TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti vzniku nestability v energetické síti

Possibilities of the rise of resonance in supply net

Liberec 2006 Milan Soldát

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky a mezioborových
inženýrských studií

Studijní program: M 2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Automatické řízení a inženýrská informatika

Možnosti vzniku nestability v energetické síti

The posibility of rise of current oscillation in supply net

Milan Soldát

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Eva Konečná, CSc.

Konzultant: Ing. Jan Václavík

Rozsah práce:

Počet stran: 47

Počet příloh: 3?

Počet tabulek: 10?

Počet obrázků: 7

Počet grafů: 9?

Datum: 6. ledna 2006

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon Č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vykonal samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne: 6. ledna 2006 .....

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Evě Konečné, CSc. za odborné vedení, rady a připomínky k diplomové práci a Ing. Janu Václavíkovi za lidský přístup a pomoc při řešení diplomové práce.

Mé poděkování rovněž patří rodině za podporu po celou dobu studia.

1. ÚVOD 10
2. TEORETICKÁ ČÁST 11
2.1. DEFINICE ZÁKLADNÍCH POJMŮ 11
2.1.2. VYŠŠÍ HARMONICKÉ 11
2.1.3. ŘÁD VYŠŠÍ HARMONICKÉ 12
2.1.4. MEZIHARMONICKÉ 12
2.1.5. NESYMETRIE NAPĚTÍ 12
2.1.6. POKLES NAPĚTÍ 12
2.1.7. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC) 12
2.1.8. KOMPATIBILNÍ ÚROVEŇ 12
2.1.9. MEZ VYZAŘOVÁNÍ (ZDROJE RUŠENÍ) 13
2.2. VLIV NELINEÁRNÍCH SPOTŘEBIČŮ 13
2.2.1. HARMONICKÉ RUŠENÍ 13
2.2.2. ÚČINKY NA INSTALOVANÁ ZAŘÍZENÍ 13
2.2.3. ZDROJE HARMONICKÝCH 14
3. NORMY 14
3.1. ČSN EN 61000 - 3 - 2 - MEZE EMISÍ HARMONICKÝCH PROUDŮ 14
3.1.1. ROZDĚLENÍ DO TŘÍD 15
3.2. ČSN EN 61000 - 2 - 2 - KOMPATIBILNÍ ÚROVNĚ V SÍTÍCH NN 17
3.3. POROVNÁNÍ REÁLNÉHO ODBĚRU S NORMAMI 18
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 20
4.1. HLAVNÍ ROZVADĚČ BUDOVY „F“ (HR – MF1) 20
4.2. IDENTIFIKACE PARAMETRŮ NAPÁJECÍ SÍTĚ 21
4.2.1. PRINCIPIELNÍ ZAPOJENÍ 21
4.2.2. NALEZENÍ PARAMETRŮ VEDENÍ MEZI TRANSFORMÁTOREM A HR 22

4.2.2.1 Základní kontrola rezonance 22
4.2.2.2 Thompsonův vztah 23
4.2.2.3 Frekvenční charakteristika 25
4.3. PARAMETRY ZÁŘIVKY S INDUKČNÍM PŘEDŘADNÍKEM 26
4.3.1. POPIS 26
4.3.2. MĚŘENÍ NA ZÁŘIVCE 27
4.3.3. VÝPOČET PARAMETRŮ ZÁŘIVKY 29
4.3.4. ZÁŘIVKA S INDUKČNÍM PŘEDŘADNÍKEM 30
4.3.4.1 Nelineární chování zářivky 30
4.3.4.2 Parametry sítě mezi hlavním rozvaděčem a zářivkou 30
4.4. SIMULACE 31
4.4.1. SIMULACE V PROGRAMU MATLAB - SIMULINK 31
4.4.2. SIMULACE V PROGRAMU MICROCAP 33
4.4.3. PŘIZPŮSOBENÍ DAT 35
4.4.4. POROVNÁNÍ MODELŮ 36
4.4.5. POROVNÁNÍ REÁLNÉHO ODBĚRU A SIMULACÍ 38
4.5. FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKY OSVĚTLOVACÍ SÍTĚ 40
4.5.1. VLIV NA REZONANČNÍ FREKVENCI PŘI ZVYŠOVÁNÍ KOMPENZAČNÍ KAPACITY 40
4.5.2. VLIV NA REZONANČNÍ FREKVENCI PŘI ZMĚNĚ IMPEDANCE SÍTĚ .. 41
4.5.3. VLIV NA REZONANČNÍ FREKVENCI PŘI ZVYŠOVÁNÍ ZÁŘIVKOVÉ ZÁTĚŽE 41
4.6. MOŽNOSTI VZNIKU A ODSTRANĚNÍ NESTABILITY V NAPÁJECÍ SÍTI 43
4.7. DISKUZE VÝSLEDKŮ 44
5. ZÁVĚR 45
6. POUŽITÁ LITERATURA 46
7. POUŽITÝ SOFTWARE 47
8. PŘÍLOHY 48

Seznam zkratek a symbolů

ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
λ		Účiník
P,Q,S	[W,Var,VA]	Činný, jalový a zdánlivý výkon
L	[H]	Indukčnost
C	[F]	Kapacita
U_f	[V]	Fázové napětí
U_N	[V]	Jmenovitá hodnota napětí
I_n,U_n	[A,V]	Jmenovitá hodnota proudu, napětí n-té harmonické
U_{ef}	[V]	Efektivní hodnota napětí
n		Řád harmonické
I_N	[A]	Jmenovitá hodnota proudu
I_f	[A]	Fázový proud
e_k	[%]	Napětí nakrátko transformátoru
f_{rez}	[Hz]	Rezonanční frekvence
L_{n1},R_{n1}	[H, Ω]	Indukčnost a odpor vedení mezi TR a HR
L_{n2},R_{n2}	[H, Ω]	Indukčnost a odpor vedení mezi R1.8 a osvětlovací sítí
C_q	[F]	Kapacita kompenzační baterie přepočítaná na 1-fázi
Q_c	[VAr]	3-fázový kompenzační výkon
P_b,Q_b	[W,VAr]	Činný a jalový výkon spotřebovaný na předřadníku
L_b,R_b	[H, Ω]	Indukčnost a odpor předřadníku
U_{balast}	[V]	Napětí na předřadníku
P_v,Q_v,U_v	[W,Var,V]	Činný, jalový výkon a napětí na vedení
G_k,i_k	[W,Var,V]	Činný, jalový výkon a napětí na vedení
TR		Transformátor
HR		Hlavní rozvaděč
nn		Nízké napětí
nf		Nízkofrekvenční

1. Úvod

Rozvoj techniky zapříčinil zvýšení odběru elektrické energie v průmyslu, firmách, ale i v řadě domácností. Je to způsobeno hlavně zvětšením počtu elektrických zařízení, připojených na jeden odběr či jednu domácnost. Bohužel tato zařízení mají obvykle nelineární provozní charakteristiky, což v praxi znamená, že se stávají zdroji vyšších harmonických. V lepším případě je to nehospodárné zacházení s elektrickou energií, což není v dnešní době, kdy vyvstává problém se získáváním primárních zdrojů elektrické energie a vývojem úsporných a ekologicky přijatelnějších technologií, zrovna vhodné. V horším případě může dojít ke zpětnému rušení energetické sítě, které může mít za následek snížení spolehlivosti a bezpečnosti provozu jednotlivých zařízení připojených k této napájecí síti. Nelze také opomenout působení na člověka prostřednictvím spotřebičů, připojených k takovéto síti, a to ve formě akustického či optického rušení. Úroveň rušení jednotlivých zařízení by neměla přesahovat hodnoty udávané normami a výrobce by je měl respektovat, ale z pohledu zpětných vlivů na energetickou síť je potřeba uvažovat celkový vliv všech současně provozovaných zařízení. To je právě případ velkých osvětlovacích sítí. Jednotlivé zářivky mohou splňovat normy o rušení v distribučních sítích domácími spotřebiči a podobnými elektrickými zařízeními, ale jakmile dojde ke zvýšení počtu zářivek a tedy i ke zvýšení podílu odběru z celkové odebírané elektrické energie, výsledný zpětný vliv na napájecí síť pak může převyšovat mezní hodnoty i několikanásobně.

Úkolem diplomové práce je pomocí simulací zjistit parametry reálné osvětlovací sítě a zjistit okolnosti, za kterých může dojít k rezonancím v napájecí síti. V posuzované budově „F“ Technické univerzity v Liberci, kde se nyní nachází menza s jídelnou, internetová místnost, učebny a kancelářské prostory, je nainstalováno větší množství nízkotlakých zářivek s celkovým příkonem v desítkách kW, které jsou zdroji vyšších harmonických a mohou tak negativně působit na celou napájecí síť.

2. Teoretická část

České technické normy ČSN, podle kterých jsou definovány použité pojmy jsou od 1.1.2000 nezávazné, nicméně zůstávají platné a poskytují návod či doporučují postupy při řešení různých situací.

2.1. Definice základních pojmů

2.1.1. Nelineární spotřebiče

Nelineární spotřebiče jsou spotřebiče připojené na sinusové napětí a i přes to jimi protéká nesinusový proud [3].

2.1.2. Vyšší harmonické

Vyšší harmonické jsou sinusová napětí nebo proudy o kmitočtech, které jsou celistvými násobky základního kmitočtu, na kterém je navržena a provozována rozvodná síť (např. 50 nebo 60 Hz) [9]. Mohou být vyjádřeny dvěma způsoby :

- *Jednotlivě* - Pomocí poměru jednotlivých harmonických k základní harmonické.
- *Společně* - Prostřednictvím činitele tvarového zkreslení THD (Total Harmonic Distortion).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} U_n^{\,2}}}{U_1} \qquad (2.1)$$

U_n - jmenovitá napětí jednotlivých harmonických

U_1 - jmenovitá hodnota napětí základní harmonické

2.1.3. Řád vyšší harmonické

Řád vyšší harmonické je celé číslo dané poměrem kmitočtů vyšší harmonické a základní harmonické [3].

2.1.4. Meziharmonické

Meziharmonické jsou kmitočty, které nejsou celistvými násobky základní harmonické. Mohou se vyskytovat jako diskrétní kmitočty nebo jako širokopásmové spektrum. Součtové účinky meziharmonických nejsou pravděpodobné a nemusí být uvažovány [9].

2.1.5. Nesymetrie napětí

Nesymetrie napětí je stav, kdy se třífázová napětí liší v amplitudě nebo jsou odchýleny od jejich normálního posunu 120°, nebo oboj í. V sítích nízkého napětí jsou většinou jednofázová zatížení připojována mezi fázi a střední vodič a s pokud možno rovným rozložením do všech fází [9].

2.1.6. Pokles napětí

Pokles napětí pod 90% jmenovité hodnoty napětí po dobu půl periody sítě až do několika sekund [9].

2.1.7. Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení nebo systému vyhovujícím způsobem fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřípustného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí [9].

2.1.8. Kompatibilní úroveň

Kompatibilní úroveň je předepsaná maximální úroveň elektromagnetického rušení, o které se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje a zařízení provozované v konkrétních podmínkách [10].

2.1.9. Mez vyzařování (zdroje rušení)

Mez vyzařování je předepsaná maximální úroveň vyzařování zdroje elektromagnetického rušení [10]. Menší hodnota než kompatibilní úroveň.

2.2. Vliv nelineárních spotřebičů

Všeobecně jsou spotřebiče s nelineární V - A charakteristikou (volt–ampérová charakteristika I = f (U)) hlavním důvodem harmonického nízkofrekvenčního rušení a lze je tedy považovat za zdroj harmonického proudu. Nízkofrekvenčního rušení odpovídá kmitočtovému pásmu od 0 do 10kHz .

2.2.1. Harmonické rušení

Harmonické rušení způsobuje zkreslení odebíraného proudu a následně průchodem impedancí sítě na těchto harmonických vznikají úbytky napětí, které zapříčiní zkreslení napájecího napětí. To se projevuje rušivě v provozu zařízení, která jsou závislá na tvaru křivky napájecího napětí. Negativním ovlivněním napájecí sítě mohou být poškozováni i další odběratelé.

Při připojení reaktivních zařízení (kompenzační kapacity, kapacity kabelů atd.) může dojít k paralelní či sériové rezonanci v kabelových rozvodech [9].

2.2.2. Účinky na instalovaná zařízení

- *Krátkodobé* – chybná činnost, selhání či nižší stupeň kvality provozu regulujících přístrojů, elektronických zařízení a počítačů (vlivem posunu průchodu nulou vlny napětí).
  Velké amplitudy mohou způsobit chybnou funkci přijímačů hromadného dálkové ho ovládání HDO a ochran (jističe mohou rozepnout) [9].
- *Dlouhodobé* – v zásadě tepelné, přídavné ztráty a přehřátí snižuje dobu stárnutí kondenzátorů a rotačních strojů (motory se mohou přehřát, stát se hlučnými či může dojít ke škodlivým vibracím a mechanické rezonanci) [9].

2.2.3. Zdroje harmonických

- *Generátory, přenosová a distribuční zařízení* – samotný generátor představuje v malém rozsahu a úrovních zdroj harmonických, jeho nesymetrický provoz může mít za následek generování třetí a vyšších harmonických.
- *Průmyslová zatížení* – mohou představovat značné úrovně harmonického zkreslení, to platí zejména pro výkonové měniče (usměrňovače), indukční pece, obloukové pece
- *Zařízení v obytných oblastech* – mohou být převažujícím zdrojem harmonického zkreslení kvůli většímu počtu spotřebičů používaných současně. Jsou to zejména spotřební elektronika (např. televizní přijímače, počítače), tyristorově řízené přístroje (např. stmívače) a zářivky.

Tyto zdroje produkují harmonické v závislosti na jejich provozu, v konstantní nebo proměnné úrovni [9].

3. Normy

Diplomová práce je zaměřena na simulaci osvětlovací sítě, tedy na zařízení obytných, administrativních a průmyslových budov. Soustavu svítidel lze posuzovat jako jeden spotřebič pro domácnost [9]. Meze emisí harmonického proudu pro zařízení s jmenovitým fázovým proudem do 16 A včetně udává norma ČSN EN 61000 - 3 - 2. Pro zařízení s fázovým proudem od 16 A do 75 A platí norma ČSN EN 61000 - 3 - 12. Při měření v budově „F" nepřesahoval fázový proud tekoucí do osvětlovací sítě 16 A.

3.1. ČSN EN 61000 - 3 - 2 - meze emisí harmonických proudů

Cílem této normy je stanovení mezí harmonických proudů injektovaných elektrickým zařízením do veřejné rozvodné sítě nízkého napětí, tak aby vyhovovali těmto mezím zároveň s dovolenými emisemi z jiných zařízení nepřekročilo kompatibilní úrovně, které jsou definovány normou ČSN IEC 61000 - 2 - 2. Za tímto účelem zde jsou elektrická zařízení rozdělena do několika tříd.

3.1.1. Rozdělení do tříd

- ***Třída A*** - symetrická třífázová zařízení, domácí spotřebiče kromě zařízení identifikovaného jako zařízení třídy D, nepřenosná nářadí, stmívače pro žárovky a zvuková zařízení.
- ***Třída B*** - přenosná nářadí, oblouková svářečka, která není profesionálním zařízením.
- ***Třída C*** - světelná zařízení
- ***Třída D*** - zařízení u něhož příkon je menší nebo rovný 600 W a to např. osobní počítače, monitory a televizní přijímače.

Zařízení, která nejsou začleněna do tříd B,C nebo D se musí zařadit do třídy A.

Mezní hodnoty harmonických proudů pro zařízení třídy A a B :

Maximální hodnoty harmonických proudů pro zařízení třídy B jsou rovny hodnotám zařízení třídy A vynásobené koeficientem 1,5 (viz. tab.1).

Tab. 1 Mezní hodnoty harmonických proudů – Třída A a B

Řád harmonické *n*	Max. hodnoty harm. proudů – třída A [A]	Max. hodnoty harm. proudů - třída B [A]
liché harmonické		
3	2,3	3,45
5	1,14	1,71
7	0,77	1,155
9	0,4	0,6
11	0,33	0,495
13	0,21	0,315
15 < *n* < 39	0,15 * 15/n	1,5*(0,15 * 15/n)
sudé harmonické		
2	1,08	1,62
4	0,43	0,645
6	0,3	0,45
8 < *n* < *40*	0,23 * 8/n	1,5*(0,23 * 8/n)

Mezní hodnoty harmonických proudů pro zařízení třídy C :

a) pro spotřebiče jejichž činný příkon je > 25 W jsou maximální dovolené hodnoty harmonických proudů uvedeny v tabulce 2.
b) pro výbojkové světelné zařízení s činným příkonem ≤ 25 W musí být splněn alespoň jeden z těchto požadavků:

- harmonické proudů nesmí překročit meze vztažené na výkon podle tabulky 3, sloupce 2
- proud třetí harmonické, vyjádřený jako procentní hodnota základní harmonické proudu, nesmí překročit 86% a pátá harmonická nesmí překročit 61%, mimoto tvar vlny vstupního proudu musí být takový, aby začínal protékat před nebo v 60°, měl poslední vrchol před nebo v 65° a průtok se neukončil před 90°, přičemž průchod nulou základní harmonické napájecího napětí se předpokládá v 0°.

Tab. 2 Mezní hodnoty harmonických proudů – Třída C

Řád harmonické *n*	Max. hodnoty harm. proudů [%] základní harmonické
2	2
3	30*λ
5	10
7	7
9	5
11 < n < 39 (jen liché harmonické)	3

Mezní hodnoty harmonických proudů pro zařízení třídy D :

Tab. 3 Mezní hodnoty harmonických proudů – Třída D

Řád harmonické *n*	Max. hodnoty harm. proudů na watt [mA/W]	Největší dovolený harmonický proud [A]
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1	0,77
9	0,5	0,4
11	0,35	0,33
13 < n < 39 (jen liché harmonické)	3,85/n	0,15 * 15/n

3.2. ČSN EN 61000 - 2 - 2 - kompatibilní úrovně nf rušení v sítích nn

Norma ČSN EN 61000 - 2 - 2 udává kompatibilní úrovně pro veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí, které mají jmenovité fázové napětí do 420 V nebo sdružené do 690 V a jmenovitý kmitočet 50 Hz nebo 60 Hz.

Tab. 4 Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v síti nn

Liché harmonické nenásobky 3		Liché harmonické násobky 3		Sudé harmonické	
Řád harmonické n	Harmonické napětí U(n) [%]	Řád harmonické n	Harmonické napětí U(n) [%]	Řád harmonické n	Harmonické napětí U(n) [%]
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+12,5/n				

3.3. Porovnání reálného odběru s normami

Jelikož se diplomová práce zabývá simulací osvětlovací sítě, tak byly k porovnání s normami použity naměřené hodnoty proudu odebíraného zářivkou. Ke stanovení mezí emisí harmonických proudů slouží norma ČSN EN 61000 - 3 - 2 a protože se jedná zářivku, použijí se mezní hodnoty pro třídu C, tedy pro světelná zařízení.

Tab.5 znázorňuje porovnání harmonických proudů, které odebírá 58 W zářivka bez kompenzačního kondenzátoru. V tomto případě naměřené hodnoty odpovídají normě.

Tab. 5 Porovnání emisí harmonických proudů 58W zářivky bez kompenzace s normou ČSN EN 61000 - 3 - 2

Řád harmonické	I [A]		
	Naměřená hodnota [A]	Třída C [A]	Překročení normy [%]
2	0,003	0,011	-
3	0,072	0,081	-
5	0,01	0,051	-
7	0,01	0,036	-
9	0,004	0,025	-

V tabulce 6 jsou s normou porovnány hodnoty harmonických proudů, které odebírá stejná zářivka, ale navíc s paralelně připojeným kompenzačním kondenzátorem 5 μF. Zde již vyšších harmonických dochází k překročení normy. Je to způsobeno interakcí mezi kompenzačním kondenzátorem a impedancí sítě a nesinusovým napájecím napětím.

Tab. 6 Porovnání emisí harmonických proudů 58W zářivky s kompenzací 5uF s normou ČSN EN 61000 - 3 - 2

Řád harmonické	I [A]		
	Naměřená hodnota [A]	Třída C [A]	Překročení normy [%]
2	0,003	0,006	-
3	0,033	0,083	-
5	0,069	0,030	128
7	0,032	0,021	55
9	0,015	0,015	-
11	0,010	0,009	11
13	0,011	0,009	20

Pro porovnání s kompatibilními úrovněmi pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nn byl vybrán odběr na rozvaděči R1.8 (více v kap.4.1). Tento odběr je tvořen zářivkovým osvětlením, které je ve větším množství zdrojem značného harmonického rušení, ale i přesto, jak je vidět z tabulky 7 nedochází k překročení kompatibilních úrovní.

Tab. 7 Porovnání s kompatibilními úrovněmi pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nn

Řád harmonické	U [V]		
	Naměřená hodnota [V]	Norma [V]	Překročení normy [%]
3	9,60	15,3	-
5	10,65	18,4	-
7	5,93	15,3	-
9	0,53	4,6	-
11	1,1	10,71	-
13	0,69	9,18	-

4. Experimentální část

Pro identifikaci parametrů napájecí sítě, osvětlovací sítě a náhradního zapojení zářivky s indukčním předřadníkem byly použity výsledky měření, které zpracovala Pavla Černá v rámci své diplomové práce „Energetická síť a nelineární spotřebiče". Z toho důvodu, že od té doby nedošlo ke změnám zátěže. Navíc by bylo problematické získání povolení k přístupu ke hlavnímu rozvaděči budovy a napájecímu transformátoru.

4.1. Hlavní rozvaděč budovy „F" (HR – MF1)

Měření proběhlo v budově „F" v Husově ulici na hlavním rozvaděči, který se skládá ze šesti paralelně řazených polí. Rozvaděč je umístěn v prvním podzemním podlaží. Tento rozvaděč, ale i celý areál technické univerzity je napájen z transformátoru umístěném v transformátorovně, což je samostatná budova, v které jsou dále umístěny další dva transformátory, napájející blízké okolní zástavby a nemocnici.

Částečné složení zátěže hlavního rozvaděče, ale i některé parametry kabelů lze zjistit z technické dokumentace, jež je uložena na Referátu investiční výstavby a dislokace TU v Liberci, bohužel tyto informace nejsou dostačující, ale lze je využít pro identifikaci parametrů sítě.

Proměřen byl „výstup" z rozvaděče - pole číslo 2 a 3, která jsou zajímavá z pohledu celkového vlivu více nelineárních spotřebičů (počítače, zářivkové osvětlení) na síť. Měření bylo provedeno v částečném i plném provozu budovy „F" [3].

Pole číslo 1 je přívodní a tedy napájené přímo z transformátoru čtyř žilovým kabelem 4 x AYKY 3 x 240 + 120. Transformátor je olejově chlazený a napájený tří žilovým kabelem ze sítě vysokého napětí 35 kV.

Pole číslo 2 obsahuje pětistupňovou skupinovou kompenzaci v podobě kondenzátorové baterie QM - 40 od firmy Hansel zapojené do trojúhelníka. Tato baterie odleh-

čuje od jalového výkonu úsek od hlavního rozvaděče budovy F k napájecímu transformátoru. Z pole dále vede propojka k poli číslo 4, ze kterého jsou napájeny převážně kancelářské prostory a učebny.

Pole číslo 3 napájí elektrická zařízení kuchyně, jídelny, jejich osvětlení a dále vedlejší rozvaděč, na který připojena zářivková osvětlovací síť s přibližně 200 kusy 58W zářivek.

Další pole nebyla proměřena.

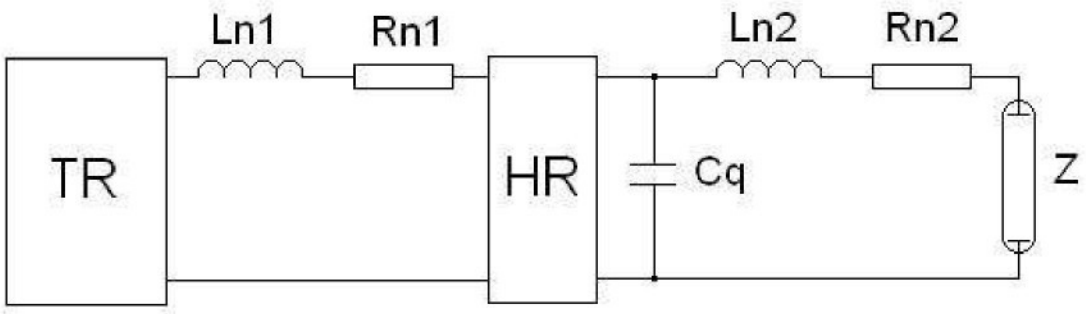
Schéma přiloha

4.2. Identifikace parametrů napájecí sítě

Diplomová práce se zabývá hlavně vlivem zářivkového osvětlení na napájecí síť, proto bude zářivkové osvětlení uváděno jako hlavní zátěž i přesto, že v celkovém odběru zaujímá malou část.

4.2.1. Principielní zapojení

Trojfázovou soustavu lze pro zjednodušení nahradit jednofázovou soustavou s přepočtenými parametry. Vedení nn je nahrazeno pouze podélnou impedancí [8].



TR - transformátor 35/0.4/0.23kV
HR - hlavní rozvaděč
Z - zářivka
L_{n1}, L_{n2} - indukčnosti vedení
R_{n1}, R_{n2} - odpory vedení
C_q - kompenzační kapacita

Obr. 1 Principielní schéma pro jednu fázi

4.2.2. Nalezení parametrů vedení mezi transformátorem a HR

Získání těchto parametrů je možné ze znalosti délky vedení a normovaných elektrických parametrů kabelů, nebo je možno použít k jejich odvození vztah (4.1), používaný pro základní přibližnou kontrolu rezonance (pro nezatížený transformátor), převzatý z literatury [2]. Je k tomu potřeba znát štítkové údaje napájecího transformátoru. Jeho zdánlivý výkon S [VA], napětí nakrátko e_K [%] a kompenzační výkon Qc [VAr]. Orientační hodnoty kompenzačních výkonů pro transformátory 35/0,4 kV při provozu naprázdno jsou v tab.8.

Tab. 8 Orientační stanovení kompenzačních výkonů při provozu naprázdno pro transformátory 35/0,4 kV [2].

S[kVA]	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300	10000
Qc[kVAr]	4	4	6	7	8	11	13	22	27	35	45

V případě, že není možné zjistit napětí nakrátko, lze použít normu [12], která obsahuje charakteristické hodnoty transformátorů.

4.2.2.1 Základní kontrola rezonance

Pro zjištění přibližné rezonanční frekvence slouží zjednodušený výraz (4.1), kdy je předpokládán provoz bez zatížení [2],[14]. Bližší informace a vztah pro rozšířenou kontrolu rezonance a tedy činný odběr P > 0 jsou v literatuře [2] ,[14].

$$f_{REZ} \cong 50 * \sqrt{\frac{100 * S}{Q_c * e_K}} \qquad [\text{ Hz; MVA; MVAr; \% }] \qquad (4.1)$$

Zdánlivý výkon transformátoru : S = 630 kVA
Napětí nakrátko transformátoru : e_k = 6 %
Kompenzační výkon : Q_c = 8 kVAr

Dosazením do vzorce (4.1) získáme výslednou rezonanční frekvenci:

$$f_{REZ} = 1811 \text{ Hz}$$

4.2.2.2 Thompsonův vztah

Ze zjištěné rezonanční frekvence je možné pomocí Thompsonova vztahu (4.2) odvodit indukčnost vedení. Thompsonův vztah je použitelný jak pro sériový, tak pro paralelní ideální rezonanční obvod. Je odvozen z podmínky rezonance, kdy je jalová složka impedance rovna nule.

$$f_{REZ} = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_{n1} * C_q}} \qquad [\text{Hz; H ; F}] \qquad (4.2)$$

$$L_{n1} = \frac{1}{(f_{REZ} * 2 * \pi)^2 * C_q} \qquad (4.3)$$

Kapacitu kompenzační baterie, která je zapojená do trojúhelníka je potřeba přepočítat na jednofázovou kapacitu C_q pomocí vztahu (4.5).

$$Qc \cong 3 * U_f * I_f * \sin\varphi = 3 * U_f * \frac{U_f}{X_c} * \sin\varphi = 3 * U_f^2 * \omega * C_q * \sin\varphi \qquad (4.4)$$

$$C_q \cong \frac{Q_c}{3 * U_f^2 * \omega * \sin\varphi} \qquad [\text{F; VAr; V; Hz; °}] \qquad (4.5)$$

Q_c - kompenzační 3-fázový výkon

U_f - fázové napětí

Jelikož se jedná o kompenzační (jalový) výkon, lze předpokládat ideální stav, kdy cosφ = 0, tedy sinφ = 1. Výpočet je proveden pro síťovou frekvenci 50 Hz a fázové napětí U_f = 220 V. Dosazením do vzorce (4.3) a (4.5) lze vypočíst C_q a L_{n1}.

C_q = 175μF
L_{n1} = 43 μH

Takto odvozenou indukčnost lze porovnat s indukčností vypočítanou pomocí měrných hodnot parametrů kabelů pro sítě nízkého napětí podle [7].
Z transformátoru jsou k rozvaděči vyvedeny kabely 3 x 240 AYKY a 1 x 120 AYKY.

Maximální hodnoty pro 240 AYKY : R = 0.129 Ω/km a X = 0.0727 Ω/km
120 AYKY : R = 0.258 Ω/km a X = 0.0743 Ω/km

Odhadnutá vzdálenost transformátoru od hlavního rozvaděče je asi 100m. Proto po přepočtení měrných hodnot na tuto délku dostaneme.

R = 0.0387 Ω
X = 0.0147 Ω

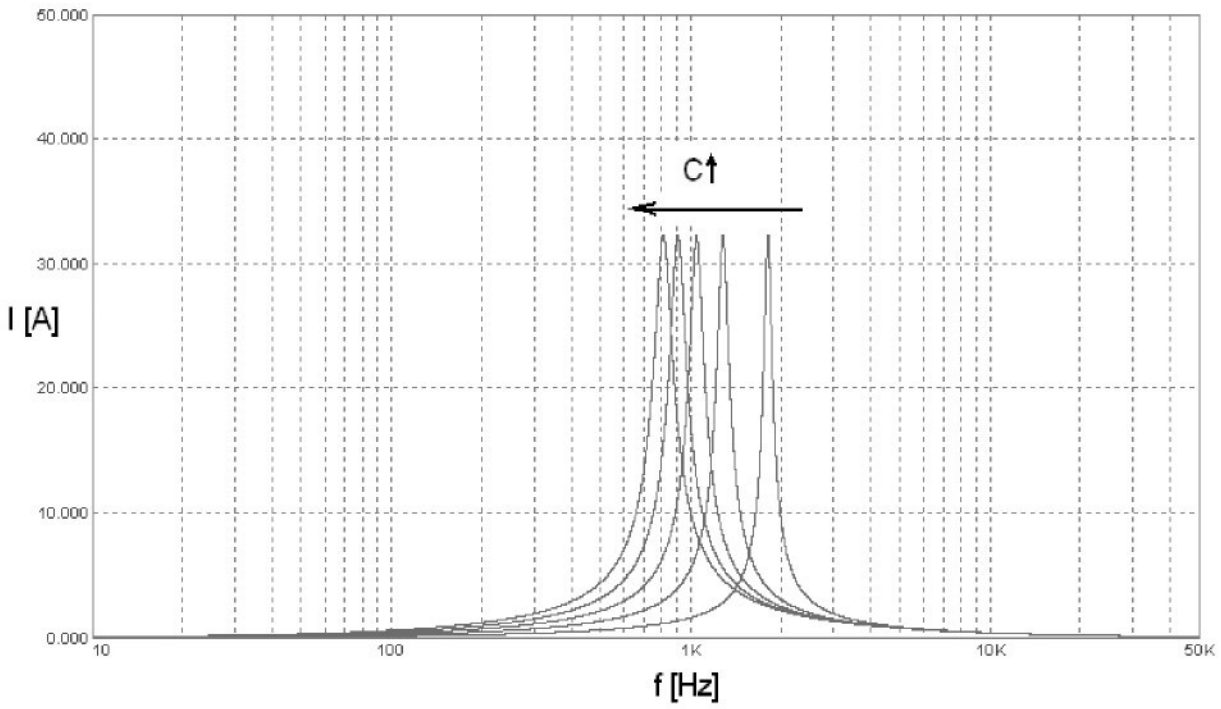
$$X = L_{n1} * \omega \Rightarrow L_{n1} = \frac{X}{\omega} \qquad (4.6)$$

L_{n1} = 46 μH

Odchylka je pravděpodobně způsobena odhadem délky kabelů a použitím normovaných parametrů kabelů a transformátoru, jež se mohou od reálných parametrů mírně lišit.

4.2.2.3 Frekvenční charakteristika

V grafu 1 jsou znázorněny frekvenční charakteristiky rezonančního obvodu, který je tvořen vypočítanou indukčností vedení (kap.4.2.2.2) a kompenzační kapacitou C_q reprezentující kondenzátorovou baterii. Odpor vedení je zanedbán, protože má tlumící charakter a ke zjištění vlivu na rezonanční frekvenci při změně kompenzačního výkonu (8, 16, 24, 32, 40 kVAr) není potřeba. Z průběhů je patrné, že rezonanční frekvence se nelineárně snižuje se lineárně se zvyšujícím se kompenzačním výkonem Q_c.



Graf. 1 Závislost rezonanční frekvence na kompenzační kapacitě u nezatížené sítě

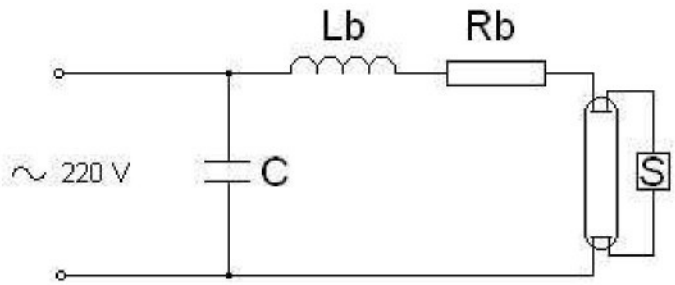
4.3. Parametry zářivky s indukčním předřadníkem

Zářivky jsou velmi rozšířeným zdrojem světla, hlavně pro svou nízkou spotřebu elektrické energie a větší životnost. Z toho nejrozšířenějším typem zářivek jsou právě s indukčním předřadníkem a s vestavěným paralelním kompenzačním kondenzátorem. Kompenzační kondenzátor snižuje odběr jalového výkonu z napájecí elektrizační soustavy, ale způsobí zvýšení podílu harmonických složek v odebíraném proudu (viz. kap. 3.3 - porovnání s normami).

Pro měření byla použita zářivka typu Sylvania standard F 58 W/154 s předřadníkem Layrton, Typ: ARC 65/23, 65W, 230V, 50Hz, 0.67A s doporučenou paralelní kompenzací C = 5,2 μF ± 4% a standardním startérem.

4.3.1. Popis

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, u nichž se ultrafialové záření výboje mění vrstvou luminoforu na viditelné světlo. Indukční předřadník se využívá pro vytvoření vysokého napětí nutného k zapálení výboje v zářivkové trubici. Také vyhlazuje proudovou křivku. Nevýhodou je, že dochází k fázovému posuvu mezi odebíraným proudem a napětím zářivky, což způsobuje malý účiník (okolo 0.6) a velký odebíraný proud. Proto výrobce připojuje k zářivce kompenzační kondenzátor, který se volí tak, aby byl účiník zářivky mezi 0.9 a 0.95.



C - kompenzační kondenzátor

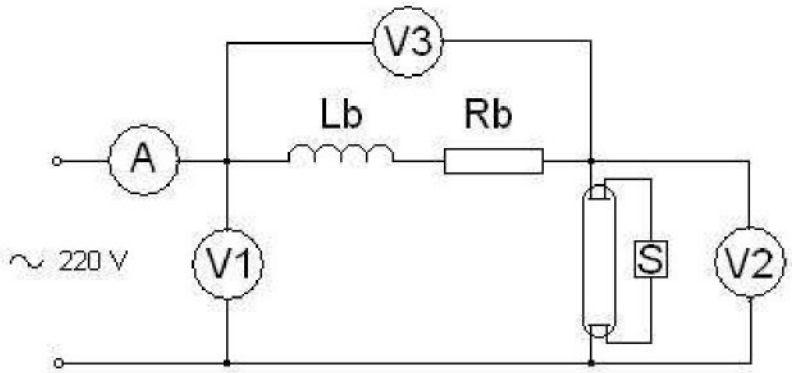
S - startér

Obr. 2 Náhradní schéma zářivky s indukčním předřadníkem

Paralelně k trubici je připojen startér, ale ten se uplatňuje pouze při zapnutí zářivky, pro simulaci rozsvícené zářivky se tedy neuvažuje. Indukční předřadník je tvořen tlumivkou, lze ho tedy nahradit ideální indukčností L_b v sériovém zapojení s odporem R_b. Náhradní schéma zářivky s indukčním předřadníkem je na obr.2.

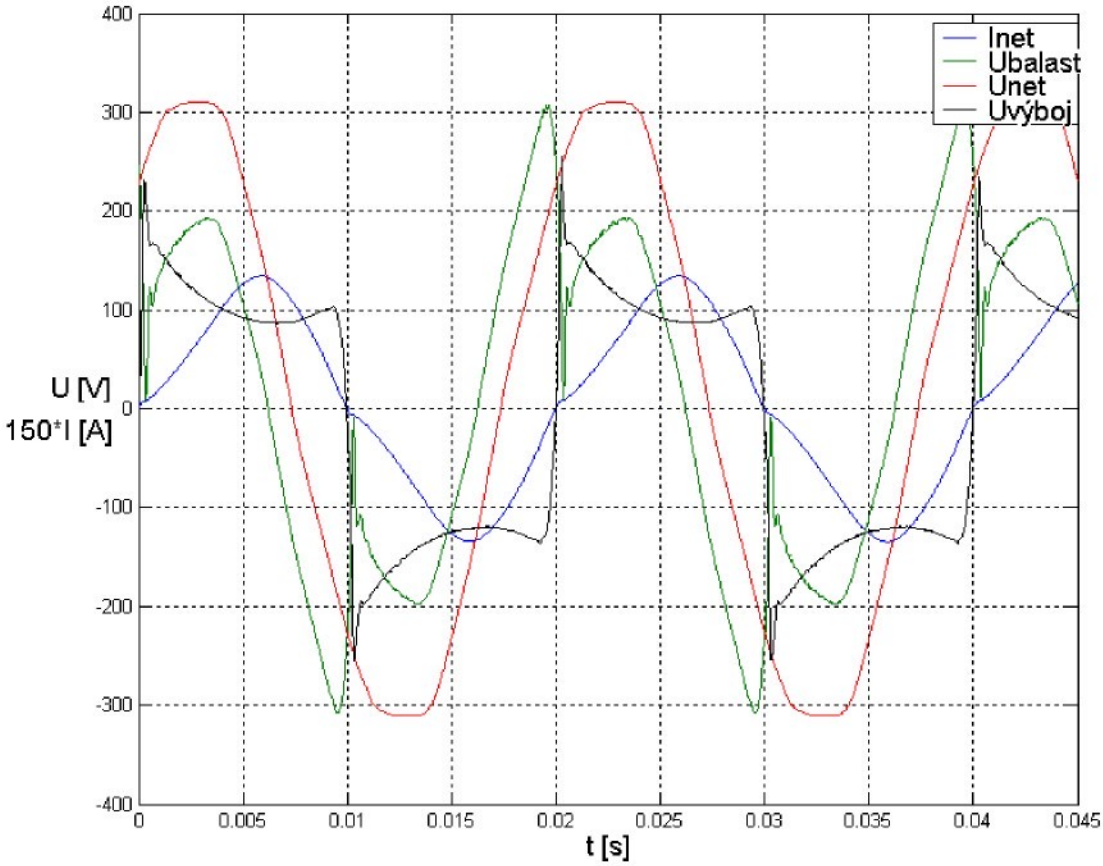
4.3.2. Měření na zářivce

Digitálním osciloskopem byl naměřen proud odebíraný zářivkou, napětí na výboji a síťové napětí. Při měření nebyl zapojen kompenzační kondenzátor, protože pro zjištění indukčnosti předřadníku L_b není potřeba. Pomocí ohmmetru byla změřena velikost odporu R_b. Schéma měření na zářivce je na obr.3.



V1 - síťové napětí U_{net}
V2 - napětí na výboji U_{vyboj}
V3 - napětí na předřadníku U_{balast}
A - odebíraný proud ze sítě I_{net}

Obr. 3 Schéma měření na zářivce



Graf. 2 Naměřené průběhy elektrických veličin na zářivce

Z naměřených průběhů elektrických veličin na zářivce bez kompenzačního kondenzátoru (graf.2) je patrné, že napětí na výboji je ve fázi s odebíraným proudem zářivky. Posun napájecího napětí vůči odebíranému proudu je způsoben indukčním předřadníkem. To má za následek nízký účiník odebíraný proud vyšší, než je potřeba. Nelineární charakter zářivky je způsoben vodivostí výboje a stává se tak zdrojem harmonického rušení v distribuční síti. Napájecí napětí není zcela sinusové, což je způsobeno úbytky harmonických napětí na vedeních od výrobce elektrické energie až ke spotřebiteli. Obecně se však dá říci, že výrobce dodává z generátoru do sítě sinusové napětí. Emise harmonických proudů injektovaných do distribuční sítě zářivkou bez kompenzační kapacity jsou porovnány v kap. 3.3.

4.3.3. Výpočet parametrů zářivky

Z naměřených hodnot byla pro jednotlivé veličiny vypočítána efektivní hodnota podle vzorce (4.7) pomocí skriptu v programu Matlab.

$$EF = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} x^2(i)}{N}} \tag{4.7}$$

x – hodnoty jednotlivých vzorků

N – počet vzorků

Efektivní hodnota napětí na předřadníku : U_{balast} = 173 V

Efektivní hodnota odebíraného proudu : I = 0.55 A

Činný odpor předřadníku : R_b = 18.9 Ω

Celková impedance předřadníku je rovna :

$$P_b = U_{balast} * I * \lambda = R_b * I^2 = 18.9 * 0.55^2 = 5.72\,W \tag{4.8}$$

$$Q_b = \sqrt{S_b^2 - P_b^2} = \omega L_b * I^2 \Rightarrow L_b = \frac{Q_b}{\omega * I^2} = \frac{\sqrt{S_b^2 - P_b^2}}{\omega * I^2} = 0.998\,H \tag{4.9}$$

P_b , Q_b – činný / jalový výkon předřadníku

S_b – zdánlivý výkon předřadníku

λ – účiník

Účiník λ - Power Factor (PF) - je definován jako poměr činného ke zdánlivému výkonu. Zahrnuje i ostatní newattové výkony, v tomto případě způsobené vyššími harmonickými.

$$\lambda = \frac{P}{S} \tag{4.10}$$

4.3.4. Zářivka s indukčním předřadníkem

4.3.4.1 Nelineární chování zářivky

Nelineární chování zářivky je způsobeno nízkotlakým výbojem uvnitř výbojové trubice. Napájením střídavým proudem dochází k zapálení výboje, zhasnutí a opětovnému zapálení v opačném směru. Tím dochází k nelineárním změnám vodivosti, což má za následek nelineární odběr proudu. Vodivost výboje lze popsat diferenciální rovnicí (4.11), odvozena z matematicko - fyzikální analýzy vysokotlakého výboje, jež je nízkotlakému výboji při zvolení vhodných koeficientů podobný [5].

$$\frac{dG_k}{dt} = a_2 \cdot i_k^2 - \left[b_3 \cdot G_k^3 + b_2 \cdot G_k^2 + b_1 G_k\right] \tag{4.11}$$

G_k – vodivost výboje zářivky

a_2, b_3, b_2, b_1 – experimentálně zjištěné konstanty

i_k – proud tekoucí zářivkou

4.3.4.2 Parametry sítě mezi hlavním rozvaděčem a zářivkou

Při znalosti napětí na hlavním rozvaděči HR, odebíraném proudu a napětí na tělese zářivky, lze rozdílem zjistit úbytek napětí na vedení. Další postup je obdobný postupu při určování parametrů v kap. 4.3.3.

$$P_v = U_v * I * \lambda = R_{n2} * I^2 \Rightarrow \lambda = \frac{I * R_{n2}}{U_v} \tag{4.12}$$

$$Q_v = \sqrt{S_v^2 - P_v^2} = \omega L_{n2} * I^2 \Rightarrow L_{n2} = \frac{Q_v}{\omega * I^2} \tag{4.13}$$

P_v, Q_v – činné/ jalové ztráty na vedení

S_v – celkové ztráty na vedení

U_v – úbytek napětí na vedení

L_{n2} – indukčnost vedení mezi HR a zářivkou

Pro případ budovy „F“ v Husově ulici byly z technické dokumentace zjištěny základní informace o vedení mezi hlavním rozvaděčem (HR), rozvaděčem R1.8 a zářivkovým osvětlením. Mezi HR a rozvaděčem pro R1.8 je veden 35 CYKY, dál pak 2,5 CYKY a 1,5 CYKY. Délky vedení se už zjistit nepodařilo. Z normy ČSN 34 7201 je možné získat měrný odpor měděných jader vodičů (viz. tab.9).

Tab. 9 Měrné odpory vedení podle ČSN 34 7201

Průřez jádra vodiče S [mm^2]	Měrný odpor vodiče R [Ω/km]
1,5	12,1
2,5	7,41
35	0,524

Z naměřených elektrických veličin na rozvaděči R1.8 není možné určit úbytek napětí na vedení a proto také nelze stanovit impedanci vedení. Parametry vedení je třeba upřesnit experimentálně, simulací.

4.4. Simulace

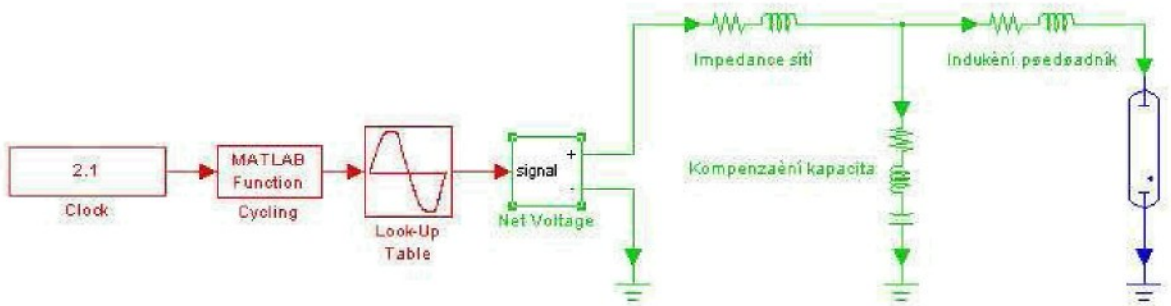
4.4.1. Simulace v programu Matlab - Simulink

Matlab je komerční matematicko-grafický systém s integrovaným prostředím, s jehož pomocí lze provádět zejména modelování, analýzu a vizualizaci dat a návrhy řídících a komunikačních systému. Je možné ho rozšiřovat o Toolboxy, což jsou knihovny funkcí, které významně rozšiřují možnosti Matlabu a jsou orientovány na konkrétní vědní obory. Samostatnou kapitolou je systém Simulink, který umožňuje pracovat se všemi funkcemi a příkazy, jako s grafickými bloky.

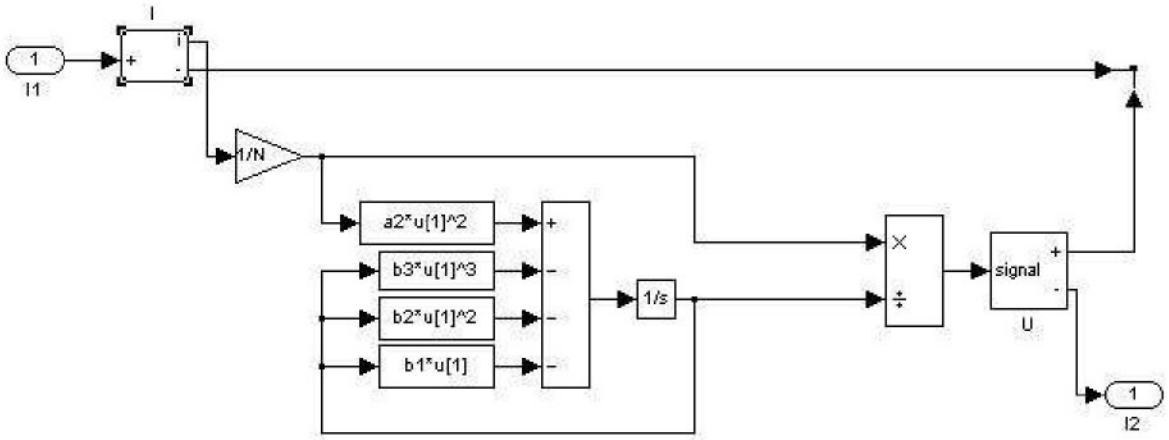
Po spuštění Matlabu se standardně zobrazí pracovní plocha, která sestává ze tří základních oken. Z většího Command Window a dvou menších Workspace a Command History. To jaká další okna je možné aktivovat lze vybrat v nastavení Matlabu. Commad Windows je hlavní a nejdůležitější částí pracovní plochy, zadávají se sem příkazy a zobrazuje se zde odezva Matlabu a systémová hlášení (chyby, varování …). Okno Commad History zobrazuje již použité příkazy. Na tento příkaz stačí jen kliknout či ho přetáhnout do Command Window. V okně Workspace se nachází přehled všech používaných proměnných a informace o nich (rozměr, struktura…). M - soubor je textový soubor s příponou *.m, který slouží k zápisu zdrojového kódu, který je Matlab schopný provést. Matlab je dostupný v individuální nebo školní licenci, která je o něco levnější. Pro simulaci byl použit Matlab 6.5.

V Simulinku je standardně dostupný SimPowerSystems Toolbox, který obsahuje již hotové modely RLC prvků a další elektrická zařízení, takže není nutné každý prvek zvlášť modelovat.

Simulační schéma elektrické sítě napájející zářivkové osvětlení je na obr.4. V tomto obrázku červená část slouží k ovládání řízeného napěťového zdroje. Zelené bloky reprezentují čistě elektrickou část - napájecí zdroj, impedance sítě, konpenzační kapacita a indukční předřadník. Modrá část označuje subsystém výboj zářivky, jehož model je sestaven podle diferenciální rovnice (4.6) a zapouzdřen do jednoho bloku (viz. obr.5). Každý blok má své specifické parametry, které jsou zadávány při spouštění m-souboru.



Obr. 4 Simulační schéma napájecí sítě se zářivkou v Simulinku



Obr. 5 Simulační schéma subsystému výboj v Simulinku

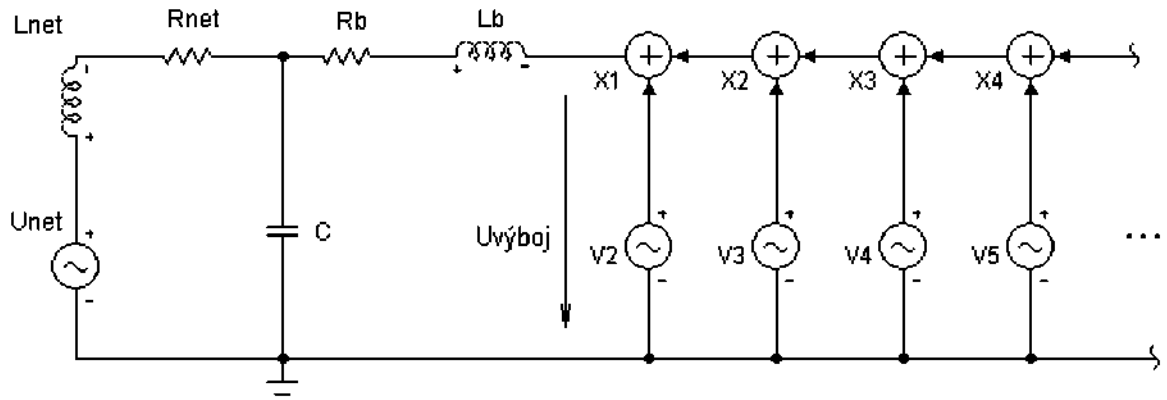
Simulační schéma výboje zářivky je odvozeno od diferenciální rovnice (4.11). Koeficienty a2, b1, b2 a b3 byly zjištěny experimentálně v diplomové práci „Modelování světelných výbojů“ od Aleše Kobrleho, ale lze je s určitou nepřesností odhadnout zkusmo. Blok výboje zářivky byl převzat literatury [1].

4.4.2. Simulace v programu MicroCap

Microcap je simulační program pro elektronické a elektrické obvody, který umožňuje různé typy analýz. Při startu si lze vybrat zda se bude kreslit elektrické schéma (Schematic), tvořit netlist zapojení (Spice/Text) nebo nová knihovna součástek (Library). Při otvírání stávajících souborů, se objevuje náhled, takže si není třeba pamatovat obvody podle jména. Microcap je také komerční software, ale na rozdíl od Matlabu je možné zdarma stáhnout z internetu zkušební verzi, která je plně funkční. Omezení se týkají rozsahu obvodů (max. 50 součástek), rychlosti výpočtů, menšího výběru z knihoven součástek, dále nejsou podporovány třírozměrné grafy a některé víceparametrové analýzy. Jinak je povoleno vše, včetně krokování při simulaci, ukládání, tisku a importu/exportu souborů a výsledků simulací. Od verze osm je Microcap vybaven funkcí FFT a na internetu lze stáhnout neoficiální českou lokalizaci.

Simulace v programu Microcap v této práci slouží hlavně k ověření správnosti modelu vytvořeným v Matlabu, protože rovnice (4.11) popisuje vysokotlaký výboj, kdežto zářivka reprezentuje nízkotlaký výboj a také jako alternativní řešení, jak namodelovat elektrický obvod se zářivkou.

Základní myšlenka vychází z toho, že nelineární spotřebič lze chápat jako zdroj harmonických proudů. Na rozdíl tedy od Matlabu je spotřebič nahrazen zdroji harmonických napětí. Vzájemné posuvy harmonických napětí je nutné zadat ručně (obr.6). Na druhou stranu takto vytvořený spotřebič je téměř shodný ve smyslu vyzařování harmonických proudů se skutečným spotřebičem.

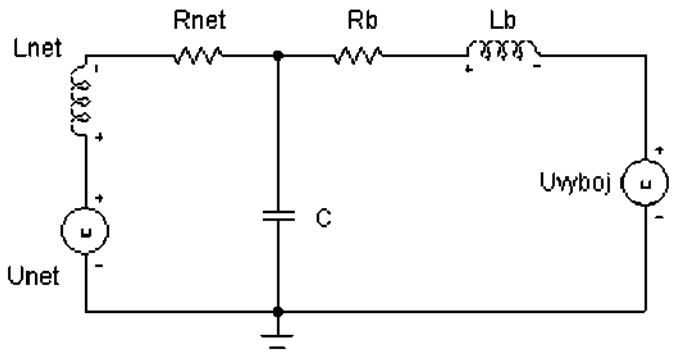


R_{net}, L_{net} – parametry vedení (odpor, indukčnost)
R_b, L_b – parametry předřadníku
C – kompenzační kondenzátor zářivky
U_{net} – napájecí napětí
V2,V3,V4,V5... – zdroje jednotlivých harmonických napětí
X1,X2,X3,X4... – sumátory

Obr. 6 Náhradní schéma osvětlovací sítě v programu Microcap se zdroji harmonických napětí

Při správné volbě R_{net} a L_{net} lze dosáhnout toho, že nasimulovaný odebíraný proud je podobný jako proud naměřený. Ke zjištění amplitud a vzájemných posunů jednotlivých harmonických napětí je potřeba provést rozklad naměřeného napětí na výboji nejlépe pomocí FFT (Fast Fourier Transformation), což je algoritmus výpočtu diskrétní Fourierovi transformace, který celý výpočet značně urychluje.

Nebo se nabízí možnost a to pomocí řízených napěťových zdrojů, kdy reprezentují naměřené hodnoty napájecího napětí a napětí na výboji zářivky (obr.7). U_{net} a $U_{výboj}$ odpovídají skutečným naměřeným hodnotám. Lze to proto využít k porovnání s modelem použitým v Matlabu.



U_{net} – naměřené napájecí napětí

$U_{výboj}$ – naměřené napětí na výboji

Obr. 7 Náhradní schéma osvětlovací sítě v programu Microcap s řízenými napěťovými zdroji

První způsob řešení je tedy možné uplatnit, není-li v simulačním programu dostupná komponenta řízeného zdroje. Nevýhodou je, že při zadávání hodnot amplitud a fázových posunů do jednotlivých zdrojů harmonických může dojít k překlepu, který znehodnotí celou simulaci, a pracnost odhalení takové chyby je pak závislá na počtu zdrojů harmonických napětí. Naštěstí většina simulačních programů, včetně Microcapu možností použití řízeného zdroje disponuje a odpadají tak veškeré problémy popsané výše. Navíc je průběh přesnější, protože není nijak frekvenčně omezen, narozdíl od první možnosti, která využívá určitý konečný počet harmonických.

4.4.3. Přizpůsobení dat

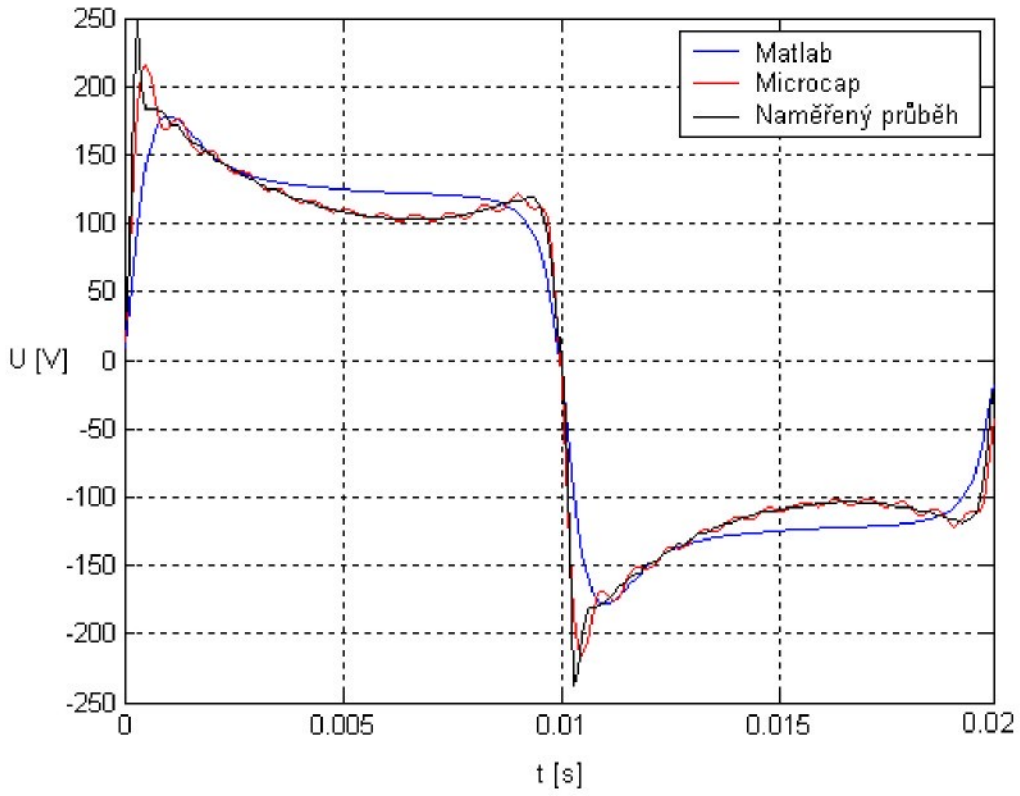
Aby bylo možné modely porovnat, je nejprve nutné získat nasimulovaná data a vzájemně je přizpůsobit. Potom je lze porovnat nejlépe opět v Matlabu, protože je dobře vybaven pro práci s daty.

Matlab nabízí uložení dat jak ve standardním formátu *.mat, tak v ASCII formátu. Data uloží do textového souboru pomocí příkazu *save data.mat inet - ASCII*, kde *data.mat* je jméno souboru, do kterého uloží proměnná *inet.* Takový soubor je pak lehce otevíratelný v jakémkoli textovém či tabulkovém editoru.

Microcap na výběr nedává, ale ukládá rovnou do textového souboru s příponou *.usr, který nejprve obsahuje hlavičku s informacemi o datech a pak samotná data oddělená čárkami (viz. příloha 2). Při importu do Matlabu stačí tuto hlavičku odstranit.

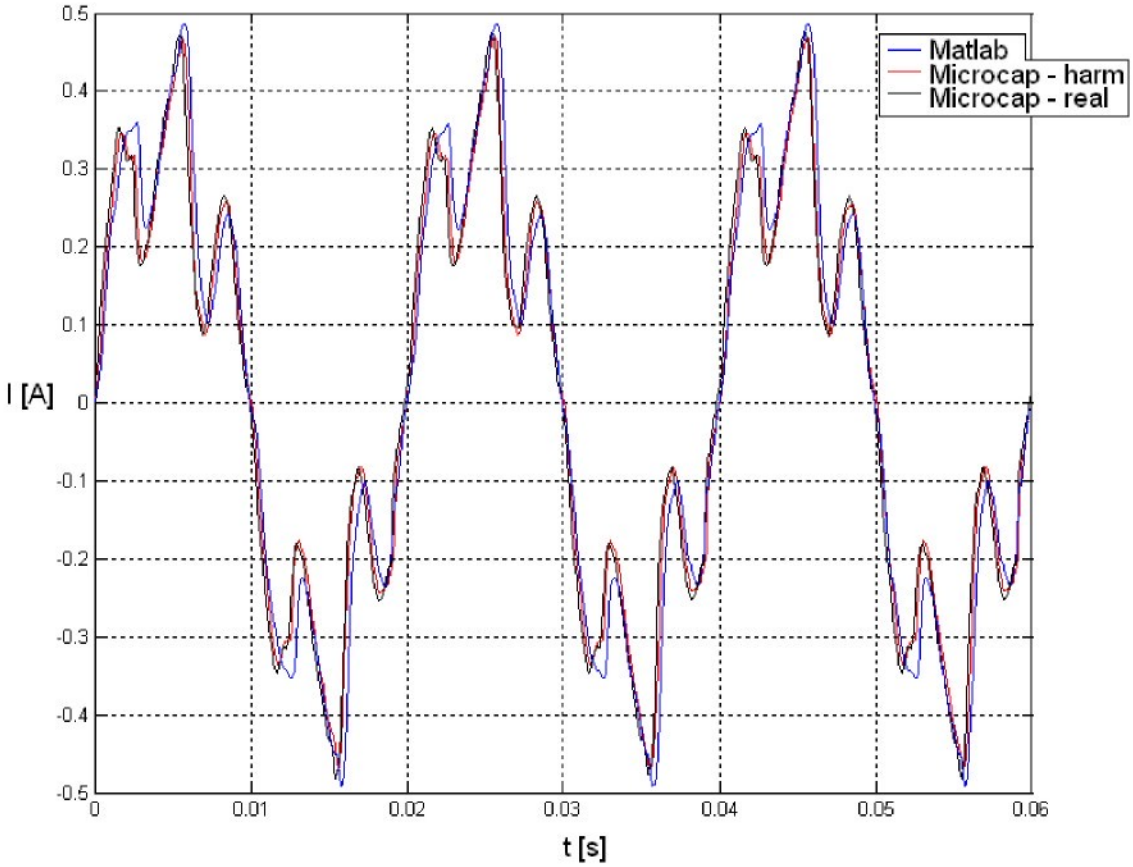
4.4.4. Porovnání modelů

V grafu 3 jsou porovnány průběhy napětí na výboji. Modrý průběh je určován rovnicí vodivosti výboje, namodelované v Matlabu. Naměřené napětí na výboji je znázorněno černě. Frekvenční spektrum obou průběhů je v příloze 1 obr. P1.1. Červený průběh je složen pouze z lichých harmonických až do 25.řádu. Sudé harmonické nedosahují takových hodnot, aby je bylo třeba uvažovat.



Graf.3 Porovnání průběhů napětí na výboji

I přesto, že průběh napětí na výboji, vytvořený v Matlabu se od skutečného naměřeného průběhu liší a to hlavně na vyšších harmonických, lze tento model použít, už jen z toho důvodu, že výboj způsobuje hlavně rušení do 9. harmonické a lepší popis nízkotlakého výboje zatím stejně není dostupný. Průběhy odebíraných proudů pro zářivku s paralelním kompenzačním kondenzátorem 5 μF jsou v grafu 4.



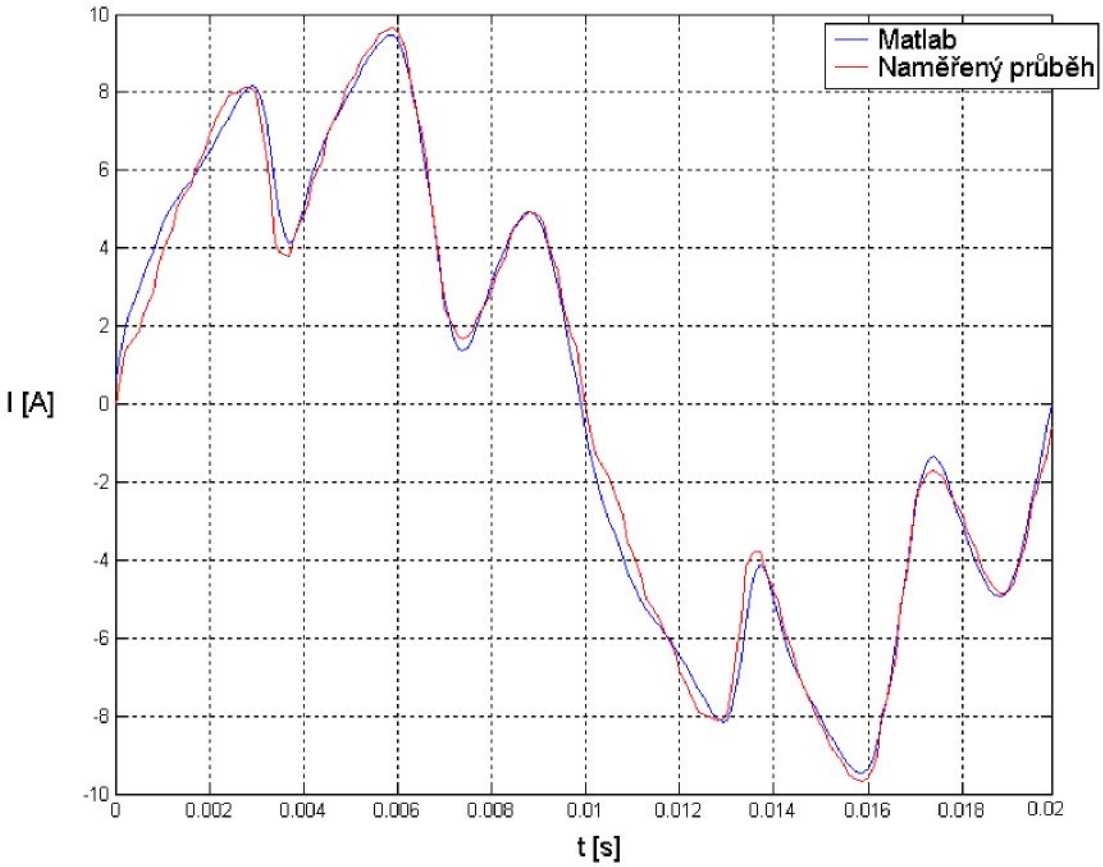
Graf.4 Porovnání nasimulovaných odběrů proudů pro zářivku s paralelním kompenzačním kondezátorem 5 μF

Proudová křivka značená v grafu 4 černou barvou vznikne, nahradí – li se vodivost výboje řízeným zdrojem napětí, odpovídajícím naměřenému napětí na výboji. V případě, že není možné použít řízený napěťový zdroj, lze tuto náhradu provést pomocí několika sinusových zdrojů o různých frekvencích (viz. obr.6), reprezentující harmonická napětí. Tento případ zobrazuje červená křivka. Nasimulovaný odběr v Matlabu se mírně liší od obou předchozích průběhů, což je způsobeno rozdílem

modelu vodivosti od reálné vodivosti na vyšších frekvencích (viz. příloha 1 obr. P1.1). Další srovnání průběhů odebíraných proudů pro zářivku s kompenzaci 2 μF a bez kompenzace je v příloze 1 (graf. P1.1 a graf. P1.2).

4.4.5. Porovnání reálného odběru a simulací

Pro porovnání modelu a zároveň pro nalezení parametrů sítě byl zvolen odběr zářivkového osvětlení v jedné fázi. Simulace byla provedena v Matlabu, z důvodu jednoduššího zpracování dat. Při simulaci byly měněny parametry R_{n2} a L_{n2} za předpokladu, že kompenzační kondenzátor jednotlivých zářivek je stejný.



Graf.5 Porovnání nasimulovaného a reálného odběru proudu pro 22 zářivek s paralelním kompenzačním kondezátorem 5 μF

Celkový instalovaný výkon připojený k rozvaděči R 1.8 je 11.5 kW, to odpovídá dohromady asi 200 zářivkovým svítidlům, tedy okolo 65 zářivkám zapojeným v jedné fázi v případě symetrického zapojení.

Hodnoty naměřených elektrických veličin jsou v tabulce 10. Pro porovnání se simulací byla použita fáze L2. Simulací bylo zjištěno, že počet svítících zářivek zapojených na fázi L2 je 22. Lze to odvodit i výpočtem z naměřeného I_{ef} a efektivní hodnoty proudu odebíraným jednou zářivkou. Další srovnání s reálným odběrem je v příloze 1 graf. P1.3, pro 38 zářivek.

Tab. 10 Naměřené elektrické veličiny [3]

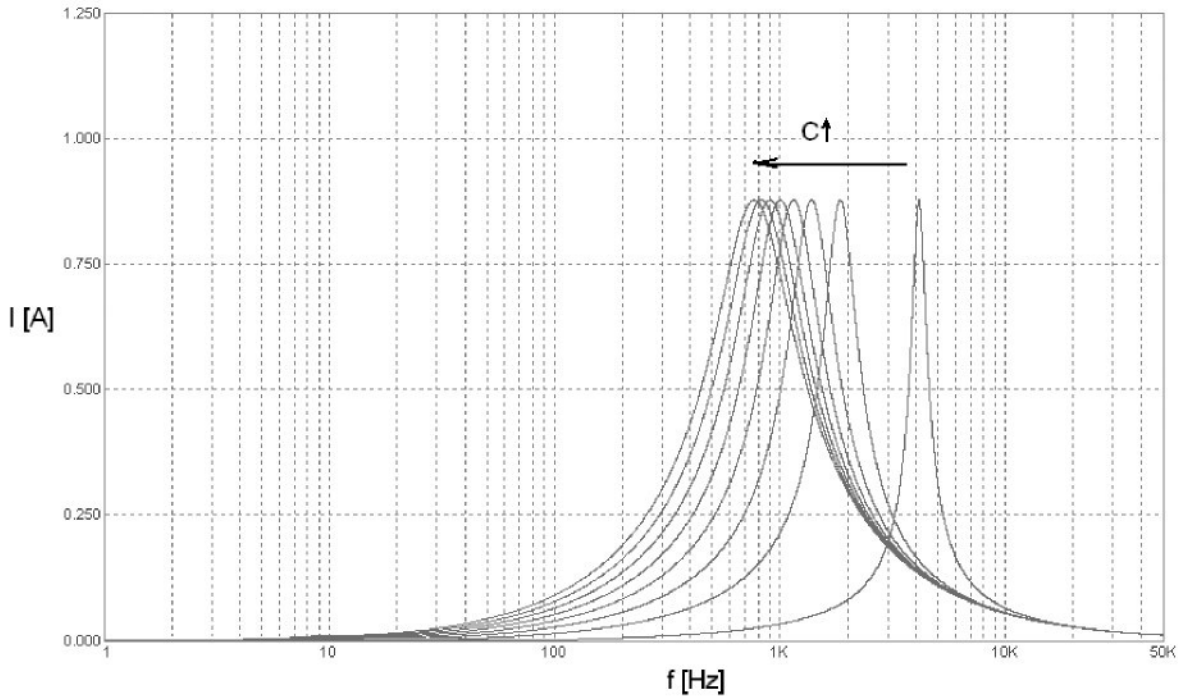
	L_1	L_2	L_3
U_{ef} [V]	218,5	216,3	216,8
I_{ef} [A]	10,6	5,78	4,51
P [W]	2 216	1 170	913,9
S [VA]	2 308	1 250	977,8
Q [VAr]	645,2	441,2	347,7
λ	0,96	0,94	0,93
THD	0,1394	0,3647	0,3605

Simulací zjištěné parametry jsou R_{n2} = 1.1 Ω a L_{n2} = 250 μH. Z tabulky 8 je patrné, že na jejich velikost má největší vliv přívodní vedení k zářivkám, tedy s nižším průřezem jádra.

4.5. Frekvenční charakteristiky osvětlovací sítě

4.5.1. Vliv na rezonanční frekvenci při zvyšování kompenzační kapacity

Se zvyšujícím se počtem zářivek se zvětšuje i celková kompenzační kapacita, čímž klesá rezonanční kmitočet (graf.6). Pravá krajní poloha odpovídá jedné zářivce s kompenzačním kondenzátorem 5 uF. Levá krajní poloha reprezentuje 33 paralelně zapojených zářivek, tedy kapacitu 165 uF.

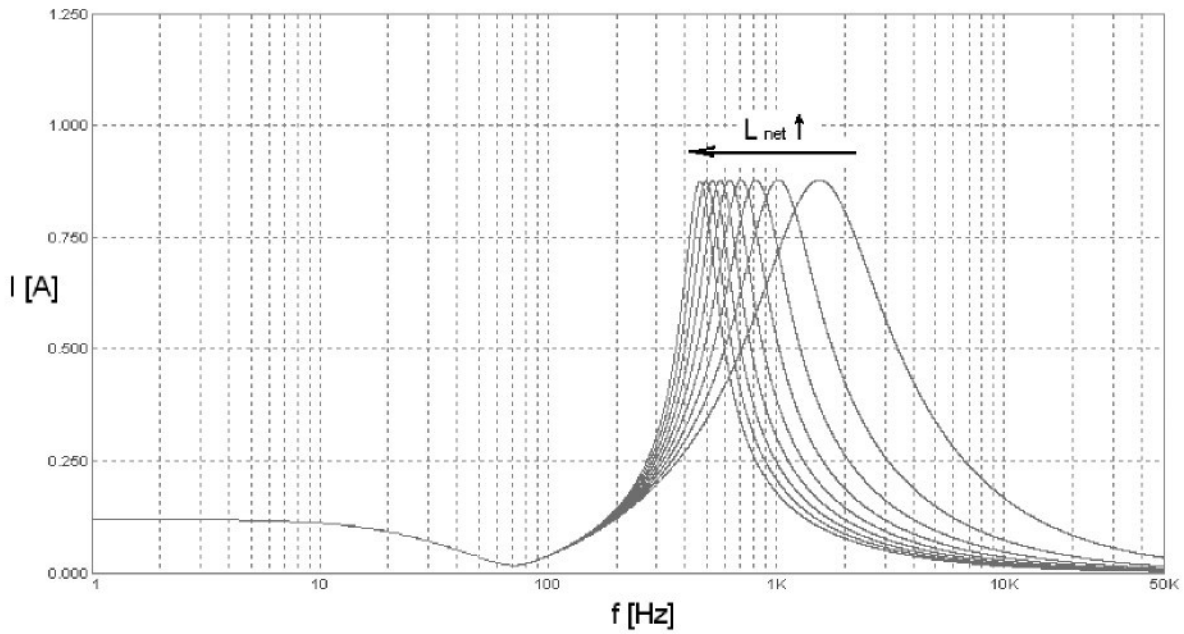


Graf. 6 Závislost rezonanční frekvence na změně kompenzační kapacity

Při této frekvenční analýze zůstaly parametry předřadníku R_b a L_b konstantní, aby byl vidět vliv kompenzační kapacity na směr posunu rezonanční frekvence. V opačném případě, tedy při konstantní kompenzační kapacitě a snižování hodnot R_b a L_b, je trend opačný. Se zvyšujícím se zatížením se zvyšuje rezonanční frekvence. Celkový vliv na frekvenční charakteristiku napájecí sítě zvyšováním zářivkové zátěže je dán oběma těmito trendy.

4.5.2. Vliv na rezonanční frekvenci při změně impedance sítě

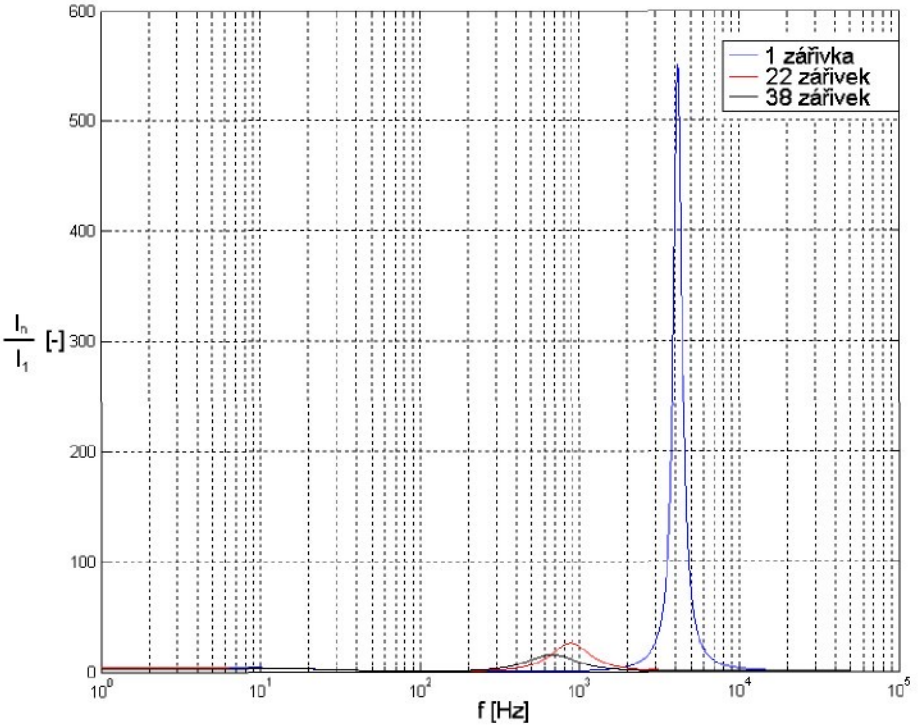
Délka přívodního vedení určuje indukčnost vedení a na ní je závislá rezonanční frekvence. Tato závislost je znázorněna v grafu 7. Strmost frekvenčních charakteristik by měla být podobná a amplituda by se měla snižovat. V grafu 7. tomu tak není z toho důvodu, že Microcap neumožňuje zároveň změnu dvou parametrů R_{n2} a L_{n2} reprezentující impedanci sítě, což ale nemá vliv na rezonanční frekvenci. Proto zůstává R_{n2} konstantní. Z frekvenčních charakteristik je patrné, že při zvyšující se délce vedení se rezonanční frekvence snižuje.



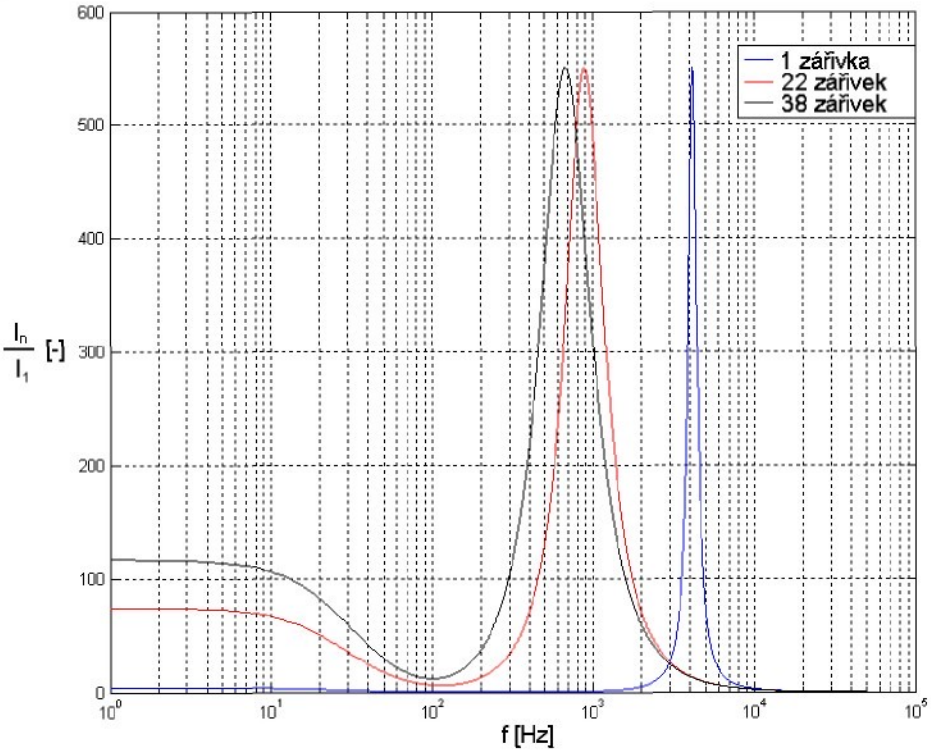
Graf. 7 Závislost rezonanční frekvence na změně indukčnosti sítě

4.5.3. Vliv na rezonanční frekvenci při zvyšování zářivkové zátěže

Počty zářivek byly zvoleny stejně jako při hledání parametrů osvětlovací sítě v kap. 4.4.4. V grafu 8 je na ose y vynesen poměr proudu dané harmonické ku proudu základní harmonické a vyplývá z něj, že při zvyšování počtu zářivek v napájecí síti dochází ke snižování rezonanční frekvence, ale zároveň útlumu oproti nižšímu počtu zářivek.



Graf. 8 Závislost rezonanční frekvence na počtu zářivek



Graf. 9 Závislost rezonanční frekvence na počtu zářivek - normovaná

Stejné charakteristiky jsou vyneseny v grafu 9 , ale navíc vynásobeny koeficienty, které je rovnají na stejnou úroveň, aby byla lépe vidět odlišná strmost frekvenční charakteristiky a rezonanční frekvence. Z grafu je patrné, že zvyšováním zářivkové zátěže se snižuje rezonanční frekvence, ale zároveň se snižuje činitel jakosti obvodu, což vede ke snižování amplitudy proudu při rezonanci a nezpůsobí to kmitočtové rozšíření rezonanční křivky. Z grafu 9 se může zdát opak, ale to je způsobeno znormováním na stejnou hodnotu rezonanční frekvence.

4.6. Možnosti vzniku a odstranění nestability v napájecí síti

K nestabilitě může dojít, když se v síti vyskytnou kmitočty blízké rezonanční frekvenci. Rezonanční obvod tvořený impedancí vedení a kompenzačními kapacitami zářivek pak tyto kmitočty může zesílit nad míru udávanou normami. Vznik těchto kmitočtů způsobují odběry nelineárních spotřebičů.

K zabránění vzniku nestabilit v napájecí síti je možné dvěma způsoby. Buď nepřipojovat potenciální zdroje rušení, nebo odstranit následky rušení.

Už při návrhu lze ze znalosti připojované zátěže a impedance sítě zjistit nebezpečné frekvence. Jelikož zářivkové osvětlení, ale i jiná rušivá zařízení většinou injektují do sítě nižší harmonické (do 20.harmonické), je vhodné posunout rezonanční frekvenci co nejvýše, samozřejmě s ohledem na konkrétní spektrum vyzařovaných kmitočtů. To lze zajistit snižováním indukčnosti sítě nebo kompenzační kapacity (viz. graf 6. a graf 7). Indukčnost sítě už obvykle snížit nelze, a proto je třeba se zaměřit na snižování kompenzační kapacity a odstranění kmitočtů blízkých rezonanční frekvenci.

V případě osvětlovacích sítí tvořených zářivkami s indukčním předřadníkem a kompenzačními kondenzátory se jejich kapacity sčítají, což snižuje rezonanční frekvenci (graf.6), proto by ve větších sítích, kde jsou problémy s harmonickým rušením, mohli být individuální kompenzace nahrazeny centrální kompenzací s filtry pro potřebné harmonické či pásmovým filtrem. Nevýhodou je, že jednotlivé odběry zářivek by byly nevykompenzovány i přesto, že úsek od rozvaděče k transformátoru bude odlehčen od jalového proudu.

Pro potlačení harmonických frekvencí vyzařovaných spotřebiči je možné použít kvalitnější zařízení, která bývají dražší nebo pasivní či aktivní filtry.

Pasivní filtry jsou tvořeny různým zapojením kapacit a indukčností. Jsou levné a jednoduché, jejich nevýhodou je, že obvykle nejsou přeladitelné.

Aktivní filtry mohou být paralelní, sériové či kombinované, podle požadavku na vyhlazení křivky proudu, napětí či obojího. Paralelní připojený aktivní filtr je tvořen generátorem harmonického proudu, tak že generuje harmonické složky odebíraného proudu, ale v opačné polaritě a injektuje je do sítě. Výsledný proud je pak zbaven zvolených harmonických, čímž se také snižují úbytky napětí na přívodním vedení. Zároveň je generováním jalové složky první harmonické možné provádět kompenzaci. U trojfázové soustavy je schopen upravovat nesymetrické zatížení.

4.7. Diskuze výsledků

V části, kde je srovnáván naměřený odběr zářivkového osvětlení v budově „F“ v Husově ulici s normami emisí harmonických proudů a kompatibilními úrovněmi harmonických napětí v síti nn, je vidět, že i když odebíraný proud obsahuje vyšší harmonické, nedochází k překročení kompatibilních úrovní. Je to způsobeno tím, že se tento zkreslený proud zářivkového osvětlení podílí na celkovém odběru jen malou měrou.

V identifikační části se výpočtem podařilo zjistit pouze parametry zářivky, na které lze změřit všechny elektrické veličiny. U měření osvětlovací sítě vyvstává problém se vzdáleností a tedy časovou synchronizací měření, proto pokud se podařily určité parametry odvodit, je to hlavně na základě normovaných hodnot. Dále je zde uveden i možný postup pro jejich nalezení, když by nebyla výše zmiňovaná komplikace se synchronizací. Proto jsou výsledné parametry sítě porovnány s reálným naměřeným odběrem, aby bylo zřejmé, na kolik jsou správné.

Poslední část je zaměřena na nalezení frekvenční charakteristiky modelu osvětlovací sítě a je zde ukázána její závislost na změny jeho parametrů. Zásadní výsledek je asi ten, že při zvyšování zářivkové zátěže dochází ke snížení rezonanční frekvence ale i ke snížení jakosti rezonančního obvodu, což má za následek snížení amplitudy rezonanční frekvence.

5. Závěr

Cílem diplomové práce bylo nalezení parametrů modelu osvětlovací sítě, tvořené nízkotlakými zářivkami s magnetickým předřadníkem a možnostmi vzniku nestability v napájecí síti. Parametry jsou zjištěny částečně výpočtem s použitím naměřených elektrických veličin a částečně simulací, ale i pro ně je uvedeno teoretické odvození.

Dále je zde provedeno srovnání dvou přístupů, jak lze osvětlovací síť namodelovat. Buď pomocí modelu vytvořeném v Matlabu odvozením z matematicko - fyzikální analýzy vysokotlakého výboje podobného nízkotlakému, nebo nahrazením nízkotlakého výboje zdroji harmonických napětí.

S využitím zjištěných parametrů byla vytvořena v programu Microcap frekvenční charakteristika osvětlovací sítě, která zde je uvedena včetně její závislosti na změny impedance vedení či počtu připojených zářivek.

Všemi těmito poznatky jsou položeny základy k praktickému řešení problematiky odstranění nestability v napájecí síti. Velmi důležité je, že se podařilo vytvořit simulační model osvětlovací sítě s nízkotlakými zářivkami, který odpovídá reálným skutečně naměřeným výsledkům.

6. Použitá literatura

[1] Novák M., Václavík J.: Current oscilations in lighting systems with discharge lamps. Institute of Physics, Conference Series Number 182, Light Sources 2004, Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources, Toulouse, 2004, pp. 623-624, ISBN 0-7503-1007-3

[2] Korenc V. - Holoubek J.: Kompenzace jalového výkonu v praxi, Knižnice ELEKTRO svazek 39 1999

[3] Černá P.: Energetická síť a nelineární spotřebiče, diplomová práce, TU Liberec 2003

[4] Zissis G., Aubes M., Sewraj N., Stambouli M., Elleuch N., Annabi M.: Simulation d´une installation d´éclairage utilisant des lampes á décharge dans la vapeur de mercure HP, alimentée par un transformateur triphase, Extraits de la Revue générale de l´Eletricité, Janvier 1992, n1, R.G.E., rue de la Procession – Paris

[5] Kobrle A. : Modelování světelných výbojů, diplomová práce, TU Liberec 2002

[6] ČSN IEC 1000 - 2 - 1: Elektromagnetická kompatibilita, část 2: Prostředí, díl 1: Popis prostředí ve veřejných rozvodných sítích

[7] PNE 33 3430 – 0: Výpočetní hodnocení zpětných vlivů odběratelů distribučních soustav

[8] PNE 33 3430 - 1: Parametry kvality elektrické energie, část 1: Harmonické

[9] ČSN EN 61000 - 3 - 2: Elektromagnetická kompatibilita, část 3: Meze, díl 2: Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)

[10] ČSN IEC 61000 - 2 - 2: Elektromagnetická kompatibilita, část 2: Prostředí, díl 2: Kompatibilní úrovně pro nf rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítí nízkého napětí

[11] ČSN EN 61000 - 3 - 12: Elektromagnetická kompatibilita, část 3: Meze, díl 12: Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem od 16 A do 75 A včetně)

[12] ČSN 35 1122 - 3: Trojfázové olejové distribuční transformátory 50 Hz, od 50 kVA do 2 500 kVA s nejvyšším napětím pro zařízení nepřevyšujícím 36 kV, část 3: Doplňující požadavky pro transformátory s nejvyšším napětím pro zařízení rovným 36 kV

[13] ČSN 34 7201: Jádra kabelů - Pokyn pro mezní rozměry jader kruhového průřezu

[14] Kůs V.: Nízkofrekvenční rušení, Západočeská univerzita v Plzni,2003

7. Použitý software

Matlab version 6.5 release 13 , 1984 - 2002 The Mathworks

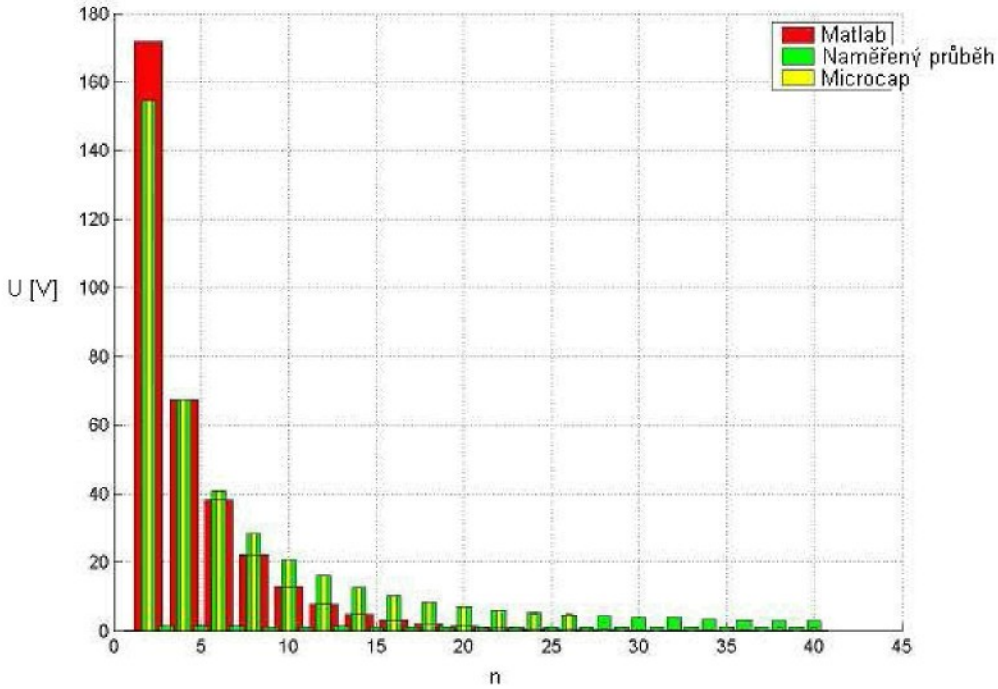
- www.mathworks.com
- www.humusoft.cz

Micro - Cap 8.0.7.0 evaluation version , 1982 - 2004 Spectrum software

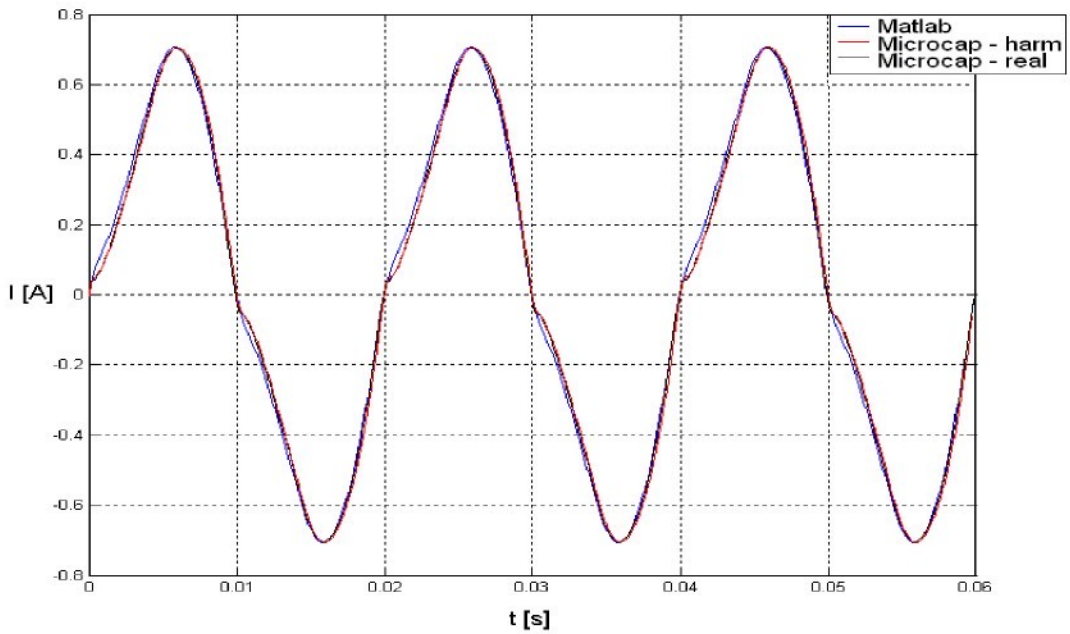
- www.spectrum-soft.com

8. Přílohy

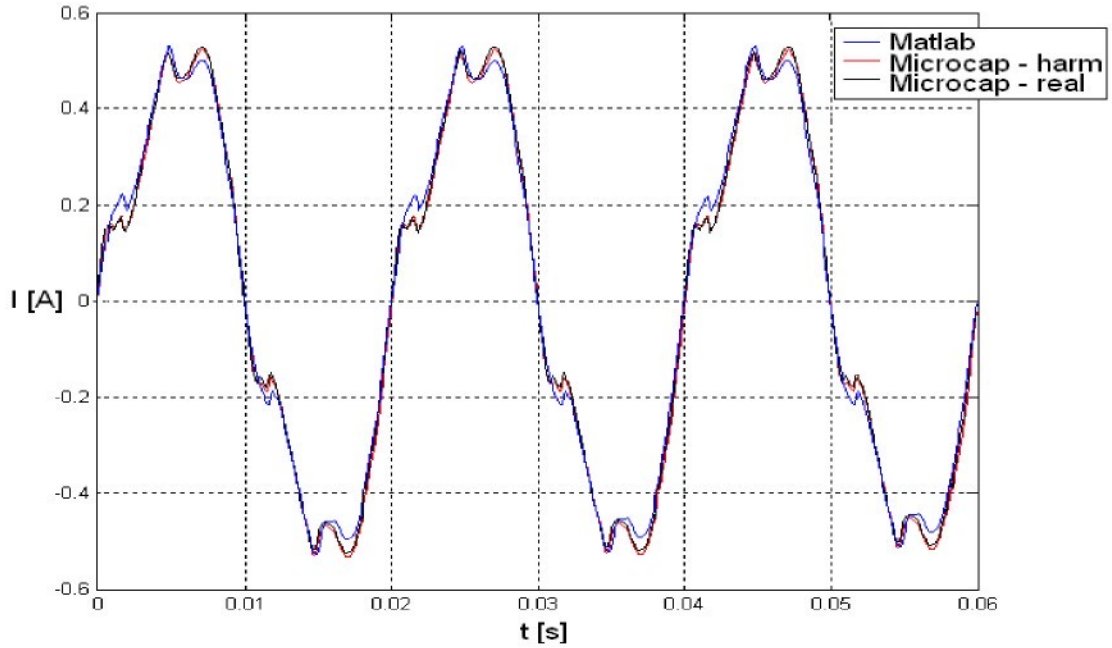
8.1. Příloha 1



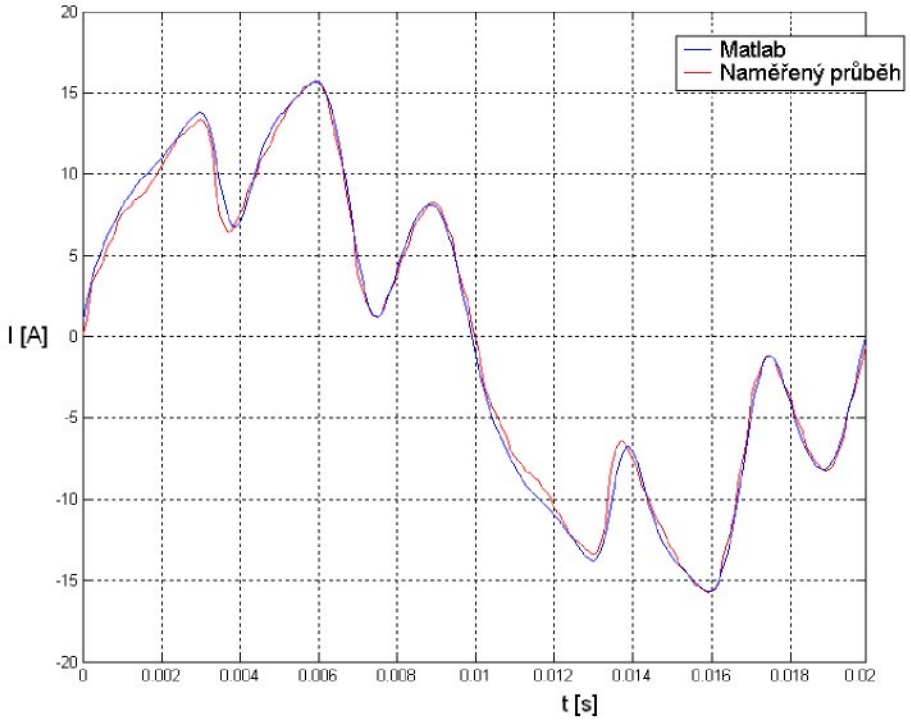
Obr. P1.1 Harmonické složky napětí na výboji



Graf. P1.1 Porovnání nasimulovaných odběrů proudů pro zářivku bez kompenzace



Graf. P1.2 Porovnání nasimulovaných odběrů proudů pro zářivku s paralelním kompenzačním kondezátorem 2 μF



Graf. P1.3 Porovnání nasimulovaného a reálného odběru proudu pro 38 zářivek s paralelním kompenzačním kondezátorem 5 μF

8.2. Příloha 2

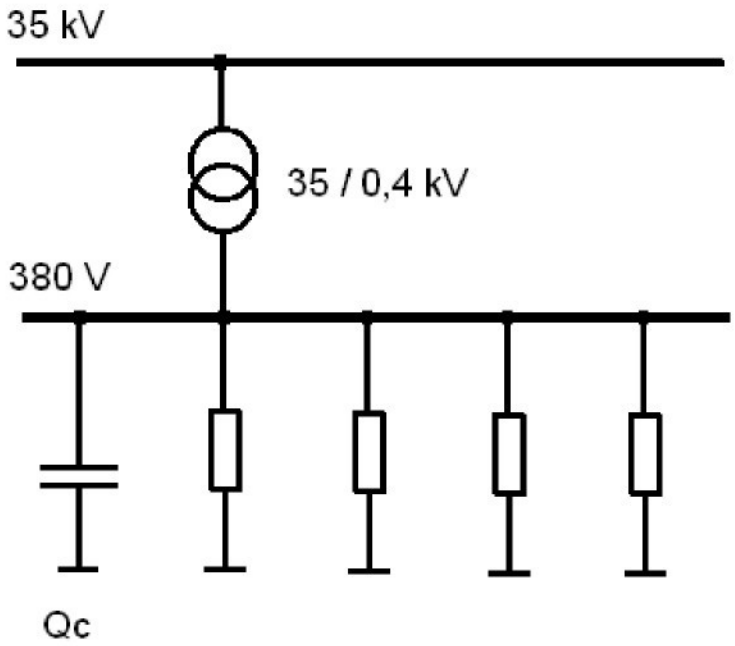
Výpis části datového souboru programu Microcap, uložená data začínají až za řádkem *Data point count*, který udává počet naměřených hodnot.

```
[Main]
FileType=USR
Version=2.00
Program=Micro-Cap

[Menu]
;Simple    = T,X,Y
;SimpleNoX = T,Y
;Complex   = F,Xr,Xi,Yr,Yi
;ComplexNoX= F,Yr,Yi
;FormatType = Simple | Complex | SimpleNoX | ComplexNoX
;Format=FormatType
WaveformMenu=v(5) vs T

[Waveform]
Label=v(5) vs T
MainX=T
LabelX=T
LabelY=v(5)
Format=Simple
Data Point Count=7407
0,0,48.15507713
8E-007,8E-007,48.58497841
1.6E-006,1.6E-006,49.01507651
3.2E-006,3.2E-006,49.87584206
6.4E-006,6.4E-006,51.59950244
1.28E-005,1.28E-005,55.05414859
                .
                .
                .
```

8.3. Příloha 3



Obr. P3.1 Základní schéma představující elektrický rozvod v budově „F“

Anotace:

Cílem diplomové práce je zjištění možností vzniku nestability v energetické síti a seznámení se s působením nelineárních spotřebičů na napájecí síť.
Teoretická část nejprve seznamuje s normami pro požadavky na elektrická zařízení z hlediska vlivu na elektrizační soustavu. V praktické části je provedena identifikace parametrů napájecí sítě a rozbor změřeného reálného odběru ve formě osvětlovací sítě. Těchto poznatků se využívá pro simulaci v programech Matlab a Microcap a porovnána s reálným odběrem. Nakonec je zde ukázáno, kdy může dojít k rezonancím mezi spotřebiči a napájecí sítí.

Annotation:

Purpose this diploma work is finding possibility of rise resonance and discover influence of nonlinear aplliances on in suply system .
Teoretical part of diploma work give information about norms, which include requirements for electric appliances attached to suply system. Practical part of diploma work contains identification of parameters of suply system and lightning system. These piece of knowledge are used for simulation in program Matlab and Microcap. Simulated results are compared with measured results. In the end is shown possibility of rise current oscillations between nonlinear aplliances and suply system.

The diploma work is separated on three parts . First is necessary analyze electrical appliance (Compact Fluorescent lamp) and perform harmonic analysis.Second is used same procedure for harmonic analyze of interaction electrical appliance and distribution systém . Third these piece of knowledge are used for simulation in program MicroCap . There is shown influence of disturbance on distribution systém .

Simulated results are compared with measured results . Next is simulated influence several electrical appliances together on distribution system and it can cause rise unstability .