



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky**

# **Návrh filtračně-kompenzačních zařízení s ohledem na charakteristiky nadřazené soustavy**

**Project of filtering-compensating devices due to characteristics of an  
overriding system**

Bakalářská práce

Študijný program: Elektrotechnika, energetika a management

Študijný odbor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedúci práce: Ing. Martin Čerňan

**Nikolai Solenov**

---

**Praha 2015**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Nikolai Solenov**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Návrh filtračně-kompenzačních zařízení s ohledem na charakteristiky nadřazené soustavy**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled požadavků na kvalitu elektrické energie.
- 2) Popište principy zlepšení kvality elektrické energie v průmyslových sítích, zaměřte se na zařízení SVC.
- 3) Vytvořte matematické modely charakteristik nadřazených elektrizačních soustav.
- 4) Vytvořte studie zlepšení kvality elektrické energie pro statickou a pro dynamickou zátěž.

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 50160
- [2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. Voltage quality in electrical power systems. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755.
- [3] TLUSTÝ, J.: Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích, ČVUT, 1999

Vedoucí: Ing. Martin Čerňan

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

## Prohlášení

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

V Praze, dne 19. května 2015

Podpis

.....

## **Poděkování**

Především chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Martinu Čerňanovi, za jeho neuvěřitelně důležité konzultace a blahosklonní přístup, bez pomoci kterého tuto bakalářskou práci nebylo by možný ukončit. Chtěl bych poděkovat taky mým rodičům, za umožnění studia na vysoké škole na území České Republiky. Dále také chtěl bych poděkovat mým přátelům za konzultace gramatické stránky práce a tolerování značného omezení mého volného času.

## Abstrakt

Práce se primárně zabývá kvalitou elektrické energie v průmyslových sítích s ohledem na takové důležité parametry kvality, jako jsou jalový výkon, vyšší harmonické a flicker efekt. V bakalářské práci byla problematika postupně vysvětlována od určení požadavků na kvalitu elektrické energie hlavně s ohledem na technickou normu ČSN EN 50160 až po vysvětlení metodik výpočtů šíření flicker efektu a vyšších harmonických pomocí ukázkových příkladů. V dalších částech se práce věnuje popisu základních principů zlepšení kvality elektrické energie s vlastním příkladem různých filtrů vyšších harmonických a porovnání jejich charakteristik. Dalším bodem práce byl popis SVC kompenzačního zařízení a filtrů vyšších harmonických. V praktických příkladech jsme se zabývali návrhem filtrů vyšších harmonických pro statickou i dynamickou zátěž. Posledním bodem práce jsou ukázky vybraných ekonomických aspektů navržených řešení, což je v současné době taky důležité. V závěru byli ukázány hlavní výhody navržených řešení s ohledem na problematiku kvality elektrické energie.

**Klíčová slova:** Kvalita elektrické energie, flicker efekt, vyšší harmonická napětí, SVC, filtry vyšších harmonických.

## Abstract

The bachelor thesis primarily concerned with quality of electricity in industrial networks with focus on such important points of electricity as reactive power quality, higher harmonics and flicker effect. The bachelor thesis topic was explained step by step from the determination requirements for the quality of electricity, mainly with respect to technical standard EN 50160 to explanation methodology for calculation of dissemination flicker effect and higher harmonics by the sample example. In the following parts of the thesis is devoted to describe the basic principles of improvement the quality of electricity with proposed example of different higher harmonics filters and compared their characteristics. Another point of the thesis was description of SVC compensation element and higher harmonics filters. In practical examples we dealt with proposal of higher harmonic filters for dynamic and static load. The last point of the thesis was accounting economic aspects of the proposed solutions, which nowadays is also important. In conclusion I've demonstrated out the main advantages of the proposed solutions with regard to the issue quality of electricity.

**Key words:** Power Quality, Higher Harmonic Voltage, Flicker Effect, SVC, Higher Harmonics Filters

## Obsah

<b>Zadání</b> .....	<b>2</b>
<b>Prohlášení</b> .....	<b>3</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Obsah</b> .....	<b>7</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>9</b>
<b>1 Požadavky na kvalitu elektrické energie (ČSN EN 50160), pro NN, VN a VVN</b> .....	<b>11</b>
1.1 Vyhodnocování kvality .....	11
1.2 Účinník odběru.....	12
1.3 Vyšší harmonické.....	14
1.4 Nesymetrie napětí .....	15
1.5 Flicker efekt .....	16
<b>2 Charakteristiky nadřazené soustavy</b> .....	<b>19</b>
2.1 Impedanční matice a viděna impedance .....	19
2.2 Charakteristiky pro síť induktivního, RL a RLC charakteru .....	23
2.3 Metodika výpočtů šíření flecker efektu a vyšších harmonických .....	24
<b>3 Principy zlepšení kvality elektrické energie</b> .....	<b>31</b>

3.1	Kompenzace jalového výkonu .....	31
3.2	Filtrace vyšších harmonických .....	32
3.3	Potlačení flicker efektu .....	39
<b>4</b>	<b>SVC (Static Var Compensator).....</b>	<b>40</b>
4.1	Základní princip .....	40
4.2	Filtry vyšších harmonických.....	41
4.3	Dekompenzační člen .....	43
4.4	Přínosy SVC pro zlepšení kvality elektrické energie.....	44
<b>5</b>	<b>Praktické ukázky.....</b>	<b>46</b>
4.1	Návrh filtrů vyšších harmonických pro usměrňovač v kapacitní síti .....	46
4.2	Návrh SVC pro dynamickou zátěž.....	49
<b>6</b>	<b>Ekonomické aspekty navržených řešení.....</b>	<b>53</b>
	<b>Záver .....</b>	<b>56</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>57</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>58</b>
	<b>Príloha A.....</b>	<b>59</b>
	<b>Príloha B.....</b>	<b>60</b>



## Úvod

V současné době se v energetice postupně rozšiřuje používání výkonové elektroniky. Mezi nejpoužívanější jednotky patří fázové řízené usměrňovače, hlavně tyristorově. Teto usměrňovače hlavně mohou poskytovat řízení středních hodnot buď to výstupního napětí nebo proudu a tím řízení střední hodnoty okamžitého výkonu, který jde do zátěže. Je to taky spojené se zásadním problémem energetiky a distribuci elektrické energie ke spotřebitelům. Řízené usměrňovače občas bývají součástkami většiny elektrických přístrojů napájených z elektrické sítě střídavým proudem, používaným k distribuci elektrické energie, protože tě přístroje většinou potřebují stejnosměrný proud ke své činnosti.

Dalšími důležitými s hlediska kvality elektrické energie spotřebičemi jsou elektrické obloukové pece, velikost se pohybuje v rozmezí od 1 až do 400 tun pro výrobu oceli ze surového železa. Používané hlavně ve slévárnách pro výrobu slitinových výrobků. Hlavními důvody pro použití těchto pecí je používání elektrické energie pro roztavení místo paliva, plynu, a proto menší náklady, schopnost k roztavení poplatek (šrotu) téměř jakékoliv složení, přesné řízení teploty kovu a jeho chemické složení.

Hlavními problémy pro tyto velké skupiny spotřebičů, že jsou zdroji vyšších harmonických proudů a jalového výkonu pro napájecí síť a taky příčinami nesymetrie napětí napájecí sítě. Drobnější popis problematiky používání těchto komponentů elektrizační soustavy bude uveden v následujících kapitolách práce.

Z historického pohledu na začátek používání elektrické energie hospodárnost při její použití neměla takový velký rozvoj jak v současné době. Protože v tuto dobu neexistovalo tolik znalosti o kvalitě elektrické energie, že může se měnit v závislosti na denních změnách v zatížení elektrizační soustavy, počasí a klimatických podmínkách, výskytech nouzového provozu v síti atd. Jako následky špatné kvality elektrické energie mohou být deformace sinusové formy napájecího napětí, a z toho vznik vyšších harmonických a vliv na citlivé spotřebiče. Snížená kvalita elektřiny může vést k pozorovatelným změnám v provozních podmínkách u elektrických spotřebičů v důsledku poklesu produktivity pracovních mechanismů, špatnou kvalitu výrobků, zkracují životnost elektrických zařízení, zvyšuje pravděpodobnost nehody.

Tato bakalářská práce bude věnovaná kvalitě elektrické energie, metodám odstranění špatných účinků vyšších harmonických, návrhem řešení pro soustavy se zadanými předem parametry, následujícím porovnáním výsledků těchto řešení z technických norem a ekonomického pohledu.

## Požadavky na kvalitu elektrické energie

Postupem času se požadavky na kvalitu elektrické energii neustále zvyšují. Tenhle trend si vyžaduje pozornost jak výrobců, tak i spotřebitelů elektrické energie, aby byli schopni vyhovět novým trendům a normám na kvalitu elektrické energie, kterou se budeme zabývat v dané kapitole.

### 1.1 Vyhodnocování kvality

Vyhodnocování kvality elektrické energii na území Evropské Unie se většinou řídí evropskou technickou normou ČSN EN 50160. V této normě jsou uvedené hlavní charakteristiky napětí v místech připojení odběratelů zveřejněných distribučních sítí nízkého a vysokého napětí za normálních provozních podmínek. V normě jsou také uvedené meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoliv odběratel, ale nemá v sobě popis typické situace odběratele připojeného na veřejnou distribuční síť.

Předmětem této normy je definování a popis charakteristik napájecího napětí týkající se:

- kmitočtu,
- velikosti,
- tvaru vlny,
- symetrie třífázových napětí.

Pro správné vyhodnocování kvality elektrické energie je potřebné vysvětlit pojem kvality elektrické energie. Kvalita elektrické energie je definovaná jejími charakteristikami v daném bodě ES, srovnání s hodnotami uvedenými v normách.

Vyhodnocování kvality elektrické energii lze provést pomocí charakteristik popisujících její kvalitu, vycházející z normy ČSN EN 50160 pro sítě NN a VN. Jsou to:

- kmitočet sítě
- velikost napájecího napětí

- odchylky napájecího napětí
- rychlé změny napětí:
  - velikost rychlých změn napětí
  - míra vjemu flikru
- krátkodobé poklesy napájecího napětí
- krátkodobá přerušení napájecího napětí
- dlouhodobá přerušení napájecího napětí
- dočasná přepětí o síťovém kmitočtu mezi živými vodiči a zemí
- přechodná přepětí mezi živými vodiči a zemí
- nesymetrie napájecího napětí
- harmonická napětí
- mezipharmonická napětí
- úrovně napětí signálů v napájecím napětí.

## 1.2 Účinník odběru

Celá řada spotřebičů elektrické energiiv provozu energetické soustavy odebírá ze sítě nejen činný výkon ale také i výkon jalový, většinou charakteru induktivního. Účinník můžeme definovat jako fyzickou veličinu, která vyjadřuje podíl mezi výkonem činným  $P$  a zdánlivým  $S$  v elektrizační soustavě(1.1).

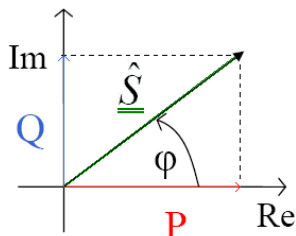
$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

Definujeme všechny tři typy výkonů,( činný výkon  $P$  (1.2), jalový výkon  $Q$  (1.3) a zdánlivý výkon  $S$  (1.4).

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi \quad (1.2)$$

$$Q = UI \sin \varphi = S \sin \varphi \quad (1.3)$$

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$



**Obr. 1.1 - Trojúhelník výkonů – vztah mezi činným  $P[W]$ , jalovým  $Q[VA]$  a zdánlivým výkonem  $S[VA]$**

Kompenzací jalového výkonu pak rozumíme snížení odběru induktivního jalového výkonu pomocí dodatečných technických opatření na předepsanou hodnotu, tj. požadovaný účinník v rozmezí  $\cos(\varphi) = 0,95-1$ .

Důsledky špatného účinníku je v elektrizační soustavě nutný přenos činného i jalového výkonu, tj. tzv. zdánlivého výkonu, který je větší než potřebný výkon činný, který způsobuje problémy v elektrizační soustavě:

- zvýšení nákladů na prvky elektrizační soustavy,
- snížení využití generátorů,
- zvýšení tepelných ztrát,
- zvětšení úbytku napětí v síti,
- zhoršení zkratových poměrů v síti.

Pro zlepšování účinníku můžeme používat jeden ze dvou nejrozšířenějších způsobů:

- správným návrhem a provozováním zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů, což v našem případě bude správný výběr a regulace transformátorů, jmenovitého napětí a například využití synchronních motorů místo asynchronních.
- Využitím takzvaných kompenzačních zařízení, které jsou zdrojem jalového kapacitního výkonu.

### 1.3 Vyšší harmonické

Pojmu vyšších harmonických můžeme rozumět jako napětí s takovou frekvencí, která bude vždy celočíselným násobkem základní frekvence napájecího napětí sítě. Vyšší harmonické většinou mohou být vyvolané hlavně nelineárními zátěžemi odběratelů připojených na napájecí síť, což mohou být například spínané zdroje, polovodičové měniče, obloukové pece a svařování, transformátory a tlumivky. Nejdůležitější věc spojitá s vyššími harmonickými v elektrizačních soustavách, která nás zajímá nejvíce je proud. Harmonické proudy, protékající v síti vyvolají harmonické napětí a tyto veličiny se v místech odběru mění s časem. Pro charakterizování obsahu harmonických se používá činitel harmonického zkreslení THD(1.5), (1.6), (1.7).

Pro proudy platí:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (I_k)^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

Pro napětí platí:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{25} (U_k)^2}}{U_1} \quad (1.6)$$

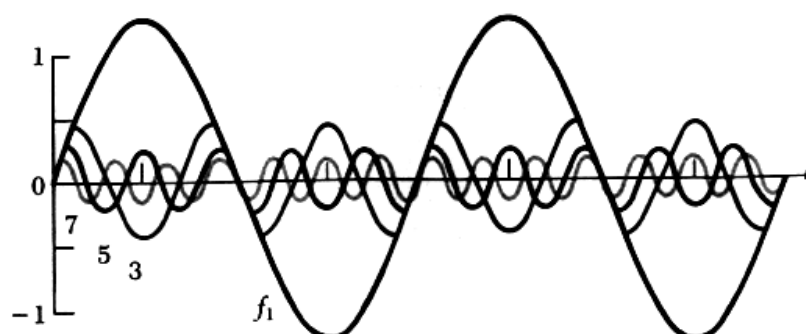
Kde  $I_1$  a  $U_1$  jsou proud a napětí základní harmonické,  $I_k$  a  $U_k$  jsou  $k$ -té harmonické. Pro celkové harmonické zkreslení používán vztah (1.7)

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{25} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \quad (1.7)$$

Vzhledem k tomu, že harmonické vyšších řádů jsou obvykle malé a obtížně měřitelné jsou v ČSN EN 50160 stanovené jen do řádu 25.

Harmonické se měří v odběrném místě pomocí přístrojů vyhovujícím normě ČSN EN 61000-4-7. Základní měření se skládá z desetiminutových efektivních hodnot harmonických a činitele zkreslení. V soustavě VN se měření provede na sdružených napětích a v soustavě NN se měření

provede na fázových napětích. Perioda sledování harmonických musí být jeden týden včetně soboty a neděle.



**Obr. 1.2 – Příklad průběhu čtyř harmonických složek (o frekvencích  $1f$ ,  $3f$ ,  $5f$ , a  $7f$ .)**

Za vyhovující normě ČSN EN 50160 jsou považovány vyšší harmonické napětí v případě, pokud jejich desetiminutové efektivní hodnoty jsou v 95 % případech menší nebo rovné stanovené mezi.

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Nenásobky 3. harmonické		Násobky 3. harmonické		Harmonická	$U_h$ v %
Harmonická	$U_h$ v %	Harmonická	$U_h$ v %		
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6-24	0.5
13	3	21	0.5		
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

**Tab. 1.1: Úrovně harmonických napětí v předávacím místě v procentech  $U_n$  pro řády harmonických 2 až do 25.**

## 1.4 Nesymetrie napětí

Rozložení zatížení na napájecí síť nemusí být vždy rovnoměrně. Důsledkem tohoto nerovnoměrného zatížení je vznik nesymetrických proudů a nesouměrnost napětí. Nesymetrie napětí (1.8) definuje jako podíl zpětné ( $U_2$ ) a sousledné ( $U_1$ ) složky ze základní harmonické napájecího.

$$Uu = \frac{U_2}{U_1} * 100 \quad (1.8)$$

Ten to poměr stačí pro hodnocení sdružených napětí. Ale naopak fázové napětí mohou být i více nevyvážené a proto se v normě ČSN EN 50160 nesymetrie napájecího napětí rozlišuje i na hodnocení poměru netočivé složky napětí  $U_0$  ke složce sousledné koeficientem nevyváženosti (1.9):

$$\varepsilon = \frac{U_0}{U_1} \quad (1.9)$$

Nesymetrické napětí mohou být vyvolané:

- Indukčnípeco sítovéfrekvenci
- Odporovápec
- Oblouková pec a “konduktivní” ohřívací zařízení

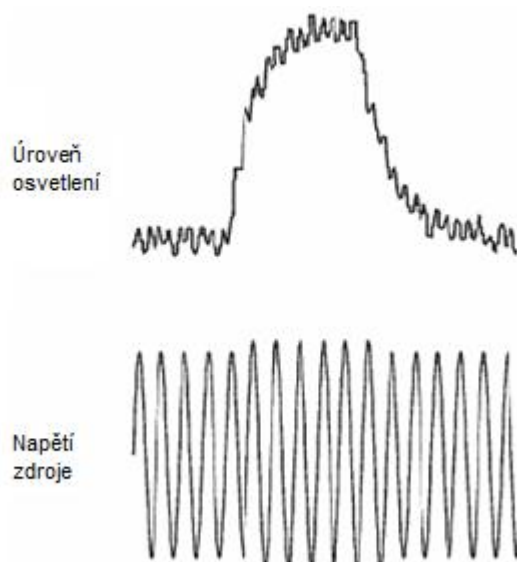
Problematika spojená z nesymetrii napětí je taková, že postejném činném výkonu může být proudové zatížení pro jednofázový odběr až dvojnásobné proti symetrické zátěži. Za normálních provozních podmínek musí byt v libovolném týdenním období 95% desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0 až 2% sousledné složky.

## 1.5 Flicker efekt

Rychlé periodické změny napětí se nazývají kolísání napětí. Tento jev se může projevit na světelných spotřebičích rychlou změnou světelného toku a způsobuje změnu zrakového vnímání. Blikání světelných zdrojů (tzv. flicker), většinou bývá vyvoláno fluktuací napětí, která je popsána jako opakující anebo nahodilé změny okamžité hodnoty napětí, které může přivést ke zhoršení zraku, fyzickou a psychologickou ochablost, což může přivést ke zhoršení jak kvality práce tak i v nejhorší situaci až k pracovnímu zranění. Existuje dva základní typu fluktuace napětí, které mohou být rozdělena na cyklické a necyklické. Cyklickou fluktuaci napětí můžeme nazvat výsledek periodického kolísání napětí, ale přitom příčinami necyklické fluktuace můžeme nazvat náhodné rychlé změny velikosti napětí. Aby jsme mohli popsat kolísání napětí, jsou potřebné dva základní parametry, a to jsou velikost kolísání a frekvence kolísání obálky v případě periodického kolísání, a velikost změn a jejich četnost v čase v případě necyklického

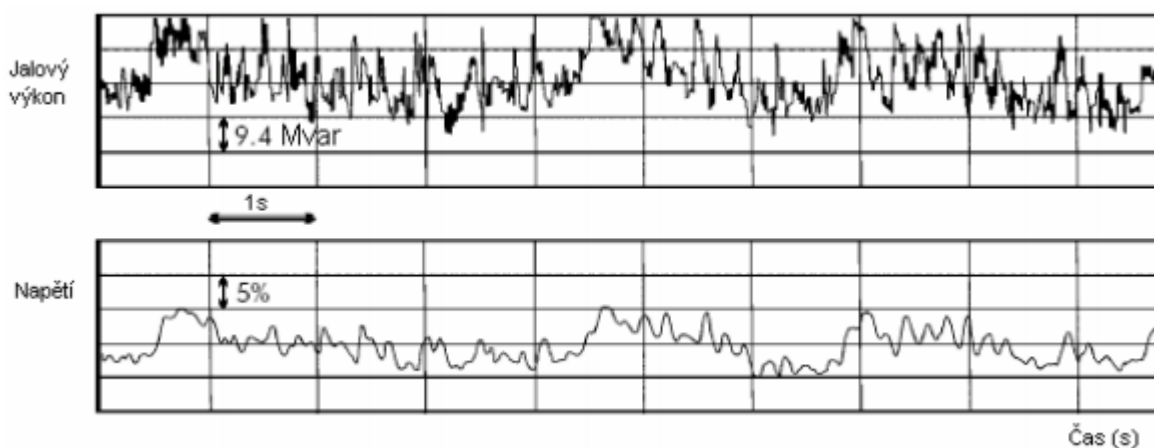


kolísání, vyvolaného náhodnými rychlými změnami velikosti napětí. Oba parametry, velikost fluktuace i výskyt v čase, jsou pro hodnocení negativního důsledku fluktuace napětí velmi důležité.



**Obr. 1.3 - Vliv změn napětí na světelný tok žárovky**

Hlavním důvodem pro vznik fluktuace napětí můžeme nazvat časovou změnu činného i jalového výkonu zátěže což vyvolává rychlé změny napětí. Takovými zátěžemi většinou bývají obloukové pece, pohony válcovacích stolic, nabíječky atd. Můžeme říct, že jsou to zátěže s velkým počtem změn výkonu během své práce.



**Obr. 1.5 - Změny jalového výkonu a následné kolísání napětí v bodě připojení obloukové pece**

Taky zdroji vzniku fluktuace jsou malé výkonové zátěže jako například zařízení pro rozběh indukčních motorů, svářečky, ohřívače vody, regulátory výkonu, elektrické pily a kladiva, pumpy a kompresory, jeřáby a výtahy.

Dalšími případy vzniku fluktuace mohou být spínání kompenzačních kondenzátorů a přepínání transformátorových odboček, které mají velký vliv na změnu induktivní složky náhradní impedance. Takový efekt mohou mít změny při generování výkonu, např. větrné elektrárny. Takže někdy mohou nastat případy, při kterých mohou být kolísání napětí způsobené nízkofrekvenčními mezi-harmonickými složkami.

Příčiny nebo zařízení, které mohou způsobit flicker:

- Spínání velké zátěže
- Rozběh velkých motorů
- Proměnlivá zátěž
- Elektrické obloukové pece

## 2 Charakteristiky nadřazené soustavy

### 2.1 Impedanční matice a viděná impedance

#### 2.1.1 Popis tvorby admitanční-matice

Admitanční matice je matice, která popisuje energetickou soustavu pomocí její admittance vypočtených z parametrů všech prvků soustavy. Admitanční matice ukazuje charakter a vlastnosti energetické soustavy. Začneme definicemi impedančních prvků, ze kterých se skládají většina energetických soustav, kde:

$$R = R, \text{ je impedance činného odporu} \quad (2.1)$$

$$L = j\omega L, \text{ je impedance induktivního charakteru} \quad (2.2)$$

$$C = \frac{1}{j\omega C}, \text{ je impedance kapacitního charakteru} \quad (2.3)$$

Pro tvorbu admitanční matice používáme metodu uzlových napětí (MUN). Pro výpočty mělo by nás zajímat impedance pro jednotlivé uzly. Velikost admitanční matice zaleží na počtu uzlů (například 4 uzly v soustavě budou odpovídat admitanční matice rozměrnosti 4\*4), taky je nutno poznamenat, že prvky admitanční matice budou na diagonále záporné a mimo diagonálu kladné, což platí pro spotřebičově orientovaný systém. Pro diagonální prvky admitanční matice platí, že jsou rovné součtu všech převrácených hodnot impedanci spojitých z tím to uhem (2.4).

$$\hat{Y}_{(k,k)} = - \sum_{\substack{m \neq k \\ m=1}}^n \hat{Y}_{km} = - \sum_{\substack{m \neq k \\ m=1}}^n \frac{1}{\square_{km}} \quad (2.4)$$

Například: Diagonální prvek  $\hat{Y}_{(k,k)} = -\left(\frac{1}{\square_{10}} + \frac{1}{\square_{12}} + \frac{1}{\square_{13}}\right)$

Pro nediagonální prvky admitanční matice platí, že je rovné převrácené hodnotě jednotlivé impedance mezi uzly (2.5).

$$\hat{Y}_{(k,m)} = \frac{1}{\square_{km}} \quad (2.5)$$

Například: Meziagonální prvek  $\hat{Y}_{(1,2)} = \frac{1}{\square_{12}}$

Impedanční matice najdeme z inverzní admitanční matice pomocí vztahu (2.6.)

$$Z = Y^{-1} \quad (2.6)$$

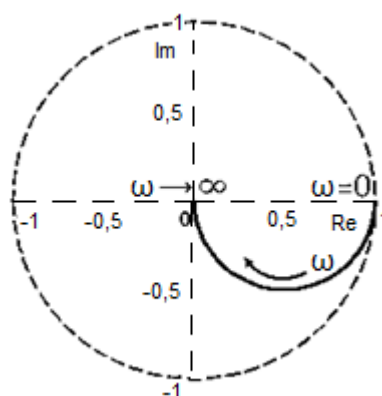
### 2.1.2 Amplitudová fázová charakteristika viděné impedance

Frekvenčními charakteristikami nazýváme závislost podílu amplitudy výstupního napětí k vstupnímu napětí a jejich fázový posun, který závisí na frekvenci. Většinou budeme se setkávat s dvěma nejčastější typy charakteristik. Zaprvé je to frekvenční charakteristika v komplexní rovině, což je vlastně hodograf komplexní funkce  $G(j\omega)$  vynesené v závislosti na reálné nezávisle proměnné  $\omega$ . Zadruhé nejčastěji používáme amplitudo-fázové frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích. V tomto případě vynášíme amplitudovou a fázovou charakteristiku odděleně. Vzhledem k tomu, že nás obvykle zajímá průběh frekvenční charakteristiky ve velkém rozsahu frekvencí a amplituda se v tomto rozmezí změní o několik řádů, vynášíme amplitudu i fázi v závislosti na logaritmu frekvence (resp. úhlové frekvence) a amplitudu vynášíme v decibelech. V našem případě však nebudeme uvažovat podíl vstupního a výstupního napětí, ale přímo výraz viděné impedance. Závislost výstupního napětí na frekvenci můžeme zapsat jako:

$$G(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} \quad (2.7)$$

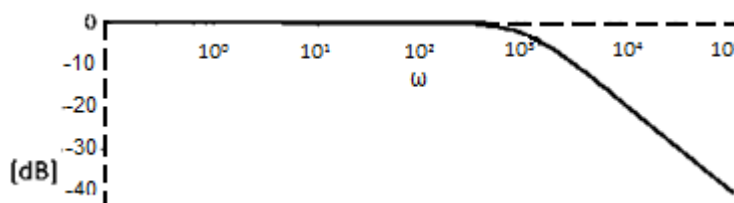
Tento přenos může být graficky znázorněn dvěma způsoby:

1. V komplexní rovině jako Hodograf(Nyquistova frekvenční charakteristika)
  - Hodograf je křivka v komplexní rovině, bodům které budou patřit hodnoty frekvence  $\omega$
  - Vzdálenost určitého bodu křivky s počátkem určuje modul přenosu
  - Úhel mezi reálnou osou a spojnicí vybraného bodu s počátkem určuje fázi přenosu



**Obr. 2.1–Hodograp (Nyquistova frekvenční charakteristika)**

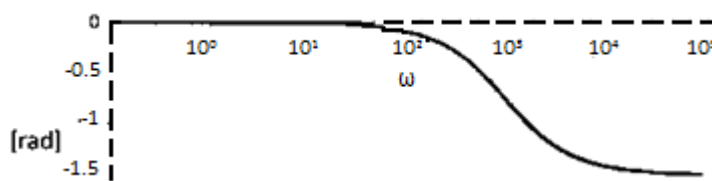
2. Modulová a fázová frekvenční charakteristika



**Obr. 2.2 – Modulová charakteristika**

Modulovou charakteristiku na obr.2.2 můžeme popsat rovnicí (2.8). Obě osy modulové charakteristiky mají logaritmický charakter. Jednotka je decibel [dB].

$$y = 20 \log(|G(j\omega)|) \tag{2.8}$$



**Obr. 2.3 – Fázová charakteristika**

Fázovou charakteristiku můžeme vyjádřit pomocí vztahu (2.9). Osa Y fázové charakteristiky je lineární a osa X je logaritmická. Jednotka je radián [rad].

$$y = \arg(G(j\omega)) \tag{2.9}$$

### 2.1.3 Určení zkratových výkonů v uzlech

Rázový zkratový výkon ve zkratovém obvodu  $S_k''$  je taková hodnota, kterou lze dle (2.10).

$$S_k'' = \sqrt{3} U_n I_k'' \quad (2.10)$$

Počáteční rázový zkratový proud (2.11) –  $I_k''$  je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci. Je to přechodný střídavý proud, vznikající v prvním okamžiku po zkratu, když napětí má ještě původní hodnotu a odpor se už zmenšil zkratem.

$$I_k'' = k_1 \frac{U_v}{Z_k}, \text{ kde:} \quad (2.11)$$

$k_1$  – je koeficientem nárazového zkratového proudu

$U_v$  – je vztažné napětí

$Z_k$  – je celková vypočtena impedance, která se počítá podle druhu zkratu

Taky existuje možnost vypočítat zkratové výkony ze vztažných hodnot, podle (2.12)

$$S_k'' = \sqrt{3} U_v \frac{I_v}{Z_1} = \frac{S_v}{Z_k}, \text{ kde:} \quad (2.12)$$

$S_v$  – vztažný výkon

$U_v$  – vztažné napětí

$I_v$  – vztažný proud

$Z_k$  – je celková vypočtená impedance, která se počítá podle druhu zkratu

Další možnost je přepočít pomocí celkové reaktance soustavy (2.13).

$$S_k'' = \frac{S_v}{X_v}, \text{ kde:} \quad (2.13)$$

$S_v$  – vztažný výkon

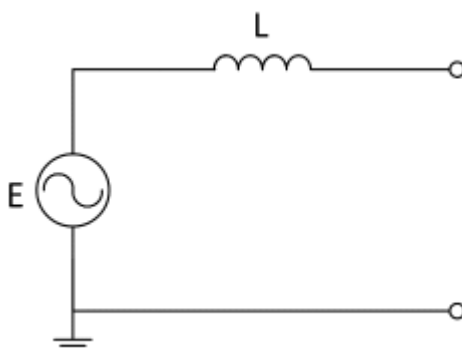
$X_v$  – celková reaktance soustavy

## 2.2 Charakteristiky pro síť induktivního, RL a RLC charakteru

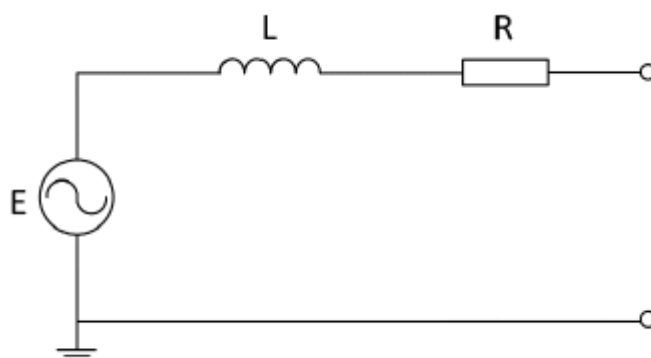
Charakter nadřazené soustavy bude mít velkou důležitost pro pozorování šíření vyšších harmonických rušení. Tímto pádem můžeme vysvětlit charakter soustavy jak amplitudovou frekvenční charakteristiku viděné impedance v místě zapojení. V praxi se můžeme setkat s několika druhy charakteristik:

- Síť induktivního charakteru
- Síť induktivního charakteru s uvažováním činného odporu
- Síť s paralelní rezonancí způsobenou parazitními kapacitami kabelových vedení.
- Síť s paralelními rezonancemi s prvky v soustavě.

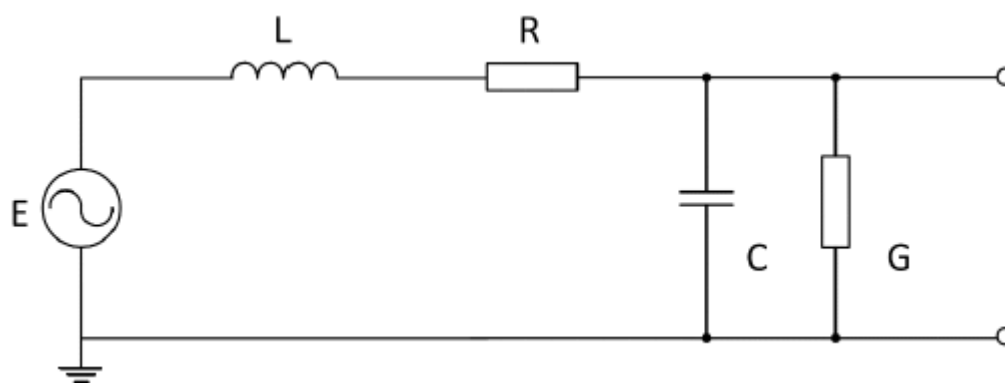
Dole jsou uvedeny obrázky s typickými druhými schématy v praxi.



*Obr. 2.4 – Síť induktivního charakteru*

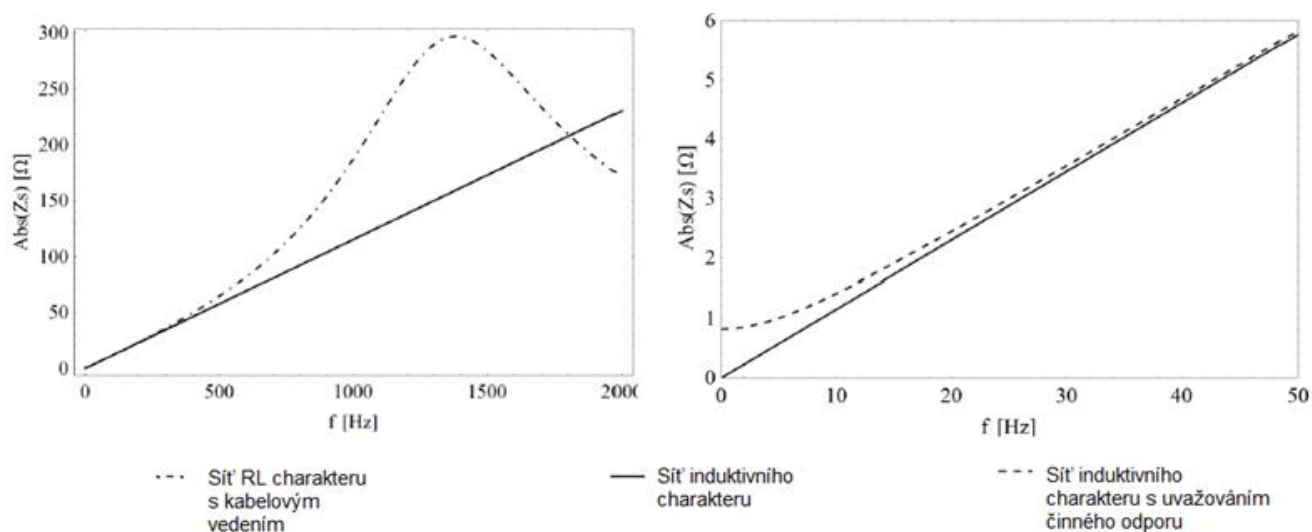


*Obr. 2.5 - Síť induktivního charakteru s uvažováním činného odporu*



Obr. 2.6 - Síť RL charakteru s kabelovým vedením

Na obr. 2.7-představené typické průběhy amplitudových frekvenčních charakteristik.



Obr. 2.7 - Srovnání charakteristik nadřazené soustavy s různými typy zátěží

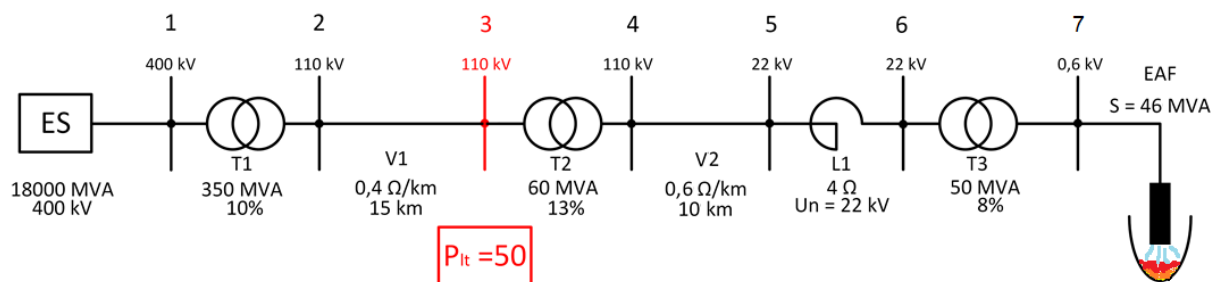
## 2.3 Metodika výpočtů šíření flicker efektu a vyšších harmonických

### 2.3.1 Metodika výpočtů šíření flicker efektu

Šíření flicker efektu je možné spočítat pomocí výpočtu časových průběhů napětí v jednotlivých uzlech soustavy, a z těchto naměřených hodnot bychom mohli pomocí algoritmu pro určení flicker efektu vypočítat potřebné údaje. Ale tento způsob určení je velmi komplikovaný a proto je používán v praxi ulehčený způsob, princip kterého vychází z analýzy prvků impedanční matice tj. v souvislosti s rázovým zkratovým výkonem jednotlivých uzlů.



V reálné soustavě to by vypadalo tak, že při vysokém zkratovém výkonu by doházelo k malým změnám napětí a naopak nízký zkratový výkon způsoboval velké změny napětí. Pro lepší pochopení dále bude uveden vzorový příklad, kde si popíšeme princip tohoto ulehčeného způsobu.



**Obr. 2.8 – Soustava navřená pro ukázkový příklad**

V prvním bodě našich výpočtu je potřeba přepočítání parametrů jednotlivých prvků naší konkrétní radiální sítě a sestavení admitanční matice. Dalším bodem výpočtu je inverze admitanční matice na matici impedanční. Výsledná impedanční matice bude ukazovat další potřebnou informaci pro výpočet. Takovou informaci jsou například zkratové poměry v síti, které určíme podle vztahu (2.14).

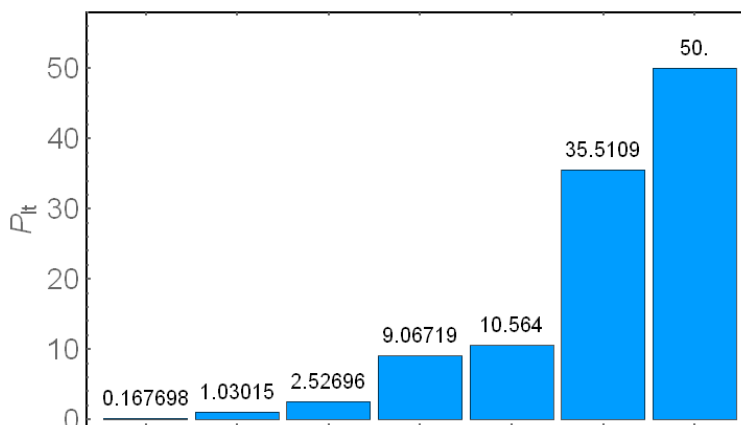
$$S_{ksi} = \frac{Sv}{Zi.i} \quad 2.14$$

Hlavním cílem výpočtů bude analýza šíření flicker efektu v dané síti. Ve výpočtech je nutné počítat jen s jedním zdrojem flicker efektu, jelikož ve výpočtech o více zdrojích neumíme ocenit vzájemnou superpozice pro odběr, a proto bude potřeba před výpočtem vybrat, pro jaký uzel soustavy budeme uvažovat zdroj šíření flicker efektu. Budeme vycházet z následujícího zápisu (2.14)

$$\begin{array}{cccccccccc}
 Z_{13} & P_{lt3} & & Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} & Z_{17} & 0 \\
 Z_{23} & P_{lt3} & & Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} & Z_{27} & 0 \\
 Z_{33} & P_{lt3} & & Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} & Z_{37} & P_{lt3} \\
 Z_{43} & P_{lt3} & = & Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} & Z_{47} & 0 \\
 Z_{53} & P_{lt3} & & Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} & Z_{57} & 0 \\
 Z_{63} & P_{lt3} & & Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} & Z_{67} & 0 \\
 Z_{73} & P_{lt3} & & Z_{71} & Z_{72} & Z_{73} & Z_{74} & Z_{75} & Z_{76} & Z_{77} & 0
 \end{array} \quad 2.15$$

Pomocí posledního vztahu (2.15) budeme určovat působení flicker efektu na soustavu.

$$\begin{array}{l}
 P_{lt1} \\
 P_{lt2} \\
 P_{lt3} \\
 P_{lt4} \\
 P_{lt5} \\
 P_{lt6} \\
 P_{lt7}
 \end{array} = \begin{array}{l}
 \frac{Z_{13}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{23}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{33}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{43}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{53}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{63}P_{lt3}}{Z_{33}} \\
 \frac{Z_{73}P_{lt3}}{Z_{33}}
 \end{array} \quad 2.16$$



Obr. 2.9 – Šíření flicker efektu v radiální síti pro uzel č. 7

Při zkoušení rozličných variací přijdeme k následujícím výsledkům:

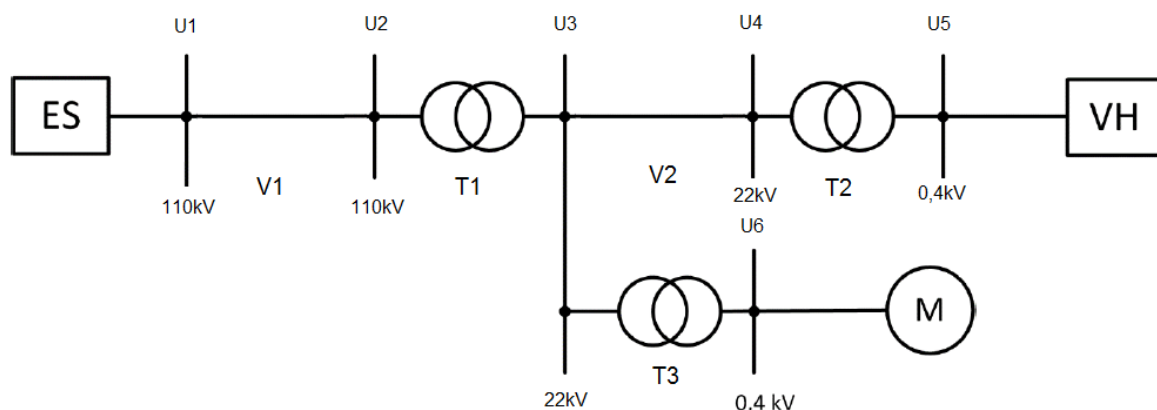
- Pokud bude zdroj flicker efektu na nízké napěťové úrovni, tak při posunu k vyšším úrovním dochází utlumování flicker efektu.

- Strmost utlumení bude záležet na velikosti odebíraného výkonu v bodě vzniku rušení. Rušivé odběry malých výkonů jsou utlumeny už na další napěťové úrovni, přičemž velké rušivé odběry se mohou objevit i na nejvyšších napěťových úrovních.

Pokud bude zdroj flicker efektu na vyšší napěťové úrovni, tak při pohybu k nižším úrovním nedochází k jeho principiálnímu útlumu. Můžeme říct jen o útlumu rovném jednotkám procent pouze v případě, když jsou na nižších napěťové úrovni větší odběry.

### 2.3.2 Metodika výpočtu šíření vyšších harmonických

Základní metodiku výpočtu šíření vyšších harmonických bude nejjednodušší ukázat na názorném příkladu. V této metodice je potřeba znát schéma zapojení a topologie soustavy a taky parametry jednotlivých prvků. V našem případě budeme uvažovat soustavu a parametry znázorněné na obrázku 2.8



Obr. 2.8 – Schéma zapojení pro názorný příklad

Výpočet se začíná z přepočtu indukčností a činných odporů jednotlivých prvků soustavy:

$$L_s = \frac{U_{Ns}^2}{S_{ks}} \frac{1}{2\pi 50} p_{T1}^2 p_{T3}^2 \quad 2.17$$

$$L_{T1} = u_{kT1} \frac{U_{nT1}^2}{S_{nT1}} \frac{1}{2\pi 50} p_{T3}^2 \quad 2.18$$

$$L_{T2} = u_{kT2} \frac{U_{nT2}^2}{S_{nT2}} \frac{1}{2\pi 50} \quad 2.19$$

$$L_{T3} = u_{kT3} \frac{U_{nT3}^2}{S_{nT3}} \frac{1}{2\pi 50} \quad 2.20$$

$$R_{T1} = \frac{P_k U_{nT1}^2}{S_{nT1}^2} p_{T3}^2 \quad 2.21$$

$$R_{T2} = \frac{P_k U_{nT2}^2}{S_{nT2}^2} \quad 2.22$$

$$R_{T3} = \frac{P_k U_{nT3}^2}{S_{nT3}^2} \quad 2.23$$

Indukčnost motoru je rovná:

$$L_M = \frac{U_{nM} \cos \varphi}{i_z P_{nM}} \frac{1}{2\pi 50} \quad 2.24$$

Indukčnost a odpor vedení je rovné:

$$L_{V1} = \frac{X_{V1} l_1}{314} \quad 2.25$$

$$L_{V2} = \frac{X_{V2} l_2}{314} \quad 2.26$$

$$R_{V1} = \frac{X_{V1}}{7l_1} \quad 2.27$$

$$R_{V2} = \frac{X_{V2}}{5l_2} \quad 2.28$$

Pak zavedeme impedance použitých typů prvků podle následujících vztahů:

$$Z_{Tn} = R_{Tn} + j\omega L_{Tn} \quad 2.29$$

$$Z_{Vn} = R_{Vn} + j\omega L_{Vn} \quad 2.30$$

$$Z_S = j\omega L_S \quad 2.31$$

$$Z_M = j\omega L_M \quad 2.32$$

Pro výpočet hlavně nás budou zajímat viděné impedance v jednotlivých uzlech soustavy, a proto potřebujeme sestavit admitanční matici. Pro diagonální prvky které bude platit:

$$\hat{Y}_{(1,1)} = -\left(\frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{Z_{V1}}\right) \quad 2.33$$

$$\hat{Y}_{(2,2)} = -\left(\frac{1}{Z_{V1}} + \frac{1}{Z_{T1}}\right) \quad 2.34$$

$$\hat{Y}_{(3,3)} = -\left(\frac{1}{Z_{T1}} + \frac{1}{Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{T3}}\right) \quad 2.35$$

$$\hat{Y}_{(4,4)} = -\left(\frac{1}{Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{T2}}\right) \quad 2.36$$

$$\hat{Y}_{(5,5)} = -\left(\frac{1}{Z_{T3}} + \frac{1}{Z_M}\right) \quad 2.37$$

Výsledná admitanční matice bude (2.38):

$$\hat{Y} = \begin{matrix} & -\left(\frac{1}{Z_{S1}} + \frac{1}{Z_{V1}}\right) & \frac{1}{Z_{V1}} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{Z_{V1}} & -\left(\frac{1}{Z_{V1}} + \frac{1}{Z_{T1}}\right) & \frac{1}{Z_{T1}} & 0 & 0 \\ \hat{Y} = & 0 & \frac{1}{Z_{T1}} & -\left(\frac{1}{Z_{T1}} + \frac{1}{Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{T3}}\right) & \frac{1}{Z_{V2}} & \frac{1}{Z_{T3}} \\ & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{V2}} & -\left(\frac{1}{Z_{V2}} + \frac{1}{Z_{T2}}\right) & \frac{1}{Z_{T2}} \\ & 0 & 0 & \frac{1}{Z_{T3}} & \frac{1}{Z_{T2}} & -\left(\frac{1}{Z_{T3}} + \frac{1}{Z_M}\right) \end{matrix} \quad 2.38$$

Impedanční matici dostaneme inverzí admitanční matice pomocí vztahu (2.39)

$$Z = \hat{Y}^{-1} \quad 2.39$$

Dalším krokem výpočtu bude počítání se zdrojem vyšších harmonických proudů. My ho můžeme umisťovat do libovolných uzlů v naší soustavě, ale výpočet můžeme provést jen pro

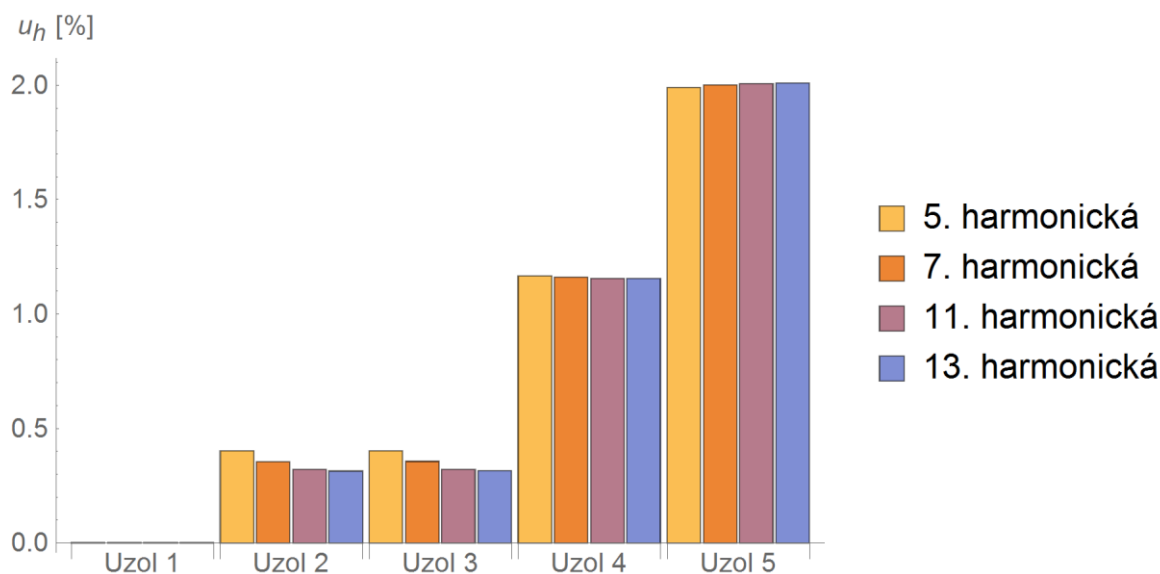
jeden uzel najedou. V našem příkladu přidáme proudové zdroje vyšších harmonických do uzlu 3. Najdeme si sloupcový vektor proudů uzlů podle (2.40)

$$I_h = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{I}_{3h} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad 2.40$$

Podle vztahu (2.41) a (2.42) zjistíme napětí vyšších harmonických v jednotlivých uzlech, které budou rovnat fázovým hodnotám:

$$U_h = Z_h I_h \quad 2.41$$

$$U_h = Abs \begin{pmatrix} p_1 \hat{U}_{1h} \\ p_2 \hat{U}_{2h} \\ p_3 \hat{U}_{3h} \\ p_4 \hat{U}_{4h} \\ p_5 \hat{U}_{5h} \end{pmatrix} \quad 2.42$$



**Obr. 2.9 – Výsledky šíření vyšších harmonických, zdroje VH umístěné v uzlu 3.**

Z obrázku 2.9 je vidět že, v uzlu 1 nejsou viditelné výsledky. Je to spojitě s tím, že jsou velmi malé a proto nejsou viditelné na obrázku. Tento samý postup bude opakován je-li to nutné pro zbývající uzly se zdroji vyšších harmonických proudů.

## 3 Principy zlepšení kvality elektrické energie

### 3.1 Kompenzace jalového výkonu

Dodavatelé elektrické energie vyžadují od odbíratelů odběr výkonu s účinnkem v požadovaném rozmezí. Pod kompenzací jalového výkonu rozumíme zmenšení odběru jalového výkonu pomocí dodatečných technických zařízení na potřebovanou hodnotu, což je požadovaný účinník v rozmezí  $\cos(\varphi) = 0,95-1$ .

Menší účinník má totiž za následek:

- zmenšení přenášeného činného výkonu P (zmenšení využití stávající rozvodné sítě) a pro zachování S konstantní roste výkon Q, který zatěžuje rozvodnou síť, ale nevykoná žádnou práci
- zvýšení činných ztrát:

$$P_{ztr} = 3UI^2 = \frac{R}{U^2} 3U^2 I^2 = \frac{R}{U^2} S^2 = \frac{R}{U^2} P^2 + Q^2 = \left(\frac{P}{Q \cos \varphi}\right)^2 R \quad (3.1)$$

- zvýšení nákladů u všech zařízení, které závisí na velikosti Q (transformátory, vypínače, spínače, měřicí technika, jisticí přístroje a ochrany)
- zvýšení úbytku napětí:

$$\Delta U = RI_{\xi} + XI_j \quad (3.2)$$

Skupina elektrických spotřebičů používaných pro elektrickou síť odebírá kromě činného výkonu také i jalový výkon, ve většině případů induktivního charakteru. K takovým to spotřebičům patří:

- Asynchronní motory a generátory
- Transformátory
- Střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece
- Výkonové polovodičové měniče
- Venkovní a kabelová vedení

Zmenšení jalového induktivního odběru, můžeme provádět dvěma způsoby:

- využitím kompenzačního zařízení, které budou používané jako zdroj jalového kapacitního výkonu

- příslušným návrhem a řízením zdrojů, přenosové soustavy a spotřebičů a dalších součástí technologie soustavy. K tomu budou patřit následující operace jako správné dimenzování jak transformátorů tak i asynchronních motorů a omezení jejich chodu naprázdno, správná volba jmenovitého napětí, využití synchronních motorů

Kompenzační zařízení můžeme rozdělit podle těchto vlastností:

Podle principu činnosti zařízení:

- rotační
- statické
- polovodičové

Podle způsobu regulace zařízení:

- kompenzátory s konstantním výkonem
- kompenzátory se stupňovitou regulací
- kompenzátory s plynulou regulací
- s aktivními filtry

Podle umístění kompenzátoru:

- centrální
- skupinová
- individuální
- smíšená

### **3.2 Filtrace vyšších harmonických**

Přenosová soustava, různé typy zařízení, transformátory a většina všech prvků v elektrizační přenosové soustavě v praxi jsou nastavené na základní frekvenci sítě, která na území EU je 50 Hz. Ale v praxi máme zcela hodně nelineárních spotřebičů, které odebírají ze sítě nesinusový (neharmonický) zátěžový proud. A proto vzniká deformace sinusové formy základné harmonické (50 Hz), které můžeme představit jako zpětné působení spotřebičů na síť. Vyšší harmonické s nejsilnějšími účinky jsou 3., 5. a 7., což je frekvence 150, 250 a 350 Hz. Zpětné vlivy, které způsobují vyšší harmonické mohou mít na síť následky:



- vyšší kupní náklady na elektrickou energii
- větší ztráty ve přenosové soustavě
- větší zatížení jalovým výkonem a proto jako následek zvýšené náklady (přenastavení některého zařízení)
- větší tepelné působení na používané transformátory a kabely
- možnost většího působení na citlivé spotřebiče jako omezení jejich provozu anebo úplně vyloučení z provozu

Podle technické normy ČSN EN 50160 musí být splněny dovolené limity vyšších harmonických napětí. Za vyhovující normě ČSN EN 50160 jsou považovány harmonické, pokud jejich desetiminutové efektivní hodnoty jsou v 95 % menší nebo rovné než stanovené meze. V praxi máme několik řešení, jak tyto problémy vyřešit. Ukážeme si základné způsoby řešení:

- využití aktivních filtrů (používá se v případě malých výkonů)
- pasivní rezonanční filtry vyšších harmonických
- využití více-pulzních usměrňovačů
- transformátory s vinutím zapojeným do trojúhelníku nebo do lomené hvězdy

Nejpoužívanějšími a nejvýhodnějšími z hlediska provozu a konstruktivního provedení v praxi jsou pasivní rezonanční filtry vyšších harmonických. Možnost nastavení na široké rozmezí výkonů je hlavní výhodou pasivních rezonančních filtrů, v praxi můžeme se setkat s nastavením filtrů až na desítky MVA. Nejen filtraci vyšších harmonických je výhodou pasivních rezonančních filtrů, oni taky mají možnost působení na síť jako kapacita pro vyrovnání jalového odběru základní harmonické, který je taky důležitým parametrem sítě.

Takže proto se v této práci budeme zabývat hlavně pasivními rezonančními filtry vyšších harmonických, které budou představené různými typy a s nastavením na různé harmonické.

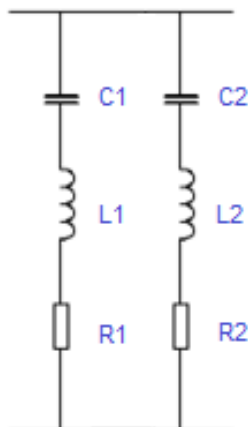
V praxi budou z hlediska výpočtů vyšších harmonických nejvíce zajímavé výpočty viděné impedance sítě v jednotlivých uzlech sítě. V uzlech sítě je třeba spočítat celkovou impedance filtrů, kterou můžeme zjistit z diagonálních prvků admitanční (impedanční matice). Většinou v praxi používané 3 základní typy filtrů:

- sériový filtr druhého řádu

- ztlumený sériový filtr druhého řadu
- C-type filtr

Taky často můžeme se setkat s takzvaným "Double-tuned" filtrem. V dané kapitole se budeme zabývat se výpočtem potřebných impedanci pro každý typ filtrů.

Sériový filtr druhého řadu ukázán na obr. 3.1



**Obr. 3.1 – Schéma zapojení sériového filtru druhého řadu pro ukázkový příklad.**

Konstrukci sériového filtru druhého řadu je jednoduchá, a proto tento typ filtrů je nejvíc používán. Tato konstrukce představuje tlumivku se sériově zapojeným kondenzátorem. V náhradním schématu filtru je taky použit činný odpor, který nepředstavuje přídavní součástku, ale je to ekvivalent odporu vinutí tlumivky. Pro výpočet daného druhu filtru je potřeba zavést několik zásadních vztahů. Je to koeficient zvýšení napětí:

$$a = \frac{U_{n1}}{U_{C1}} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \quad (3.5)$$

kde  $U_{C1}$  je napětí na kondenzátoru a  $U_{N1}$  je jmenovité napětí filtru pro první harmonickou. Koeficient  $n_r$  je rád vyšší harmonické na kterou tento filtr bude nastaven. Kompenzační výkon filtru určujeme podle vztahu:

$$Q_{CF} = 3aU_{n1}^2\omega_1 C \quad (3.6)$$

Kvůli tomu že filtr nesmí být přetěžován proudem dané vyšší harmonické, on musí mít určitou minimální hodnotu kompenzačního výkonu a to zjistíme z největšího možného proudu dané vyšší harmonické:

$$Q_{CFmin} = 3 \frac{a}{n_r} I_{hmax} U_{n1} \quad (3.7)$$

A konečný kompenzační výkon vychází z ohledem na vliv klesání napětí na kondenzátoru:

$$Q_{komp} = \frac{Q_{CF}}{a} \quad (3.8)$$

Pro celkovou impedanci daného filtru je potřeba spočítat jednotlivé impedanci každého z prvků a sečíst podle zapojení. Což v případě sériový filtr druhého řadu bude:

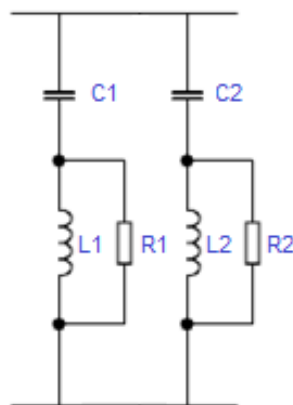
$$C_h = \frac{Q_{CF}}{a U_{n1}^2 L_h} \quad (3.9)$$

$$R_h = \frac{n_r \omega_1 L_h}{Q} \quad (3.10)$$

$$L_h = \frac{a U_{n1}^2}{n_r^2 \omega_1 Q_{CF}} \quad (3.11)$$

$$Z_{h(\omega)} = R_h + j\omega L_h + \frac{1}{j\omega C_h} \quad (3.12)$$

Ztlumený sériový filtr druhého řadu ukázán na obr. 3.2



**Obr. 3.2 – Schéma zapojení ztlumeného sériového filtru druhého řadu pro ukázkový příklad.**

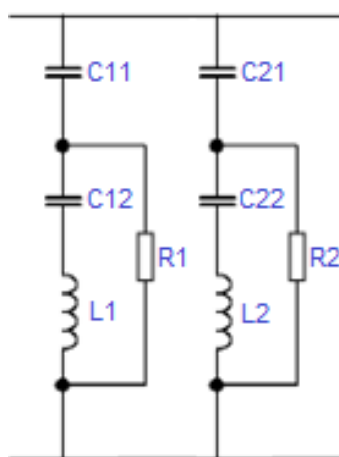
Základem použití ztlumeného sériového filtru druhého řadu je změna amplitudové frekvenční charakteristiky. Ve srovnání s předchozím zapojením bude zásadně omezovat vyšší harmonické jiných frekvencí, kromě té, na kterou je nastaven. Hlavním plusem použití ztlumeného sériového filtru druhého řadu je potlačení nejen nastavené harmonické a taky i ostatních harmonické, což může být mnohém výhodnější než použití dalších filtrů. Pro určení tlumícího odporu budeme počítat se s použitím vztahu pro určení charakteristické impedance filtru a z toho spočítáme tlumící odpor a celkovou impedanci filtru:

$$X_{char} = \frac{L_h}{C_h} \quad (3.13)$$

$$R_h = X_{char}Q \quad (3.14)$$

$$Z_{h(\omega)} = \frac{R_h j\omega L_h}{R_h + j\omega L_h} + \frac{1}{j\omega C_h} \quad (3.15)$$

C-type filtr ukázán na obr. 3.3



**Obr. 3.3 – Schéma zapojení C-type filtru pro ukázkový příklad.**

Zapojení C-type filtru je výhodné z hlediska činných ztrát a tvaru frekvenční amplitudové charakteristiky. Pro výpočet bude používán stejný postup jak v předchozích výpočtech a taky bude potřeba následně spočítat prvky filtru:

$$C_1 = \frac{Q_{CF}}{U_{n1}^2 \omega_1} \quad (3.16)$$

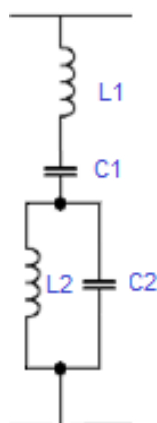
$$C_2 = C_1(n_r^2 - 1) \quad (3.17)$$

$$L = \frac{1}{C_2 \omega_1^2} \quad (3.18)$$

$$R = \frac{Q U_{n1}^2}{n_r Q_{CF}} \quad (3.19)$$

$$Z_{h(\omega)} = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{(j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2})R}{(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2})} \quad (3.20)$$

Double-tuned filtr ukázán na obr. 3.4



**Obr. 3.4 – Schéma zapojení double-tuned filtru pro ukázkový příklad.**

Většinou v elektrizační soustavě existují několik frekvence harmonických, a proto je potřeba používat skupinu paralelních jednotlivých naladěných filtrů k filtrování harmonických. Tato metoda filtrování potřebuje velkou plochu umístění zařízení a má vysoké náklady. Vzhledem ke konstrukčním vlastnostem sériového a rezonančního obvodů, double-tuned filtr umožňuje filtraci dvou různých frekvencí harmonických. Nicméně, double-tuned filtr má nižší náklady než u dvou rovnoběžných jednotlivých laděných filtrů. Double-tuned filtr se skládá ze sériového rezonančního obvodu a paralelního rezonančního obvodu. V některých schématech filtru se taky používá činný odpor, on nepředstavuje sebou reální činný odpor, ale je to spojené s tím že on projeví ve vinutí tlumivky, potřebné pro spočítání činných ztrát. Při výpočtu impedance daného

typy zapojení je nutné počítat s tím, že filtr musí být nastaven na dvě různé harmonické, a proto je nutné provést přepočítání zásadních vztahů, kde indexy  $h_1$  a  $h_2$  budou označovat první a druhou rezonanční frekvenci, na které je nastaven filtr:

$$a_{h_1} = \frac{h_1^2}{h_1^2 - 1} \quad (3.21)$$

$$a_{h_2} = \frac{h_2^2}{h_2^2 - 1} \quad (3.22)$$

$$Q_{CFminh_1} = 3 \frac{a_{h_1}}{n_r} I_{hmax} U_{n1} \quad (3.23)$$

$$Q_{CFminh_2} = 3 \frac{a_{h_2}}{n_r} I_{hmax} U_{n1} \quad (3.24)$$

$$Q_{CFmin} = Q_{CFminh_1} + Q_{CFminh_2} \quad (3.25)$$

Taky dále bude potřeba nadefinovat úhlové frekvence sériového a rezonančního obvodu a úhlové frekvence příslušné první a druhé rezonanční frekvence, na které je nastaven filtr:

$$\omega_{h_1} = 2\pi 50 h_1 \quad (3.26)$$

$$\omega_{h_2} = 2\pi 50 h_2 \quad (3.27)$$

$$\omega_R = 2\pi 50 (h_1 + h_2) \quad (3.28)$$

$$\omega_S = \frac{\omega_{h_2} \omega_{h_1}}{\omega_R} \quad (3.29)$$

Dále zbývá jen spočítat jednotlivé impedance prvků a spočítat celkovou jejich impedance podle následujících vztahů:

$$C_{h_1} = \omega_1 \left( \frac{\omega_R}{\omega_{h_2} \omega_{h_1}} \right)^2 - \frac{1}{\omega_1} + \left( \frac{\omega_1 \omega_{h_1}^2 + \omega_{h_2}^2 - \omega_R^2}{\omega_{h_1}^2 \omega_{h_2}^2 \omega_R^2 - \omega_1^2} \right) \left( \frac{-Q_{komp}}{U_{n1}^2} \right) \quad (3.30)$$

$$C_{h_2} = \frac{\omega_S^2}{\omega_{h_1}^2 + \omega_{h_2}^2 - \omega_R^2 - \omega_S^2} C_{h_1} \quad (3.31)$$

$$L_{h1} = \frac{1}{\omega_S^2 C_{h1}} \quad (3.32)$$

$$L_{h2} = \frac{1}{\omega_R^2 C_{h2}} \quad (3.33)$$

$$R_{h1} = \frac{\omega_S L_{h1}}{Q} \quad (3.34)$$

$$R_{h2} = \frac{\omega_R L_{h2}}{Q} \quad (3.35)$$

$$Z_{h(\omega)} = R_{h1} + j\omega L_{h1} + \frac{1}{j\omega C_{h1}} + \frac{(R_{h2} + j\omega L_{h2} * \frac{1}{j\omega C_{h2}})}{(R_{h2} + j\omega L_{h2} + \frac{1}{j\omega C_{h2}})} \quad (3.36)$$

Program s návrhem různých variant filtrů vyšších harmonických a jejich charakteristik je uveden v příloze B, grafické zobrazení použitých variant je uvedené v tabulce 3 v příloze A.

### 3.3 Potlačení flicker efektu

Flicker efekt způsobený velkými zátěžemi s kolísáním napětí v síti je jedním z velkých problémů kvality elektrické energie, které mohou vyvolávat výpadky nebo kolísání případně i pokles el. napětí v síti. Existuje několik základních způsobů zmenšení vlivu flickeru na síť:

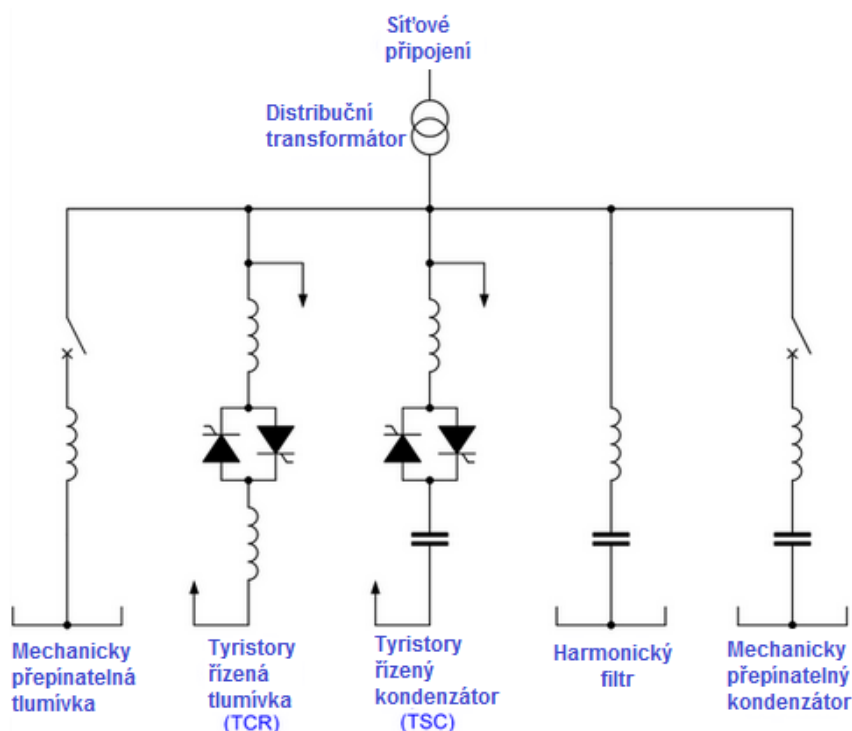
- připojení zařízení způsobující flicker do sítě s vyšším zkratovým výkonem
- zvětšení průřezu napájecího vedení
- snížení potřeby jalového výkonu
- kompenzace aktivními filtry
- připojení nového generátoru či synchronního kompenzátoru

## 4 SVC (Static Var Compensator)

### 4.1 Základní princip

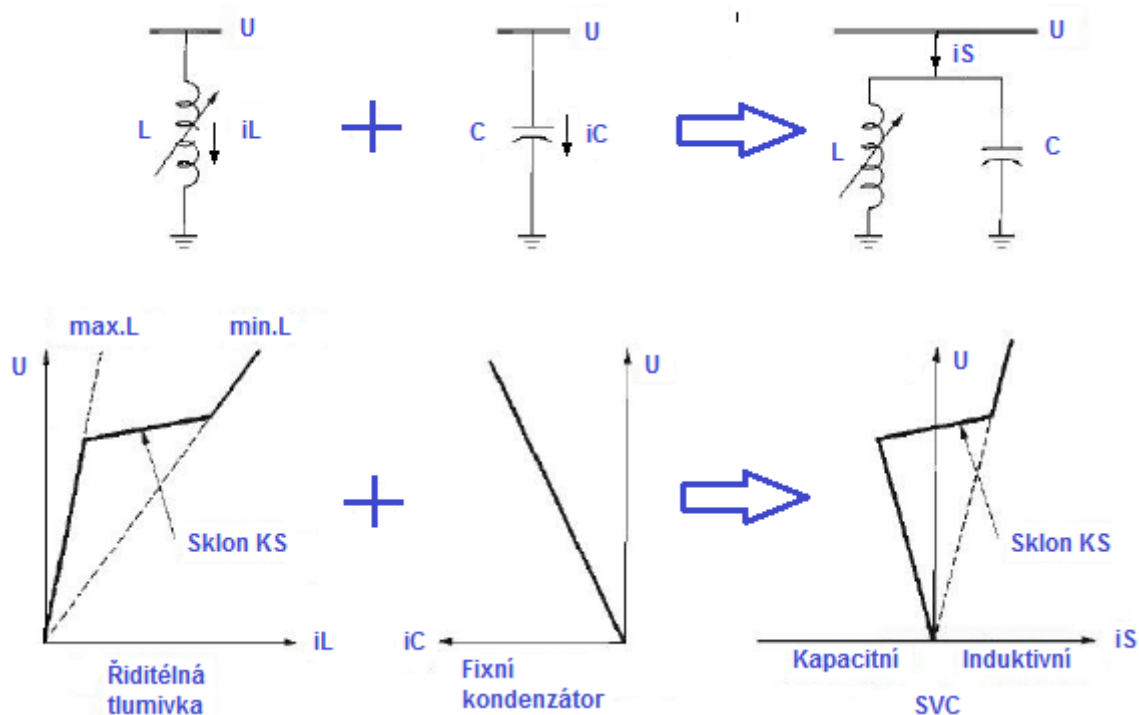
Statický VAR kompenzátor (SVC) je soubor elektrických zařízení, která poskytují rychle působící jalový výkon na vysoké napětí sítí v přenosové soustavě. SVC jsou většinou složeny jak z odběrového tak i zdrojového prvku což v našem případě budou (C a L články) a řídicích jednotek, většinou polovodičových prvků. Typické SVC obsahuje jeden nebo více bloků pevných nebo spínacích posuvnými kondenzátory nebo reaktorů, z nichž alespoň jeden blok musí být spínán tyristory. Základními prvky SVC jsou:

- Tyristory řízená tlumivka (TCR)/Tyristor controlled reactor
- Tyristory řízený kondenzátor (TSC)/ Tyristor switched capacitor
- Harmonický filtr (y)/ Harmonic filter(s)
- Mechanicky přepínatelné kondenzátory nebo tlumivky/ Mechanically switched capacitors or reactors



Obr. 4.1 - typické uspořádání SVC.





Obr. 4.2 – VA charakteristiky soustavy s použitím SVC

## 4.2 Filtry vyšších harmonických

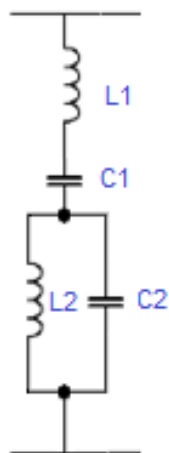
V praxi se zpravidla filtračně kompenzačních stanicích střetneme se s třemi zásadními typy pasivních rezonančních filtrů vyšších harmonických. Zásadní typy jsou:

1. sériový filtr druhého řádu
2. ztlumený sériový filtr druhého řádu
3. C-type filtr

Tě zásadní typy pasivních rezonančních filtrů jsou znázorněny na obrázcích (3.1;3.2;3.3) v předchozí kapitole. Pasivní filtry jsou široce používány pro filtrování harmonických v napájecím systému až do teďka protože mají jednoduchou strukturu, nízkou cenu, vysokou spolehlivost. Většinou v elektrizační soustavě existuje několik frekvencí vyšších harmonických, a proto je potřeba používat skupinu paralelních jednotlivých naladěných filtrů k filtrování harmonických.

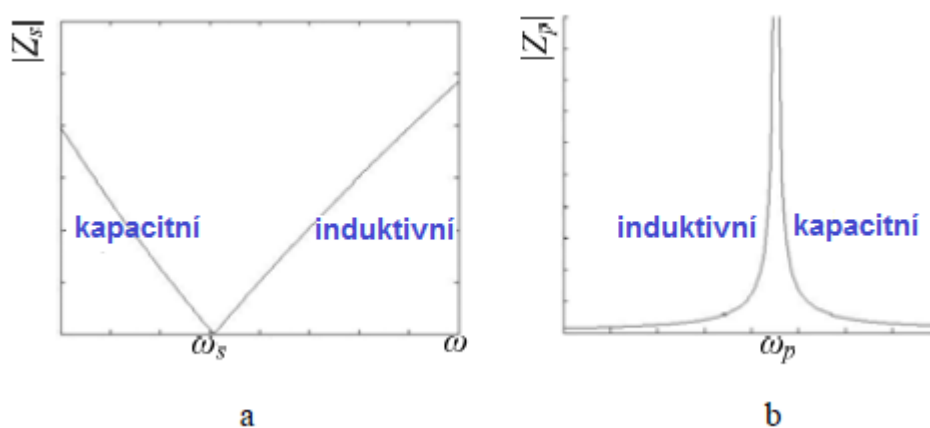
Double-tuned filtr se skládá z sériového rezonančního obvodu a paralelního rezonančního obvodu.

Struktura a impedanční-frekvenční charakteristika křivky typického double-tuned filtru jsou znázorněny na obrázku 3.



**Obr.4.4 –Typické uspořádání Double-tuned filtru**

Sériový rezonanční obvod (L1, C1) a paralelní rezonanční obvod (L2, C2), respektive mají rezonanční frekvenci  $\omega_s$  a  $\omega_p$ . Impedanční-frekvenční charakteristika sériového a paralelního obvodů jsou znázorněny na obrázku 4.



**Obr.4.5 - Impedanční -frekvenční charakteristika sériového a paralelnéhoobvodů**

**a- sériový rezonační obvod**

**b- paralelní rezonační obvod**

### 4.3 Dekompenzační člen

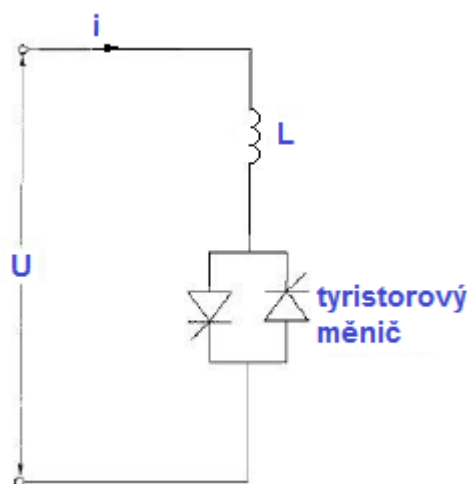
Tyristory řízená tlumivka – TCR představuje sebou tlumivku v sérii s dvěma antiparalelně zapojenými tyristory, které jsou používány pro regulace proudu protékajícího tlumivkou. Tyristory jsou řízené pomocí řídicího úhlu  $\alpha$  v rozmezí  $90^\circ$  až  $180^\circ$ . Při  $\alpha = 90^\circ$  jsou tyristory plně otevřeny a tlumivkou prochází zcela čistě jalový proud sinusového průběhu. K částečnému otevření tyristoru dojde při  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . Při  $\alpha = 180^\circ$  jsou tyristory zavřeny a tlumivkou neprochází žádný proud. Pro úhel otevření  $\alpha$  platí vztah (4.1):

$$\alpha = 2\pi - \alpha \quad (4.1)$$

Momentální hodnota proudu je dána vztahy:

$$i = \frac{\sqrt{2}U}{X_L} \cos \alpha - \cos \omega t, \quad \text{pro } \alpha < \omega t < \alpha + \pi \quad (4.2)$$

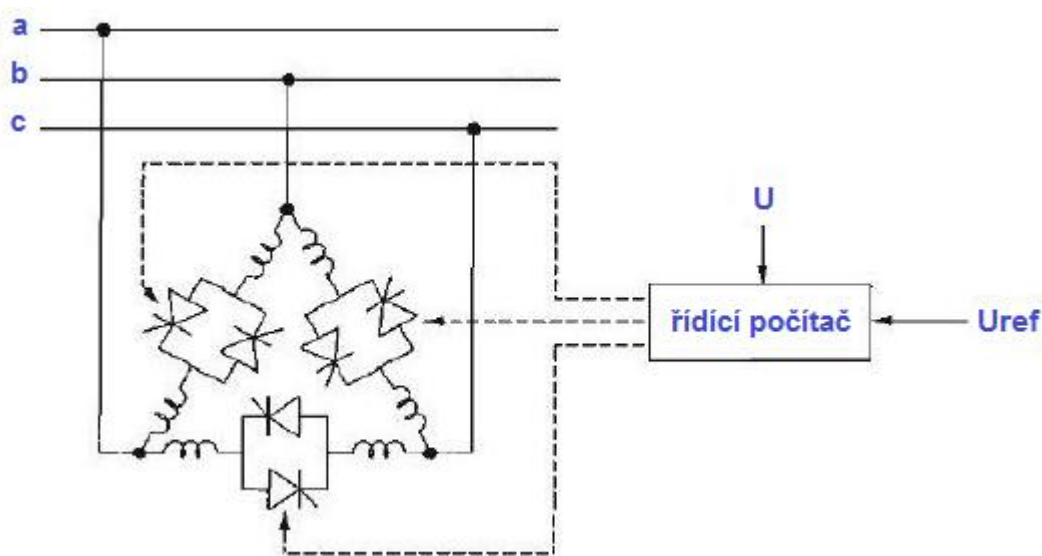
$$i = 0, \quad \text{pro } \alpha + \pi < \omega t < \alpha + 2\pi \quad (4.3)$$



Obr.4.5 – Základní jednofázově zapojení TCR

Při zvětšování úhlu  $\alpha$  dochází ke generaci vyšších harmonických. Základní jednofázově zapojení TCR vhodná i pro 3fázové soustavy protože bude kombinované z 1fázových zapojení. Nejlepší z hlediska omezení vyšších harmonických a nejpoužívanější zapojení jsou 6-ti a 12-ti pulzní zapojení. V 6-ti pulzním zapojení používané zapojení do trojúhelníku jednotlivých TCR

článků. Při daném zapojení se násobky 3. harmonické (3, 9, atd.) šíří v rámci trojúhelníku a neovlivňují tak vnější síť. Pro ostatní harmonické se použijí filtry. Využití 12-ti pulzního zapojení je sice vhodné pro eliminaci 5. a 7. harmonické, ale vyžaduje instalaci dalšího transformátoru s terciárním vinutím nebo dvou standardních transformátorů se zajištěním rozdílných hodinových uhlů pro daný fázový posun ( $30^\circ$ ). Eliminace spočívá v zapojení dvou 6-ti pulzních TCR do sekundárního a terciárního vinutí, kdy jedno vinutí je zapojené do trojúhelníka a druhé do hvězdy. Nejnižší generované harmonické jsou 11. a 13., pro které se použijí filtry. Určení potřebné indukčnosti tlumivky se vypočítá z potřebného induktivního výkonu.



Obr. 4.6 – 3fázové zapojení 6pulsního TCR článku

#### 4.4 Přínosy SVC pro zlepšení kvality elektrické energie

Hlavní výhodou SVC ve srovnání z jednoduchými typy filtrů je jejich téměř okamžitá reakce na změny v napětí systému. Z tohoto důvodu jsou často provozovány v blízkosti jejich nulového bodu s cílem maximalizovat korekci jalového výkonu, kterou schopné rychle poskytnout v případě potřeby. Oni jsou obecně levnější, mají vyšší kapacitu, rychlejší a spolehlivější než dynamické kompenzační systémy, takové jako například synchronní kondenzátory. Nicméně, static VAR kompenzátory jsou dražší než mechanicky spínaných kondenzátorů, takže v praxi můžeme se setkat s použitím kombinaci dvou technologií. Takové systémy schopné pomocí static VAR kompenzátorů poskytovat podporu pro rychlé změny a mechanické spínané kondenzátory poskytovat síť v ustáleném stavu.

SVC mohou být instalovány z takových důvodů, že mohou tlumit rušivé vlivy sítě na citlivé odběry, kompenzuje kolísání napětí v síti, způsobené vlivem poruch a taky při výkonových přetíženích může zabránit napěťové poruše.

## 5 Praktické ukázky

### 5.1 Návrh filtrů vyšších harmonických pro usměrňovač v kapacitní síti

Pro praktickou ukázkou výhod použití filtrů vyšších harmonických pro statickou zátěž navrhnul jsem se několik soustav, odlišných od sebe buď s uvažováním nebo bez uvažování kapacity kabelového vědění, které jsou znázorněné v tabulce 5.1

Navřené varianty soustav	
Varianta 1.1 (bez uvažování $C_k$ a bez filtrů VH)	Varianta 2.1 (s uvažováním $C_k$ ale bez filtrů VH)
Varianta 1.2 (bez uvažování $C_k$ ale s filtry VH)	Varianta 2.2 (s uvažováním $C_k$ a filtrů VH)
Varianta 1.3 (bez uvažování $C_k$ ale s filtry VH)	Varianta 2.3 (s uvažováním $C_k$ a filtrů VH)

Tab. 5.1: Navřené pro ukázkový příklad soustavy

Pro výpočet potřebujeme taky proudy vyšších harmonických, které budeme používat v dalších výpočtech. Ve výpočtech počítal jsem se s proudami od základní až do 50. harmonické, které uvedené v tabulce 5.2 v procentech a v ampérech s ohledem na proud základné harmonické pro napěťovou hladinu 110kV.

h	Ih1 [%]	Ih2 [%]	Ih3 [%]	Průměr	Výsledný Ih [A]
1	100	100	100	100	1560
2	0,120	0,191	0,144	0,152	2,366
3	1,496	1,789	2,961	2,082	32,4792
4	0,543	0,414	0,490	0,482	7,52284
5	3,584	4,778	3,684	4,015	62,6392
6	0,373	0,951	0,793	0,706	11,0084
7	4,805	4,597	6,073	5,158	80,47
8	0,588	0,539	0,764	0,630	9,8332
9	0,654	0,416	0,521	0,530	8,2732
10	0,103	0,101	0,081	0,095	1,482
11	0,959	0,834	0,974	0,922	14,3884
12	0,077	0,070	0,060	0,069	1,0764
13	0,624	0,694	0,547	0,622	9,698
14	0,048	0,065	0,064	0,059	0,9204
15	0,181	0,088	0,196	0,155	2,418
16	0,044	0,049	0,044	0,046	0,7124
17	0,101	0,079	0,106	0,095	1,4872
18	0,038	0,038	0,035	0,037	0,5772
19	0,074	0,090	0,099	0,088	1,3676
20	0,030	0,041	0,043	0,038	0,5928
21	0,145	0,111	0,216	0,157	2,4544
22	0,034	0,034	0,041	0,036	0,5668
23	0,257	0,230	0,266	0,251	3,9156
24	0,032	0,029	0,032	0,031	0,4836
25	0,172	0,169	0,148	0,163	2,5428
26	0,026	0,026	0,025	0,026	0,4004
27	0,042	0,047	0,036	0,042	0,65
28	0,022	0,024	0,022	0,023	0,3536
29	0,023	0,025	0,026	0,025	0,3848
30	0,020	0,022	0,021	0,021	0,3276
31	0,031	0,025	0,022	0,026	0,4056
32	0,020	0,020	0,020	0,020	0,312
33	0,061	0,045	0,069	0,058	0,91
34	0,019	0,020	0,019	0,019	0,3016

**Tab. 5.2: Proudů vyšších harmonických pro napěťovou hladinu 110kV**

**Pokračování tabulky 5.2**

h	Ih1 [%]	Ih2 [%]	Ih3 [%]	Průměr	Výsledný Ih [A]
35	0,146	0,088	0,166	0,133	2,08
36	0,018	0,019	0,018	0,018	0,286
37	0,096	0,112	0,087	0,098	1,534
38	0,017	0,018	0,017	0,017	0,2704
39	0,025	0,024	0,025	0,025	0,3848
40	0,017	0,018	0,016	0,017	0,2652
41	0,016	0,018	0,016	0,017	0,26
42	0,016	0,017	0,016	0,016	0,2548
43	0,016	0,017	0,016	0,016	0,2548
44	0,016	0,017	0,016	0,016	0,2548
45	0,017	0,018	0,016	0,017	0,2652
46	0,016	0,018	0,016	0,017	0,26
47	0,016	0,018	0,016	0,017	0,26
48	0,016	0,017	0,016	0,016	0,2548
49	0,016	0,017	0,016	0,016	0,2548
50	0,017	0,018	0,016	0,017	0,2652

Dále je potřeba vypočítat takové důležité parametry navřené soustavy, jako indukčnost (5.1) a činný odpor soustavy (5.2), kapacita kabelového vědění (5.3) a odpor zátěže (5.4) z vstupních parametrů soustavy:  $S_{ks} = 2500 \text{ MVA}$ ,  $U_n = 110 \text{ kV}$ ,  $c = 0.15 \cdot 10^{-6} \text{ F/km}$ ,  $l = 5.4 \text{ km}$ .

$$L_s = \frac{U_n^2}{S_{ks}} \frac{1}{2\pi 50} = \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{2500 \cdot 10^6} \frac{1}{314} \quad 5.1$$

$$R_s = \frac{U_n^2}{S_{ks}} \frac{1}{7} = \frac{(110 \cdot 10^3)^2}{2500 \cdot 10^6} \frac{1}{7} \quad 5.2$$

$$C_k = c \cdot l = 0.15 \cdot 10^{-6} \cdot 5.4 \quad 5.3$$

$$R_z = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_h [h]} = \frac{110 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot [5. \text{ sloupec tabulky 5.2}]} \quad 5.4$$

Pro navřenou soustavu použil jsem se ztlumené sériové filtry vyšších harmonických druhého řadu, zapojené paralelně a nastavené na (5. a 11.) a (5. a 17.) harmonické. Výpočet impedanci filtrů byl vysvětlen v kapitole 3.2 a proto použil jsem se stejný princip výpočtu.



Celkovou impedanci soustavy jsem se počítal jako paralelní zapojení všech vypočtených prvků soustavy.

Po výpočtu celkové impedance soustavy počítal jsem se napětí vyšších harmonických s ohledem na řad harmonické ze dle (5.5).

$$u_h h = \frac{Z_{celk}[h] * I_h[h]}{U_n} \quad 5.5$$

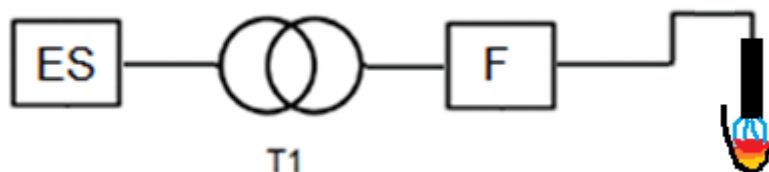
Posledním bodem byl výpočet činitele harmonického zkreslení THD pro napětí (1.5) a porovnání výsledků s normou ČSN 50160. Grafické zpracované výsledky uvedené v příloze A v tabulce 1.

THD [%]		
	bez uvažování C <sub>k</sub>	s uvažováním C <sub>k</sub>
Bez filtrů VH	4.09	4.23
S filtry (5. a 11.) harmonické	3.72	3.73
S filtry (5. a 17.) harmonické	3.8	3.81

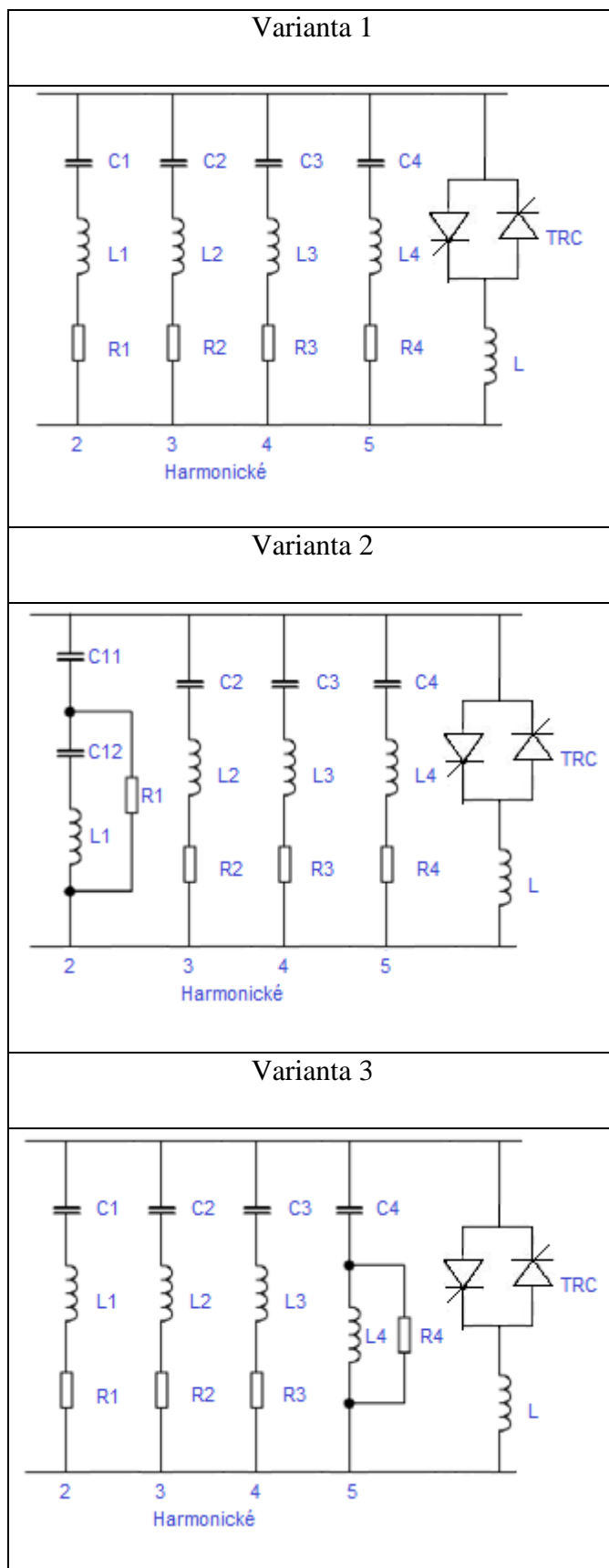
Tab. 5.3: Výsledky porovnání s normou ČSN 50160 pro napět'ovou hladinu 110kV

## 5.2 Návrh SVC pro dynamickou zátěž

Pro praktickou ukázkou výhod použití filtrů vyšších harmonických pro dynamickou zátěž navrhnul jsem se soustavu na obrázku 5.1, která má 3 různé varianty návrhu filtrů vyšších harmonických odlišné od sebe použitými typy a uspořádáním těchto filtrů, které jsou znázorněné v tabulce 5.4. Dynamická zátěž představuje sebou TRC článek na obrázku 4.5



Obr. 5.1: Navřena soustava s dynamickou zátěží.



**Tab. 5.4: Navřené filtrů vyšších harmonických**

Pro výpočet potřebujeme taky proudy vyšších harmonických, které budeme používat v dalších výpočtech. Ve výpočtech počítal jsem se s proudami od základní až do 20. harmonické, které uvedené v tabulce 5.5 v procentech a v ampérech s ohledem na proud základné harmonické pro napěťovou hladinu 22kV.

h	Ih [%]	Ih [A]	IhTRC [A]	Vysledený proud
1	100,00	1300	0,00	1300
2	11,81	153,53	0,00	153,53
3	15,78	205,14	188,95	278,8987668
4	6,03	78,39	0,00	78,39
5	7,00	91	75,58	118,2934335
6	3,84	49,92	0,00	49,92
7	2,78	36,14	0,00	36,14
8	1,33	17,29	0,00	17,29
9	1,35	17,55	0,00	17,55
10	1,06	13,78	0,00	13,78
11	0,85	11,05	0,00	11,05
12	0,67	8,71	0,00	8,71
13	0,67	8,71	0,00	8,71
14	0,64	8,32	0,00	8,32
15	0,52	6,76	0,00	6,76
16	0,45	5,85	0,00	5,85
17	0,44	5,72	0,00	5,72
18	0,40	5,2	0,00	5,2
19	0,30	3,9	0,00	3,9
20	0,29	3,77	0,00	3,77

**Tab. 5.5: Proudny vyšších harmonických pro napěťovou hladinu 22kV**

Dále je potřeba vypočítat takové důležité parametry navřené soustavy, jako impedanci soustavy (5.6) impedanci transformátoru (5.7), indukčnost (5.8) a proudy dynamickou zátěží (5.11) a (5.10) z vstupních parametrů soustavy:  $S_{ks} = 1500 \text{ MVA}$ ,  $S_{trafo} = 63 \text{ MVA}$ ,  $u_k = 11\%$ ,  $U_1 = 110 \text{ kV}$ ,  $U_2 = 22 \text{ kV}$ ,  $Q_{TCR} = 60 \text{ MVar}$ .

$$Z_s = j\omega_1 L_s = j\omega_1 \frac{U_1^2}{S_{ks}} \frac{1}{2\pi 50} \quad 5.6$$

$$Z_{traf} = j\omega_1 L_{traf} p_T^2 = j\omega_1 u_k \frac{U_1^2}{S_{trafo}} \frac{1}{2\pi 50} \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \quad 5.7$$

$$L_{TCR} = \frac{3U_2^2}{Q_{TCR}} \frac{1}{2\pi 50} \quad 5.8$$

$$I_{TCR} = \frac{Q_{TCR}}{3 * 2\pi 50 * L_{TCR}} \quad 5.9$$

$$I_{TCR3} = I_{TCR} \sqrt{3} * 0,12 \quad 5.10$$

$$I_{TCR5} = I_{TCR} \sqrt{3} * 0,048 \quad 5.11$$

Pro navrženou soustavu použil jsem se jednoduché typy filtrů vyšších harmonických, zapojené paralelně a nastavené na (2., 3., 4., 5.) harmonické. Výpočet impedanci filtrů byl vysvětlen v kapitole 3.2 a proto použil jsem se stejný princip výpočtu akorát pro výpočet celkové impedanci filtru počítal jsem se s paralelním jejich zapojením jako v tabulce 5.4.

Celkovou impedanci soustavy jsem se spočítal jako paralelní zapojení všech vypočtených prvků soustavy.

Po výpočtu celkové impedance soustavy spočítal jsem se napětí vyšších harmonických s ohledem na řad harmonické ze dle (5.5).

Posledním bodem byl výpočet činitele harmonického zkreslení THD pro napětí (1.5) a porovnání výsledků s normou ČSN 50160. Grafické zpracované výsledky uvedené v příloze A v tabulce 2.

THD [%]	
Bez filtrů VH	24.96
Varianta 1	0.98
Varianta 2	2.6
Varianta 3	1

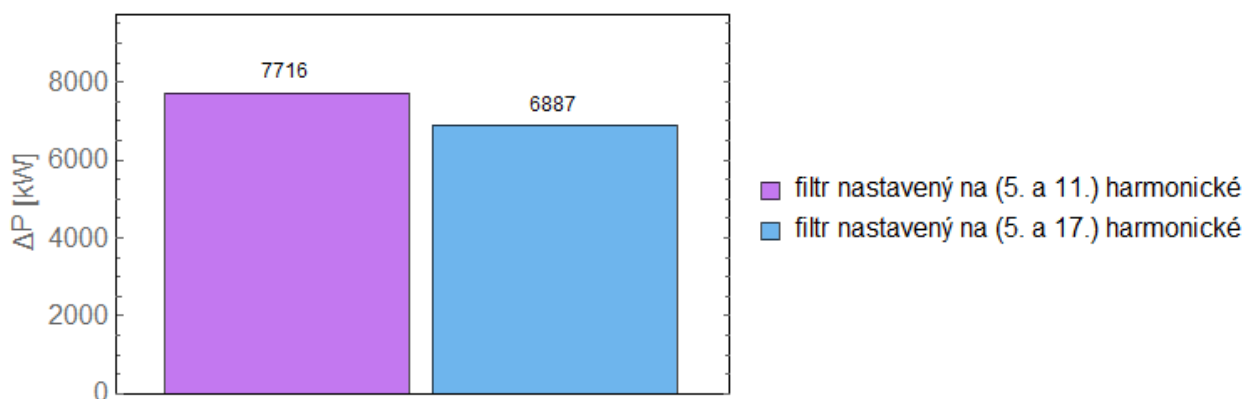
## 6 Ekonomické aspekty navržených řešení

Z pohledu na ekonomické aspekty navržených řešení pro statickou zátěž nás hlavně budou zajímat činné ztráty ve filtrech vyšších harmonických, které jsem se použil v navržených soustavách a taky náklady z hlediska investic. Pro výpočet činných ztrát filtrů budeme uvažovat 2 varianty filtrů:

1. nastavený na (5. a 11.) harmonické
2. nastavený na (5. a 17.) harmonické

Činné ztráty (6.1) zpočítané z celkové impedanci filtru, ale budeme uvažovat jen reálnou složku celkové impedanci filtrů. Jak je vidět z obrázku 6.1 činné ztráty jsou menší pro 2. variantu.

$$\Delta P_{filtr} = \frac{U_n^2}{Re\{Z_{celk}[h]\}} \quad 6.1$$



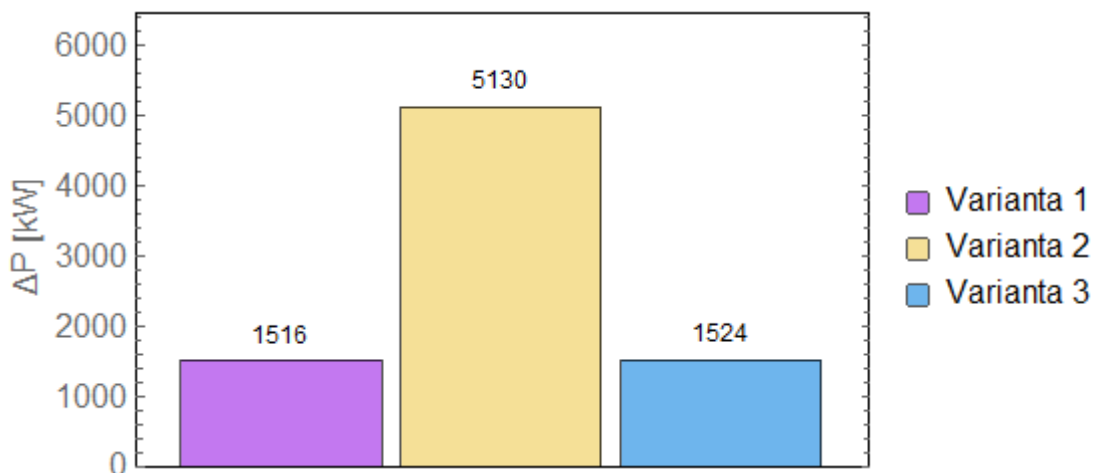
**Obr. 6.1: Výsledky výpočtu činných ztrát pro statickou zátěž.**

Z hlediska investic filtr nastavený na (5. a 17.) harmonické bude levnější než filtr nastavený na (5. a 11.) harmonické, protože bude potřebovat menší indukční cívku pro omezení menších proudů vyšších harmonických, a z toho menší náklady na výrobu tohoto filtrů a menší pořizovací cenu.

Z pohledu na ekonomické aspekty navržených řešení pro dynamickou zátěž nás hlavně budou zajímat činné ztráty ve filtrech vyšších harmonických, které jsem se použil v navržených

soustavách a taky náklady z hlediska investic. Pro výpočet činných ztrát filtrů budeme uvažovat 3 varianty filtrů z tabulky 5.4

Činné ztráty (6.1) zpočítané z celkové impedanci filtru, ale budeme uvažovat jen reálnou složku celkové impedanci filtrů. Jak je vidět z obrázku 6.2 činné ztráty jsou nejmenší pro 1. variantu.



**Obr. 6.2: Výsledky výpočtu činných ztrát pro dynamickou zátěž.**

Z hlediska investic filtry z varianty 1 budou levnější než varianty 2 a 3, protože tato navržená varianta používá 4 jednoduché sériové typy filtru, a varianty 2 a 3 mají taky v sobě dražší typy filtrů .

## Záver

Měl jsem se několik určitých pokynů pro vyplnění bakalářské práci. Musel jsem se zpracovat přehled požadavků na kvalitu elektrické energie, kterým jsem se věnoval 1. kapitole bakalářské práci. Při zpracování této kapitoly odkazoval jsem se na technickou normu ČSN EN 50160.

Popis principů zlepšení kvality elektrické energie v průmyslových sítích, se zaměřením na zařízení SVC byl popsán v kapitolách 3 a 4. V nich jsem se popisoval technické možnosti zlepšení kvality elektrické energie, zaměřené na kompenzaci jalového výkonu, filtraci vyšších harmonických a potlačení flicker efektu. Problematika filtraci vyšších harmonických byla nasměrovaná na použití filtrů vyšších harmonických, program na použití kterých a porovnání filtrů uveden v příloze B.

V kapitole 5 byly vytvořené ukázkové příklady zlepšení kvality elektrické energie pro statickou a pro dynamickou zátěž. K těmto příkladům byly navřené matematické modely charakteristik nadřazených elektrizačních soustav ukázané na souvisejících k příkladům obrázcích.

V poslední kapitole bakalářské práci byly popsány ekonomické aspekty navřených řešení z pohledu jednorázových investic a činných ztrát. Srovnání jednorázových investic bylo uděláno s hlediska ceny na různé typy navřených filtrů. Srovnání činných ztrát bylo taky uvažováno s hlediska provozních ztrát při použití různých typů navřených filtrů.

Ke zpracování a zobrazení výsledků měření navřených soustav a příkladů byly vytvořené programy v aplikaci Wolfram Mathematica. Vytvořené programy jsou nahrané na CD, které je jako příloha této práce.

## Použitá literatura

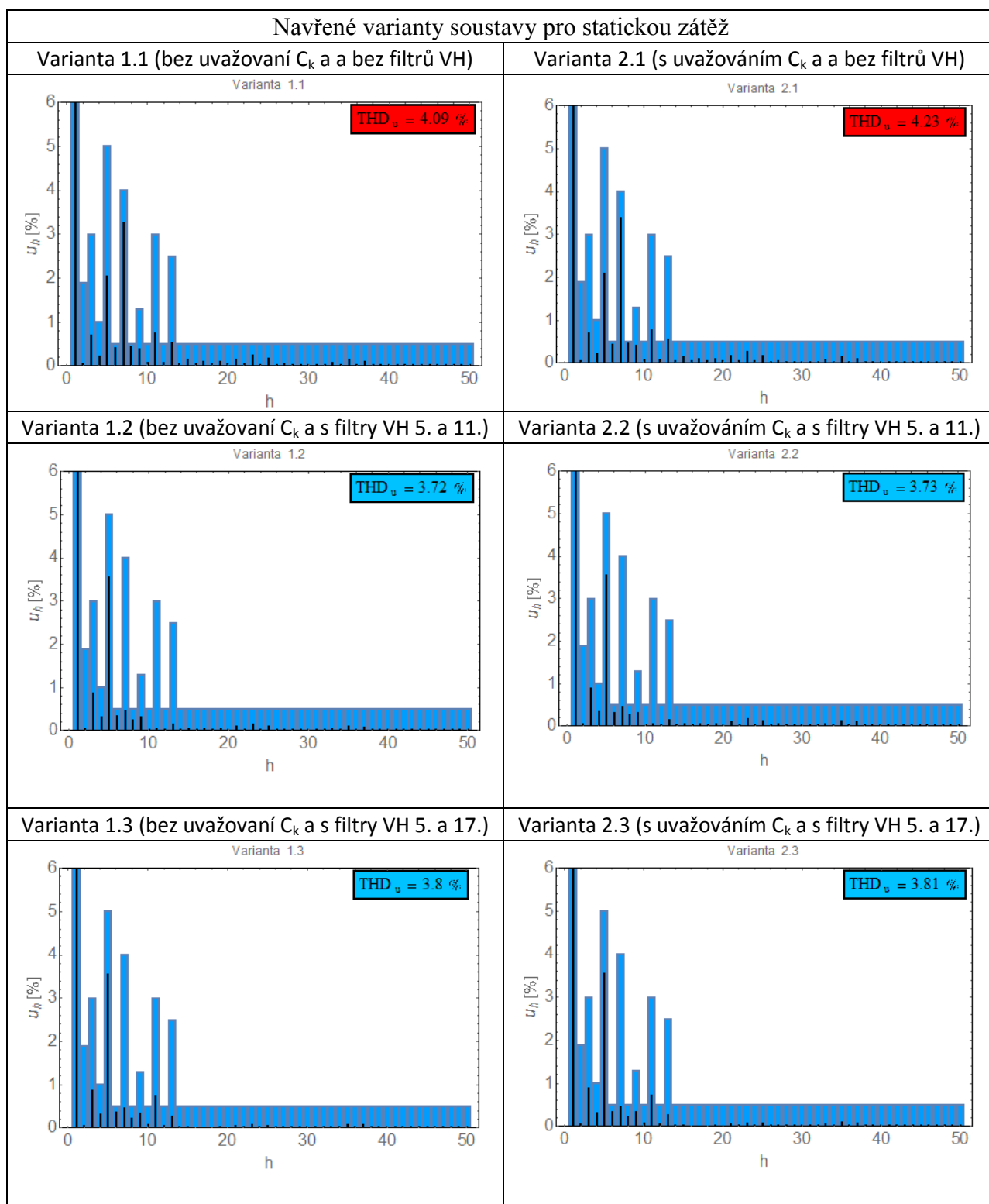
- [1] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie z veřejných distribučních sítí*. 3. dopl. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] SCHLABBACH, J, D BLUME a T STEPHANBLOME. *Voltage quality in electrical power systems*. London: Institution of Electrical Engineers, c2001, x, 241 p. IEE power and energy series, 36. ISBN 978-085-2969-755.
- [3] TLUSTÝ Josef. *Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 1999. 65s.
- [4] KLEMPKA, Ryszard, Zbigniew HANZELKA a Yuri VARETSKY. *Bank Harmonic Filters Operation in Power Supply System – Cases Studies: Chapter 8*. Dostupné také z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/44197.pdf>.
- [5] KOUPENÝ, Jaroslav. *Řídicí algoritmy aktivních filtrů*. 2008. Dostupné také z: [https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/koupej1\\_2008bach.pdf](https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/koupej1_2008bach.pdf). Bakalářská práce.
- [6] HAŠPL, Viktor. *Vyšší harmonické a jejich působení na síť* [online]. . Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/vyssi-harmonicke-a-jejich-pusobeni-na-sit--11949>.
- [7] TLUSTÝ, Josef. *ZACHOVÁNÍ KVALITY DODÁVANÉ ELEKTRICKÉ ENERGIE PŘI NÁRŮSTU ÚROVNĚ RUŠIVÝCH VLIVŮ V DISTRIBUČNÍCH SÍTÍCH GAČR č.102/99/1000: VZÁJEMNÉ VAZBY ENERGETICKÝCH RUŠENÍ INTERHARMONICKÉ A FLICKER*. 2001. Grant.
- [8] TEPLAN, Miroslav. *Měřicí jednotka kvality elektrické energie* [online]. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.



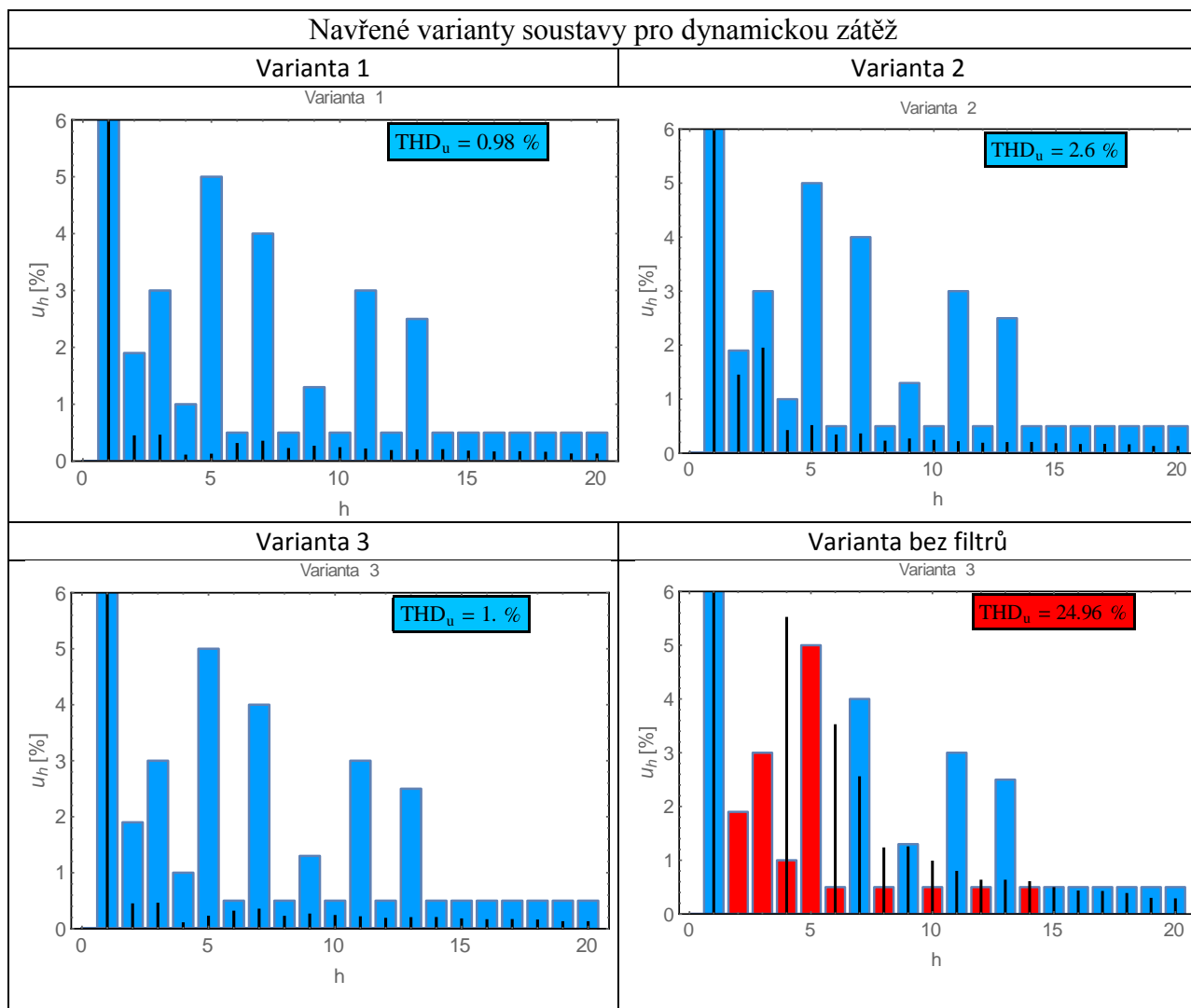
## Seznam příloh

- A. Grafické zpracované výsledky navřených matematických modelů soustav a filtrů vyšších harmonických
- B. Obsah přiloženého CD

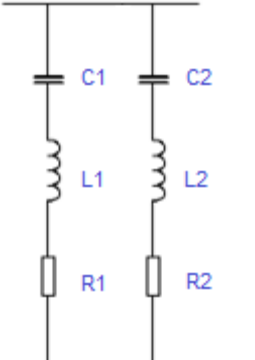
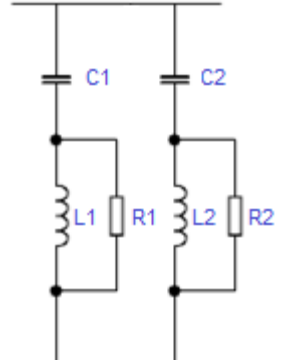
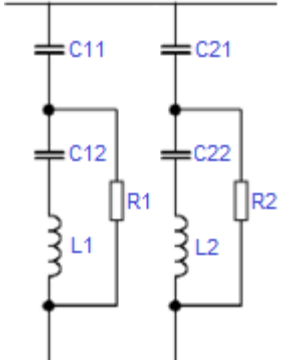
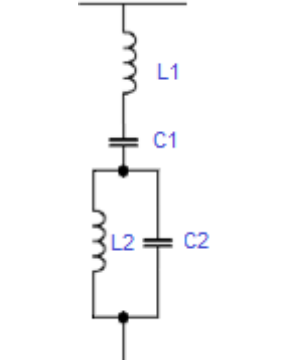
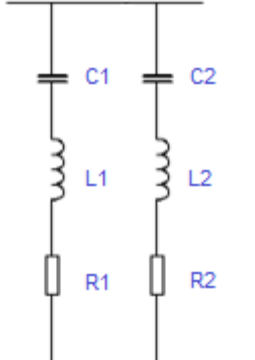
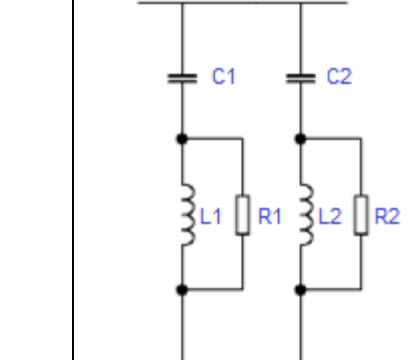
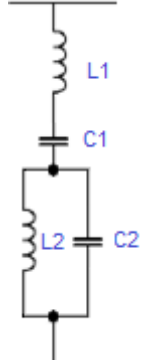
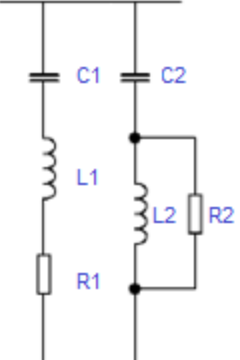
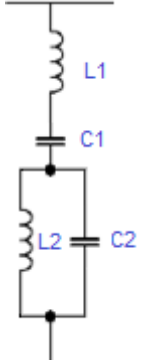
## Příloha A



Tab. 1: Grafické zpracované výsledky navřené soustavy se statickou zátěží



Tab. 2: Grafické zpracované výsledky navřené soustavy s dynamickou zátěží

Navřené varianty filtrů vyšších harmonických			
Varianta 1 – Porovnání 4 typů filtrů nastavené na 2. a 3. harmonickou			
2* sériový filtr druhého řádu	2* ztlumený sériový filtr druhého řádu	2*C-type filtr	Double-tuned filter
			
Varianta 2 – Porovnání 3 typů filtrů nastavené na 5. a 7. harmonickou			
2* sériový filtr druhého řádu	2* ztlumený sériový filtr druhého řádu	Double-tuned filter	
			
Varianta 3 – Porovnání 2 typů filtrů nastavené na 5. a 7. harmonickou			
Sériový filtr druhého řádu a ztlumený sériový filtr druhého řádu	Double-tuned filter		
			

Tab. 3: Navřené varianty filtrů vyšších harmonických

## Příloha B

### Obsah přiloženého CD

**Programy** – jsou rozdělené podle kapitol, ve kterých byli použité.

Kapitola 2:

- Sireni vyssich harmonickych.nb – příklad výpočtu šíření vyšších harmonických
- Sireni flicker efektu.nb – příklad výpočtu šíření flicker efektu

Kapitola 3:

- Charakteristiky filtru vyssich harmonickych.nb – návrh různých variant filtrů vyšších harmonických a jejich charakteristik

Kapitola 5:

- Navrh staticke zateze.nb – návrh a výpočet statické zátěže
- data\_proudy\_statzatez.xlsx – výpočet proudů vyšších harmonických pro statickou zátěž
- Navrh dynamicke zateze.nb – návrh a výpočet dynamické zátěže
- data\_proudy\_dynamzatez.xlsx – výpočet proudů vyšších harmonických pro dynamickou zátěž

**Text práce – v formátu pdf**

- BP\_Solenov.pdf