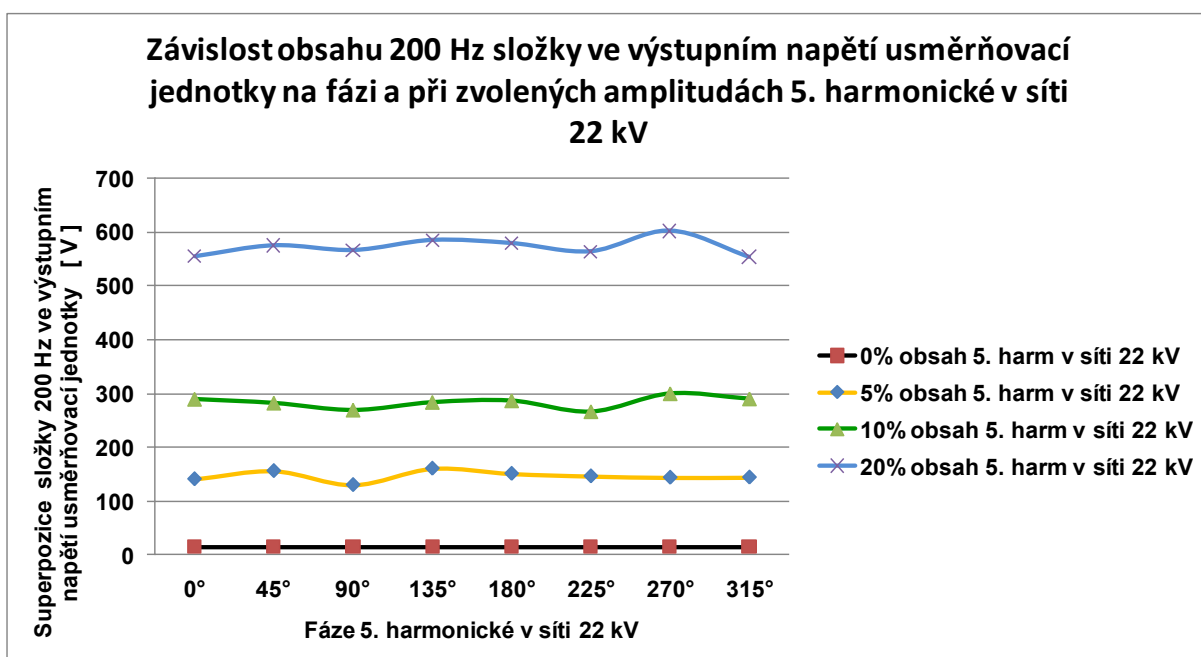


obr. p18.2 Spektrální složení výstupního napětí usměrňovací jednotky v závislosti na fázi 20 % 7. harmonické

**Závislost obsahu jednotlivých složek ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV**

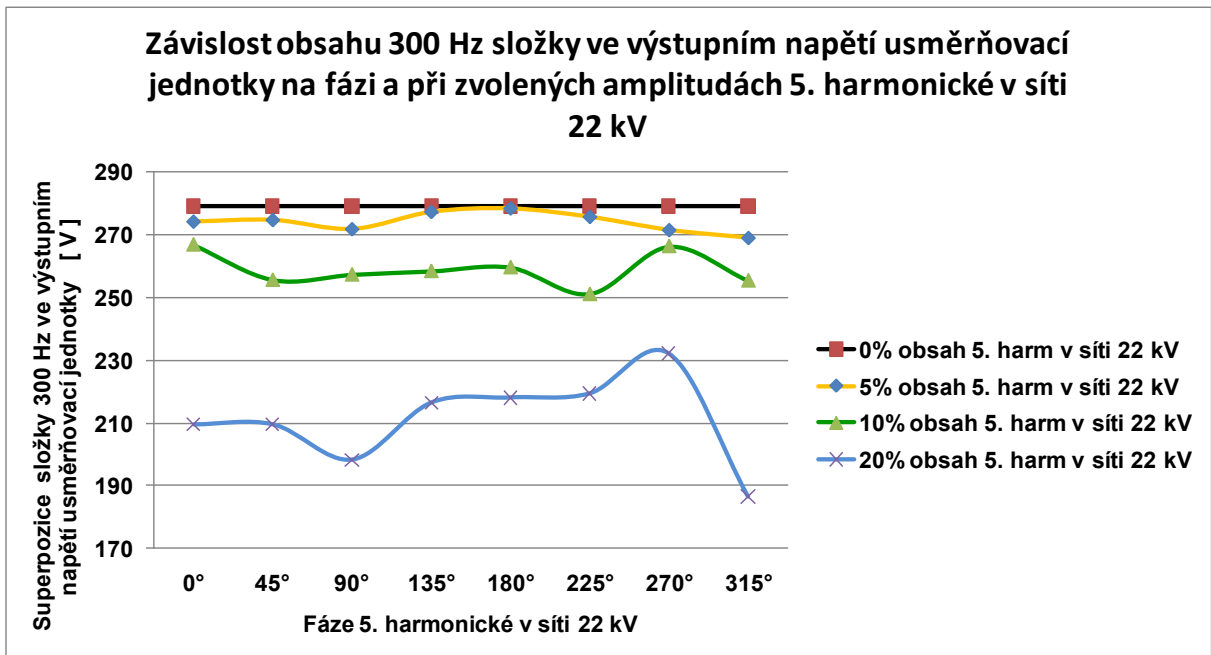


obr. p19.1 Závislost obsahu 100 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV

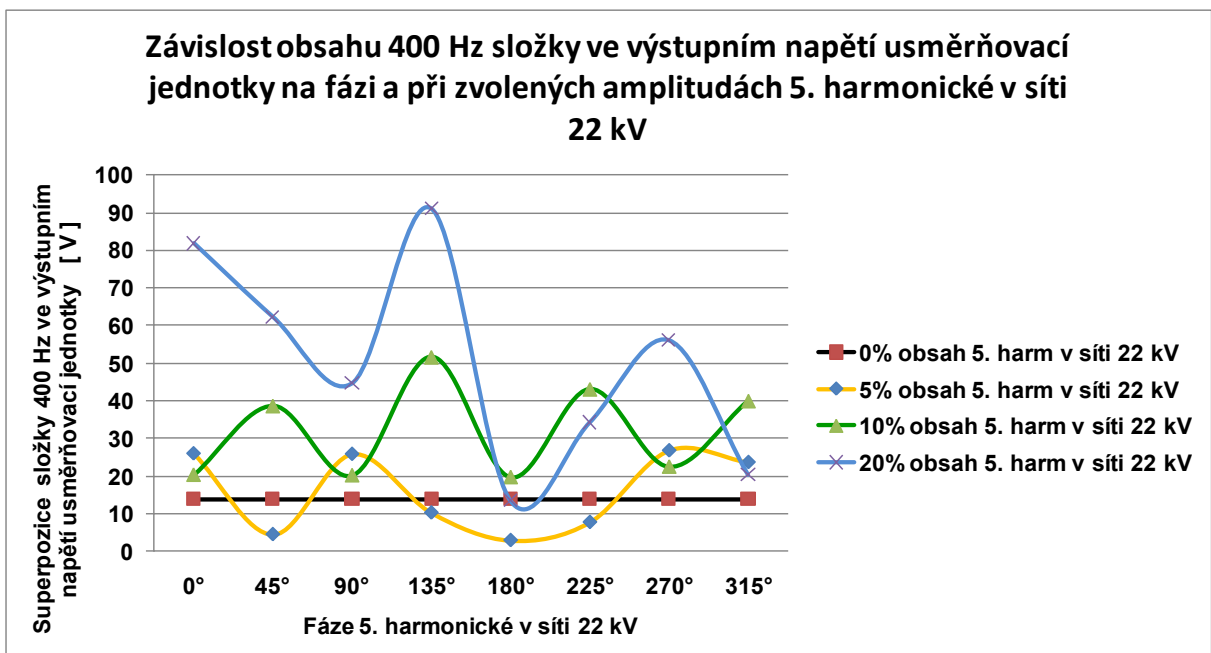


obr. p19.2 Závislost obsahu 200 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV



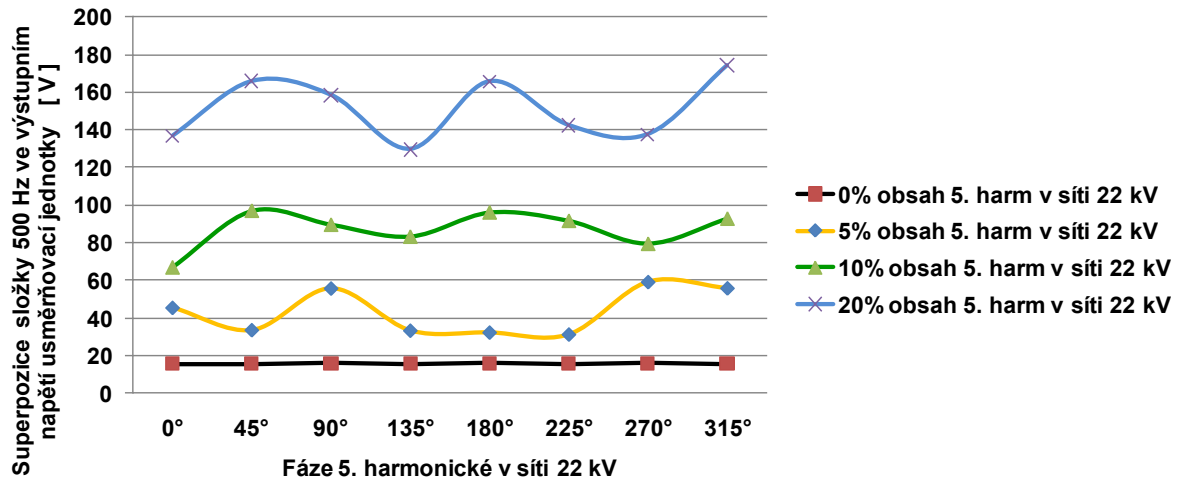


obr. p19.3 Závislost obsahu 300 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV



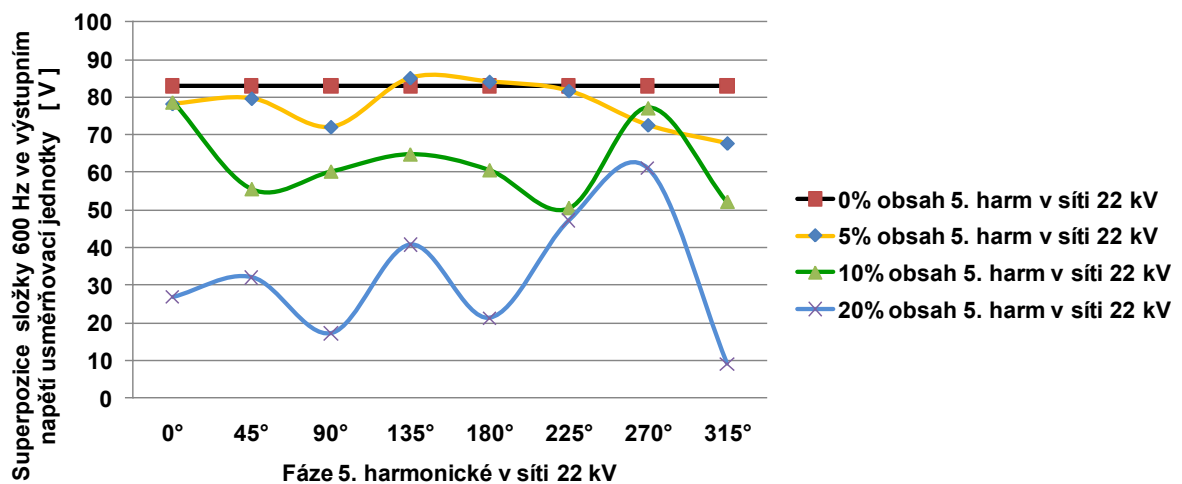
obr. p19.4 Závislost obsahu 400 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV

**Závislost obsahu 500 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV**



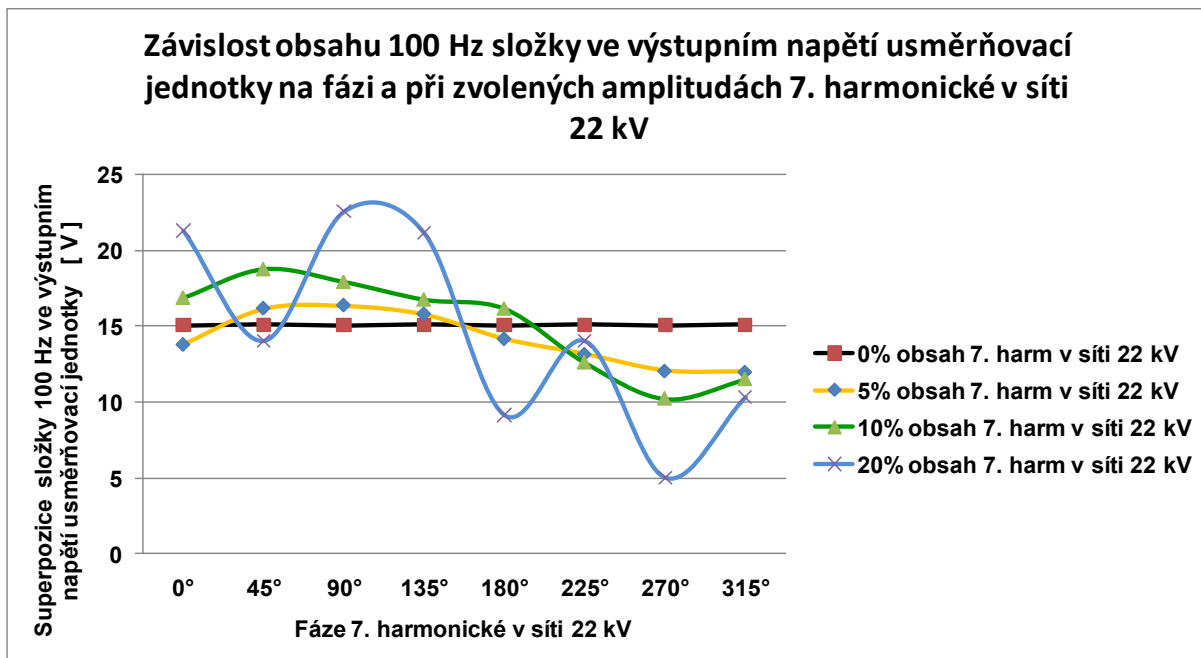
obr. p19.5 Závislost obsahu 500 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV

**Závislost obsahu 600 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV**

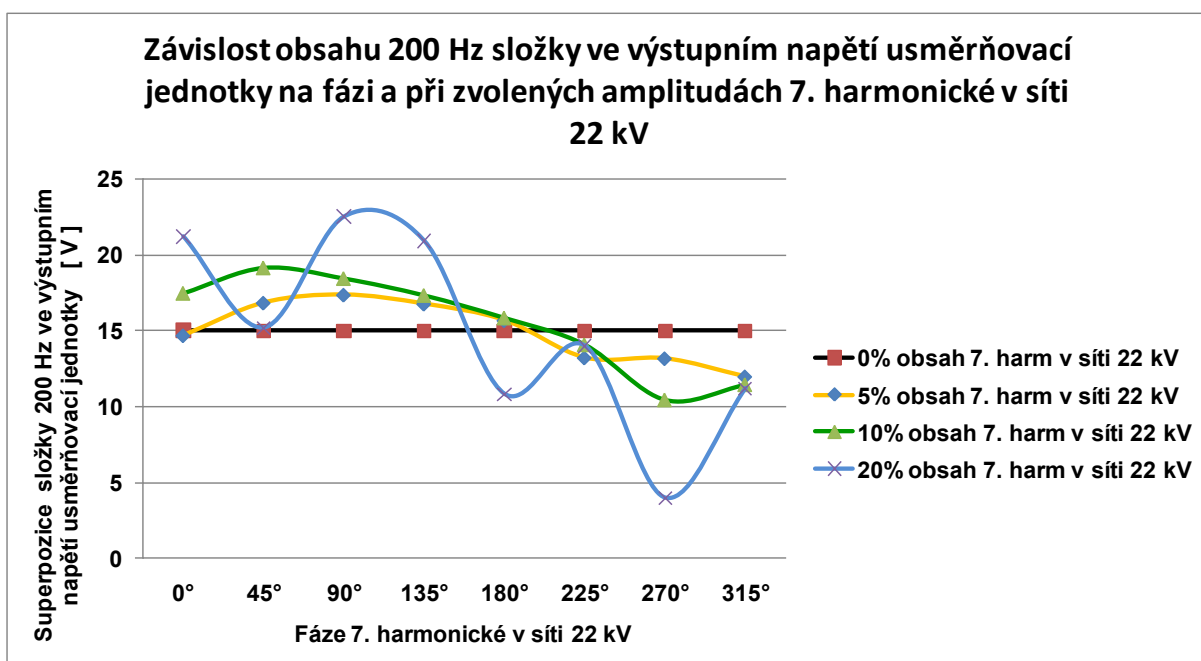


obr. p19.6 Závislost obsahu 600 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 5. harmonické v síti 22 kV

**Závislost obsahu jednotlivých složek ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV**

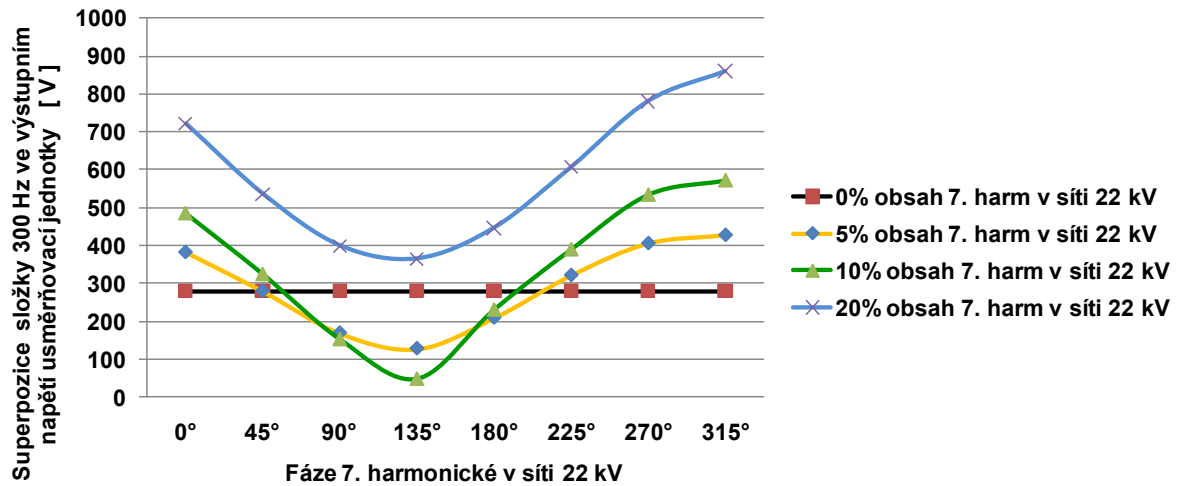


obr. p20.1 Závislost obsahu 100 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV



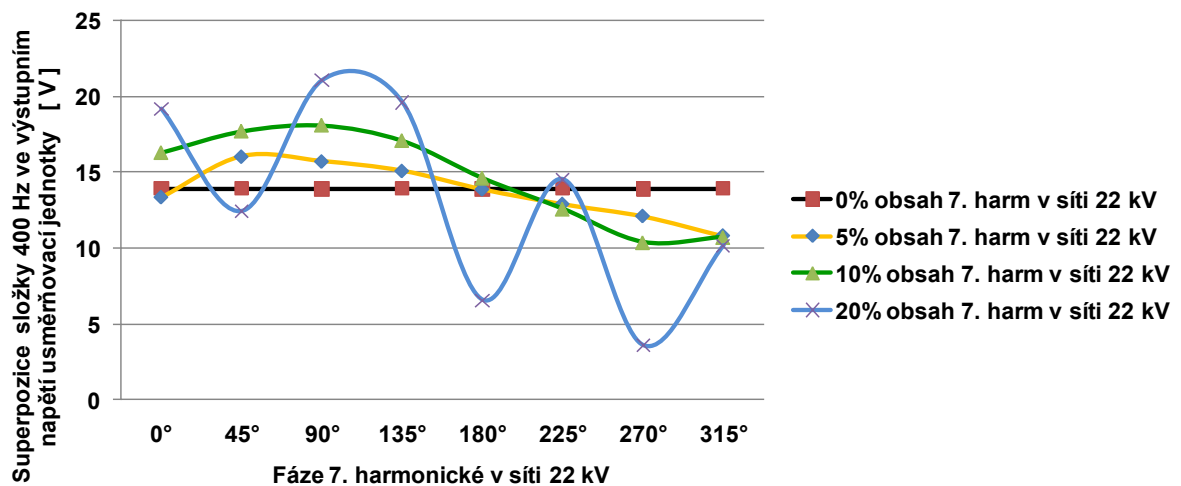
obr. p20.2 Závislost obsahu 200 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV

**Závislost obsahu 300 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV**

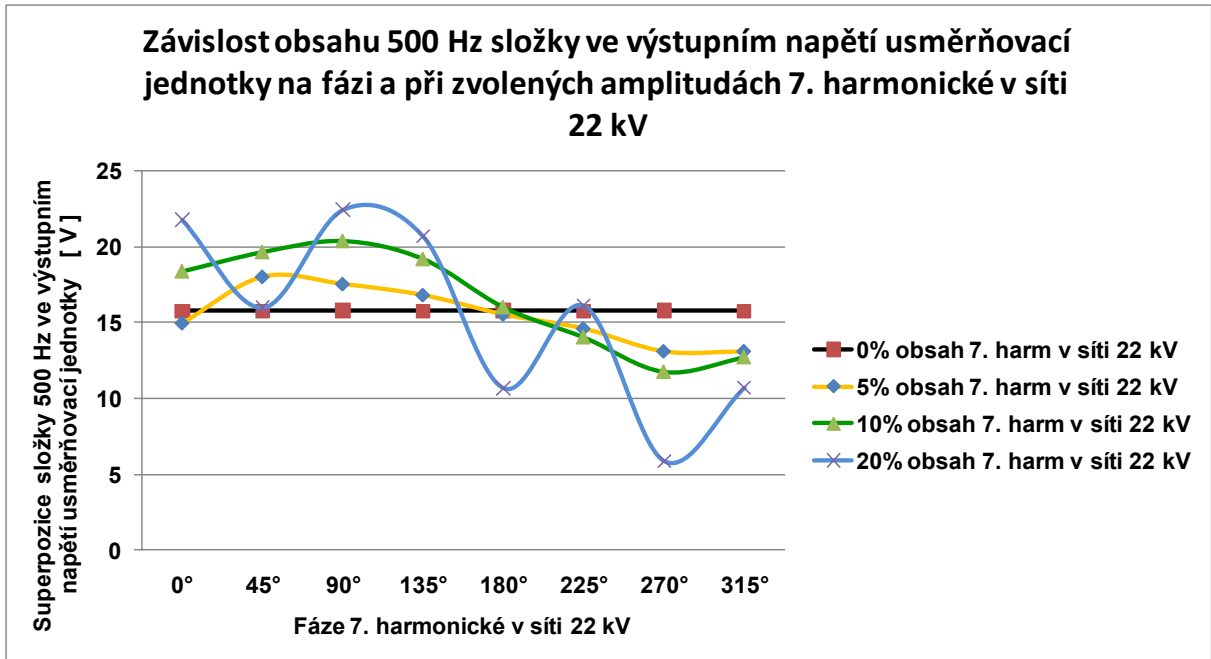


obr. p20.3 Závislost obsahu 300 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV

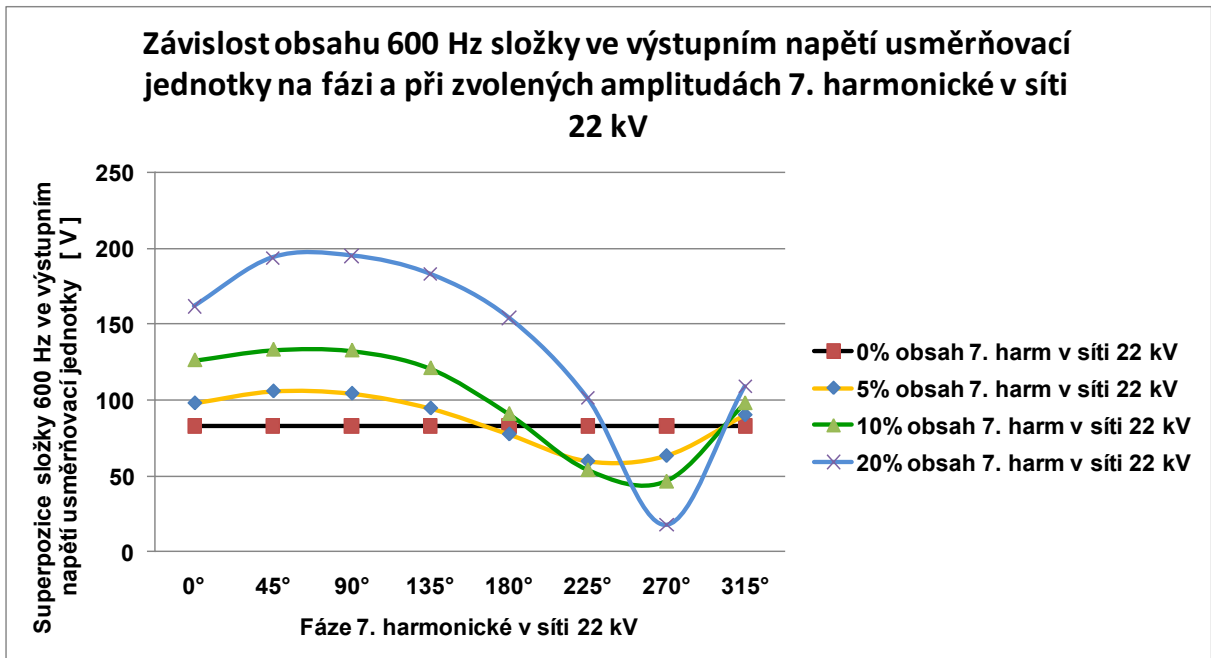
**Závislost obsahu 400 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV**



obr. p20.4 Závislost obsahu 400 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV



obr. p20.5 Závislost obsahu 500 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV



obr. p20.6 Závislost obsahu 600 Hz složky ve výstupním napětí usměrňovací jednotky na fázi a při zvolených amplitudách 7. harmonické v síti 22 kV