

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Současná činnost měničů v napájecí soustavě

**Vedoucí práce: Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
Autor: Vítězslav Dyk**

2013

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na řešení současného vlivu činnosti měničů v napájecí soustavě. Ve svém úvodu se práce věnuje teoretickému rozboru dané problematiky. Dále se práce zaměřuje pouze na světelná zařízení, kde hodnotí současné trendy v napájecí soustavě, hodnotí daná zařízení a přináší jejich srovnání s normami. V závěru práce obsahuje modelový příklad, který slouží k představě dopadu nynějších i budoucích poměrů ve spotřebitelské síti.

Klíčová slova

Harmonický proud, harmonické napětí, úsporné svítidlo, klasická žárovka, kompaktní zářivka, LED dioda, zkruslení proudu, zkruslení napětí, úspora elektrické energie, norma, vliv zkruslení,

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on addressing the current performance of the inverters in the power system. In its introduction, the work deals with the theoretical analysis of the issue. After that is work focused only on the lights, where it judges current trends in power system, evaluates the facilities and provides a comparison with a norms. The conclusion contains a model example that is used to imagine the impact of current and future conditions in the electric network.

Key words

Harmonic current, harmonic voltage, economical lamp, classic bulb, compact lamp, LED diode, current distortion, voltage distortion, saving of electric energy, norm, influence of distortion,

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6.6.2013

Vítězslav Dyk

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Václavu Kůsovi, CSc. za důležité informace k dané problematice, rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkovi firmy ČEZ s.r.o., panu Ing. Jiřímí Dlabáčkovi, za poskytnutí informací k dané problematice a reálných hodnot pro výpočty sítí.

Obsah

ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 TEORIE HARMONICKÝCH PROUDŮ	10
1.1 HARMONICKÉ PROUDY – VZNIK	10
1.2 VLIV HARMONICKÝCH PROUDŮ NA SÍŤ	10
1.3 HARMONICKÁ ANALÝZA	11
2 ZAMĚŘENÍ PRÁCE – NORMY, TŘÍDY	13
2.1 ÚVOD DO PROBLÉMŮ, VÝTAH Z NOREM ČSN EN 61000	13
2.1.1 Výťah z normy ČSN EN 61000 – 3 – 2	13
2.1.2 Výťah z normy ČSN EN 61000 – 2 – 2	16
2.2 OBLAST ZAMĚŘENÍ PRÁCE	16
3 TŘÍDA C, SVĚTELNÁ ZAŘÍZENÍ	16
3.1 NAHRAZOVÁNÍ KLASICKÝCH ŽÁROVEK	16
3.1.1 Důvody nahrazování klasických žárovek	17
3.1.2 Druhy nahrazovaných svítidel	19
3.2 VLASTNOSTI ÚSPORNÝCH ŽÁROVEK	22
3.2.1 Principi přeměny světla	22
3.2.2 Elektronická konstrukce	23
3.2.3 Rozběh zářivky	23
3.2.4 Chod zářivky	24
3.2.5 Konstrukce	24
3.2.6 Nejčastější závady	24
3.3 SROVNÁNÍ ÚSPORNÝCH SVÍTIDEL S NORMOU	25
4 MODELOVÝ PŘÍKLAD ZATÍŽENÍ SÍŤE	31
4.1 ZADÁNÍ PŘÍKLADU	31
4.2 ZADÁNÍ A VÝPOČTY HARMONICKÝCH PROUDŮ	33
4.3 VÝPOČTY PRVKŮ	34
4.4 SIMULACE	35
4.5 VÝSLEDNÉ HODNOTY SIMULACE	39
4.6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S NORMOU	39
4.7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ:	44

Úvod

Dnešní doba je charakteristická závislostí člověka na elektrické energii. Díky elektrické energii můžeme sledovat televizi, vařit si kávu, poslouchat hudbu nebo obsluhovat svůj počítač. S těmito elektronickými návyky a potřebami ovšem přichází i určité potíže a následky. Každým rokem narůstá počet spotřebičů připojených do sítě, které jsou charakteristické neharmonickým odběrem proudu. Ačkoliv to obyčejnému spotřebiteli může přijít nedůležité, pro některé techniky se tento trend může stát celkem závažným problémem.

V některých zemích EU v posledních letech stoupá úspora elektrické energie. Např. v Německu (rok 2008) je potenciální úspora elektrické energie podle některých zdrojů u elektrických pohonů zhruba 27 mld. kWh. Takovéto zvyšování hospodárnosti se např. při využívání energie regulovaných pohonů stále zlepšuje. Přece však existuje jeden nedostatek. Napájecí síť zatěžují nelineární spotřebiče, ke kterým patří vedle měničů frekvence nebo spínaných zdrojů i energeticky úsporné žárovky. [3]

Seznam symbolů a zkratek

LED.....	Light-emitting diode – Dioda emitující světlo
CFL	Compact fluorescent lamp – Kompaktní fluorescenční zářivka
EU	Evropská unie
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
ČSN.....	České státní normy
UV.....	Ultraviolet - Ultrafialové
Diak.....	Diode for alternating current (DIAC) = Dioda pro střídavý proud (obousměrná dioda)
THD	Total harmonic distortion – Celkové harmonické zkreslení
Tina	Simulační program pro elektrické obvody
EN	Evropské normy

1 Teorie harmonických proudů

V následující části práce je vysvětlen vznik harmonických proudů, jejich působení na síť a jejich teoretické řešení.

1.1 Harmonické proudy – vznik

V ideálním případě by mělo mít síťové napětí, které distribuují dodavatelé elektrické energie pro domácnosti, podniky a průmysl, rovnoměrné sinusové napětí s konstantní amplitudou a frekvencí. Nelineární spotřebiče však odebírají ze sítě nesinusový (neharmonický) zátěžový proud. Takovéto typické zatížení sítě vytvoří nejčastěji používaný 6pulsní vstupní usměrňovač. Z toho vyplývají odchylky od ideální sinusové formy, čemuž se dnes v napájecí síti nedá vyhnout. V určitých hranicích je odchylka i přípustná. [3]

Tyto deformace sinusové formy jako následek nelineárního odběru proudu se nazývají zpětné působení na síť nebo také vyšší harmonické. Při posouzení kvality sítě se v současnosti bere v úvahu rozsah do 2,5 kHz odpovídající 50. harmonické. Vyšší harmonické s nejsilnějšími účinky jsou 5. a 7., tedy frekvence od 250 a 350 Hz. Příliš velká deformace, popř. příliš velký obsah vyšších harmonických vede k tomu, že např. citlivé elektronické stanice – zařízení, jako jsou počítače, senzory či regulátory – nebudou fungovat bezchybně. Dokonce mohou být poškozené i nechráněné kompenzační stanice jalového proudu. [3]

1.2 Vliv harmonických proudů na síť

Přenosová síť, do ní připojené transformátory nebo kompenzační zařízení v průmyslových odvětvích jsou přepočítány a dimenzovány na jmenovitou frekvenci sítě, tj. např. 50 Hz. Vysokofrekvenční podíly, které představují vyšší harmonické, v provozech výrazně zvyšují náklady. Zvýšené pořizovací náklady na elektrickou energii, větší ztráty v přenosových cestách, zvýšené náklady kvůli většímu zatížení jalovým výkonem a nutnost předdimenzování komponent a částí zařízení jsou jen některé z nich. Kvůli těmto dodatečným zatížením se mohou přístroje přehřát nebo dokonce vypadnout.[3]

Z důvodu frekvenční závislosti impedance kondenzátorů a cívek v kompenzačních zařízeních stoupají ztráty v těchto zařízeních. Přitom mohou cívky a kondenzátory tvořit oscilační obvody s rezonančními frekvencemi v rozsahu vyšších harmonických, což může mít za následek destruktci kompenzačního zařízení.[3]

Dalším aspektem je větší tepelné zatížení používaných kabelů a transformátorů. Aby nedošlo k jejich přetížení, musí se oba tyto komponenty předdimenzovat. Pokud tento krok

není možné provést, např. v již existujícím a fungujícím zařízení, zredukuje se maximální zatížení podle dříve vypočítaného konstrukčního bodu.[3]

Díky deformovanému napájecímu napětí může dojít k omezení funkcí některých citlivých spotřebičů, nebo dokonce k jejich úplnému vyřazení z provozu. Mezi tyto spotřebiče patří např. systémy řízení procesu, řídicí komponenty, anebo měřicí zařízení, která pro požadovaný způsob činnosti potřebují správnou úroveň napětí.[3]

Aby se uživatelé chránili před zmíněnými účinky, jsou nuceni přistoupit k různým opatřením ohledně omezení zpětného působení elektronických regulací výkonu do sítě. Některé firmy v současné době nabízejí, např. u frekvenčních měničů, už sériově zabudované dodatečné filtrační prvky, které slouží k omezení zatížení vyššími harmonickými. Navzdory tomu však součet všech nelineárních spotřebičů ve vzrůstající míře vyžaduje řešení, které dále značně zredukuje tyto negativní účinky na kvalitu sítě.[3]

1.3 Harmonická analýza

V teorii i v praxi se často můžeme setkat s takovými průběhy elektrických veličin, které jsou sice periodické (alespoň v určitém časovém intervalu), ale jejich průběh je neharmonický. Ale protože se s harmonickými průběhy velmi dobře a výhodně pracuje, je často požadováno vyjádřit periodickou veličinu jako nekonečnou řadu složenou z konstanty a harmonických veličin o kmitočtech rovných přirozeným násobkům základního kmitočtu. Tento rozklad se nazývá *harmonická analýza* a vzniklá řada se nazývá *Fourierova řada*. [1]

Něco málo z teorie:

Periodickou funkci $f(t)$ s periodou T , která je po částech spojitá na intervalu a která má v tomto daném intervalu po částech spojitou derivaci lze vyjádřit pomocí trigonometrické Fourierovy řady:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)]$$

$$\text{kde: } a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{a} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

jsou tzv. Fourierovy koeficienty. Často je používán také spektrální tvar Fourierovy řady:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

$$\text{kde: } D_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{a} \quad \varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

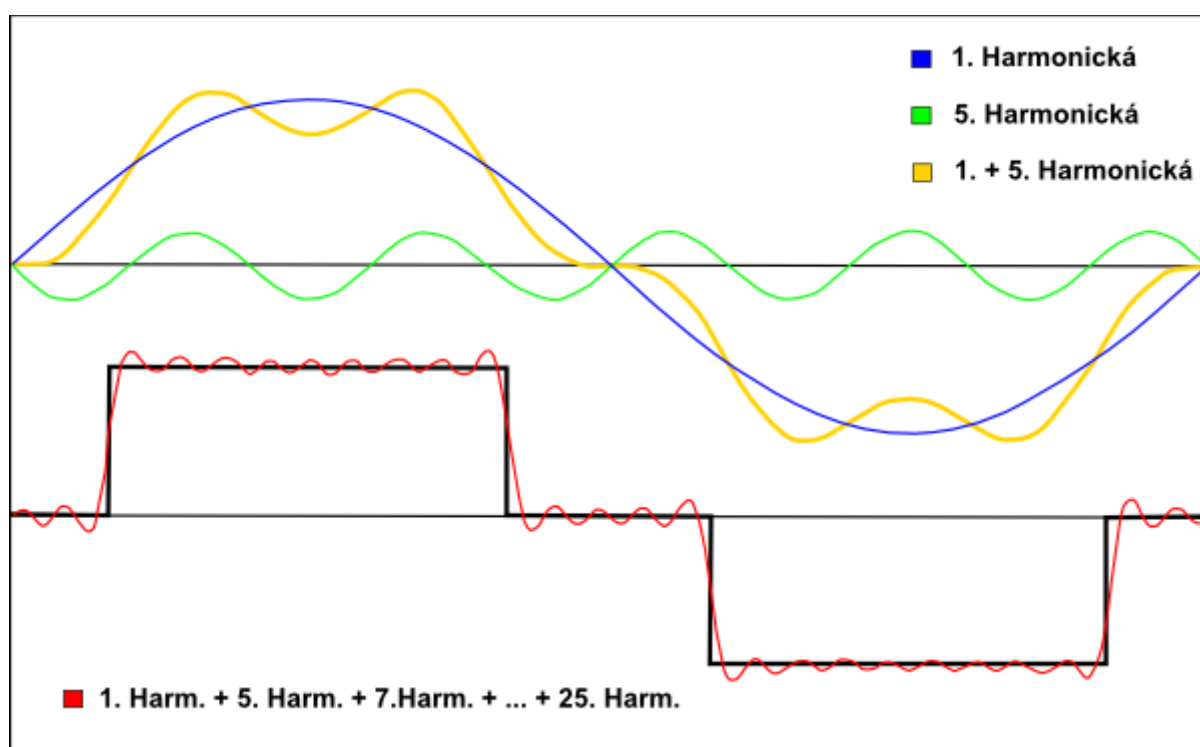
V praxi splňují mnohé funkce další vlastnosti a platí:

a) Pro sudou funkci platí: $f(t) = f(-t)$. Graf je souměrný podle osy y, Fourierova řada obsahuje pouze členy s funkcí *cosinus*.

b) Pro lichou funkci platí: $f(t) = -f(-t)$. Graf je středově souměrný vzhledem k počátku. Fourierova řada obsahuje pouze členy s funkcí *sinus*.

c) Pro funkci, jejíž graf se skládá z částí téhož tvaru, které však zaujímají různou polohu vzhledem k ose t, tj.: $f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$, platí to, že Fourierova řada této funkce obsahuje jen takové členy s funkcemi sinus a cosinus, jejichž koeficienty a_k , b_k mají liché indexy.

V teorii polovodičových měničů často nastávají případy **a** i **c**, takže výsledkem je Fourierova řada obsahující pouze liché členy s funkcí sinus. Frekvenční spektrum časového (zejména neperiodického) průběhu získáme tzv. spektrální analýzou. Základem tohoto rozkladu je *Fourierova transformace*. Ve většině prakticky se vyskytujících případů (zejména u naměřených signálů) je třeba vypočítat Fourierovy koeficienty numericky. Pak jsou obvykle známy pouze některé hodnoty $f(t_i)$ v okamžicích t_i a není známé matematické vyjádření. Pro výpočet vzorkovaného signálu používáme *diskrétní Fourierovu transformaci DFT*. [2]



(Obr. 1 – Příklad sčítání výsledných signálů harmonické analýzy, [1])

2 Zaměření práce – normy, třídy

2.1 Úvod do problémů, Výtah z norem ČSN EN 61000

Tato práce je zaměřena na velmi malou oblast elektrotechniky. Nemůže poskytnout komplexní řešení všech výše uvedených problémů. Jedná se o spotřebiče malého charakteru, které jsou rozděleny do čtyř tříd. Pro objasnění (viz 2.1.1) předkládám výtah z normy ČSN EN 61000 –3– 2.

2.1.1 Výtah z normy ČSN EN 61000 – 3 – 2

Tato norma se zabývá omezením proudů harmonických injektovaných do veřejné rozvodné sítě. Norma se týká elektrických a elektronických zařízení se vstupním fázovým proudem až do 16 A včetně, u nichž se předpokládá připojení do veřejných distribučních sítí nízkého napětí.[9]

Pro účely omezení proudu harmonické jsou spotřebiče tříděny následovně:

- Třída A:
- symetrická trojfázová zařízení;
 - domácí spotřebiče kromě zařízení identifikovaného jako zařízení třídy D;
 - nářadí kromě přenosných nářadí;
 - regulace světla pro žárovky;
 - zvuková zařízení.

Zařízení nspecifikované v jedné ze tří dalších tříd se musí považovat za zařízení třídy A.

- Třída B:
- přenosná nářadí;
 - oblouková svářečka, která není profesionálním zařízením.

- Třída C:
- světelná zařízení.

- Třída D:
- osobní počítače a monitory osobních počítačů, televizní přijímače s příkonem do 600 W.[9]

Meze pro zařízení třídy A

Zařízení třídy A nesmí překročit hodnoty harmonické vstupního proudu uvedené v tabulce 1.

Spotřebiče třídy A		Spotřebiče třídy A	
liché harmonické		sudé harmonické	
Řád harm.	Max. proud [A]	Řád harm.	Max. proud [A]
3	2.30	2	1.8
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8.40	0.23·8/h
11	0.33		
13	0.21		
15-39	0.15·15/h		

(Tab. 1, Meze harmonických proudů třídy A dle ČSN EN 61000-3-2[9])

Meze pro zařízení třídy B

U zařízení třídy B nesmí vstupní proud harmonické překročit hodnoty uvedené v tabulce 2 násobené činitelem 1,5.[9]

Spotřebiče třídy B		Spotřebiče třídy B	
liché harmonické		sudé harmonické	
Řád harm.	Max. proud [A]	Řád harm.	Max. proud [A]
3	3.45	2	1.1
5	1.71	4	0.645
7	1.155	6	0.45
9	0.60	8.40	0.345·8/h
11	0.495		
13	0.315		
15-39	0.225·15/h		

(Tab. 2, Meze harmonických proudů třídy B dle ČSN EN 61000-3-2[9])

Meze pro zařízení třídy C

Zahrnuje světelná zařízení, jejichž prvotní funkcí je generování nebo rozvod optického záření pomocí žárovek, výbojek a LED. Patří sem především světelné zdroje a svítidla, světelná část zařízení s prvotní osvětlovací funkcí, nezávislé předřadníky pro výbojky, nezávislé transformátory a snižovací elektronické převodníky pro halogenové světelné zdroje, ultrafialové a infračervené zdroje záření, osvětlené reklamní vývěsní štíty, stmívače pro jiné

než žárovkové světelné zdroje. Meze efektivní hodnoty jednotlivých harmonických proudů I_h jsou dány podle činného příkonu.[9]

a) zařízení třídy C s příkonem > 25 W má meze v % základní složky uvedené v tabulce 3.

b) zařízení třídy C s příkonem ≤ 25 W musí splňovat jeden z následujících souborů požadavků:

- harmonické proudy nesmí překročit meze vztažené na činný příkon podle tabulky 4, nebo

- proud třetí harmonické nesmí překročit 86 % a proud páté harmonické nesmí překročit 61 % základní složky proudu; přitom tvar proudu musí být takový, aby začínal před nebo v 60° (vztaženo k počátku kladné půl periody napětí), měl vrchol před nebo v 65° a končil po nebo v 90° . [3]

Spotřebiče třídy C	
pouze liché harmonické	
Řád harm.	Max. % proud [A]
2	2
3	30λ
5	10
7	7
9	5
15-39	3

(Tab. 3, Meze harmonických proudů třídy C dle ČSN EN 61000-3-2[9])

Meze pro zařízení třídy D

Náleží sem zařízení s činným příkonem ≤ 600 W těchto typů: osobní počítače, monitory osobních počítačů a televizní přijímače. Meze efektivních hodnot jednotlivých harmonických proudů I_h vztažené na jednotkový činný příkon zařízení P jsou uvedeny v tabulce 4.[9]

Spotřebiče třídy D	
pouze liché harmonické	
Řád harm.	Max. poměr mA/W
3	3.4
5	1.9
7	1.0
9	0.5
11	0.35
13	0.29
15-39	3.85/h

(Tab. 4, Meze harmonických proudů třídy D dle ČSN EN 61000-3-2[9])

2.1.2 Výťah z normy ČSN EN 61000 – 2 – 2

Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí.[10]

Norma se týká rušení šířených vedením v kmitočtovém rozsahu od 0 kHz do 9 kHz s rozšířením až do 148,5 kHz specificky pro systémy signálů ve veřejných rozvodných sítích. Tato norma uvádí kompatibilní úrovně pro veřejné střídavé distribuční sítě nízkého napětí, které mají jmenovité fázové napětí až do 420 V nebo sdružené napětí 690 V a jmenovitý kmitočet 50 Hz nebo 60 Hz. Kompatibilní úrovně specifikované v této normě platí ve společném napájecím bodu PCC – viz tabulka 5.[10]

Liché, mimo násobky 3		Liché, násobky 3		Sudé	
Řád harm.	[%] U_N	Řád harm.	[%] U_N	Řád harm.	[%] U_N
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,4	3	0,5
12	3	21	0,3	8	0,5
$17 \leq h \leq 49$	$2,27 \times (17/h) - 0,27$	$21 \leq h \leq 45$	0,2	$10 \leq h \leq 50$	$0,25 \times (10/h) + 0,25$

(Tab. 5, Kompatibilní úrovně pro jednotlivá harmonická napětí v sítích nízkého napětí[10])

2.2 Oblast zaměření práce

Na základě konzultací se práce bude nadále soustřeďovat pouze na třídu C výše uvedené normy. Důvodem je to, že třídy A, B jsou sice rozšířené, ale výkonová struktura a souběh (počet vypnutí/zapnutí) není tak vysoký jako u tříd C, D. Tříde D (osobní počítače a monitory) byla v posledních 10 letech věnována velká pozornost, ať už v normách či různých publikacích, že by zabývání se touto třídou nebylo nijak zajímavé. Navíc díky této pozornosti se v této třídě dospělo k celkem uspokojivým řešením.

3 Třída C, světelná zařízení

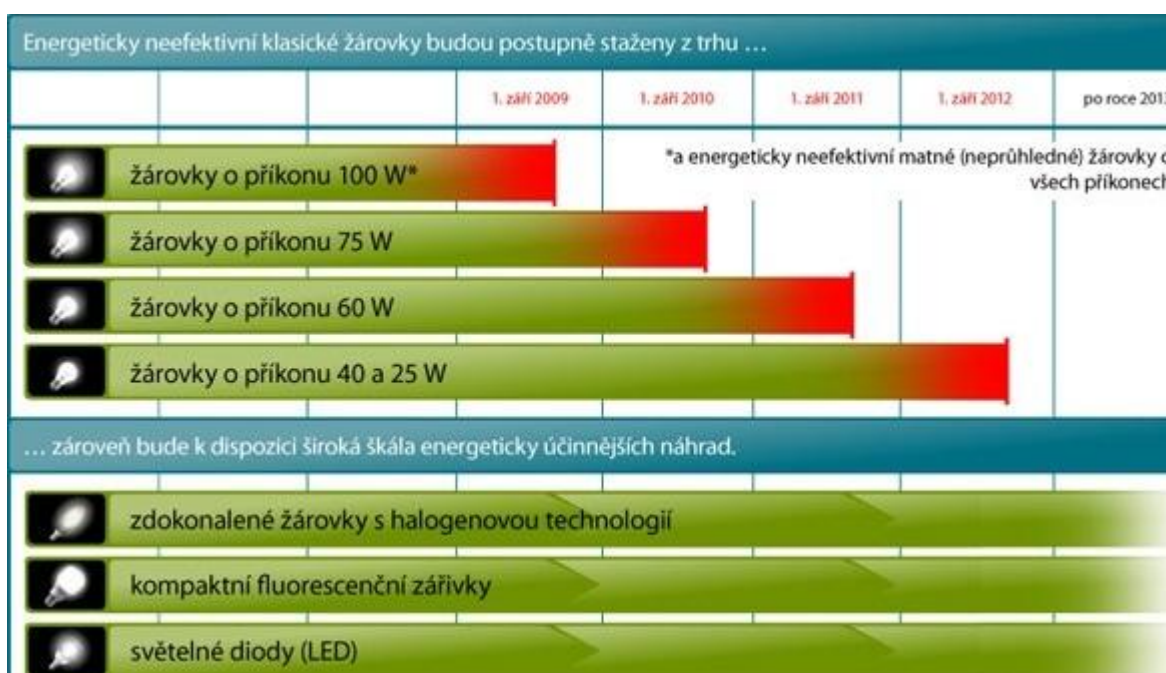
3.1 Nahrazování klasických žárovek

Zabývání se touto třídou je zajímavé hlavně kvůli událostem posledních let, kdy na příkaz EU docházelo k rušení prodeje a následnému nahrazování klasických žárovek s kovovým vláknem za úsporná svítidla.

3.1.1 Důvody nahrazování klasických žárovek

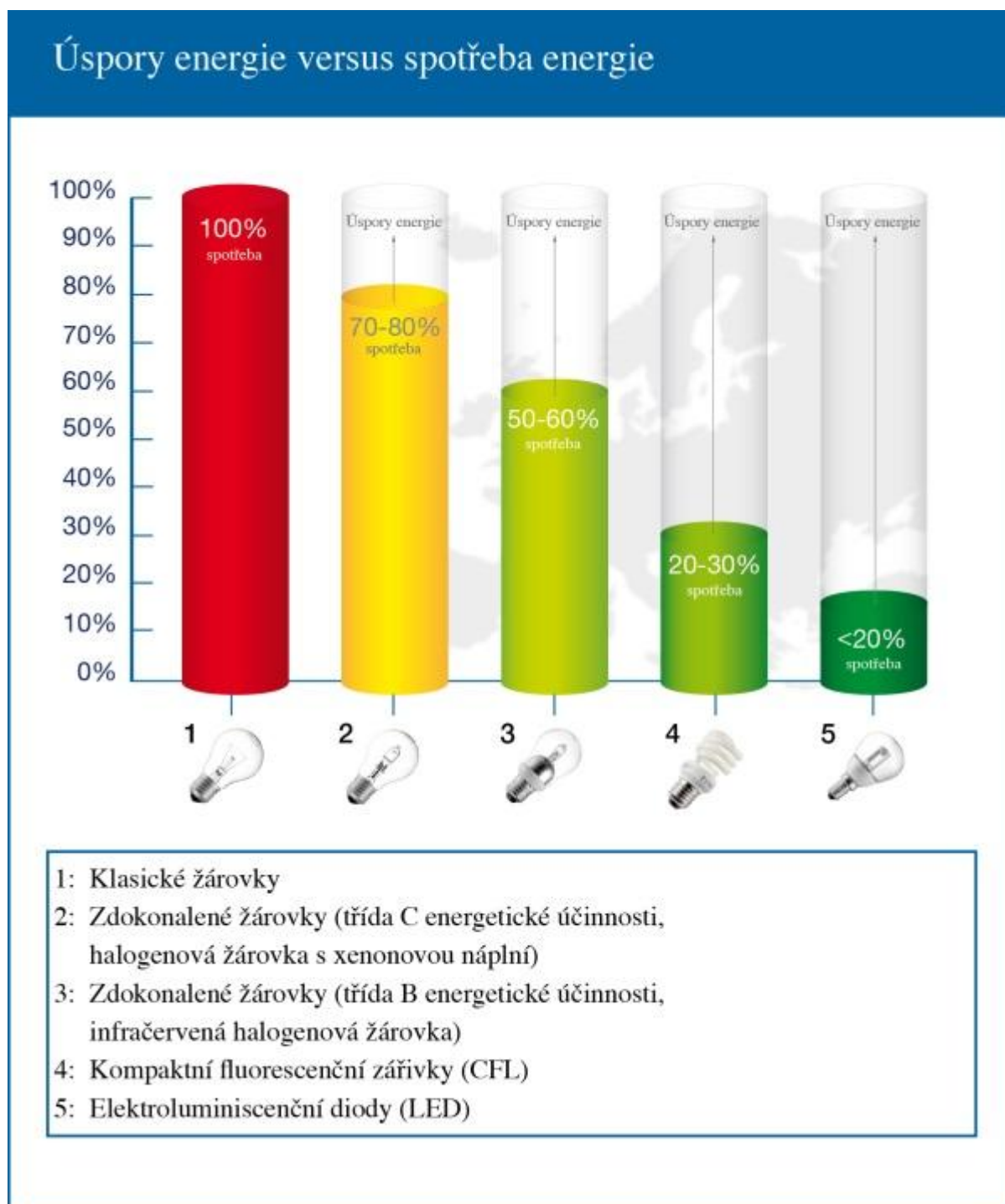
Evropská unie v minulých letech vydala několik prohlášení, ve kterých se rozhodla pro nahrazování klasických žárovek s kovovými vlákny za moderní energeticky výhodnější a úsporné zdroje světla. První omezení klasických žárovek přišlo v roce 2009, kdy byl ukončen prodej 100W klasických žárovek. V následujících letech tento trend dále pokračoval (viz Obr. 2). K těmto krokům vedlo zákonodárce několik důvodů, a ty jsou:

1. Vyřazením se **sníží emise CO₂** (o cca 15 milionů tun ročně).
2. Energeticky nejúčinnější technologie osvětlení **mají až pětkrát nižší spotřebu elektřiny než ty nejméně energeticky účinné.**
3. Osvětlení může představovat až jednu pětinu spotřeby elektrické energie domácnosti a energeticky úsporné žárovky mohou **snížit celkovou spotřebu elektřiny domácnosti o 10–15 %**, což v EU ušetří okolo 40 miliard kilowatt hodin ročně (což přibližně odpovídá roční spotřebě Rumunska).[4]



(Obr. 2, Časový diagram nahrazování klasických žárovek úspornými svítidly[4])

Hlavním důvodem je tedy energetická bilance klasické žárovky. Na obrázku 3 vidíme energetické srovnání klasické žárovky a úsporných svítidel, kterými je nahrazována v dnešní době. Z obrázku vyplývá, že moderní zdroje světla mohou dosáhnout několikanásobně nižší spotřeby energie než zmiňovaná klasická žárovka.



(Obr. 3, Srovnání svítidel [8])

3.1.2 Druhy nahrazovaných svítidel

V této části předkládám čtyři nejčastější druhy svítidel, kterými jsou v dnešní době žárovky nahrazovány.

- a) Zdokonalené žárovky s kovovým vláknem, třída C
- b) Zdokonalené žárovky s kovovým vláknem, třída B
- c) Kompaktní fluorescenční žárovky (Úsporné zářivky)
- d) Elektroluminiscenční diody (LED)

a)



(Obr. 4, Zdokonalená žárovka s kovovým vláknem, třída C[5])

Jedná se o halogenové žárovky naplněné xenonovým plynem, které spotřebují přibližně o 20-25 % méně energie při stejném světelném výkonu ve srovnání s nejlepšími klasickými žárovkami s kovovým vláknem. Na trhu existují dva druhy těchto žárovek:[5]

1) U *halogenových žárovek nové generace* jsou kromě xenonové náplně ostatní charakteristiky jako objímka a rozměry stejné jako u klasických halogenových žárovek, a proto je lze používat pouze ve svítidlech pro halogenové žárovky určených – tj. ve svítidlech se speciální halogenovou objímkou. Tyto halogenové žárovky zůstanou na trhu i po roce 2016, aby bylo možno svítidla s halogenovou objímkou používat.[5]

2) U *zdokonalených halogenových žárovek* je vylepšená halogenová kapsle umístěna ve skleněné baňce, která má tvar klasické žárovky s kovovým vláknem a s klasickou objímkou. Představují tudíž přímou náhradu klasických žárovek s kovovým vláknem. Zdokonalené žárovky s kovovým vláknem třídy C budou od roku 2016 dále zdokonalovány na třídu B nebo A.[5]

Oba typy poskytují světlo též kvality jako klasické žárovky s kovovým vláknem, ale při běžném používání vydrží dvakrát déle (cca. 2 roky). Tyto žárovky jsou velikostí plně kompatibilní se stávajícími svítidly a jsou vybaveny možností regulace jasu.[5]

b)



(Obr. 5, Zdokonalená žárovka s kovovým vláknem, třída B[5])

Žárovka na sobě má infračervený povlak, což zvyšuje její energetickou účinnost o více než 45% ve srovnání s nejlepšími klasickými žárovkami s kovovým vláknem. Takové zdokonalení můžeme ale použít pouze u nízkonapěťových žárovek. K tomu, abychom technologii mohli použít i u žárovek síťového napětí, je nutný transformátor.[5]

Transformátor může být použit před svítidlem, jako samostatná jednotka nebo může být součástí integrovanou ve svítidle. Může být zabudován i v samotné žárovce, která se poté může použít rovnou namísto klasické žárovky s kovovým vláknem v témže svítidle. Podobně jako u žárovek třídy C energetické účinnosti existují kapsle se speciální objímkou a zdokonalené žárovky s kovovým vláknem i ve třídě B energetické účinnosti.[5]

Zdokonalené žárovky s kovovým vláknem třídy B můžeme zatím najít na trhu pouze s výkonem rovnocenným výkonu 60W klasické žárovky s kovovým vláknem.

Tento typ žárovky disponuje životností až 3000 hodin, což je třikrát déle než klasické žárovky s kovovým vláknem, a také nabízí možnost regulace jasu.[5]

c)



(Obr. 6, Kompaktní fluorescenční žárovka[5])

Kompaktní fluorescenční žárovky se poprvé objevily na trhu zhruba v 80. letech 20. století a jejich předností je dlouhá životnost a vysoká energetická účinnost. Kompaktní fluorescenční žárovka má při stejném světelném výkonu o 65–80 % nižší spotřebu energie než klasické žárovky s kovovým vláknem.[5]

Kompaktní fluorescenční žárovky se někdy vyrábějí s vnějším pouzdrem, skrývajícím plynem naplněné trubice, jež jim dodává téměř stejný vzhled, jaký mají klasické žárovky s kovovým vláknem. CFL mají životnost 6000 až 15 000 hodin, v závislosti na typu a podmínkách použití. Životnost klasických žárovek s kovovým vláknem je pouze asi 1000 hodin. Kompaktní fluorescenční výbojky představují díky své vysoké účinnosti a životnosti skutečnou finanční úsporu.[5]

Vzhledem k jejich specifickým vlastnostem je však nutno vybrat správnou žárovku pro konkrétní použití.[5]

d)



(Obr. 7, Elektroluminiscenční dioda[5])

LED, anglická zkratka pro elektroluminiscenční diodu (light-emitting diode), je moderní, rychle se rozvíjející, technologie. Účinnost takto vyráběných žárovek je srovnatelná s kompaktními fluorescenčními žárovkami a nadto mají ještě delší životnost.[5]

Žárovky LED určené pro osvětlení místností jsou na trhu poměrně krátce, avšak již nyní představují účinnou náhradu čirých i matných žárovek s příkonem až do 60 W. V brzké budoucnosti se pravděpodobně stanou alternativou pro všechny žárovky. Žárovky LED mají o 80 % nižší spotřebu energie než klasické žárovky s kovovým vláknem a také neobsahují rtuť.[5]

3.2 Vlastnosti úsporných žárovek

Úsporné zářivky mají oproti klasickým žárovkám několik výhod. Předně je to výrazně nižší spotřeba (až o 80%) a mnohem delší životnost (5-15 krát). Nevýhodami je delší start, cena, nemožnost použít regulátor osvětlení.[6]



(Obr. 8 Vnitřní uspořádání zářivky[6])

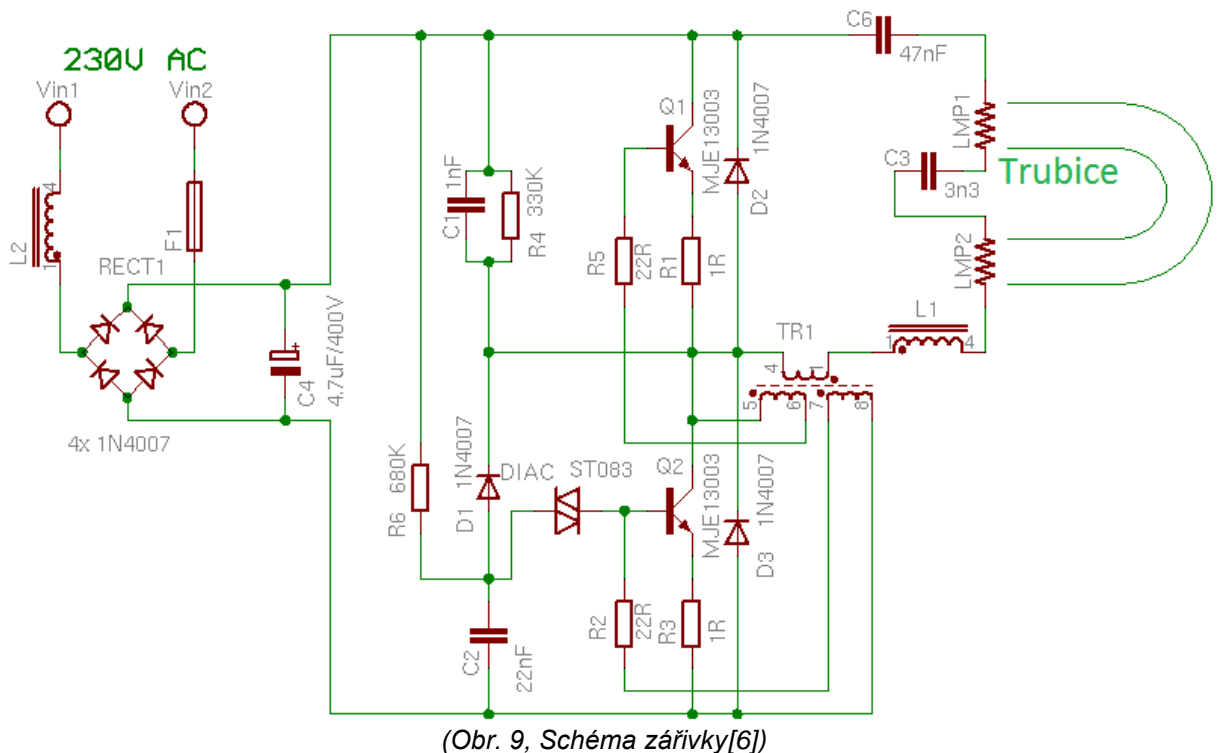
3.2.1 Princi přeměny světla

Úsporné zářivky používají vakuové trubice stejně jako klasické žárovky. Princip přeměny světla je také stejný. Na koncích trubice jsou dvě elektrody, obvykle pokryté bariem. Při vysoké teplotě, asi 900 °C, katoda generuje elektrony, které jsou urychlovány napětím mezi elektrodami a sráží se s atomy směsi argonu a rtuti. Dojde ke vzniku nízkoteplotní plazmy. Přebytkovou energii vyzáří rtuť v podobě UV záření. Přeměnu UV záření na viditelné světlo zajišťuje luminofor, jímž jsou pokryty stěny trubice. Elektrody mezi sebou stále střídají funkce anody katody díky napájení střídavým proudem. Zářivka CFL oproti klasické zářivce neblíká. Je to způsobeno měničem, který se používá pro napájení trubice. Měnič běží na

frekvenci o desítkách kHz. Měnič se nachází v patici a nahrazuje klasickou tlumivku se startérem.[6]

3.2.2 Elektronická konstrukce

Princip funkce bude vysvětlen na zářivce Luxar 11W (Obr. 9). V zapojení najdeme zdrojovou část (odrušovací tlumivka L2, pojistka F1), můstkový usměrňovač (složen z diod 1N4007 a filtračního kondenzátoru). Rozběhová část obsahuje součástky D1, C2, R6 + diak. D2, D3, R1, R3 plní ochrannou funkci. Ostatní součástky jsou v zapojení kvůli pracovní funkci.[6]



3.2.3 Rozběh zářivky

Součástky R6, C2 a DIAK slouží pro vytvoření prvotního impulsu do báze tranzistoru Q2 a způsobí otevření tranzistoru. Po rozběhu zářivky dojde k zablokování této kombinace diodou D1, přes kterou se při každém otevření Q2 vybije náboj na C2. V obvodu se pak nikdy nepodaří nashromáždit dostatek energie pro znovuotevření diaku. Tranzistory jsou dále buzeny přes malý transformátor T1. Ten je obvykle složen z feritového prstence se třemi vinutími o několika závitech (většinou 5-10). V tuto chvíli jsou žhavicí vlákna trubice napájena přes kondenzátor C3 napětím vznikajícím na sériovém rezonančním obvodu tvořeným L1, TR1, C3 a C6. Než dojde k rozsvícení trubice, je rezonanční frekvence obvodu určena kapacitou kondenzátoru C3, protože má mnohem menší kapacitu, než kondenzátor C6. Nyní je napětí na C3 přes 600V v závislosti na trubici zářivky. Během startu je špičkový

kolektorový proud přes tranzistory asi 3-5x větší než při normálním běhu. Pokud je trubice poškozena, může dojít ke zničení tranzistorů.[6]

3.2.4 Chod zářivky

Jakmile dojde k ionizaci plynu v trubici, hned poté prakticky nastane zkratování C3, a díky tomu se sníží frekvence řízená nyní pouze C6 a také napětí generované oscilátorem. Je však dostatečné k udržení zářivky v rozsvíceném stavu. Za normální situace, kdy dojde k otevření tranzistoru, dojde ke zvětšení proudu tekoucího do transformátoru TR1, dokud se jeho jádro nenasytí a pak zmizí zpětná vazba do báze tranzistoru, a ten se uzavře. Následně dojde k otevření druhého tranzistoru buzeného opačně zapojeným vinutím TR1 a celý proces se opakuje.[6]

3.2.5 Konstrukce

Zářivka se nejčastěji skládá ze dvou částí. Plastiková destička s otvory pro trubici, k níž je trubice přitmelena. Druhá mohutnější část obsahuje plošný spoj se součástkami, na který jsou připájeny vývody trubice. Oba díly jdou do sebe zacvaknuté nebo jsou slepené.[6]

3.2.6 Nejčastější závady

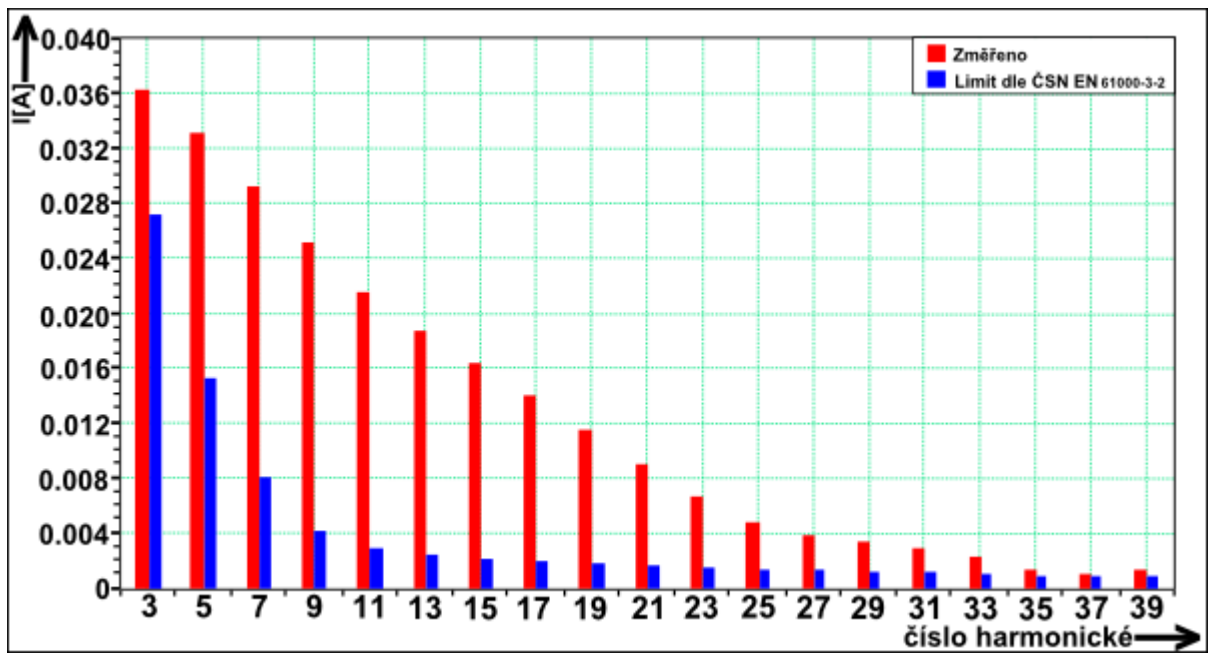
U levnějších zářivek dochází často k proražení kondenzátoru C3. Je to způsobeno použitím levných součástek pro nižší napětí. Pokud v určitém čase nedojde k rozsvícení trubice, hrozí zničení tranzistorů Q1 a Q2, následně pak R1, R2, R3, R5. Při startu také dochází k poměrně velkému přetěžování měniče a tranzistory obvykle nevydrží delší zatížení teplem. Když dojde k nefunkčnosti trubice, následně pak s největší pravděpodobností dojde i ke zničení elektroniky. Při dosloužení trubice může také dojít k přepálení jednoho z vláken elektrod a měnič poté už nenaběhne, elektronika může tento stav bez problémů přežít. Vlivem rozdílu teplot a vnitřního pnutí může dojít k prasknutí trubice. Nejčastěji dojde k poruchám během zapínání zářivky.[6]

3.3 Srovnání úsporných svítidel s normou

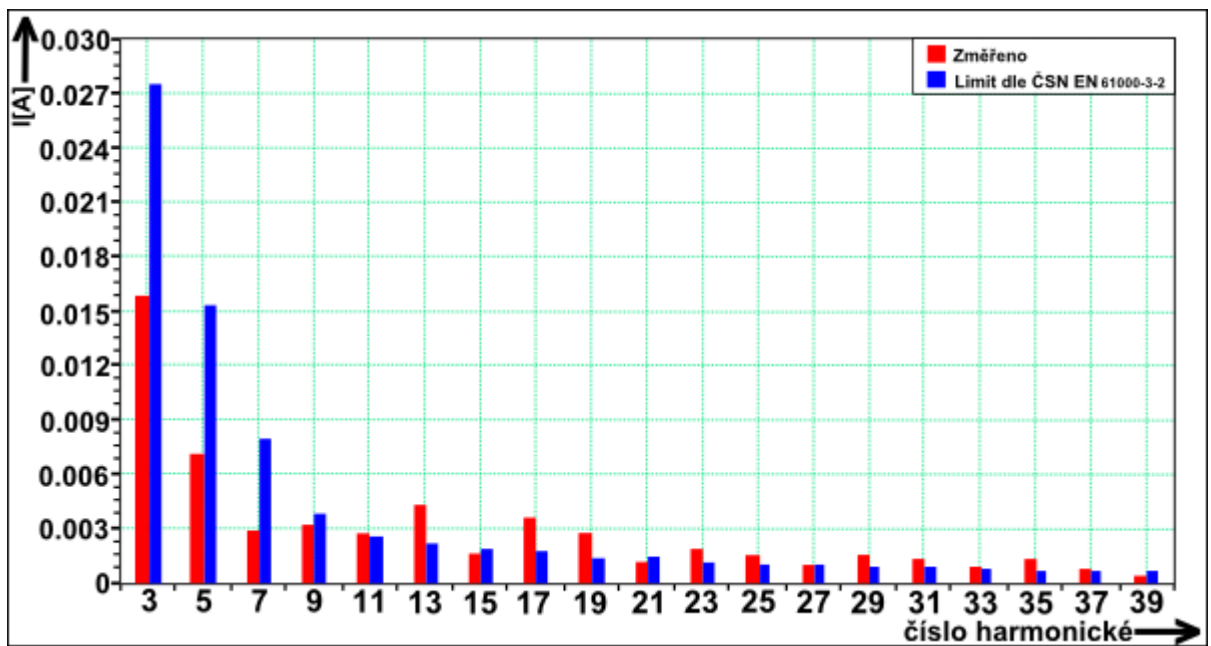
Klasickou žárovku patentoval Thomas Alva Edison v roce 1879. V dnešní době však dochází k jejímu nahrazování výkonnějšími světelnými zdroji. Jedná se o halogenové žárovky, různé druhy nízkotlakých nebo vysokotlakých výbojek a také LED světelné zdroje. Na štítku výrobku se zákazník může dočíst údaje o dlouhé životnosti, nízké spotřebě a o ekvivalentním výkonu odpovídajícímu klasické žárovce.[7]

Nicméně s využíváním úsporných zářivek a LED světelných zdrojů, které kvůli složitosti svého zapojení nelze s prostými žárovkami nijak srovnávat, je třeba se připravit na určité problémy. Tyto zdroje světla ale nemají jen klady. Připojení většího počtu těchto úsporných světel může v elektrické síti způsobit problémy. Mohou se stát zdrojem rušivých signálů pro ostatní spotřebiče. Aby bylo možné posouzení toho, jak se tento jev ve skutečnosti projevuje, je důležité se blíže seznámit s charakterem proudu, který tyto spotřebiče odebírají. K tomuto tématu je důležité hned v úvodu poznamenat, že srovnávací měření na světelných zdrojích uvedená v dalším textu byla pouze orientační, provedená za účelem porovnání. Proto ve výsledcích porovnání nejsou uvedeni výrobci ani označení výrobků. Výsledky není možné zobecňovat, protože jednotlivé typy svítidel se mohou svými vlastnostmi dost výrazně lišit, a to i když jsou vyrobeny stejným výrobcem.[7]

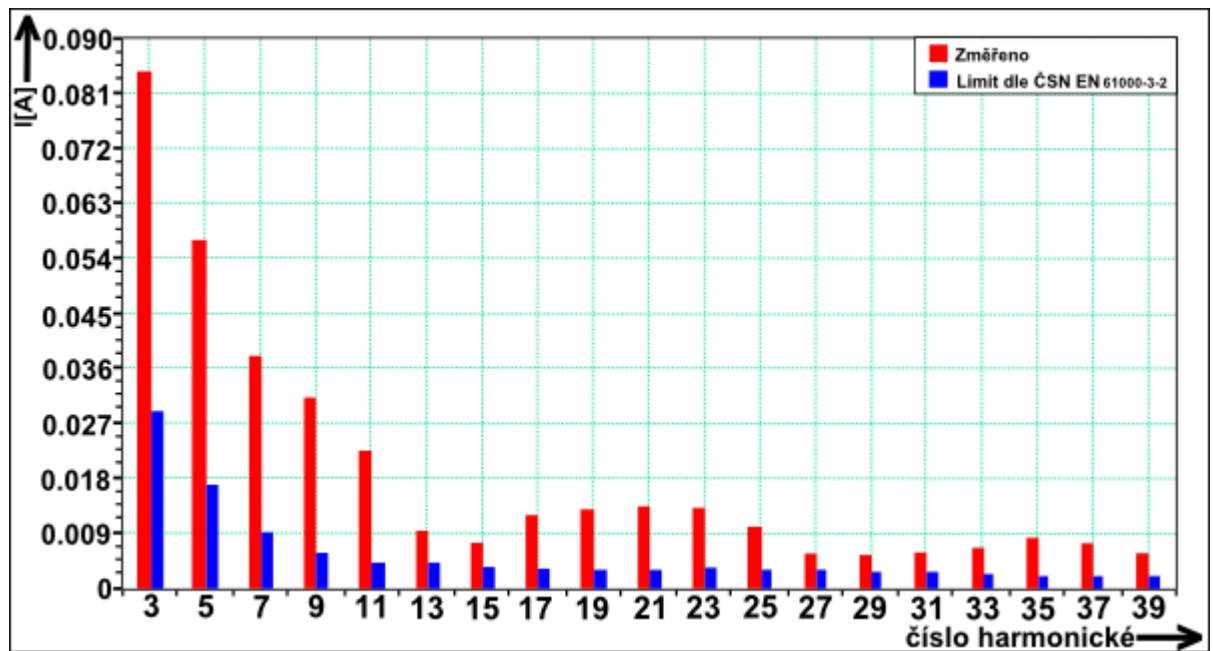
Výpočet pro proudové zatížení klasické žárovky je jednoduchý. Žárovka disponuje pouze činným charakterem proudu a jako odporový spotřebič není zdrojem harmonických proudů. Na štítcích nynějších světelných zdrojů je uveden pouze činný příkon, stejně jako je tomu u žárovek. Jedná se však o neúplný údaj (s výjimkou halogenových žárovek). Tento údaj je však pro výpočet zátěžového proudu nevyhovující. Světelné zdroje, jimiž je žárovka nahrazována, totiž vedle činného výkonu odebírají i jalovou energii. Je tedy nutné uvést ještě i jalový příkon nebo nejlépe zdánlivý příkon. U těchto moderních úsporných žárovek“ a LED svítidel má jalový příkon kapacitní charakter. Navíc hodnota jalového odběru těchto úsporných zdrojů a svítidel většinou převyšuje hodnotu činného příkonu. Doplnění štítku o údaj hodnoty zdánlivého příkonu by bylo možné určit nejen odebranou hodnotu efektivního proudu, ale také hodnotu požadovaného dekompenzačního, popř. kompenzačního jalového výkonu. Nicméně řešení eliminace vyšších harmonických proudů nadále pak zůstává samostatnou kapitolou. Zde je potřeba provést alespoň základní analýzu odebíraného proudu. Poté je možné navrhnout optimální způsob eliminace zpětných vlivů.[7]



(Obr. 10, Zastoupení lichých harmonických proudů pro LED zdroj 8 W (červené sloupce) a limitní hodnoty povolené normou (modré sloupce)[7])



(Obr. 11, Zastoupení lichých harmonických proudů pro LED zdroj 6 W (červené sloupce) a limitní hodnoty povolené normou (modré sloupce)[7])



(Obr. 12, Kompaktní zářivka 20 W s patičí E27 a naměřeným celkovým THDi 120 % číslo harmonické[7])

Moderní úsporné zdroje světla odebírají jalový výkon kapacitního charakteru. K dekompenzaci jalového výkonu kapacitního charakteru je nutné používat tlumivky. Tlumivky mají ale také činné ztráty, které jsou pak ve srovnání s kondenzátory výrazně vyšší. Takové činné ztráty jsou závislé na konstrukci tlumivky a často bývají v rozmezí 1 až 5 % j indukčního výkonu dané tlumivky. Tlumivka je nelineární prvek a je zdrojem harmonických proudů. Jedná se zejména o 3., 5. a 7. harmonickou proudů.[7]

LED světelné zdroje budí patřičný zájem a vidinu perspektivy. Proto v posledních letech udělali světelné zdroje LED velké pokroky. Těžko můžeme srovnávat světelný tok dnešních diod LED s hodnotami, kterých dosahovali LED diody před dvaceti, či i pouhými deseti lety. Hlavním problémem je to, že pro použití těchto světelných diod je nutné upravit nevyhovující síťové napětí 230V AC. Pro tento účel jsou určeny elektronické obvody, které jsou u některých typů LED světelných zdrojů také významným zdrojem ztrát a tepla. Pokud se podíváme podrobněji na příkon těchto svítidel, je zřejmé, že se jejich vlastnosti výrazně mění podle použitého předřadného elektronického obvodu. Tab. 1 obsahuje hodnoty naměřené pro tři náhodně vybrané typy LED zdrojů od jednoho českého výrobce. První typ s uvedeným příkonem 8 W má starší typ elektronického obvodu a další dva typy (12 W, 6 W) mají modernější elektronický obvod.[7]

LED světelný zdroj	1. harmonická				Efektivní hodnota (RMS)				THDi(%)
	I[mA]	P[W]	Q[var]	S[VA]	I[mA]	P[W]	Q[var]	S[VA]	
LED 8W	34,50	7,94	-1,63	8,11	75,67	7,94	-15,92	17,79	194,00
LED 12W	110,80	12,40	-23,02	26,17	124,20	12,34	-26,60	29,32	50,10
LED 6W	44,78	4,27	-9,62	10,53	48,72	4,28	-10,51	11,35	39,80

(Tab. 6, Naměřené hodnoty odběrů LED svítidel (proud I, činný příkon P, jalový příkon Q a zdánlivý příkon S)[7])

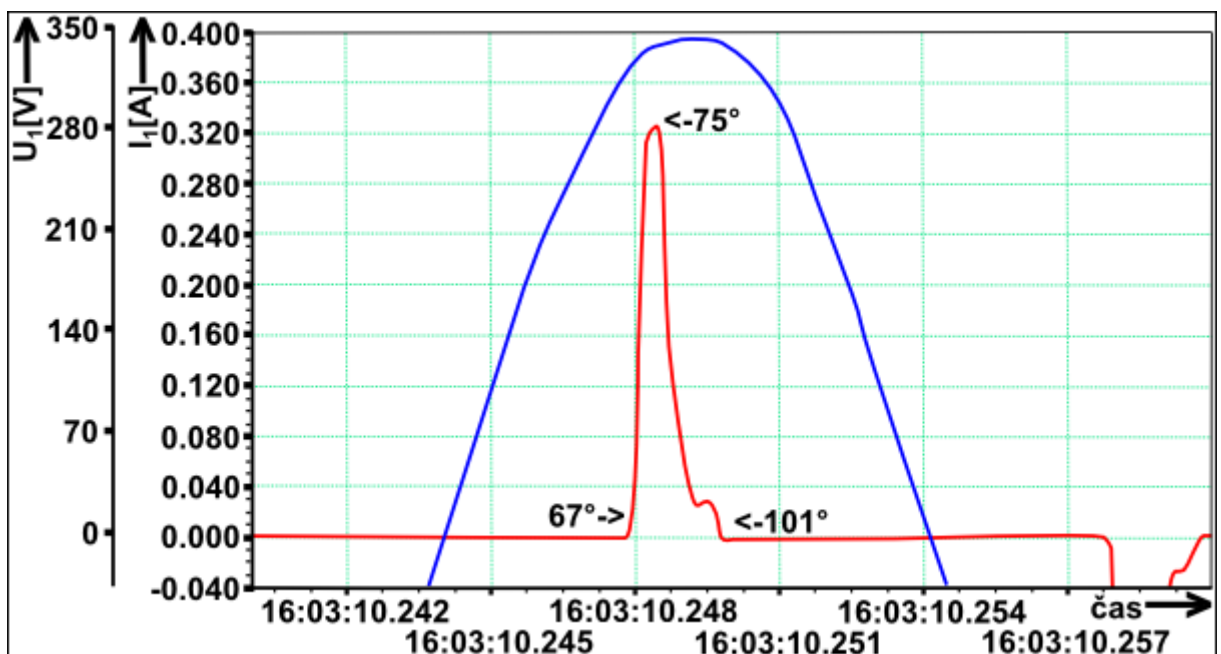
Pokud porovnáme hodnoty za Tab. 1, objeví se celkem výrazný rozdíl v celkovém harmonickém zkreslení odebíraného proudu. Toto harmonické zkreslení proudu ovlivňuje činný příkon jen málo, ale zato výrazně ovlivňuje odběr jalové energie. Takže čím vyšší je harmonické zkreslení, tím větší bude rozdíl mezi jalovým příkonem 1. harmonické a celkovým jalovým příkonem respektujícím všechny harmonické proudy. Při porovnání hodnoty činného příkonu LED svítidel s hodnotou zdánlivého příkonu můžeme zjistit, že hodnota zdánlivého příkonu zahrnující všechny harmonické je v tomto případě 2 až 2,7 násobkem udávaného činného příkonu svítidla. Proto je pro připojení úsporných svítidel nutno počítat s vyšší hodnotou odebíraného proudu, než je možné odvodit pouze z udávaného činného příkonu svítidla.[7]

Kromě LED svítidel byly měřeny také některé typy kompaktních zářivek (tzv. úsporné zářivky) s patičí E27 od několika různých výrobců. U několika náhodně vybraných vzorků se celkové zkreslení v proudu pohybovalo od 80 do 120 %. Podle celkového harmonického zkreslení proudu nemůžeme jednoznačně říci, zda dané svítidlo bude vyhovovat, či nikoliv. Obecně lze předpokládat to, že čím vyšší bude hodnota harmonického zkreslení, tím hůře lze světelný zdroj označit jako vyhovující. Dané posouzení je stanoveno normou ČSN EN 61000-3-2. V normě jsou pro zdroje světla stanoveny přípustné úrovně jednotlivých harmonických proudů a také je zde popsán i tvar proudové vlny. Ve změně A1 uvedené normy z března 2010 je zobrazen tvar této proudové vlny.[7]

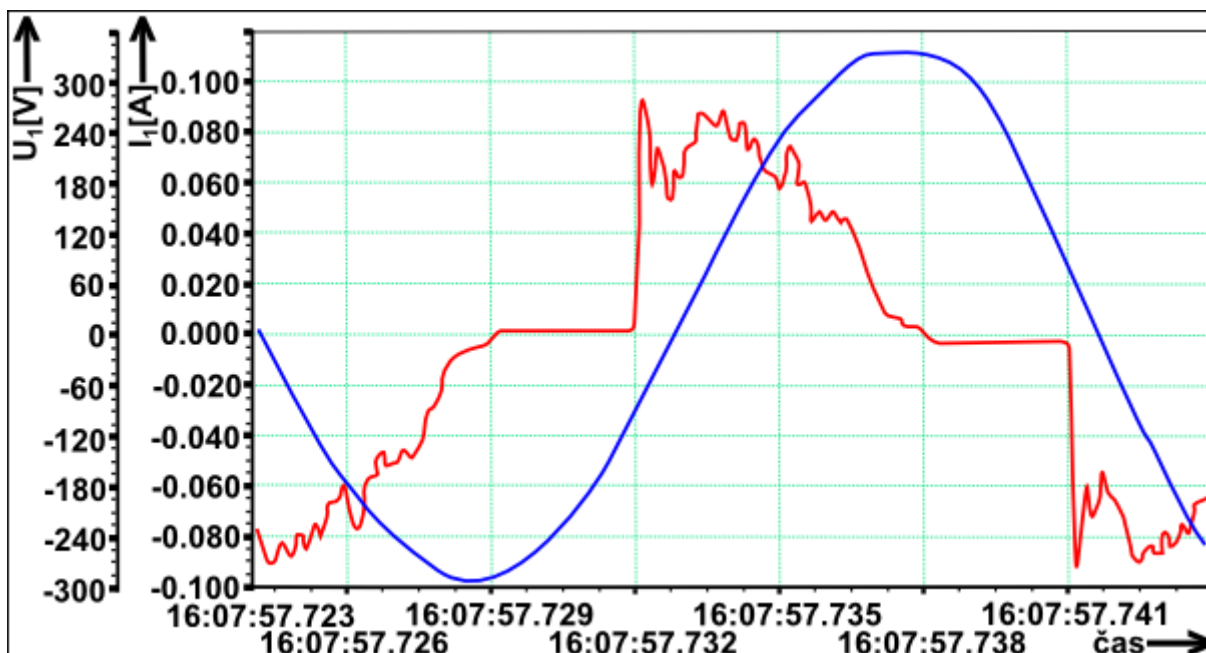
Dle kritéria a) omezený podíl jednotlivých harmonických proudů jsou na grafech v obr. 10 až obr. 12 zobrazena srovnání naměřených úrovní jednotlivých harmonických proudů v porovnání s limity stanovenými normou. Z grafu na obr. 10 je zřejmé, že 8W LED zdroj, který měl celkové harmonické zkreslení 194%, vysoce překračuje dané limity jednotlivých harmonických proudů a nesplňuje tak uvedené kritérium. Pro porovnání máme dále uveden graf (Obr. 11) 6W LED zdroje s celkovým harmonickým zkreslením 39,8%. Vzhledem k nízké hodnotě celkového harmonického zkreslení je tento světelný zdroj výrazně lepší. Ale přesto opět nevyhovuje kritériu stanovenému zmiňovanou normou, protože i zde některé harmonické proudy překračují normou stanovené limity. Na grafu v obr. 12 je zobrazeno zastoupení jednotlivých harmonických u kompaktní zářivky s patičí E27. Celkové

harmonické zkreslení proudu pro tento zdroj bylo 120%. Zdroj také nevyhovuje, protože vysoce převyšuje všechny limity jednotlivých harmonických proudu stanovené normou. [7]

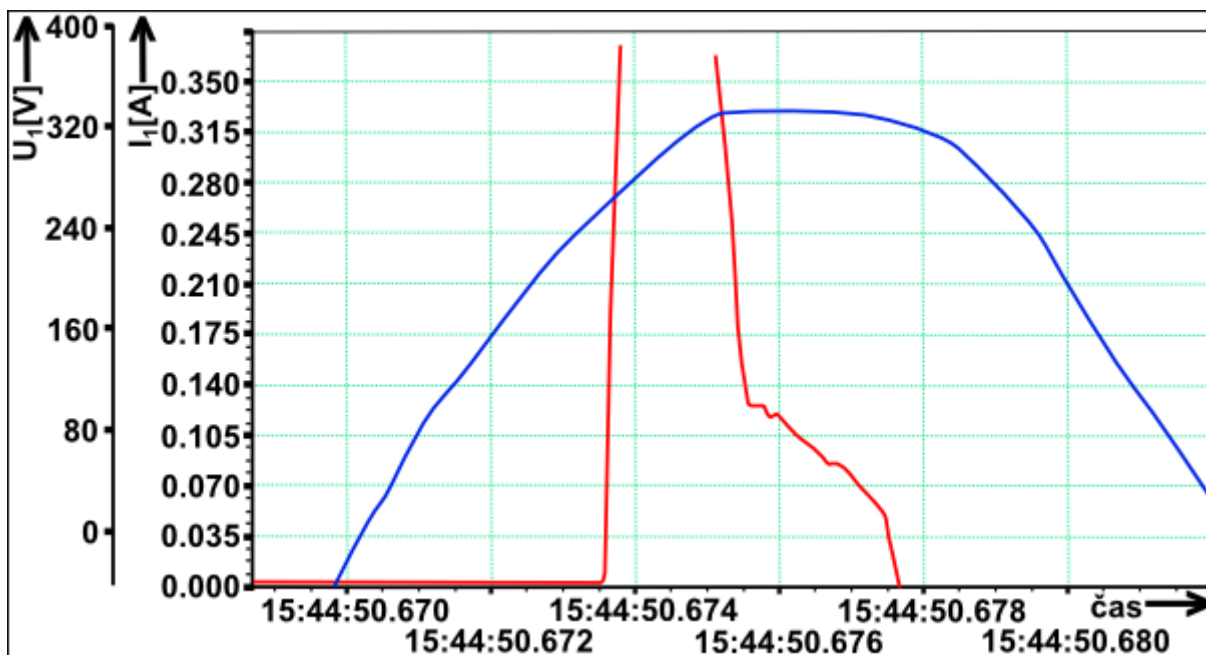
Dalším kritériem je b) tvar vlny vstupního proudu. Dle normy je stanoveno, že úhel 0° je dán pro okamžik průchodu nulou základní harmonické napětí. Úhel je měřen na cyklu, jenž zahrnuje absolutní vrcholovou hodnotu. Dle zmiňované normy je z Obr. 13 patrné, že proměřované LED svítidlo 8 W nevyhovuje ani této podmínce. Na Obr. 14 je znázorněn tvar vlny vstupního proudu pro LED svítidlo 6 W. S ohledem na fázový posun proudu je měření úhlu bráno od počátku záporné části periody napětí, protože se zde nachází absolutní vrcholová hodnota (Obr. 13). To znamená, že ani 6 W LED svítidlo nesplňuje druhou podmínku požadovanou normou (tj. b) tvar vlny vstupního proudu). Toto svítidlo má příliš vysokou hodnotu odebíraného jalového kapacitního příkonu. Pokud by byl odebíraný jalový výkon alespoň částečně dekompenzován, tvar vlny vstupního proudu by požadavkům normy vyhovoval. Např. kompaktní zářivka s příkonem 20 W, s patičí E27 a naměřeným celkovým THDi 120% tvarem odebírané proudové vlny vyhovuje požadavkům normy – viz Obr. 15.[7]



(Obr. 13, Tvar odebíraného proudu LED zdrojem 8 W [7])



(Obr. 14, Tvar odebíraného proudu LED zdrojem 6 W [7])



(Obr. 15, Tvar odebíraného proudu kompaktní zářivkou 20 W s integrovaným předřadníkem s patičí E27 a naměřeným celkovým THDi 120 % [7])

Z těchto grafů je patrné, že o sinusovém průběhu odebíraného proudu si u těchto světelných zdrojů lze zatím jen nechat zdát. Nejsou to žárovky. Přesto ale můžeme konstatovat, že je tvar vlny odebíraného proudu postupně zlepšován. Běžný spotřebitel však během koupě nemá šanci zjistit, jak na tom dané svítidlo nebo zdroj je, a neví ani to, zda tento spotřebič normě vyhovuje. I přesto, že daná norma existuje již několik let, můžeme v obchodech stále koupit světelné zdroje, které požadavkům norem platných v EU nevyhovují. Otázkou tedy zůstává, zda je k tomu tak pouze v našich obchodech nebo i

v obchodech jiných států EU. Je pravdou, že běžný spotřebitel má řekněme teoretickou možnost využívat kontrolní orgány, ale narovinu řečeno, proč by se tím vlastně zatěžoval.[7]

Jinak k tomuto problému ovšem přistupují projektanti, kteří navrhuji osvětlení větších celků, např. pro administrativní centra apod., kde je instalováno větší množství světelných zdrojů. Pro ně je vedle činného příkonu také důležitý údaj o zdánlivém příkonu svítidla. Sám projektant zodpovídá za řešení, které musí být v souladu s platnými normami. Navrhuje a předepisuje zařízení s parametry získanými přímo od výrobce. Snad tedy pouze tlak od projektantů, ovlivněný výběrem pouze vyhovujících zdrojů, popř. i kontrolních orgánů, by mohl přimět výrobce a obchodníky ke zlepšení situace na našem trhu.[7]

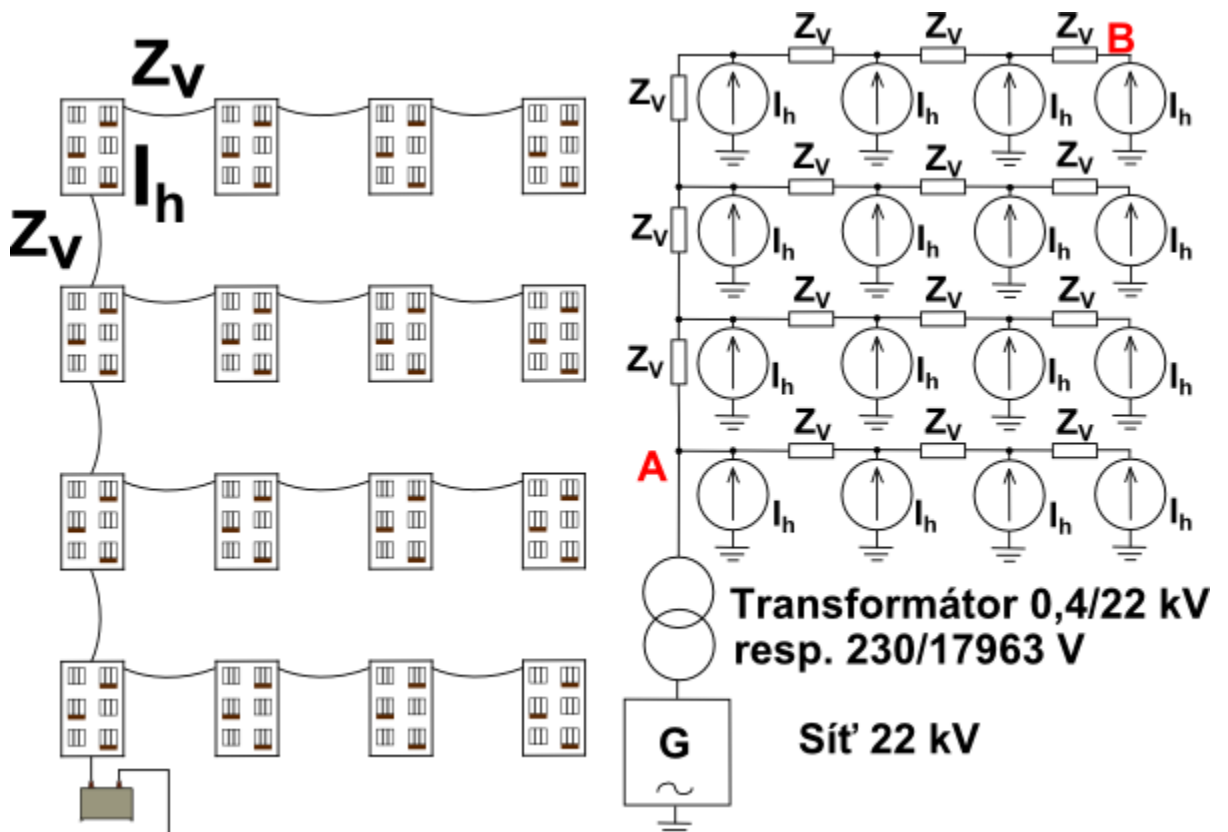
Zatím ovšem nemůžeme spoléhat na to, že by v dohledné době na pultech našich obchodů byly velmi účinné světelné zdroje, které díky svému provedení budou ze sítě odebírat pouze činný příkon se sinusovým proudem. Doplnění údaje o zdánlivém příkonu by proto zákazníkům zcela určitě poskytlo více informací ve srovnání s dnes běžně uváděným údajem pouze o činném příkonu svítidla.[7]

4 Modelový příklad zatížení sítě

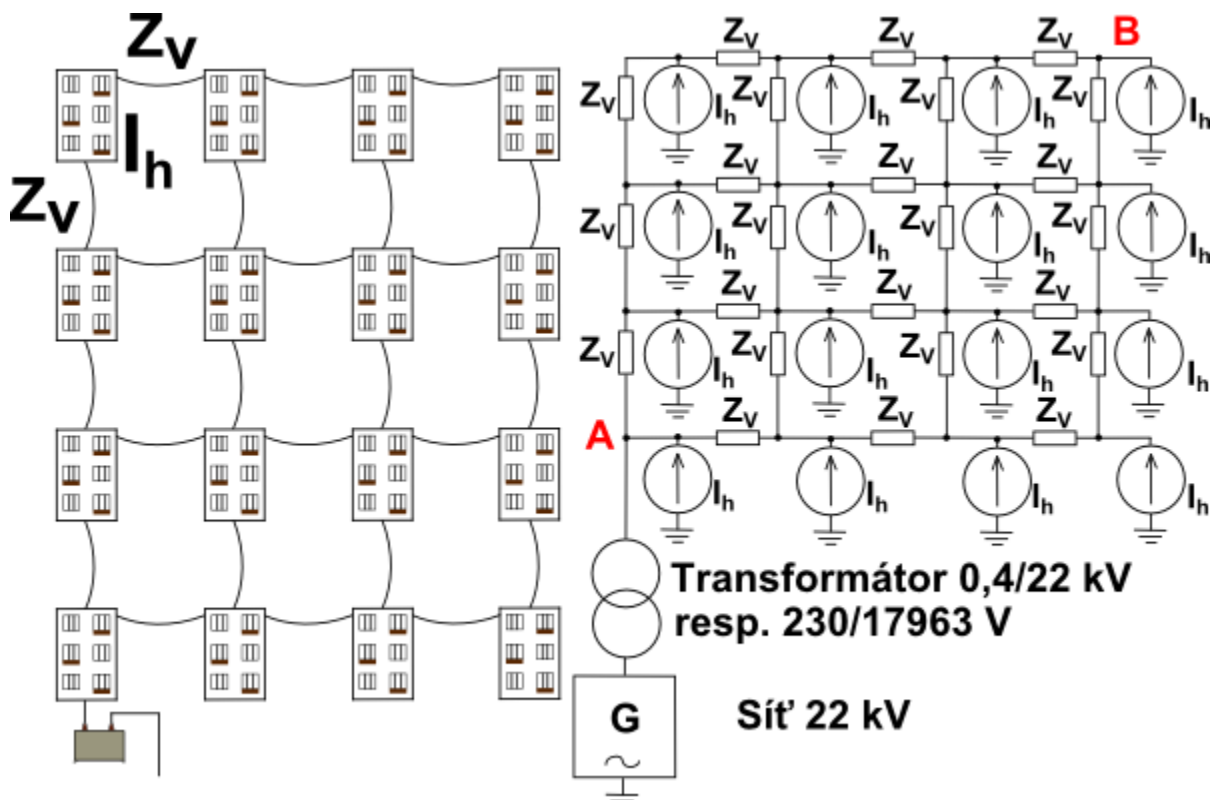
Nyní přistoupíme k modelovému příkladu výpočtu a simulace vlivu harmonických proudů na určitou oblast spotřebitelské sítě. Simulace byla provedena v programu Tina. Na základě konzultací byl zadán příklad pomocí hodnot z bodu 3.3.

4.1 Zadání příkladu

Výpočty a simulace harmonických napětí budou provedeny na předem určené oblasti. Touto oblastí bude model sídliště, kde budou jednotlivé bytové domy představovat příspěvky harmonických proudů I_h (Obr. 16, 17). Simulace zahrnuje dva druhy sítí, paprskovou (Obr. 16) a mřížovou síť (Obr. 17). Jedná se o velice zjednodušený příklad, kdy budeme uvažovat pouze jednu fázi vedení, nebudeme uvažovat vliv středního vodiče a pro lepší pochopení problému budeme pracovat pouze s efektivními hodnotami elektrických veličin. Měření harmonických napětí U_h se provádí v bodech A, B (model + schéma viz Obr. 16,19, Obr. 17,20), voltmetr je vždy zapojen v daném uzlu proti zemi.



(Obr 16. Obrázek a simulační schéma paprskové sítě)



(Obr 17. Obrázek a simulační schéma mřížové sítě)

Vedení:

Vycházíme z klasického kabelového vedení. Vzdálenost l mezi domy je 200 m. Uvažujeme kabel o průřezu 185mm^2 . Hodnoty vedení jsou: $R=0,167 \Omega/\text{km}$; $X=0,09 \Omega/\text{km}$; $B= 89 \mu\text{S}/\text{km}$.

Transformátor:

V distribuční síti je jedním z nejčastěji používaných transformátorů transformátor s výkonem 630 kVA. Hodnoty transformátoru:

$$S_T = 630 \text{ kVA}$$

$$U_k = 6 \%$$

$$I_o = 0,23 \%$$

$$\text{Ztráty nakrátko } P_k = 8077 \text{ W}$$

$$\text{Ztráty naprázdno } P_o = 978 \text{ W}$$

Síť:

Vedoucím práce byl zadán zkratový výkon sítě.

$$S_K = 80 \text{ MVA}$$

4.2 Zadání a výpočty harmonických proudů

Zde pro věrohodnost výsledků vyjdeme z naměřených hodnot u svítidel zmíněných v bodě 3.3. Při prvním výpočtu a simulaci však nastal problém. Díky chybně označeným osám charakteristik svítidel jsme nedospěli ke správným hodnotám, proto bylo třeba grafy přeznačit a hodnoty 1000krát zvýšit.

V bytech uvažujeme pouze dva druhy svítidel, a to: 8W LED svítidlo a 20W kompaktní zářivku. Každý bytový dům obsahuje 40 bytových jednotek a v každé bytové jednotce uvažujeme 10 svítidel (5 kusů od každého).

Výpočty hodnot pro simulaci:

Dle bodu 3.3. volíme proudy třetí harmonické:

$$8 \text{ W LED: } I_{3\text{LED}} = 35 \text{ mA}, 20 \text{ W kompaktní zářivka: } I_{3\text{KZ}} = 81 \text{ mA}$$

Hodnoty proudů pro byt:

$$I_{3\text{BYT}} = 5 \cdot (I_{3\text{LED}} + I_{3\text{KZ}}) = 5 \cdot (35 \cdot 10^{-3} + 81 \cdot 10^{-3}) = 0,6 \text{ A}$$

Hodnoty pro dům:

$$I_{3\text{C}} = 40 \cdot I_{3\text{BYT}} = 40 \cdot 0,6 = 24 \text{ A}$$

Hodnoty vybraných harmonických proudů:

Vedoucím práce byly zadány procentuální hodnoty harmonických proudů z první harmonické. Simulace se měla zaměřit na proudy těchto harmonických: 3., 5., 7., 11., a 13. harmonická.

$$I_3 = 25 \% I_1$$

$$I_5 = 10 \% I_1$$

$$I_7 = 7 \% I_1$$

$$I_{11} = 5 \% I_1$$

$$I_{13} = 4 \% I_1$$

Z hodnoty I_{3C} pak tedy vychází hodnoty harmonických proudů pro jeden bytový dům:

$$I_1 = 96 \sin(2\pi 50t) \text{ A}$$

$$I_3 = 24 \sin(2\pi 150t) \text{ A}$$

$$I_5 = 9,6 \sin(2\pi 250t) \text{ A}$$

$$I_7 = 6,72 \sin(2\pi 350t) \text{ A}$$

$$I_{11} = 4,8 \sin(2\pi 550t) \text{ A}$$

$$I_{13} = 3,84 \sin(2\pi 650t) \text{ A}$$

4.3 Výpočty prvků

Síť a transformátor:

V simulacích se síť nahrazuje indukčností L_S , transformátor odporem R_T a indukčností L_T . Výpočty těchto hodnot poté vypadají takto:

Síť:

$$Z_s = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_k} = \frac{1,1 \cdot 230^2}{80 \cdot 10^6} = 0,72 \text{ m}\Omega \rightarrow L_s = \frac{Z_s}{\omega} = \frac{Z_s}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 2,3 \text{ }\mu\text{H}$$

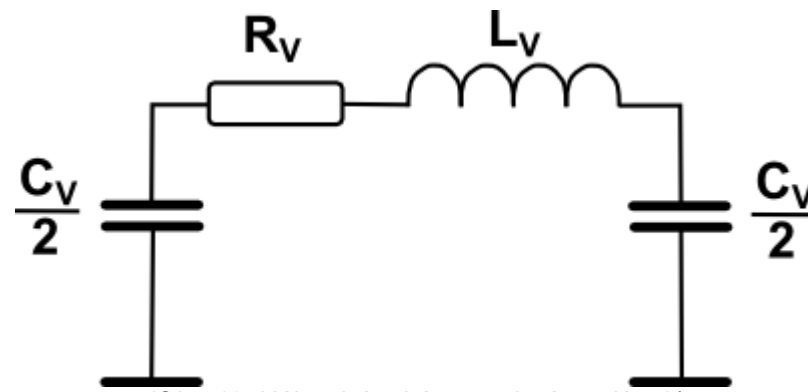
Transformátor:

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_T^2}{S_T} = \frac{6}{100} \cdot \frac{230^2}{630 \cdot 10^3} = 4,8 \text{ m}\Omega \rightarrow L_T = \frac{Z_T}{\omega} = \frac{Z_T}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 15 \text{ }\mu\text{H}$$

$$R_T = \Delta P_K \cdot \frac{U_T^2}{S_T^2} = 8077 \cdot \frac{230^2}{(630 \cdot 10^3)^2} \Rightarrow R_T = 1 \text{ m}\Omega$$

Vedení:

Pro výpočty a simulace se vedení nahrazuje π -článkem (Obr. 18). Tento článek nahrazuje také impedanci sítě pro simulaci Z_V (Obr. 16,17). Hodnoty parametrů pro π -článkem vypočteme z hodnot sítě.

(Obr. 18, Náhradní schéma vedení, π -článek)

Kde:

$$R_k = 0,167 \Omega/km$$

$$X_k = \omega L_K \rightarrow L_K = \frac{X_K}{\omega} = \frac{0,09}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 286 \cdot 10^{-6} H/km$$

$$B_k = \omega C_K \rightarrow C_K = \frac{B_K}{\omega} = \frac{89 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 283 \cdot 10^{-9} F/km$$

Hodnoty článku:

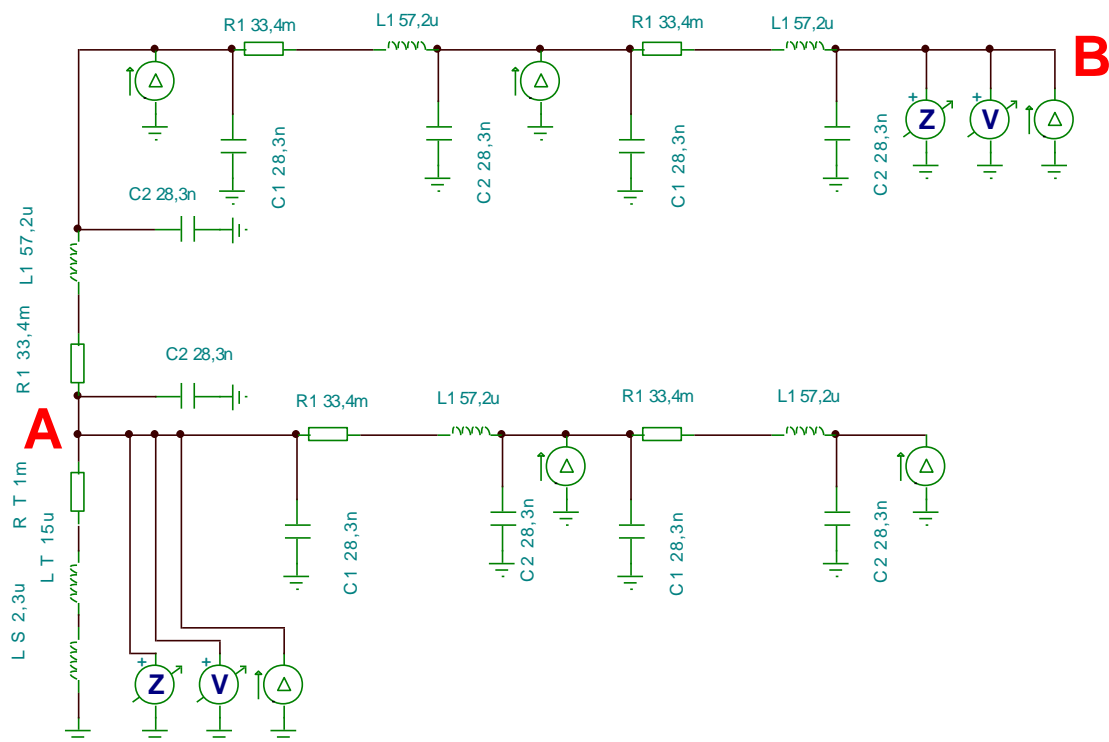
$$R_V = l \cdot R_K = 0,2 \cdot 0,167 = 0,0334 \Omega$$

$$L_V = l \cdot L_K = 0,2 \cdot 286 \cdot 10^{-6} = 57,2 \cdot 10^{-6} H$$

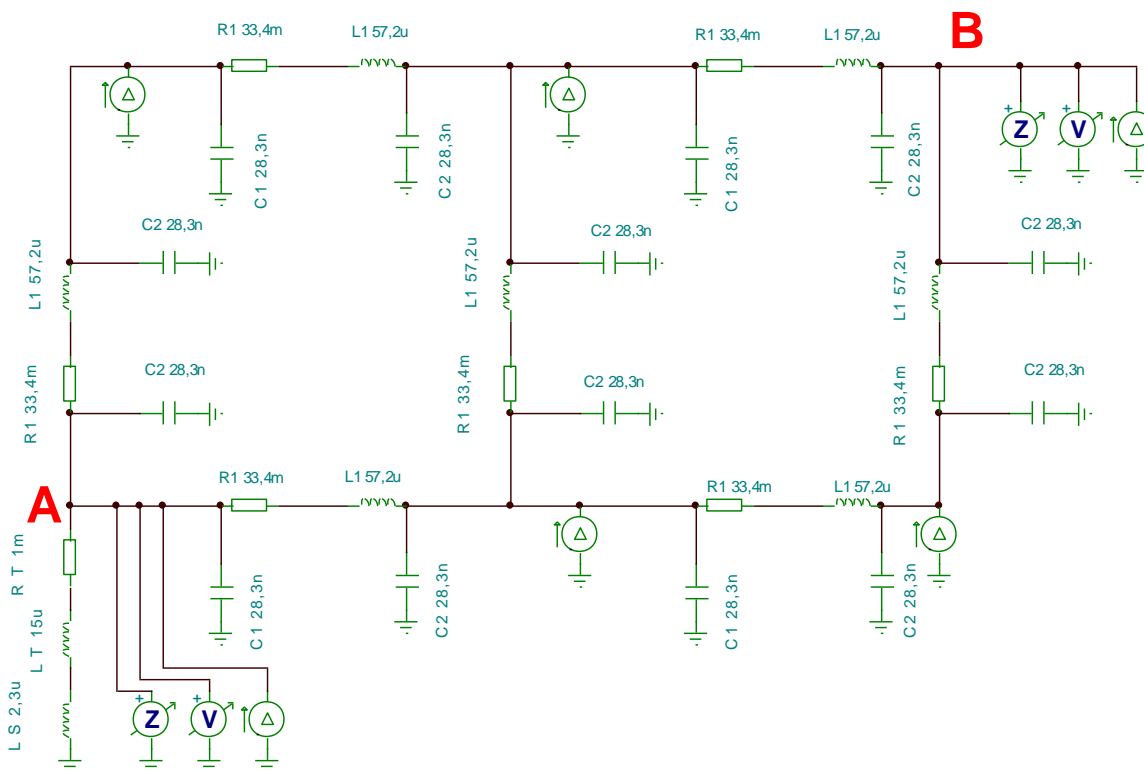
$$C_V = l \cdot C_K = 0,2 \cdot 283 \cdot 10^{-9} = 56,6 \cdot 10^{-9} F \rightarrow \frac{C_V}{2} = 28,3 \cdot 10^{-9} F$$

4.4 Simulace

Simulace byla provedena v programu Tina. Pro představu vlastností simulace a použitých metod přikládám zjednodušená schémata zapojení simulace pro dané obvody (Obr. 19 a Obr. 20). V obrázcích jsou červeným písmem označeny body A a B, ze kterých byly brány výsledné hodnoty simulace. V bodech se odečítala frekvenční závislost impedance sítě a harmonická napětí (měřiče impedance Z a voltmetry V). Dále jsou ve schématech zakresleny proudové zdroje, představující proudové příspěvky od bytových domů spolu s jejich umístěním.



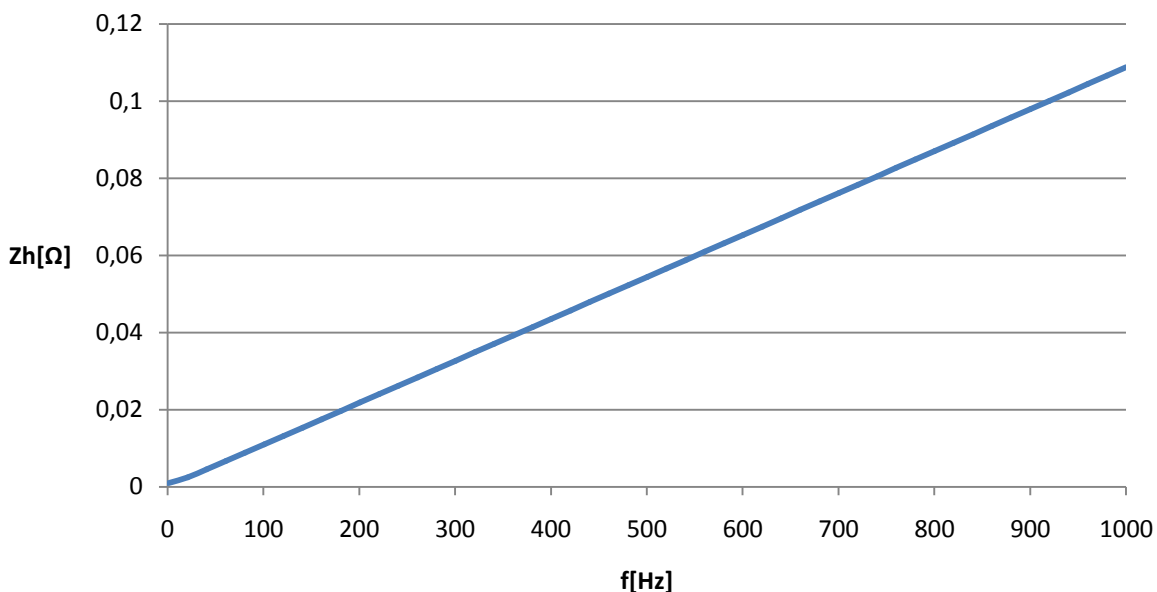
(Obr. 19, Zjednodušené schéma simulace – papřková síť)



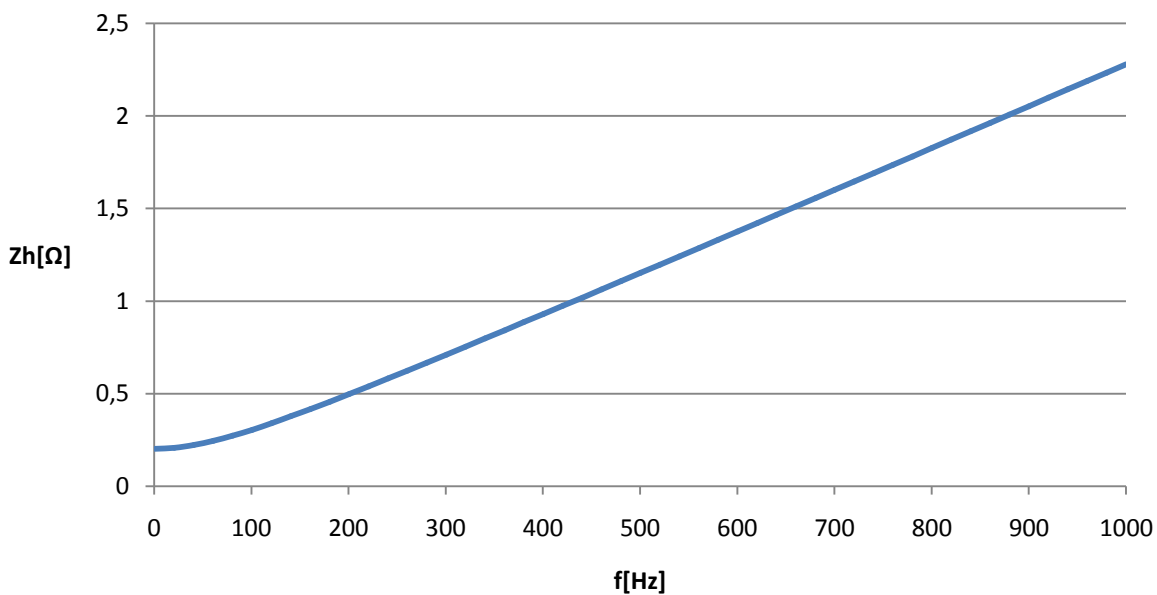
(Obr. 20, Zjednodušené schéma simulace – mřížová síť)

Předpoklady správné simulace:

Protože pracujeme s hodnotami při vyšších frekvencích, je pro odhad a správnost výsledků třeba znát frekvenční závislost impedance sítě. Níže jsou uvedeny závislosti měřených sítí dle vztažných bodů měření A a B (v programu Tina pomocí měřiče impedance vždy v daném bodě proti zemi, Obr. 19,20).

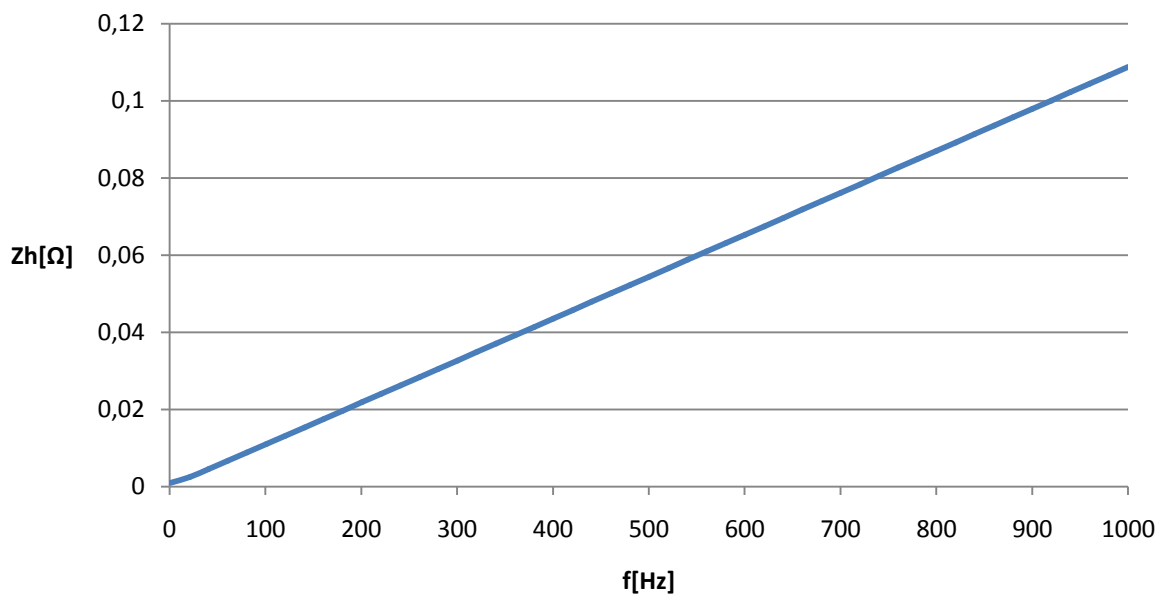
Impedance sítě: Paprsková síť - bod A

(Graf 1, Impedance sítě: Paprsková síť – bod A)

Impedance sítě: Paprsková síť - bod B

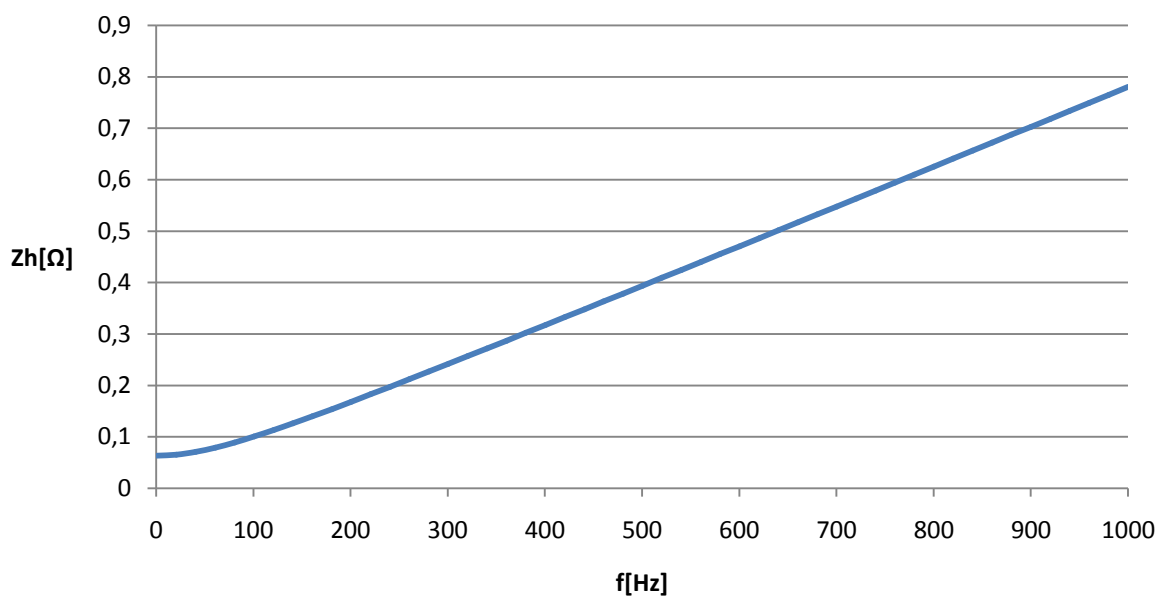
(Graf 2, Impedance sítě: Paprsková síť – bod B)

Impedance sítě: Mřížová síť - bod A



(Graf 3, Impedance sítě: Mřížová síť – bod A)

Impedance sítě: Mřížová síť - bod B



(Graf 4, Impedance sítě: Mřížová síť – bod B)

4.5 Výsledné hodnoty simulace

V tabulce 7 můžeme nalézt výsledky simulace pro dané body. Porovnání těchto výsledků s normou ČSN EN 61000-2-2 obsahuje bod 4.6.

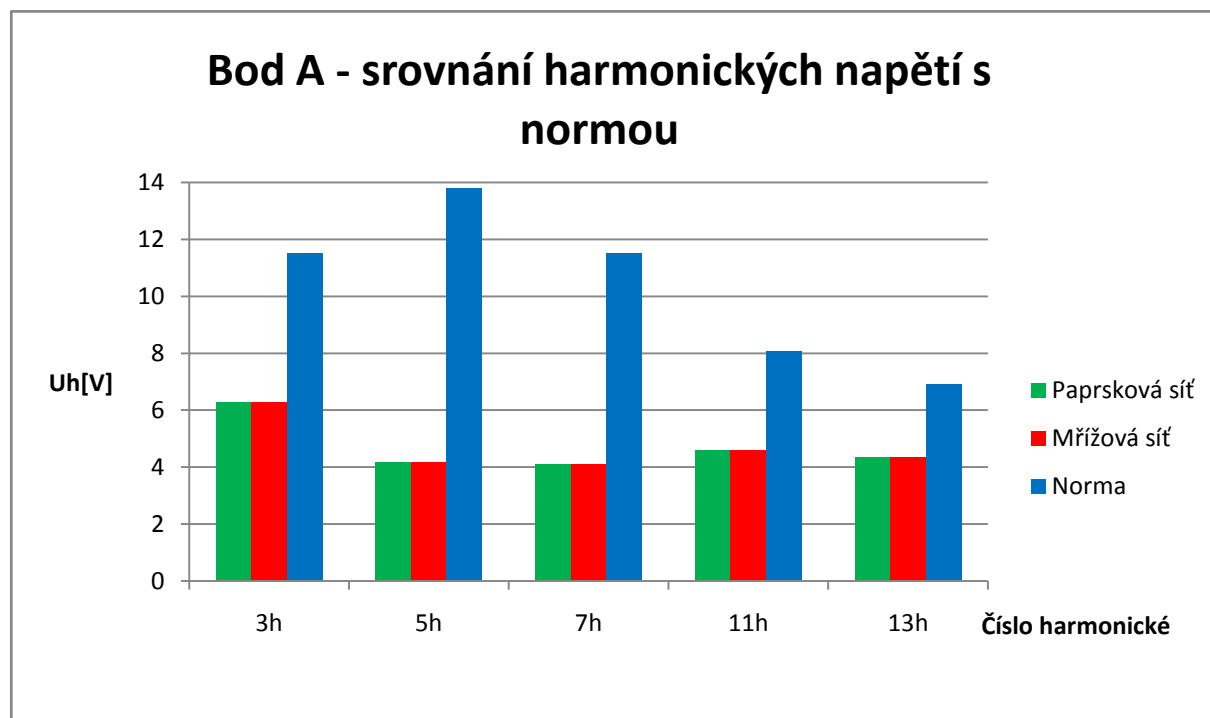
Bod A				Bod B				Dovolené normou	
Řád harm.	$U_h[V]$	Řád harm.	$U_h[V]$	Řád harm.	$U_h[V]$	Řád harm.	$U_h[V]$	Řád harm.	$U_h[V]$
3h	6,27	3h	6,27	3h	51,28	3h	28,3	3h	11,5
5h	4,18	5h	4,18	5h	31,61	5h	17,69	5h	13,8
7h	4,09	7h	4,09	7h	30,25	7h	17,01	7h	11,5
11h	4,6	11h	4,6	11h	33,45	11h	18,87	11h	8,05
13h	4,35	13h	4,35	13h	31,54	13h	17,8	13h	6,9

(Tab. 7, Tabulka odměřených harmonických napětí ze simulace)

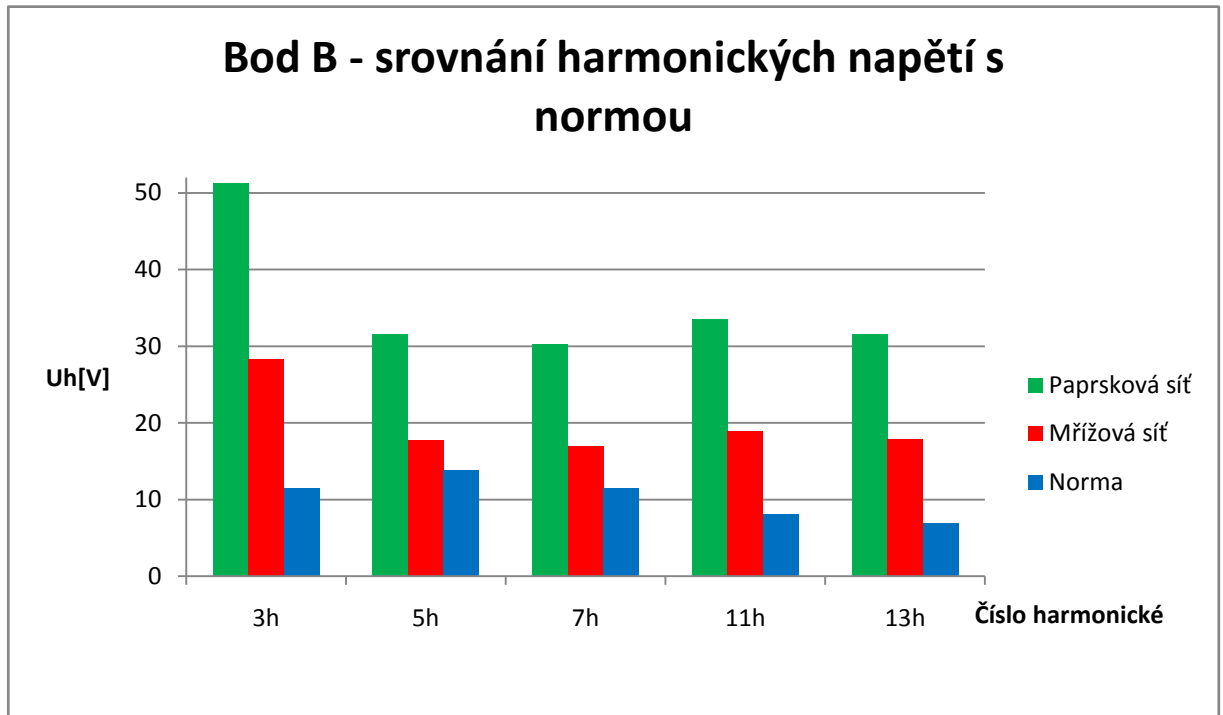
4.6 Srovnání výsledků s normou

Tento bod přináší závěrečné zhodnocení výsledků simulace. Jednotlivé grafy vždy zahrnují srovnání harmonického napětí dané harmonické mezi oběma druhy sítí a normou přípustným napětím dle ČSN EN 61000-2-2 (viz 2.1.2).

Přímé srovnání (hodnoty ve Voltech):

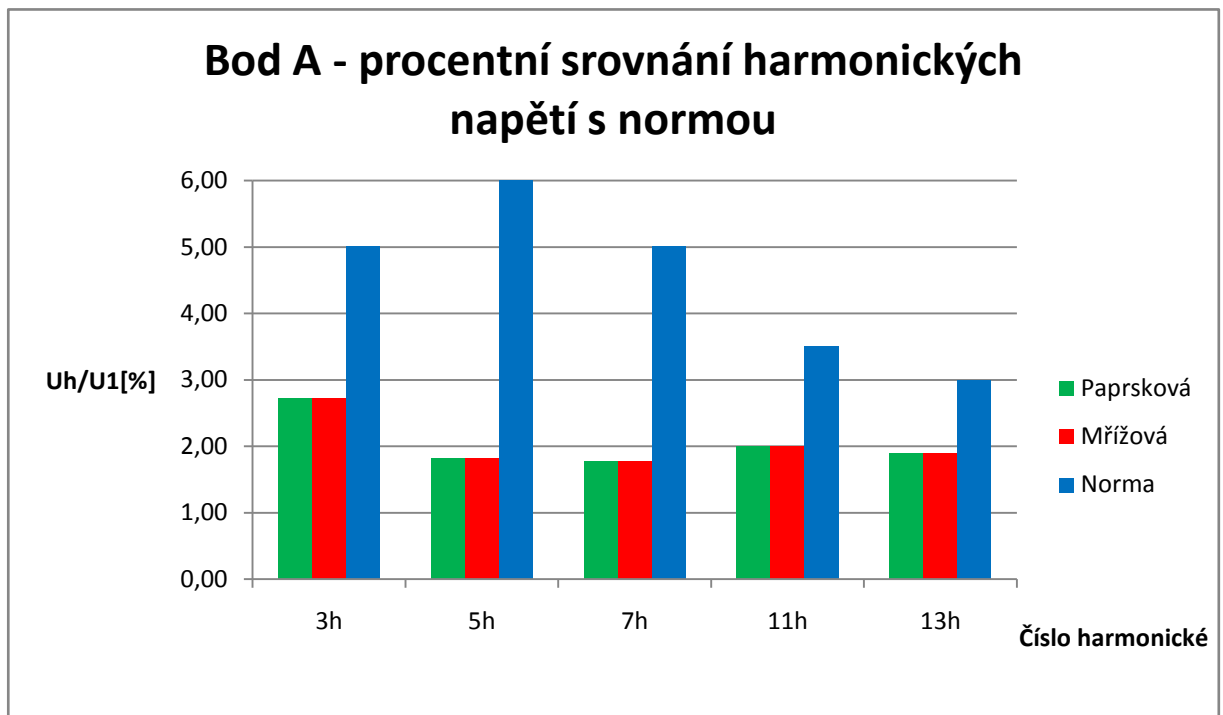


(Graf 5, Bod A – srovnání harmonických napětí s normou)

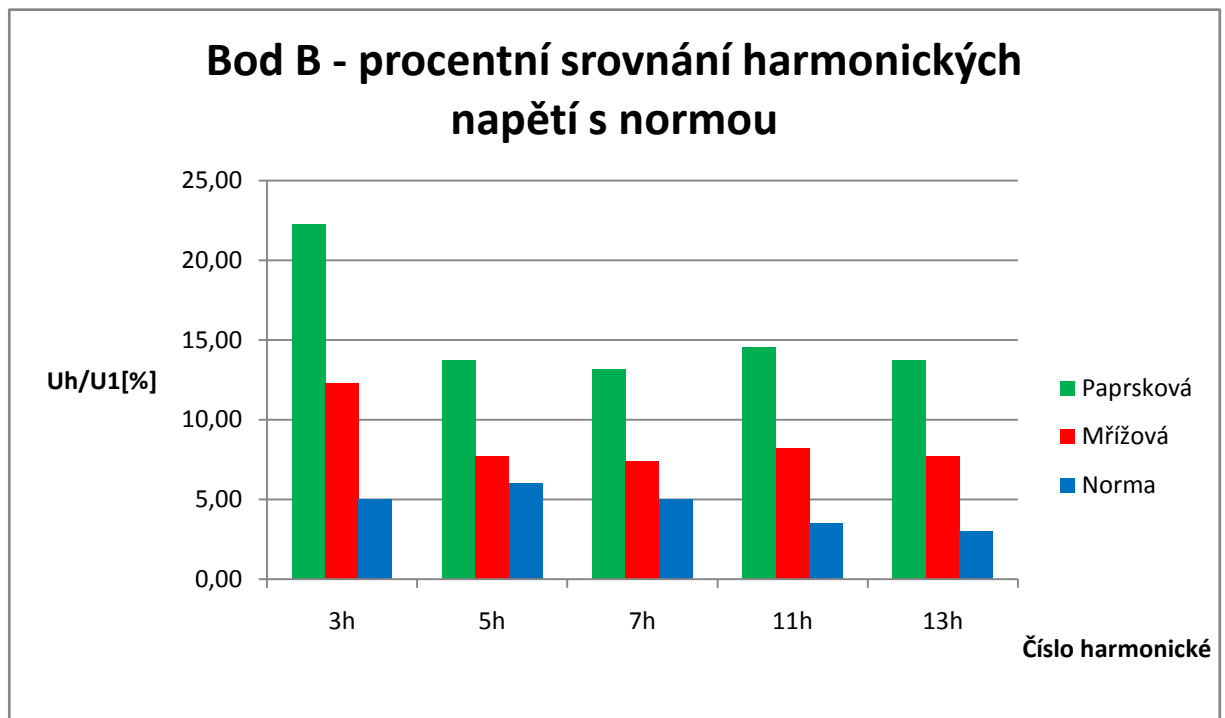


(Graf 6, Bod A – srovnání harmonických napětí s normou)

Procentní srovnání:



(Graf 7, Bod A – procentní srovnání harmonických napětí s normou)



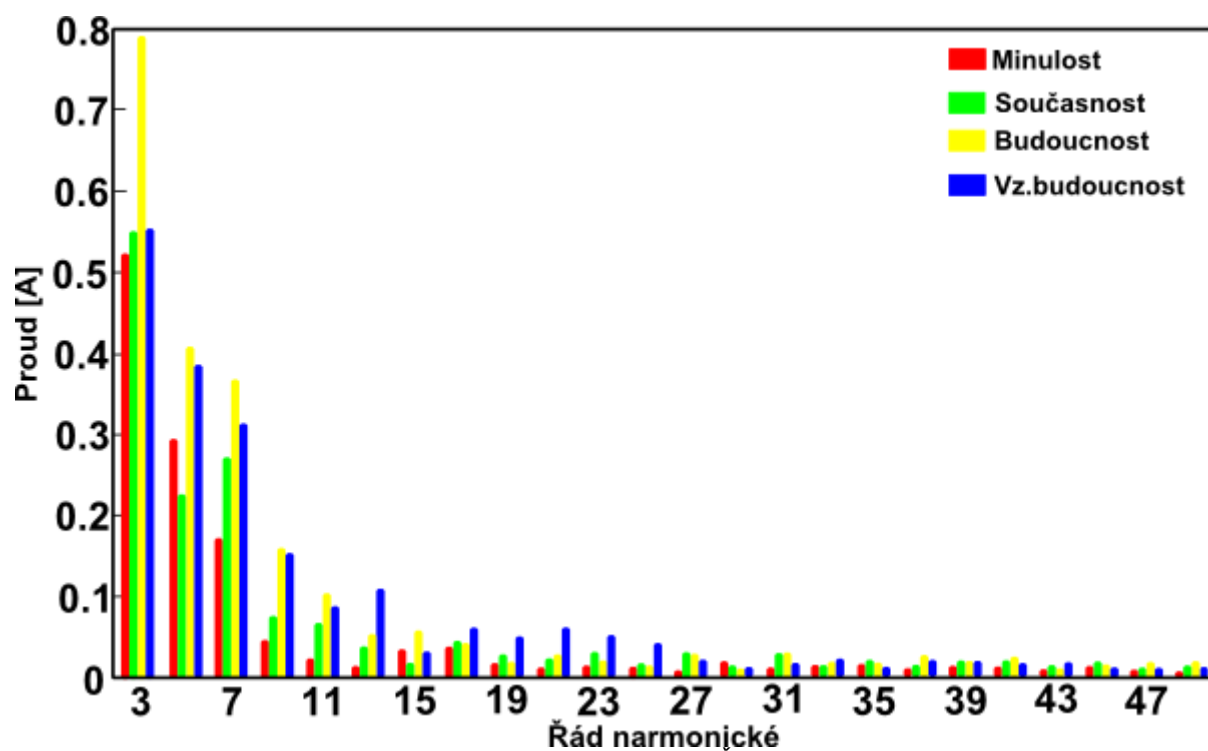
(Graf 8, Bod A – procentní srovnání harmonických napětí s normou)

4.7 Zhodnocení výsledků

Výsledky ukazují, že v bodě A nezáleží na druhu zapojení, hodnoty harmonických napětí jsou zde velice podobné a splňují požadavky normy. Naopak pro bod B platí, že mřížová síť má nižší hodnoty harmonických napětí a dochází zde k výraznému překročení normy. Vzhledem k charakteru a účelu práce nebyly při výpočtech zohledněny všechny aspekty týkající se rozvodů v městských oblastech. Výsledky jsou spíše orientační, je třeba k nim přistupovat s určitými rezervami. Například ve skutečných sítích je napájení řešeno z více bodů, kdy jeden transformátor není připojen k takovému zatížení apod. Navzdory těmto omezením a zjednodušením však výsledky celkem jednoznačně dokazují, že s užíváním velkého množství jednofázových spotřebičů s nelineárním odběrem bude stoupat zatížení sítě harmonickými proudy a bude docházet ke zkreslení napětí. V určitých případech může být toto zkreslení i tak vysoké, že jsou překročeny hodnoty dané normou.

Kvůli podobné hodnotě odhadu proudu 3. harmonické dále uvádím srovnání se studií, provedenou v roce 2013 ve Švédsku. Kde byl na Luleaské univerzitě postaven přesný model domu, v němž byly použity spotřebiče, které jsou zdroji harmonických proudů. Do sítě domu bylo zapojeno 32 světel (kombinace CFL, LED), LED televize, počítač s CRT monitorem, mikrovlnná trouba a sporák. Spotřebiče spolu byly spínány v různých časech a intervalech, při tom docházelo k měření harmonických proudů. Výsledky měření jsou aplikovány na graf (Obr. 21), který výsledky přenáší na vyhodnocení poměrů harmonických proudů v síti pro

minulost, přítomnost, blízkou a vzdálenou budoucnost. Z grafu vyplývá, že v blízké budoucnosti budou harmonické proudy způsobovat v síti určité problémy.[11] Hlavně díky tomu, že bude i nadále docházet k nárůstu spotřebičů s neharmonickým odběrem proudu, k čemuž přispívá také nařízení EU o nahrazování klasických žárovek za úsporné zdroje světla. Po několika letech by však mělo dojít ke zlepšení, technologie světel půjde jistě kupředu a výkony požitých světel se budou snižovat. Určitě dojde i ke zlepšení polovodičových měničů s ohledem jejich zpětného působení na síť.



(Obr. 21, Harmonické proudy ze Švédské studie)

Závěr

Díky nařízením EU dochází v současné době k nahrazování klasických svítidel různými typy úsporných zdrojů. Na tento trend však můžeme zaujmout dva úhly pohledu. Z energetického hlediska je používání úsporných svítidel vzhledem ke zlomkové spotřebě jistě velkým přínosem. Na druhou stranu tato zařízení odebírají silně zdeformované proudy. Přestože jednotlivá zařízení jsou schopna splnit požadavky norem (často s minimálními rezervami), při předpokládaném (a povinném) masovém nasazení může dojít k takové deformaci napětí, při níž budou překročeny hodnoty dané normou.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů:

- [1] KŮS, Václav. *Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 183 s. ISBN 80-730-0062-8.
- [2] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 80-708-2976-1.
- [3] Odborné časopisy. *Vyšší harmonické a jejich působení na síť* [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37250
- [4] Evropská komise. *Energie: Úsporné žárovky* [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/lumen/faq/index_cs.htm
- [5] Evropská komise. *Energie: Úsporné žárovky* [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/lumen/overview/avariedchoice/index_cs.htm
- [6] Pavouk. *Úsporná zářivka a elektronický předřadník* [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://pavouk.org/hw/lamp/>
- [7] Odborné časopisy. *Vliv používání moderních světelných zdrojů na síť* [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=48394
- [8] Evropská komise. *Energie: Úsporné žárovky* [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/energy/lumen/img/overview/whatwillchange/infographics/bulb_comparison-cs.jpg
- [9] ČSN EN 61000-3-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 3-2: Meze - Meze pro emise harmonického proudu (zařízení se vstupním fázovým proudem do 16 A včetně)*.
- [10] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*.
- [11] *Harmonics from household equipment and different lamp technologies*. 2013. DOI: 978-1-4673-4913-0/13/\$31.00. Dostupné z: aril@uco.es