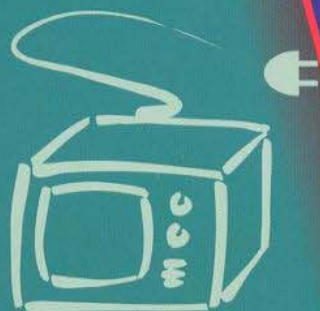


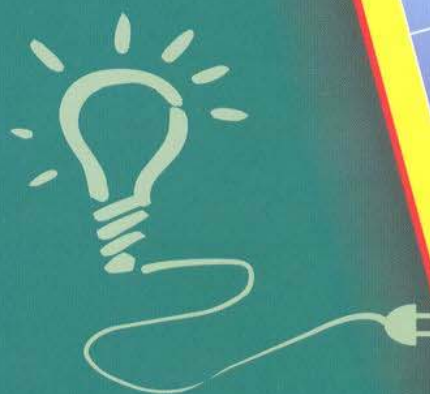
Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí



(Zlepšení kvality elektrické energie
zvětšením průřezu měděných vodičů)

Prof.Dr. András Dán
Technická univerzita Budapešť, Maďarsko

Prof. Ing. Pavel Santarius, CSc.
Ing. Josef Gavlas
Ing. Miloslav Kužela
VŠB - Technická univerzita Ostrava



Obsah

Úvod	3
1. Charakteristické ukazatele kvality elektrické energie	5
1.1 Velikost napájecího napětí	5
1.1.1 Definice a původ napěťových poklesů	5
1.1.2 Problémy způsobené odchylkami napětí	6
1.1.3 Měření napětí.	7
1.2 Pokles napětí a přepětí	7
1.2.1 Definice poklesu napětí a přepětí.	7
1.2.2 Původ poklesu napětí a přepětí	8
1.2.3 Poruchy a jejich působení na spotřebitelskou síť	9
1.2.4 Měření poklesu napětí a přepětí.	9
1.3 Harmonické zkreslení	10
1.1.1 Původ harmonických	10
1.3.2 Harmonické proudy a jejich šíření v síti	13
1.3.3 Problémy způsobené harmonickými.	20
1.3.4 Měření harmonických.	23
1.3.5 Omezení problémů způsobených harmonickými.	24

1.4	Rychlé změny napětí (flickr)	25
1.4.1	Definice	25
1.4.2	Původ flickru	25
1.4.3	Šíření flickru v síti	30
1.4.4	Rušivý vliv flickru	32
1.4.5	Měřicí metoda	32
2	Doporučení dle norem	37
2.1	Harmonické	37
2.2	Poklesy napětí, flickr	39
3	Problémy způsobené používáním zařízení, které vyhovují normám	41
4	Nejdůležitější důvody pro projektování dle nového stylu	47

Úvod

V dnešní době dochází ke změnám struktury v oblasti spotřebitelů elektrické energie. Tyto změny se objevují v oblasti průmyslu, veřejné spotřeby a zejména v místech, kde se ve větší míře využívá světelných spotřebičů. Změny struktury spotřeby jsou na jedné straně způsobeny neuvěřitelným rozšířením zařízení informačních technologií (IT) a rozšířením energeticky úsporných spotřebitelských zařízení na straně druhé. Je samozřejmé, že tyto změny mají vliv na ukazatele kvality elektrické energie a ovlivňují obvyklý způsob návrhu průřezu měděného vedení v rozvodu nízkého napětí.

V dalším textu publikace se budeme zabývat ukazateli charakterizujícími kvalitu elektrické energie, vzájemnou vazbou mezi kvalitou elektrické energie a jednotlivými spotřebiteli a některými částmi norem, které souvisí s kvalitou elektrické energie. S ohledem na výše uvedené bude porovnáno působení spotřebiče na kvalitu elektrické energie v případě "tradičního" projektování napájecího měděného vedení a v případě projektování, které bere v úvahu nové charakteristiky spotřebičů.

Na této publikace je provedena sumarizace všech důležitých závěrů týkajících se navrhnutého nového projektování průřezu měděného vedení.

1. Charakteristické ukazatele kvality elektrické energie

Dále se budeme zabývat pouze těmi ukazateli kvality elektrické energie, které jsou uvedeny v normě (ČSN EN 50160) pro sítě nízkého napětí a mohou být zlepšeny zvětšením průřezu vodiče kabelové sítě spotřebitele. Mezi tyto ukazatele patří:

- Velikost napájecího napětí
- Poklesy napětí a přepětí
- Harmonické zkreslení
- Rychlé změny napětí (flickr)

Vztah těchto ukazatelů ke kvalitě elektrické energie je nastíněn v následujících kapitolách.

1.1. Velikost napájecího napětí

Velikost napájecího napětí pro spotřebitele je definovaná pro společný napájecí bod (PCC). Zátěžný proud, který teče přívodním vedením ke spotřebiteli, vyvolává úbytky napětí, které závisí na vzdálenosti spotřebitele. Tyto úbytky mohou způsobit různé velikosti napětí v místech, kde jsou připojeni koneční spotřebitelé. Z tohoto důvodu je napětí lokálním parametrem elektrické sítě. Na straně druhé i zátěže, které se mění s časem, způsobují úbytky napětí. Velikost napětí tedy nebude záviset pouze na vzdálenosti, ale také na čase. Podle normy ČSN IEC 38 by od roku 2003 rozvodná společnost měla udržet napětí v distribuční síti nízkého napětí ve společném napájecím bodě spotřebitelů (PCC) na hodnotě $U_n \pm 10\%$ (prozatímně je platné $U_n +10/-6\%$), kde $U_n = 230\text{ V}$.

Poznámka: Dle ČSN IEC 50 (161) - Společný napájecí bod PCC (point of common coupling) je bod veřejné rozvodné sítě, elektricky nejbližší příslušnému odběrateli, ve kterém je nebo může být připojen jiný odběratel. Obvykle je to místo měření odběru elektrické energie odběratelem.

1.1.1. Definice a původ úbytků napětí

Rozdíl mezi napětím ve společném napájecím bodě (PCC) U_1 a napětím v samotném místě odběru U můžeme definovat následujícím vztahem:

$$\Delta U = U_1 - U$$

nebo v procentech

$$\Delta U_{\%} = [(U_1 - U) / U_n] \times 100$$

kde U_1 , U a U_n jsou absolutní hodnoty fázorů fázového napětí.

Jinak vyjádřeno: úbytek napětí odpovídá vztahu (fázové hodnoty):

$$\Delta U = I_{\xi} R_s + I_j X_s$$

kde R_s a X_s je činná a induktivní část síťové impedance, I_{ξ} a I_j je činná a jalová (předpokládá se induktivní) část odběrového proudu. Pro výpočet úbytku napětí pro základní harmonickou by měla být brána v úvahu:

- pro jednofázové odběry impedance smyčky Z_f (impedance fázového vodiče) + Z_n (impedance středního vodiče)
- pro symetrické trojfázové odběry impedance Z_f

V normě ČSN EN 61000-3-1 je uvedeno, že pro analýzu spotřebitelské sítě nízkého napětí mají být pro frekvenci 50 Hz použity tyto impedance: impedance fázového vodiče:

$Z_f = 0,24 + j0,15 \Omega$ a impedance středního vodiče $Z_n = 0,16 + j0,1 \Omega$.

Hodnota úbytku napětí, používaná při projektování průřezů vodičů, je při jmenovité světelné zátěži 3% jmenovitého napětí a pro ostatní zátěže 5% jmenovitého napětí. Tato hodnota odpovídá úbytku napětí mezi napájecím bodem sítě nízkého napětí a spotřebičem. Nezajímá nás tedy v tomto případě úbytek napětí na napájecím kabelu vn/nn transformátoru, který vlastní rozvodná společnost. Impedance související s úbytkem napětí se skládá ze dvou částí, a to induktivní části, která je dána zejména rozptylovou indukčností

transformátoru a odporovou částí, kterou tvoří zejména odpor vodiče nízkého napětí. Vzhledem k poměru velikostí obou částí impedance je možné v síti nízkého napětí uvažovat, že pokles napětí mezi napájecím bodem sítě a spotřebičem odpovídá ztrátám na odporu vedení ($\Delta U \approx RI^2$).

1.1.2. Problémy způsobené odchylkami napětí mimo povolené tolerance

Jak již bylo zmíněno, norma garantuje v PCC hodnotu napětí $U_n \pm 10\%$. Pokud předpokládáme, že pokles napětí mezi měřeným bodem a spotřebičem je 3% nebo 5% při jmenovité zátěži, napětí zůstává v mezích tolerance které jsou specifikovány pro nejhorší případ spotřebitele.

Pokud je napětí větší než je jeho povolená hodnota bude se zkracovat doba životnosti spotřebitelských zařízení (např. žárovky) a bude docházet k stárnutí izolace. Dále se také zvýší ztráty. V případě dalšího zvětšení napětí (přes 15%) bude větší četnost poruch těchto zařízení.

Pokles napětí pak způsobí pokles výkonu zařízení (např. pro 100 W žárovku napájenou napětím menším než $U_n - 10\%$ to představuje méně než 80% její jmenovité svítivosti) a znemožní udržet jmenovité parametry zařízení vzhledem k uživateli. Další pokles napětí může způsobit špatnou funkčnost, která závisí na typu zařízení (např. ztráta dat v zařízení IT), nebo k úplnému vypnutí zařízení (např. v případě magnetických vypínačů).

1.1.3. Měření napětí

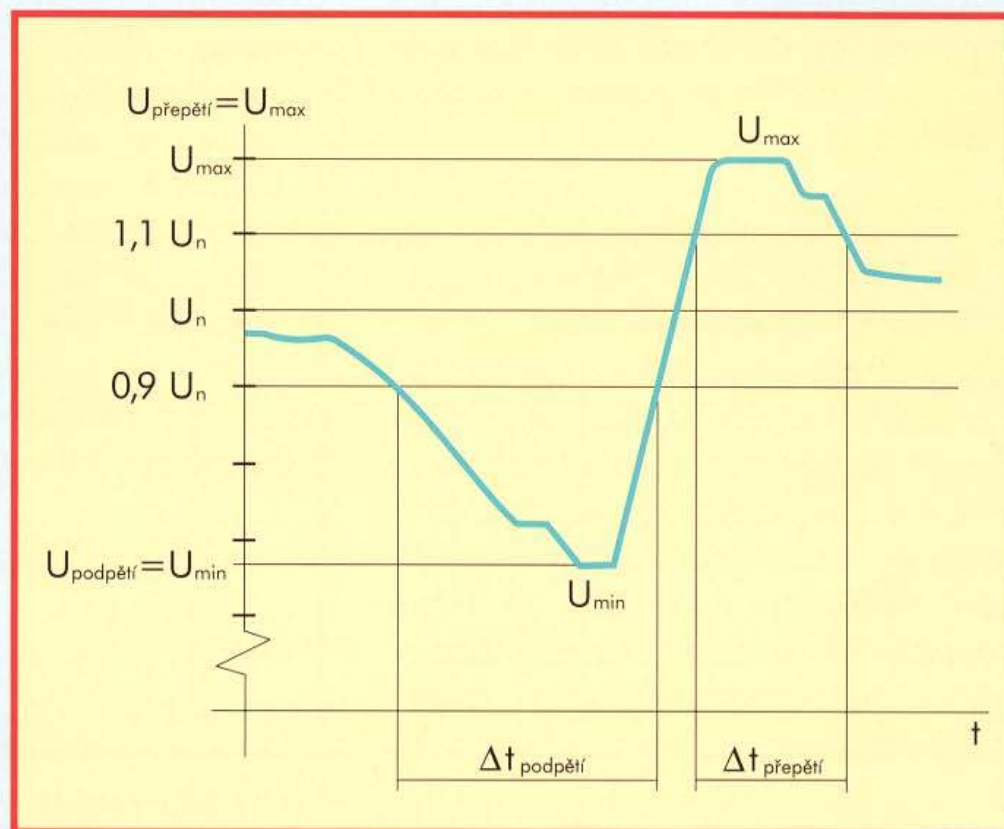
Napětí je možné měřit u spotřebitele, v PCC nebo kdekoliv jinde. Pro spotřebitele je důležitá velikost napětí v přípojném bodě, takže je možno měřit pouze amplitudu (velikost) napětí. Normy ČSN EN 61000-4-7 a ČSN EN 50160 se zabývají měřicím zařízením a měřicími metodami. Měření je prováděno digitálními přístroji v reálném čase a základní měřené hodnoty se průměrují za 8 nebo 16 period, z nich je stanovena 3 sec hodnota pro tzv. velmi krátký časový interval. Z nich je pak vypočtena a zaznamenávána průměrná hodnota každých 10 minut. Tímto způsobem je definována metoda měření pomalých změn napětí, pomocí které je možno vytvořit statistické podklady pro praktické použití hodnocení kvality napětí v distribučních společnostech.

1.2. Pokles napětí a přepětí

1.2.1. Definice poklesu napětí a přepětí

Pokles napětí je definován pomocí efektivní hodnoty napětí. V souladu s normou ČSN EN 61000-3-3 je napěťový pokles charakterizován těmito ukazateli: trvání napěťového poklesu a nejmenší poměrné napětí v době poklesu napětí. („Poměrné“ znamená že změřená hodnota napětí je vztažena k jmenovité hodnotě napětí.)

Časový interval poklesu se začíná měřit, když napětí poklesne pod 90% jmenovitého napětí. Měření končí, po opětovné nárůstu nad 90% jmenovité hodnoty.



Obrázek 1

Definice poklesu napětí a přepětí

Pokud napětí poklesne pod 1% jmenovité hodnoty nazýváme to výpadkem napětí.

V trojfázovém systému považuje norma pokles napětí v kterékoliv fázi za pokles napětí celého systému.

Přepětí je charakterizováno obdobně, tedy pomocí doby trvání a poměrné velikosti. Rozdíl je v tom, že uvažujeme napětí, které překročilo 110% jmenovité hodnoty.

Definici poklesu a přepětí ukazuje obrázek 1.

1.2.2. Původ poklesu napětí a přepětí

V ustáleném stavu sítě je efektivní hodnota ve stanovených mezích. Tato hodnota závisí na hladině napětí. Pro nízké napětí distribuční sítě je platná efektivní hodnota napětí uvedena v bodě 1.1.

V souladu se specifikací dle normy ČSN EN 50160 je měřené napětí v průběhu jakéhokoliv týdne v roce dáno 95% statistickou hodnotou zprůměrnovaných 10 minutových efektivních hodnot napětí. Tato hodnota se pak musí pohybovat v mezích daných touto normou. Neexistuje žádné nařízení týkající se zbývajících 5% (které reprezentují 8 hodin týdně). Samozřejmě to neznamená, že se napětí může pohybovat v libovolných mezích.

Pokud jde o původ těchto jevů, musíme oddělit případy vytvářené - nebo ovlivněné - spotřebiteli a ty, které jimi ovlivněny být nemohou. Tato druhá kategorie pochází od delších a kratších přerušení napětí způsobených chybami sítě (např. zkrat, OZ, chyby síťového zařízení).

Krátkým přerušením napětí se můžeme vyhnout správnou činností ochran.

Delší přerušení nazýváme výpadky napájení.

Dalším důvodem přechodného poklesu napětí (přepětí) může být příliš pomalé napěťové řízení elektrického systému, což je také v zodpovědnosti distribuční společnosti (např. po náhlém odlehčení zátěže).

Pokles napětí, nebo poruchové události způsobené uživateli jsou vytvářeny v síti spotřebitele a za předpokladu dobře navržené sítě jsou účinky těchto událostí v PCC velmi malé a další spotřebitel připojený to stejné síť není při jeho normálním provozu rušen. V případě spotřebitele, který je původcem těchto rušení a nemá dobře navrženou síť se může objevit u citlivých zařízení špatná funkce. Obecně spotřebitelé s velmi dynamickým proudovým odběrem způsobují napěťové poklesy větší než jsou dovoleny.

1.2.3. Poruchy a jejich působení na spotřebitelskou síť

Události způsobující poklesy napětí a jejich následky jsou následující:

- Uvolněný drát, který tvoří špatný kontakt či se úplně rozpojí

Následek:

- změna velikosti napětí (charakter poklesu napětí)
- rušení rádiové frekvence (TV, rádio)
- opalování kontaktů, možnost požáru
- selhání zařízení citlivých na pokles napětí

- Spotřebitelé s velmi dynamickým proudovým odběrem (mikrovlákné trouby, vysavače, bojler, různé svítidla atd.)

Následek:

- pokles napětí v průběhu dynamického proudového odběru

- selhání zařízení citlivých na pokles napětí

1.2.4. Měření poklesu napětí a přepětí

V kapitole 1.2.1 v definici napěťového poklesu bylo uvedeno, že musí být měřena změna efektivní hodnoty napětí. Norma uvažuje nejkratší měřící čas 1/2 periody. Měřící zařízení musí měřit skutečnou efektivní hodnotu. Znázornění a vyhodnocení může být provedeno několika způsoby. Časový průběh efektivní hodnoty je zaznamenáván pro každou půlperiodu se začátkem a koncem měření nastaveným na okamžik, kdy se napětí dostane mimo stanovený rozsah

$$\left(1,1 < \frac{U}{U_n} < 0,9 \right)$$

Je tedy možno provádět vypracovávání statistiky "off-line".

$t \geq$ $t <$	20 ms 100 ms	100 ms 500 ms	500 ms 1 s	1 s 3 s	3 s 20 s	20 s 1 min	1 min 3 min	3 min
10 < u ≤ 15								
15 < u ≤ 30								
30 < u ≤ 60								
60 < u ≤ 90								
90 < u								
110 < u ≤ 120								
120 < u ≤ 140								
140 < u ≤ 160								
160 < u ≤ 200								
200 < u								

Tabulka 1 $u = U/U_n \cdot 100$ (%)

Mnohem jednodušším řešením je uložit data vyhovující definici spolu s časem prvního průchodu přes hranici povoleného napětí,

$$\left(\frac{U}{U_n} < 0,9 \right) \text{ nebo } \left(\frac{U}{U_n} > 1,1 \right)$$

a časem trvání události.

Dalším zjednodušením pak je provádět "on-line" statistiku v průběhu měření z údajů odpovídajících definici (viz. obrázek 1), které zvětšují počet členů předem připravené matice. V tomto případě není zaznamenáván čas poklesů napětí nebo přepětí. V normě neexistuje žádná specifikace tohoto druhu statistik.

Tabulka č.1 ukazuje matici, kterou je možno použít pro statistické vyhodnocení měření poklesů napětí či přepětí. Tato matice je navržena skupinou specialistů pracujících u IEC (NORMCOMP).

Neexistuje žádné upřesnění týkající se délky měření. Doporučená doba je 4 týdny.

1.3. Harmonické zkreslení

1.3.1. Původ harmonických

Jeden z faktorů ovlivňujících úbytky napětí je impedance vodiče a dalším pak velikost proudu tekoucí tímto

vodičem. Otázka tedy zní: jak se změní charakter proudu ovlivňovaného zátěžemi v síti nn? První instinktivní odpověď je, že spotřebiče počínaje pračkami přes vysavače až po televize jsou tzv. úsporné spotřebiče, takže se odběrový proud sníží.

Obrázek 2 ukazuje časový průběh napětí a proudu odebíraného televizorem a Fourierovu transformaci tohoto proudu. Tento odběrový proud televize, která je připojena na sinusové napětí je periodický, ale nikoliv sinusový. Tento druh časového průběhu může být charakterizován tzv. Fourierovou řadou.

Periodická funkce může být obecně vyjádřena jako součet nekonečného počtu kosinových a sinusových členů.

Fourierova řada periodické funkce s periodou T je:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

kde

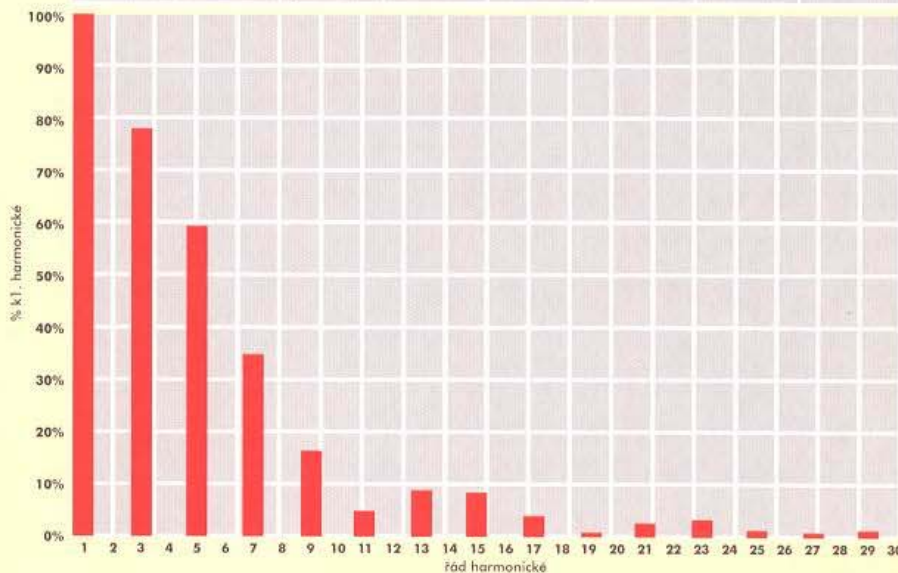
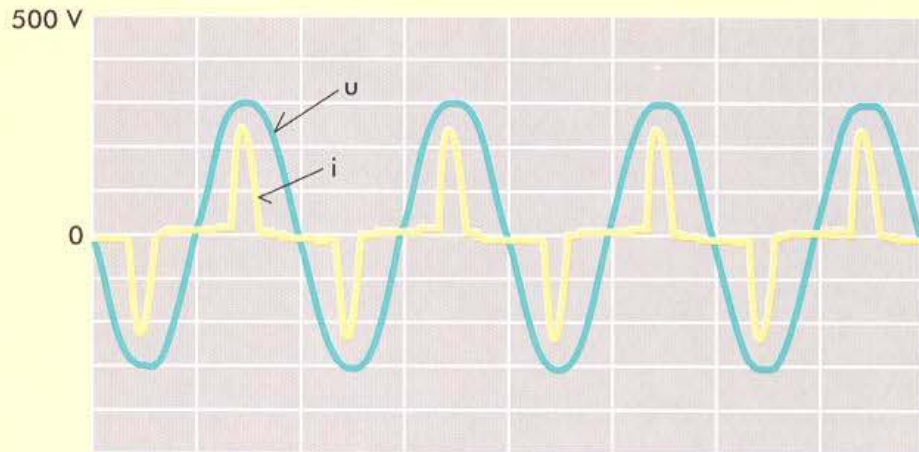
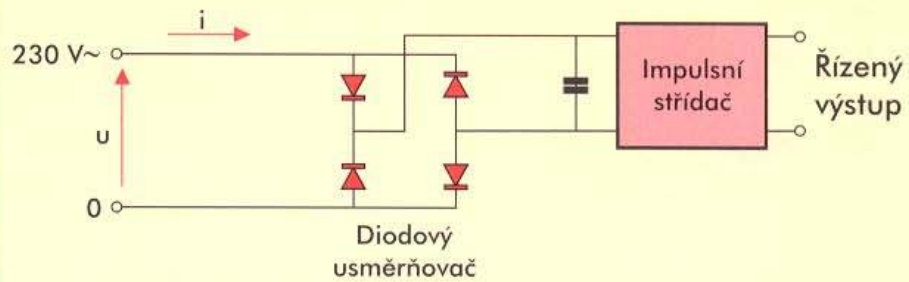
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$$

$$a_0 = \left(\frac{1}{T} \right) \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) d(\omega t)$$

$$a_k = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \cos(k\omega t) d(\omega t)$$

$$b_k = \left(\frac{1}{\pi} \right) \int_{-\pi}^{\pi} x(\omega t) \sin(k\omega t) d(\omega t)$$

$$k = 1 \rightarrow \infty$$



$I = 0,242 \text{ A}$

THD = 108,3 %

Obrázek 2
Napětí a proud
napájecí strany
jednofázového
napěťového střídače

Obrázek 2 ukazuje jednotlivé složky Fourierovy řady. Horizontální osa je osa řádu harmonických a na vertikální ose je vynesena procentní poměr harmonických k amplitudě základní harmonické. Složky, které mají frekvenci větší než 50 Hz (základní harmonická) jsou nazývané harmonické. Harmonické proudy tečou od

nelineárního spotřebiče do sítě a vyvolávají napěťové úbytky na impedanci sítě. Tyto jednotlivé úbytky harmonických napětí vedou k deformaci časového průběhu napětí v porovnání s relativně čistým sinusovým průběhem. Harmonické charakterizujeme jejich frekvencí (např. 250 Hz) nebo poměrem jejich frekvence k frekvenci zák-

ladní harmonické (např. $250/50 = 5$). Toto číslo se nazývá řád harmonické a označuje se písmenem k .

Spotřebiče obdobné tomu jak ukazuje obrázek 2, které jsou napájeny sinusovým napětím, ale přitom neodebírají periodický sinusový proud, se nazývají nelineární spotřebiče. Odběrový proud může být konstantní nebo časově proměnný. V prvním případě je amplituda a frekvence harmonického proudu konstantní, v případě druhém závisí na rychlosti změn. Zátěžný proud má frekvenční spektrum buď tvaru čárového spektra (pomalé změny) nebo spektra spojitého (rychlé změny). Harmonické jsou vyvolávány nelineárními spotřebiči elektrické energie.

Tradiční zátěže u kterých je odběrový proud sinusový a předbíhá (odpor + kapacita) nebo se zpožďuje (odpor + indukčnost) za napětím, se nazývají lineární zátěže. Jejich frekvenční a amplitudové spektrum je složeno pouze z jedné čáry základní harmonické.

Některé příklady nelineárních zátěží na hladině nízkého napětí:

Časově neproměnné: spotřebiče s nasýtitelným železným jádrem, zařízení informační technologie, úsporné svítidla s elektronickým předřadníkem.

Pomalé změny v čase: svítidla řízená stmívačem, zařízení s tyristorovým řízením, mikrovláknové trouby.

Rychle změny: pohony s regulací rychlosti, zátěže s pulsně-modu-

lovaným napájením, svářečí zařízení.

Parametr který charakterizuje nelinearitě se nazývá činitel harmonického zkreslení proudu THD_I (individuálně pak pro jednotlivé harmonické D_I):

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \quad D_I = \frac{I_k}{I_1}$$

kde I_1 je proud základní harmonické

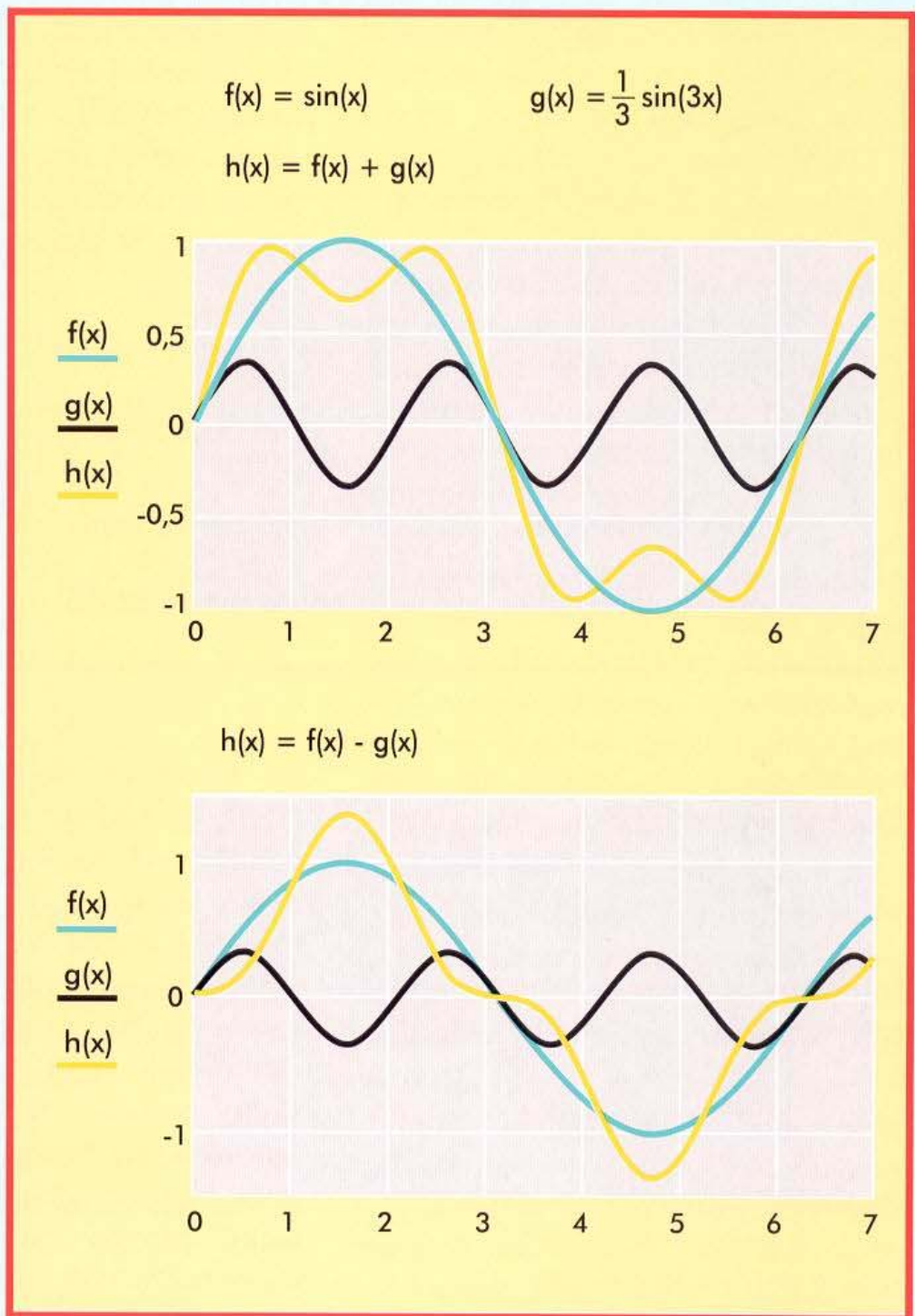
I_k je proud k -té harmonické

Tento činitel je používán také pro napětí (THD_U). Výpočet pro napětí je obdobný výpočtu pro proud.

V dnešní době se velmi často používá jako napájecí jednotky pro spotřebiče s menším odběrovým proudem do 16 A tzv. impulsní napájecí jednotky. Jejich vstupní obvod je jednofázový dvoucestný usměrňovač s kapacitním filtrem ve stejnosměrném meziobvodu. Obvod a jeho proud ukazuje obrázek 2.

Nabíjecí proud je "synchronizován" do maximální hodnoty napájecího napětí a proto všechny takovéto jedno- a trojfázové napájecí jednotky generují fázově identické harmonické proudy. To zvláště platí pro harmonické nízkého řádu např. 3. a 5. harmonická, které mají největší amplitudy.

Z tohoto důvodu v sítích nízkého napětí je zkreslení 3. a 5. harmonickou charakteristické jak pro proud tak pro napětí.



Obrázek 3
Účinek fázového úhlu třetí harmonické na výsledný tvar úhlu

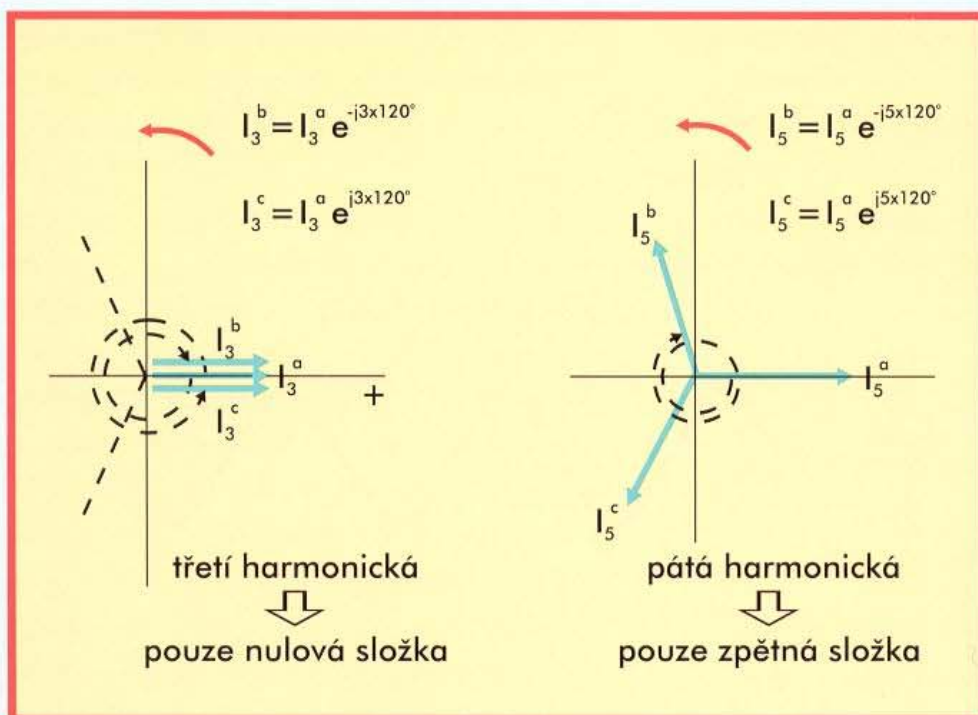
Obrázek 3 ukazuje příklad vlivu 3. harmonické na tvar výsledného průběhu.

1.3.2. Harmonické proudy a jejich šíření v síti

V trojfázovém systému jsou také harmonické ve třech fázích, ale s frekvencí odpovídající jejich řádu. Har-

monické mohou být reprezentovány fázory v kruhovém diagramu, tak jako fázory základní harmonické, a jejich fázový posun je definován symetrickými složkami.

Obrázek 4 ukazuje symetrické složky 3. a 5. harmonické pro případ souměrného zatížení v trojfázovém systému, tj. umístění nulové složky třetí harmonické a zpětné složky páté



Obrázek 4

Symetrické složky třetí a páté harmonické třífázového symetrického systému

harmonické v kruhovém diagramu. Obecně pro k -tou harmonickou platí:

$$I_k^b = I_k^a e^{-jk120^\circ} \quad \text{a} \quad I_k^c = I_k^a e^{-jk240^\circ}$$

Souměrný trojfázový systém sousledné, zpětné a nulové složky je následující:

Nulová harmonická složka:

$$k = 3n$$

sousledná harmonická složka:

$$k = 3n + 1$$

zpětná harmonická složka:

$$k = 3n - 1$$

kde k je řád harmonické a $n = 1, 2, 3, \dots$

Z předešlého vyplývá, že třetí harmonické proudy se přidávají k nulovým složkám proudu a ve středním vodiči tedy potom proud odpovídá trojnásobku proudu třetí harmonické. Pokud je amplituda třetí harmonické proudu téměř rovna amplitudě základní harmonické, jak bychom mohli vidět

v obvodě s napěťovým střídačem ($\text{THD}_1 \geq 100\%$), potom ve středním vodiči trojfázového systému poteče okolo dvoj- až trojnásobku proudu fázového vodiče. V případě symetrické zátěže přispívá pátá harmonická do zpětné složky proudu. Středním vodičem tedy tečou pouze asymetrické složky proudu - ty které přispívají do nulové složky. Pokud známe symetrické složky harmonických proudů, harmonické proudy generované každou nelineární zátěží se mohou počítat také v asymetrickém případě.

Jednotlivé harmonické proudy zátěží lze počítat samostatně jako komplexní veličiny. Vektorový součet proudů zátěží potom vede k výsledku pro každou větev a vektorový součet proudů v jednotlivých větvích dá výsledný proud transformátoru. Pro symetrickou zátěž lze použít jednofázový model: harmonické proudy k -tého řádu jsou složky sousledné, zpětné

nebo nulové v souladu s pravidlem $3n + 1, 3n - 1, 3n$. Pro jednoduchost se dále budeme zabývat pouze symetrickým stavem jak sítě tak zátěže. Součet proudů je proveden pro každý řád harmonické podle následujících vztahů:

$$\operatorname{Re}[I_k] = \sum_i \operatorname{Re}[I_k^i] \quad \operatorname{Im}[I_k] = \sum_i \operatorname{Im}[I_k^i]$$

$$\operatorname{Re}[I_k^i] = I_k^i \cos \varphi_k^i \quad \operatorname{Im}[I_k^i] = I_k^i \sin \varphi_k^i$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}[I_k]}{\operatorname{Re}[I_k]}$$

kde i reprezentuje i -tou zátěž

φ_k^i je fázový posun k -té harmonické proudu i -té zátěže ke k -té harmonické napětí

Napětí k -té harmonické je měřeno na přípojnicí.

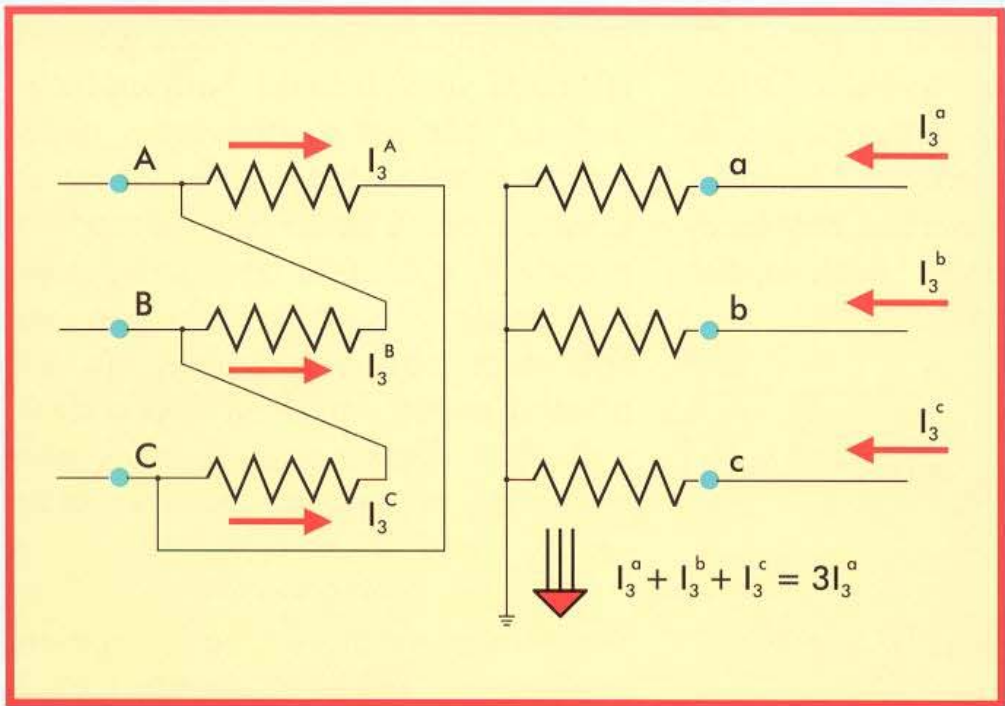
Musíme se zmínit, že existují dvě metody modelování fázového úhlu harmonického proudu pro různé typy nelineárních zátěží. V případě proudových střídačů fázový posun harmonického proudu odpovídá proudu základní harmonické. Tzn. jestliže se proud základní harmonické zpožďuje vzhledem k napětí o úhel φ , fázový posun harmonického proudu k -tého řádu bude $k\varphi$. V případě napájení

napěťovým střídačem (zvláště zařízení IT) bude úhel posunu harmonického proudu odpovídat fázovému napájecímu napětí, tedy úhel $\varphi = 0$. U tohoto druhu zátěží jsou harmonické proudy 3. a 5. řádu dominantní a jejich amplitudy se sčítají. Protože jsou spotřebiče obecně připojeny do sítě nízkého napětí, harmonické proudy 3. a 5. řádu, fázově sečtené, tečou přes nn vinutí napájecího transformátoru vn/nn.

Tyto transformátory mají zapojení trojúhelník / zemněná hvězda (D/yn). Nulová složka charakteru třetí harmonické produkuje buzení transformátoru ze strany nízkého napětí. Nicméně na straně vysokého napětí může nulová složka vyvolávat odbuzení. Tento jev ukazuje obrázek 5. Jádro transformátoru na straně vysokého napětí vyvolává proud nakrátko díky nulové složce od třetí harmonické. Na straně nízkého napětí transformátoru bude zemní a střední vodič zatěžován třetí harmonickou proudu, která je trojnásobkem třetí harmonické proudu fáze. Je zřejmé, že se ztráty transformátoru znatelně zvýší zásluhou této složky proudu třetí harmonické.

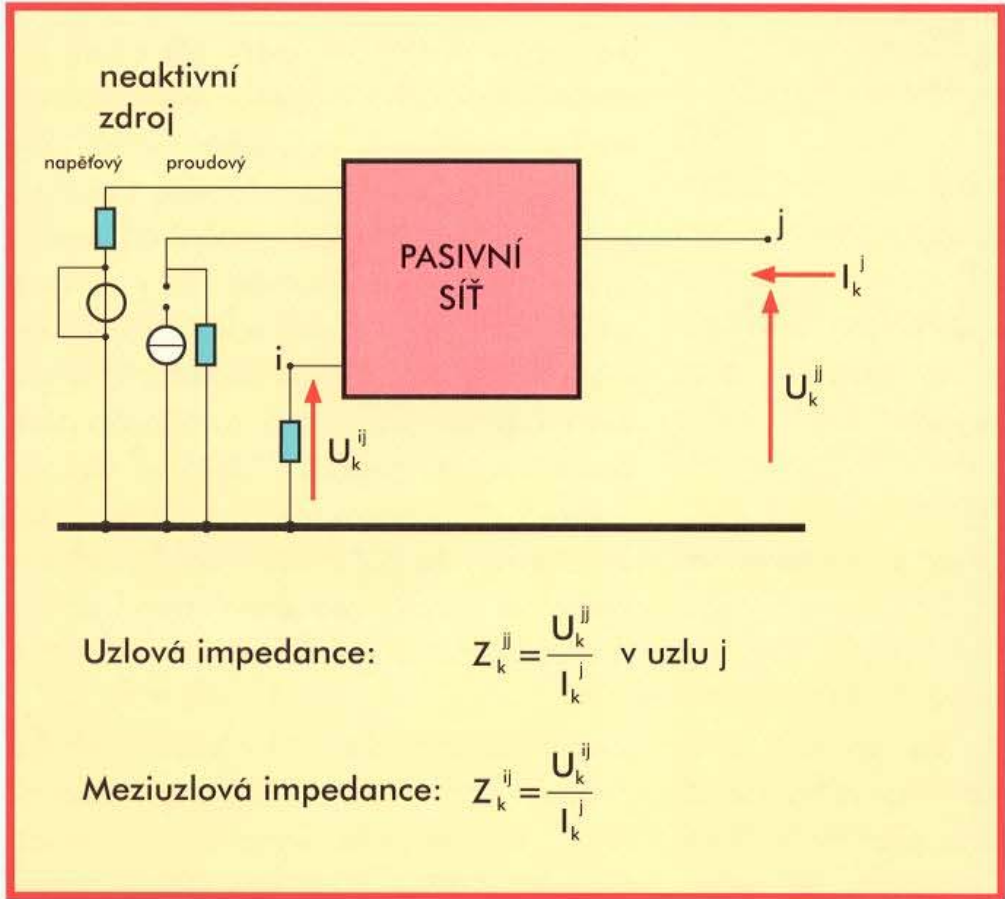
V tom samém okamžiku zpětná složka proudu páté harmonické proudu proniká na stranu vysokého napětí transformátoru. Přirozeně i tento proud způsobuje další ztráty v transformátoru.

Třetí harmonická proudu způsobuje deformaci třetí harmonické napětí transformátoru a je určena třetí harmonickou nulové složky impedance



Obrázek 5

Proudy třetí harmonické u transformátoru zemněná hvězda/ trojúhelník



Obrázek 6

definice uzlové a meziuzlové impedance harmonické k-tého řádu

transformátoru, která je přibližně trojnásobek sousledné složky impedance základní harmonické:

Jiná situace je pro pátou harmonickou.

$$U_3^{Tr} \approx I_3 3X_{Tr}$$

Harmonické proudy generované aktivním zdrojem - proudovým generátorem - „vidí“ výslednou impedanci sítě (napájecí sítě). Tato impedance v oblasti harmonických může být znatelně rozdílná od hodnoty, která může být spočítána použitím zkratového výkonu základní frekvence v bodě připojení zátěže.

Se znalostí jmenovitého napětí je uzlová impedance pro základní harmonickou je:

$$Z \approx X \approx \frac{U_n^2}{S_K^3} [\Omega, \text{kV}, \text{MVA}]$$

kde Z je impedance pro základní harmonickou

U_n je jmenovité napětí

S_K^3 je trojfázový zkratový výkon

Podíváme-li se na obvod z hlediska harmonických, může být Theveninova věta použita postupně pro jednotlivé frekvence a spotřebitele. Uzlovou impedanci jednoho spotřebitele můžeme určit pro určitou frekvenci odstraněním aktivního spotřebitele ze strany sítě pro kterou chceme stanovit impedanci a tím učiníme síť pasivní. (Tímto způsobem by měly být odstraněny všechny proudy a napětí generátorů ze sítě modelováním pouze jejich vstupních impedancí.) Poté, co uděláme síť pasivní, výše popsaným způsobem, injektujeme proud k-tého řádu do sítě ve vybraném bodě spotřebitele a měříme

napětí k-té frekvence v přípojném bodě. Pokud je hodnota injektovaného proudu přesně definovaná, měřené napětí dá přesné hodnoty hledané impedance. Použitím této metody je možné měřit také ovlivnění dalších uzlů sítě tímto zdrojem harmonických (spotřebitelem). Z napětí generovaného injektovaným proudem v jiném uzlu sítě dostaneme meziuzlovou impedanci (poměrem tohoto napětí a injektovaného proudu).

Vytvoříme admitanční matici pasivní sítě, \underline{Y}_k pro k-tý řád harmonické

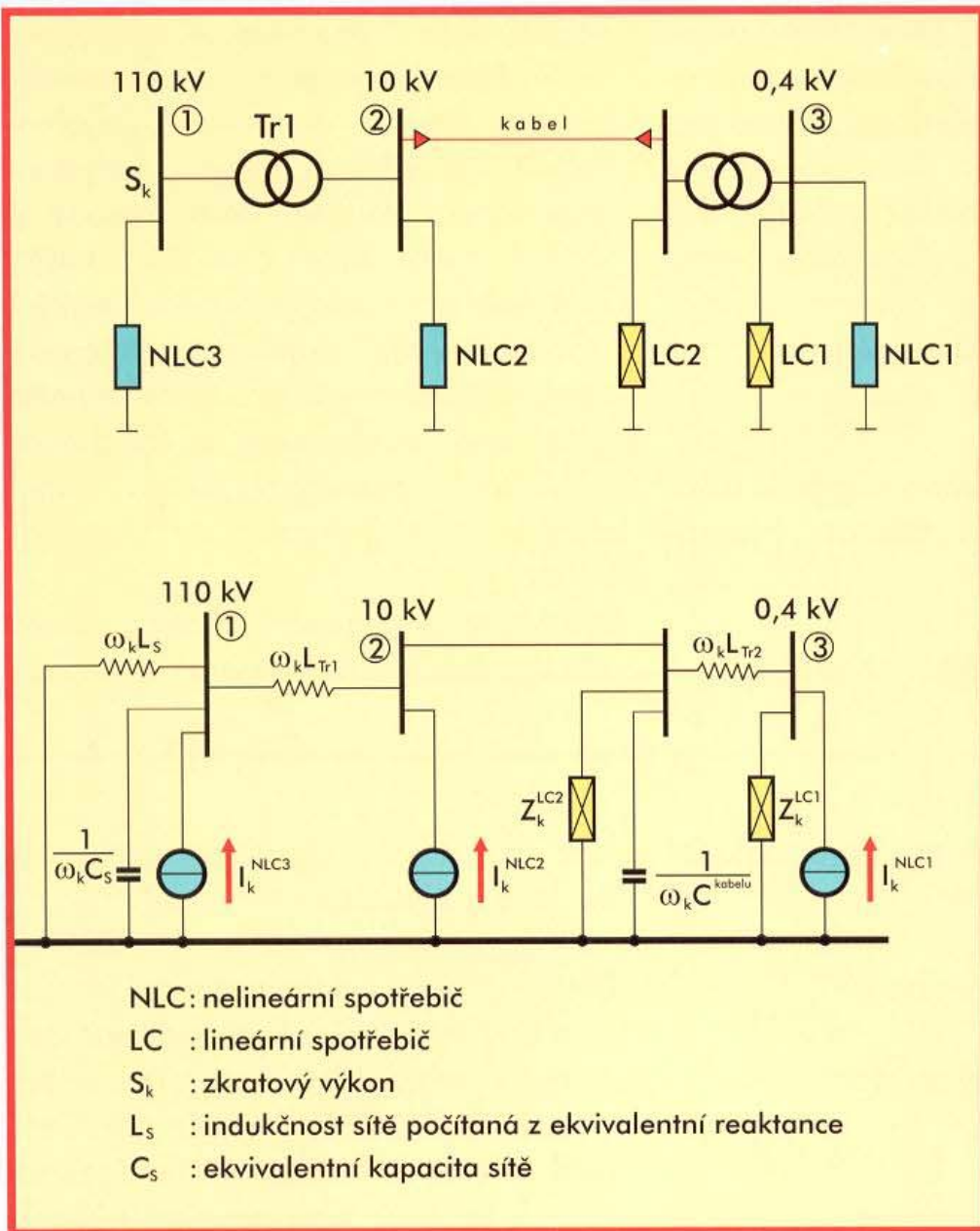
$$\underline{I}_k = \underline{Y}_k \underline{U}_k \quad \underline{U}_k = [\underline{Y}_k]^{-1} \underline{I}_k$$

kde $\underline{Z}_k = [\underline{Y}_k]^{-1}$ je impedanční matice, kterou hledáme.

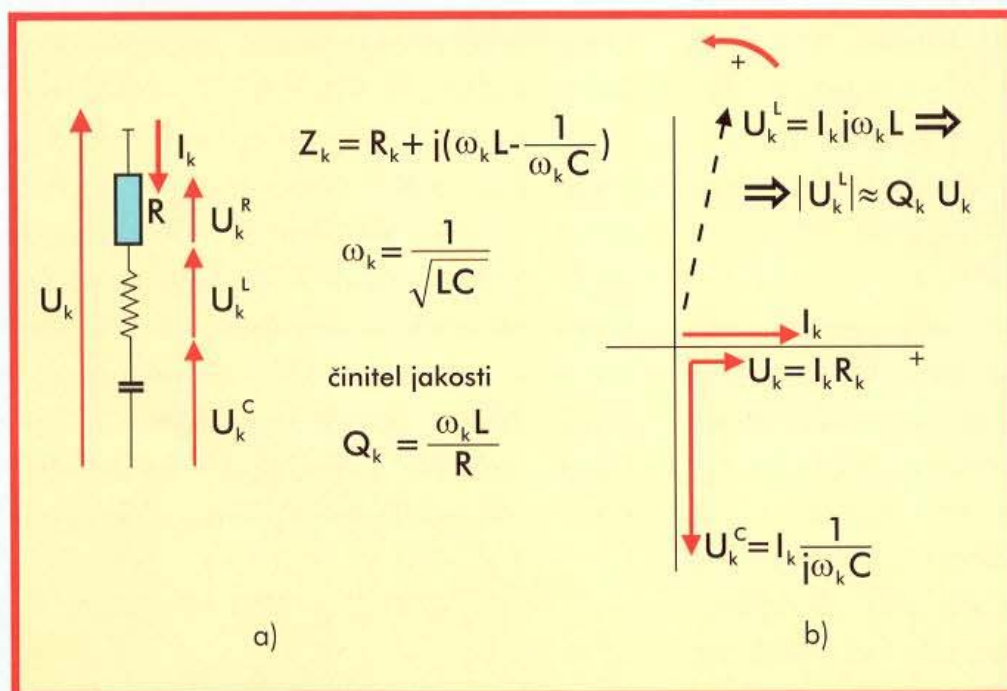
Diagonální prvky impedanční matice jsou hodnoty uzlových impedancí. Další prvky matice jsou meziuzlové impedance mezi jednotlivými uzly sítě. Definiční uzlové a meziuzlové impedance pro k-tý řád harmonické ukazuje obrázek 6.

Dále bude analyzována uzlová matice jednoduché sítě (obrázek 7) z pohledu hladiny napětí nn, vn a vvn. Pokud je nelineární zátěž připojená na síť nízkého napětí, její harmonické proudy \underline{I}_k^{NLC1} (viz. obrázek 7) se budou uzavírat ve směru k napájecí síti. Deformované napětí 0,4 kV k-té harmonické je výsledkem uzlové impedance k-tého řádu, měřené na 0,4 kV přípojnicí, násobené proudem \underline{I}_k :

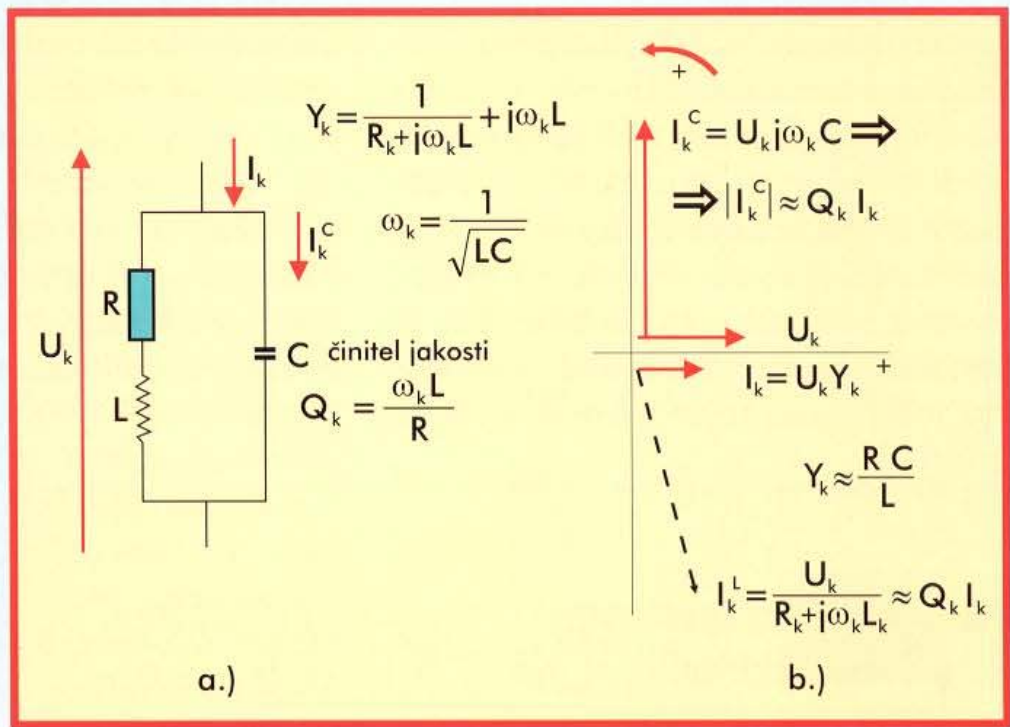
$$U_k^{0,4kV} = Z_k^{0,4kV} \underline{I}_k^{NLC1}$$



Obrázek 7
 Účinek nelineárního spotřebiče na síť (náhradní schema sítě pro harmonické)



Obrázek 8
 Sériová rezonance v R - L - C obvodu



Obrázek 9

Paralelní rezonance
v R - L - C
obvodu

V impedanční matici vztážené k uzlu 3 sítě (obrázek 7) je to element $Z_{3,3}^k$. Abychom mohli spočítat napětí generovaného proudem I_k^{NLC1} na 10 kV přípojnicí, musíme znát přenosovou impedanci $Z_{2,3}^k$. Síť, kterou ukazuje obrázek 7, i v jednoduchém případě může být relativně složitou L-C sítí, kde sériová a/nebo paralelní rezonance nebo stav blízký rezonanci může zvětšit proud nebo napětí k-tého řádu. To znamená, že přes některé prvky sítě mohou téci větší proudy než je jmenovitý injektovaný proud. V případě sítě bez kapacit, přenos harmonických a jejich hodnoty mohou být určeny jednoduše, protože šíření proudu může být počítáno pomocí poměru vodivostí. Ale jako efekt kapacitní reaktance se bude v síti vyskytovat sériový nebo paralelní rezonanční obvod či jejich kombinace a udělá tak celý problém poněkud složitější.

Obrázek 8 a obrázek 9 ukazují, že zvětšení napětí díky vlastnostem sériového rezonančního obvodu a zvětšení proudu zásluhou paralelního rezonančního obvodu jsou proporcionální s činitelem jakosti rezonančního obvodu. V sítích vysokého napětí je hodnota činitele jakosti okolo 10, závisí na velikosti zátěže (spotřebiče redukuje činitele jakosti, protože jsou obecně částečně odporového charakteru a mají tlumící efekt).

Takže neexistuje žádné obecné pravidlo pokud se jedná o šíření harmonických v síti. Pro každý případ se musí provést analýza, zda rezonance může v síti vzniknout a úplně změnit podmínky pro šíření harmonických. Bez znalosti uzlových a meziuzlových impedancí může být nalezena odpověď pouze pomocí měření.

Impedance může být spočítána (pomocí precizního modelu sítě v oblasti harmonických) nebo změřena (měření musí probíhat za provozu sítě, protože harmonická impedance vypnuté sítě je podstatně jiná od impedance provozované sítě). Z výše uvedeného je zřetelné, že jak počítačová simulace tak měření potřebuje velmi důkladnou přípravu.

1.3.3. Problémy způsobené harmonickými

- Síťová rezonance pro určitou harmonickou, která může přepětím nebo zvýšeným proudem namáhat síťové prvky
- Přehřívání a přetěžování síťových prvků (kabely, transformátory)
- Chybná funkce ochran (tzn. různé ochrany transformátoru zareagují z důvodu náhlého velkého zatížení)
- Rušení telekomunikačních vedení (z důvodu indukovaného šumu generovaného nulovou složkou harmonických proudů tekoucích ve vedeních)
- Špatná činnost řídicích obvodů elektronicky řízených zařízení

Z uvedeného seznamu, v sítích nízkého napětí reprezentují reálné nebezpečí: zahřívání, zvýšení ztrát, tavení pojistek, působení vypínače, síťová rezonance a špatná činnost řídicích obvodů elektronicky řízených zařízení.

Samostatně se musíme zabývat zkreslením sítě zásluhou impulzního napájení s vyhlazovací kapacitou na stejnosměrné straně. Toto se vyskytuje převážně v energeticky nenáročných zařízeních. Takovýto typ napájení je používán k napájení jednoho zařízení o výkonu řádově watů až kilowatů. Obrázek 2 ukazuje tvar proudu na primární straně takového zařízení. Proud obsahuje liché řády harmonických a mezi nimi je největší třetí harmonická. Proud odebíraný spotřebičem je přibližně ve fázi s napětím (v průběhu tohoto intervalu je nabíjen vyhlazovací kondenzátor usměrňovače). Proto je tedy třetí harmonická ve fázi s napětím. Pokud v trojfázovém systému budou v každé fázi tři výkonově shodné spotřebiče (např. 3 barevné televize), 120° fázový posun napětí způsobí 120° fázový posun pouze proudu základní harmonické z čehož vyplyne, že nebude nulová složka proudu. Ale v případě třetí harmonické (jak ukazuje obrázek 4) bude fázový posun $3 \times 120^\circ = 360^\circ$ a jako výsledek bude středním vodičem protékat součet třetích harmonických proudů.

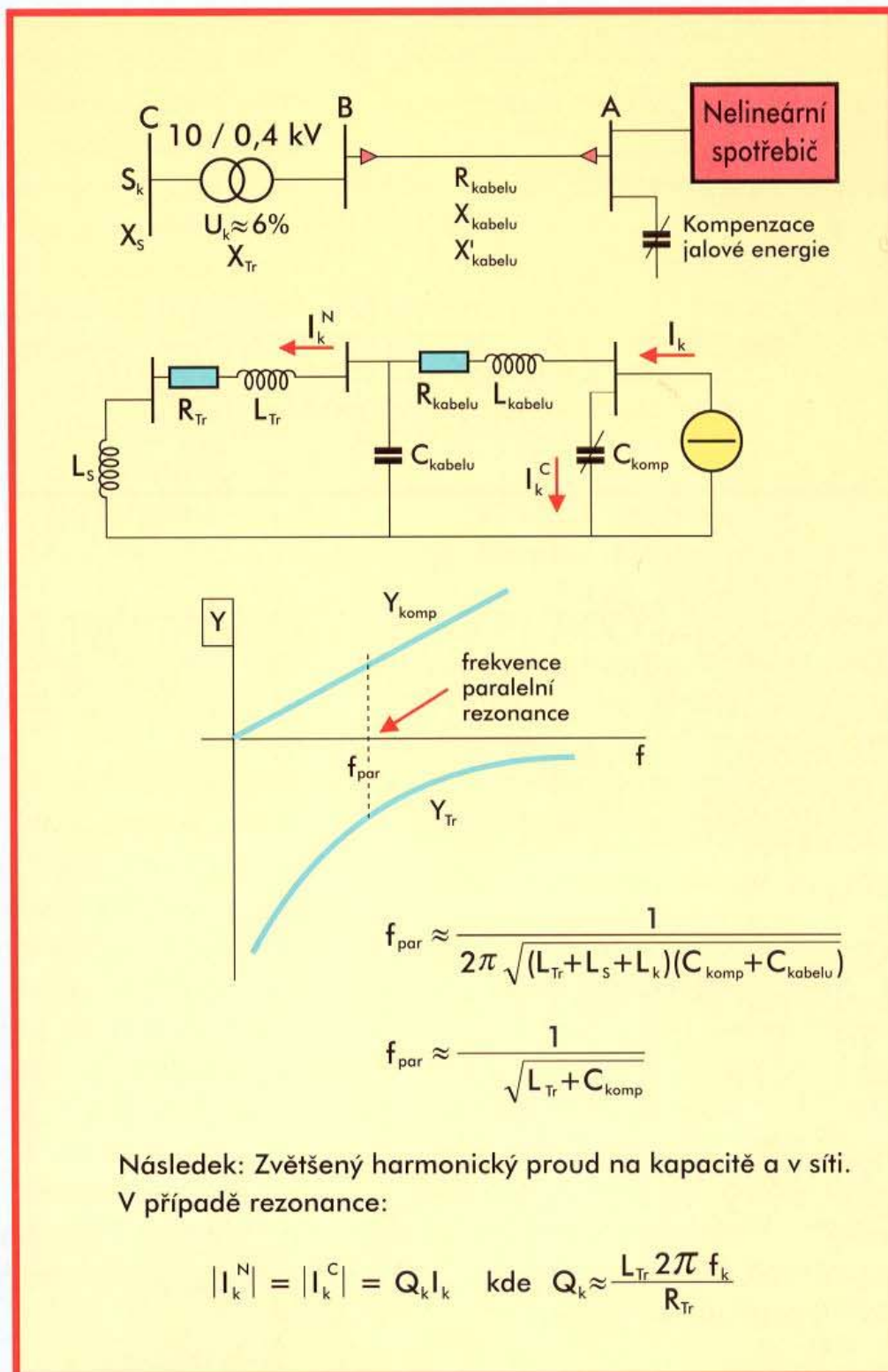
V malé vstupní impedanci napájecího obvodu napěťového střídače třetí harmonická proudu může převýšit hodnotu proudu základní harmonické. V případě čtyřvodičové sítě nízkého napětí, efektivní hodnota proudu ve středním vodiči se může rovnat 2-3 násobku proudu ve fázovém vodiči,

pokud převažují zátěže výše uvedené typu (např. kancelářské budovy bez centrálního střídače).

Mezi projektanty není tento fakt moc dobře znám, takže průřez středního vodiče je ve většině případech roven nebo dokonce menší než průřez

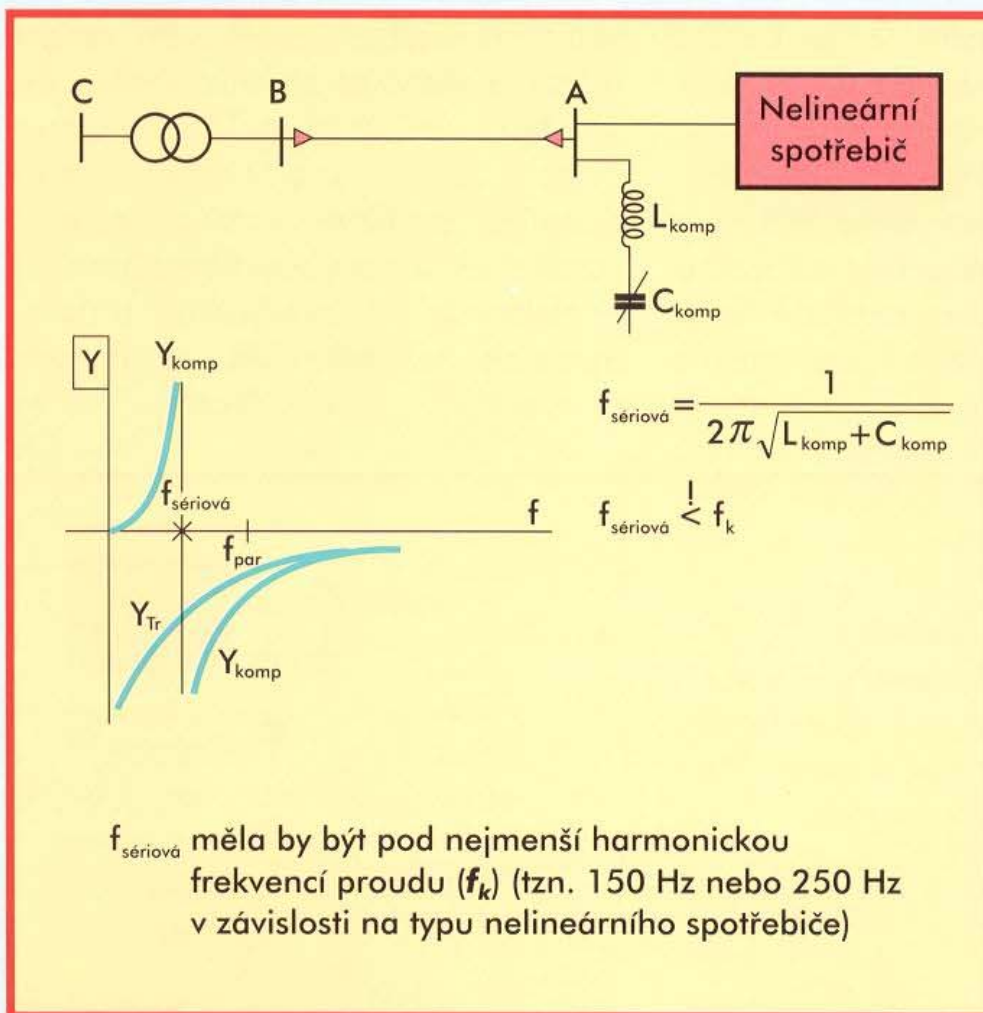
vodiče fázového. Za takovéto situace můžeme očekávat přehřívání středního vodiče.

Speciální problém v sítích nízkého napětí je různost zapalovacího úhlu v elektronických předřadnicích kompaktních svítidel (CFL) z důvodu



Obrázek 10

Paralelní rezonance způsobená čistou kapacitou a indukčností sítě



Obrázek 11

Paralelní rezonance způsobená kondenzátorem a laděným reaktorem, pokud $f_{\text{ser}} < f_k$

různosti napětí. Různost zapalovacího úhlu vede ke změně svítivosti lamp, která se nazývá flickr. Změny napětí mohou být způsobeny změnou obsahu harmonických nebo následky poklesů napětí zmíněných v kapitole 1.2.3.

Zvýšení obsahu harmonických v napětí z důvodu rezonance, může způsobit neočekávané reakce zařízení vybavených ochranou proti zkreslení napětí. Do této kategorie zařízení patří například UPS, které připouštějí na jejich vstupu 5% páté harmonické; při vyšších hodnotách se UPS vypnou a počítače, které jsou připojené na jejich výstup budou vypnuty.

Vznik rezonance a vliv nenaladěného reaktoru v síti nízkého napětí ukazuje obrázek 10 a obrázek 11.

Větší odběratelé (jako např. kancelářské budovy a obchodní centra) jsou provozovány bez výjimky s kompenzací jalové energie. Pro tento účel jsou dostupné automaticky nastavitelné kompenzační jednotky. Musíme upozornit na fakt, že pokud jsou přítomny harmonické, je doporučeno používat pouze kapacity s laděným reaktorem pro filtraci těchto harmonických (hrazená kompenzace). Tímto způsobem se vyhneme šíření harmonických spolu s jejich vážnými destruktivními následky.

1.3.4. Měření harmonických

Jak každý může vidět na jednoduchém časovém průběhu (obrázek 3), 33% obsah třetí harmonické způsobí 33% zvýšení maximální hodnoty, pokud se sečtou dva průběhy opačné fáze (spodní křivky - obrázek 3). Fázový posun třetí harmonické odebíraného proudu na již zmíněných střídačích používaných v informační technologii, napájených usměrňovačem, je shodný s posledně uvedeným případem s výjimkou obsahu třetí harmonické, která činí 100-120% a nikoliv 33%. Pokud zůstaneme u posledně uvedeného případu poměr maximální/efektivní hodnota v případě výsledného proudu je $1,33/0,75=1,77$ což je rozdílné od známé hodnoty 1,41 v případě sinového proudu.

Ve skutečnosti obsah třetí harmonické může být až 100%, pak poměr mezi maximální/efektivní hodnotou dosahuje až hodnoty 2.

Měření harmonických může být prováděno přístroji vyhovujícími normě ČSN EN 61000-4-7. Tato norma se rozsáhle zabývá požadavky na měřící metody a měřící přístroje. Dále jsou sumarizovány nejdůležitější kritéria digitálních měřících přístrojů třídy "A" pro měření harmonických a spektra.

- Frekvenční citlivost proudových a napěťových vstupů v rozsahu 0 Hz až 20 kHz

- Přesnost 0,5%
- Funkce Hanningova okna pro osm period
- Synchronní vzorkování
- Rychlá Fourierova transformace s korekcí fázového úhlu do 50. harmonické
- Spektrální analýza s možností vyhodnocení meziharmonických
- Nejmenší tří sekundová měřící doba v 10s
- Možnost souvislého záznamu měření nejméně po dobu jednoho týdne
- Antialiasing filtr

Mimo již výše zmíněných je také důležitá zásada, která se týká určení zdroje harmonických měření a to je současnost měření. Tato zásada není zmíněna v normě. Proto si myslíme, že současné vícekanálové měření proudů (odběrové větve, přípojnice) a samozřejmě napětí na přípojnici je potřebné pro identifikaci zdroje harmonických a to také v případě, pokud je tento zdroj harmonických nevýrazný vzhledem ke svému okolí a jeho vliv na deformování napětí není rozhodující. V takovéto situaci je nezbytné vyhodnotit výsledky měření správnou metodou, pro kterou je nutný na straně jedné speciální software a na straně druhé dovednost osoby, která hodnocení provádí.

1.3.5. Omezení problémů způsobených harmonickými

V předešlé kapitole jsme popsali původ harmonických, šíření a průnik harmonických, problémy jimi způsobené a měřící metody. Ukázali jsme, že problémy jsou složité a limitované velikostí harmonického zkreslení a jsou společným zájmem konečných spotřebitelů a distribučních společností. Otázka tedy je: kdo a co může dělat k dosažení společného cíle?

Možnost zlepšení kvality elektrické energie ze strany spotřebitelů

Pro spotřebitele na úrovni nízkého napětí jsou následující možnosti:

- Zesílení a rekonstrukce své vlastní sítě. To tedy znamená, že spotřebitel by měl vybudovat samostatnou síť pro nelineární spotřebiče vyvedenou do PCC a její střední vodič navrhnout na dvojnásobný průřez v porovnání s vodičem fázovým. Lineární spotřebiče by měl opět napájet z PCC přičemž tato síť může být projektována dle tradičních způsobů projektování. Těmito kroky se zamezí výskytu deformovaného napětí na impedanci vnitřní sítě pro lineární spotřebiče a to proto, že se proud nelineárních spotřebičů nedostane na vstup lineárních spotřebičů. Tyto budou mít nižší deformaci napětí vyvolané snížením společné impedance (od PCC do napájecího bodu spotřebiče), které je přibližně o 30% menší než by mohlo celé deformované napětí být.
- Filtrování nulové složky, způsobené třetí harmonickou použitím vhodného zapojení napájecího transformátoru. Vhodné je k tomuto účelu již zmíněné zapojení hvězda/trojúhelník, které zamezí průniku třetí harmonické generované nelineárními spotřebiči většího příkonu (kancelářské budovy), může to být i transformátor 0,4/0,4 kV.
- Pasivní filtry harmonických. Pasivní filtr má malou impedanci pro vyladěnou frekvenci. Potom tedy představuje zkrat pro naladěné harmonické vzhledem k napájecí síti. Toto řešení je možné pouze za předpokladu, že filtr nebude přetěžován harmonickými proudy produkovanými vnějšími nelineárními zařízeními. Je to například případ, kdy větší množství zátěží (kancelářské budovy, nákupní střediska) má vlastní napájecí transformátor vn/nn. Tedy na základě dobré znalosti podmínek (harmonické proudy, harmonické poměry na straně vn, zatížitelnost transformátoru, jalová energie) je možné připojit pasivní filtr na stranu nízkého napětí v napájecím bodě.
- Aktivní filtr harmonických. Aktivní filtr harmonických v podstatě znamená vyrobit sinusový odběrový proud pomocí elektronických prostředků. Obecně je elektronická výkonová část pulsně-šířkově modulovaný řízený střídač a automaticky řízený mikroprocesor, který generuje nezbytný proud, který se přidává "proti zkreslení" ke zkreslenému proudu a výsledkem je pak téměř sinusový proud. Aktivní filtr může být použit také tam, kde z určitých

důvodů nemůžeme být použit filtr pasivní, např. k filtrování meziharmonických (tento druh harmonických je generován pohony s regulací rychlosti, kaskádami asynchronních motorů atd.). Jediná jejich nevýhoda je jejich současná vysoká cena.

V žádném případě nelze opomenout zvětšení průřezu středního vodiče, jelikož filtrování se vztahuje vždy na několik spotřebičů najednou z důvodu ekonomické náročnosti filtrace každého spotřebiče samostatně.

V sítích nízkého a vysokého napětí pasivní a aktivní filtrace nelineárních spotřebičů, nebo nějaký způsob jejich kombinace obecně reprezentuje možnost řešení vedoucí k zlepšení kvality elektrické energie.

Zlepšení kvality elektrické energie ze strany distribučních společností

Distribuční společnosti musí dodávat el. energii v souladu s normou ČSN EN 50160. Pokud deformování není generováno spotřebičem samotného spotřebitele, je povinností distribuční společnosti dodržet povolené zkreslení napětí u všech uživatelů. Tímto způsobem je potřeba filtrování rozdělena mezi uživatele. I přesto však dodavatel může poměry v síti přímo ovlivňovat. Je možné zmenšit deformaci napětí na každé napěťové úrovni (pokud vyloučíme nebezpečí rezonance) zvětšením zkratového výkonu na straně napájení, nebo filtrací harmonických (aktivní nebo pasivní).

1.4.1. Definice

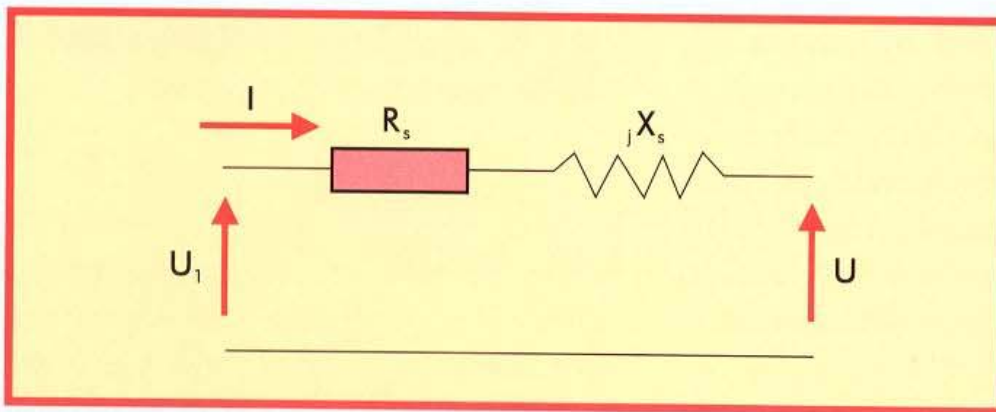
Elektrické spotřebiče, jako například žárovky, připojené do veřejné distribuční sítě, vyžadují pro správnou funkci konstantní napětí. Odběratelé s proměnlivým výkonem však bohužel způsobují měnící se úbytky napětí. Rychlé, periodické změny napětí, které nazýváme kolísání napětí, způsobují jev zvaný flickr. Tento jev se projevuje ve změně zrakového vnímání, které ruší člověka při jeho činnosti. Tyto změny zrakového vnímání jsou vyvolány časovými změnami světelného toku vlivem rychlých změn napětí.

1.4.2. Původ flickru

Charakteristiky napěťových změn lze popsat pomocí modelu napájecí sítě (obrázek 12)

Napětí na spotřebiči (U) je menší než U_1 vlivem úbytku napětí, způsobeného proudem odebíraným spotřebičem (při respektování fázového posuvu) tekoucím přes odpor a reaktanci vedení. Úbytek napětí lze přibližně s uvažováním reálné část vyjádřit takto:

$$U = |U_1| - (I_\epsilon R_s + I_j X_s) =$$



Obrázek 12

Náhradní
schema sítě

$$= |U_1| - \frac{1}{3U^*} (PR_s + QX_s)$$

(kde U je v reálné ose)

Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že změny napětí závisí na změnách činného P a jalového Q výkonu. Změny napětí při změnách zatížení lze vyjádřit takto

$$\delta U \cong \frac{1}{3U^*} (R_s \delta P + X_s \delta Q) =$$

$$= \Delta I_i R_s + \Delta I_j X_s = \delta(\Delta U)$$

V případě konstantního zatížení je $\delta P = 0$ a $\delta Q = 0$ pak i $\delta U = 0$ a napětí se s časem nemění. Definice změn napětí ukazuje obrázek 13.

Definice efektivní hodnoty napětí v čase t_1 je dána vztahem:

$$U(t) = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1 - T/4}^{t_1 + T/4} u^2(t) \cdot dt}$$

kde $T = 20 \text{ ms}$ a $\omega = 2\pi/T$.

Označme $U_{(stř)}$ střední hodnotu těchto efektivních hodnot

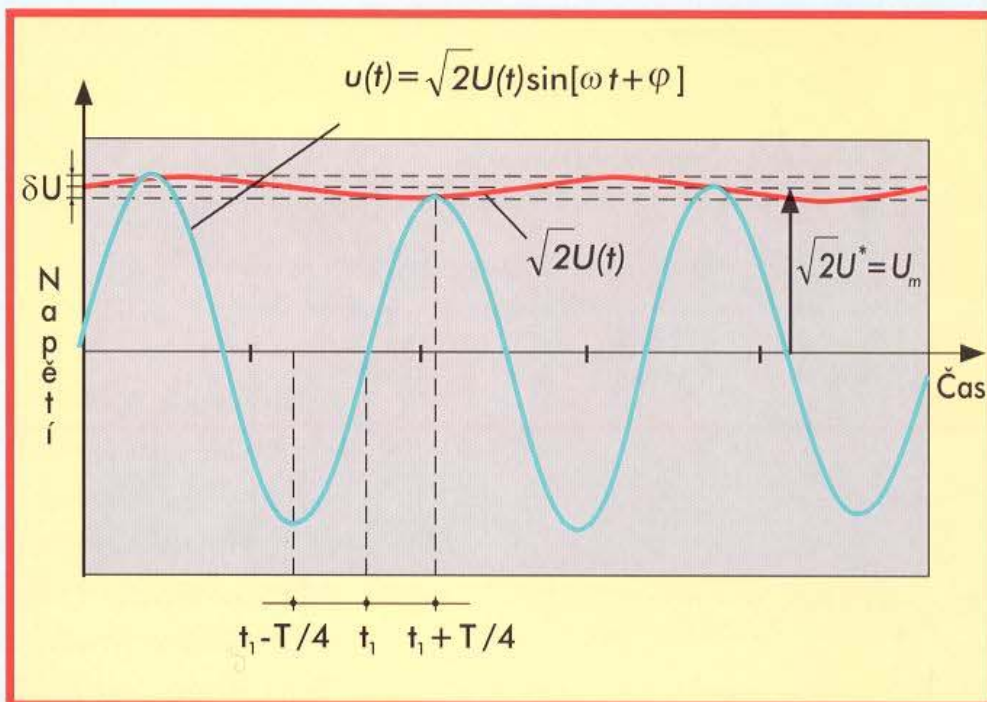
$$U_{(stř)} = \lim \left[\frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot dt \right] = U^*$$

Člověk je citlivý nejen na změny napětí, ale i na jejich frekvenci (viz. obrázek 22)

Spotřebiče a provozní stavy v napájecí síti způsobující flickr:

- spínání velké zátěže
- rozběh velkých motorů (speciálně je-li periodicky opakován)
- proměnlivá zátěž (např. řízený ohřev s velkým výkonem)
- svářečky
- elektrické obloukové pece (EOP)

Nyní ukážeme vznik napěťových změn na příkladu EOP, která je připojena k veřejné distribuční síti se zkratovým výkonem S_k v tzv. společném napájecím bodě (PCC), jak uvádí obrázek 14.



Obrázek 13
Modulace
frekvence flikru

Tedy všechna rušení způsobená elektrickou obloukovou pecí procházejí PCC.

Do série s vn stranou pecního transformátoru je zapojen reaktor, omezující zkratový proud během natavování, protože během tohoto technologického procesu se často vyskytují zkraty.

Amplituda rušení, které budou dále diskutovány, je vztažena k PCC. K výpočtu úbytku napětí opět použijeme model napájecí sítě (obrázek 15)

Označme r rezistancí napájecí sítě a transformátoru. Jeho typická hodnota přepočtená na sekundární stranu pecního transformátoru je

$$r = R_{Tr} + R_s \approx 0,15 \dots 0,4 \text{ m}\Omega$$

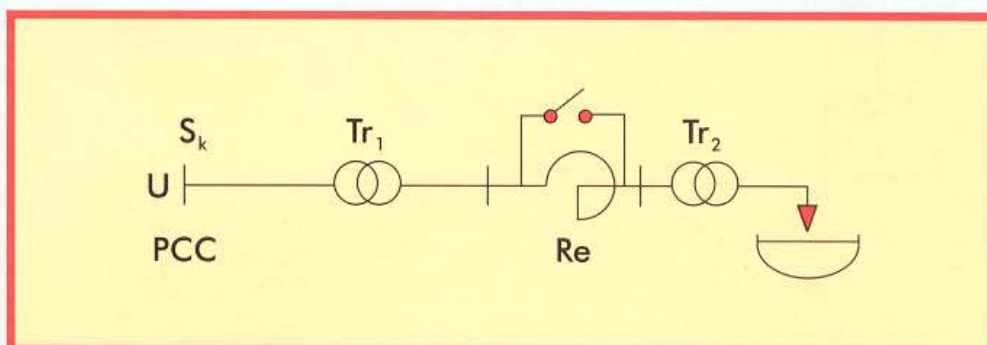
Označme x reaktanci napájecí sítě a transformátoru. Jeho typická hodnota přepočtená na sekundární stranu pecního transformátoru je

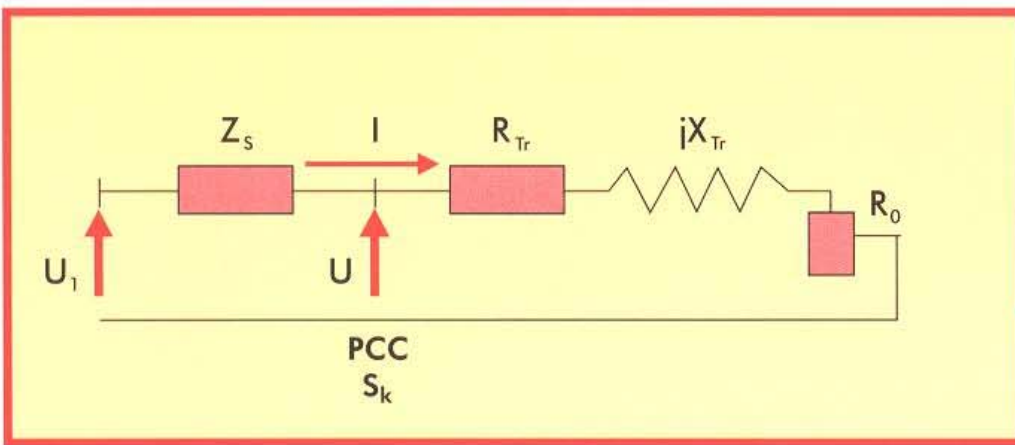
$$x = X_{Tr} + X_s \approx 3 \dots 6 \text{ m}\Omega$$

Proměnlivou hodnotu rezistance oblouku označme R_o . Dále předpokládejme, že napájecí napětí U_1 se během sledované periody nemění. S užitím výše uvedeného označení

$$[(r + R_o) + jx] I = U_1$$

Obrázek 14
Zjednodušené
schéma napájení
EOP





Obrázek 15

Náhradní schéma EOP

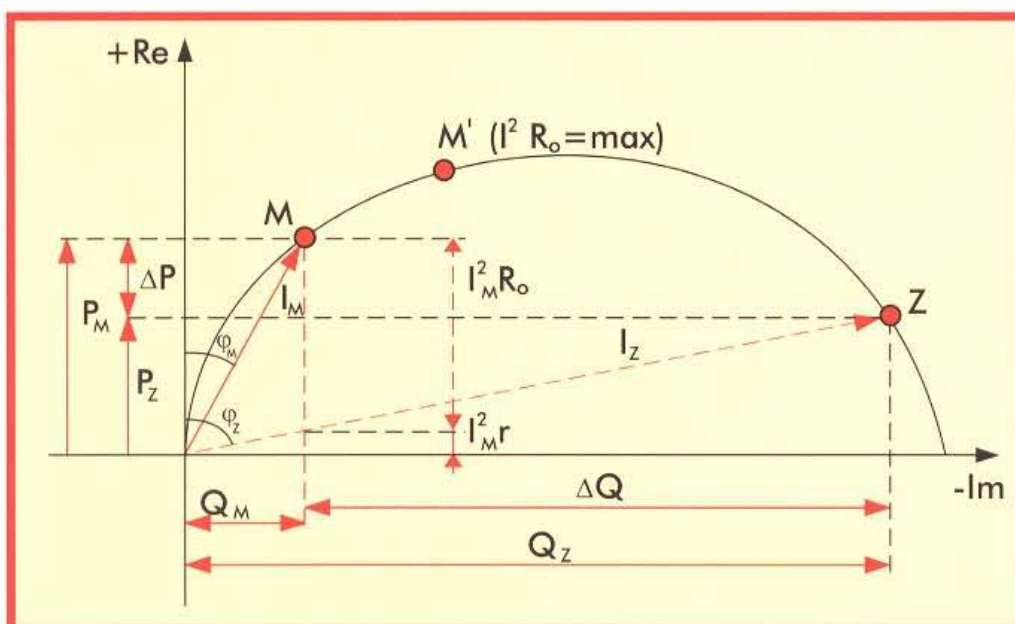
Po úpravě této rovnice

$$I - j \left(\frac{[r + R_o]}{x} \right) I = -j \left(\frac{U_1}{x} \right)$$

Během normálního provozu rezistance oblouku R_o určuje pracovní bod označený M (obrázek 16). V případě zkratu v elektrické obloukové peci se pracovní bod přemístí do bodu Z . Pak je zkratový proud určen impedancí napájecí sítě

$$I_z = \frac{U_1}{r + jx}$$

Jestliže vroste I , pak poklesne U na PCC vlivem úbytku na impedanci sítě. Tedy změny rezistance R_o oblouku způsobí změny napětí v PCC. Amplitudu změn lze vyjádřit pomocí změny P a Q zátěže, přičemž vliv těchto dvou komponent na změny napětí není stejný. Tedy změny napětí U lze rozdělit na dvě části, jednu - způsobenou změnami činného výkonu P a druhou - způsobenou změnami jalového výkonu Q .



Obrázek 16

Kružnicový diagram EOP

Pak změny napětí v PCC

$$\begin{aligned}\delta U &\cong \frac{1}{3}U^*(R_s\delta P) + \frac{1}{3}U^*(X_s\delta Q) = \\ &= \delta(\Delta U_\varepsilon) + \delta(\Delta U_j)\end{aligned}$$

Označili jsme zde složky, které produkují úbytek napětí ve fázi $\delta(\Delta U_\varepsilon)$ při změnách činného proudu a úbytek napětí $\delta(\Delta U_j)$ při změnách jalového proudu. Úbytek napětí vlivem změn činného výkonu může být zanedbán v porovnání s úbytkem napětí způsobeného změnou jalového výkonu vzhledem k poměrům parametrů

$$\frac{R_s}{X_s} \approx 0,1 \quad \frac{\Delta I_\varepsilon}{\Delta I_j} \approx 0,3$$

Pak se výše uvedená rovnice upraví na

$$\delta U \approx \delta(\Delta U) \approx \Delta I_j X_s$$

Při využití výše uvedených poměrů lze též vyjádřit poměr změn P a Q

$$\Delta P \approx 0,3 \cdot \Delta Q$$

Dále pak změna zdánlivého výkonu

$$\begin{aligned}\Delta S &= \sqrt{\Delta Q^2 + \Delta P^2} \approx \sqrt{\Delta Q^2 + (0,3 \cdot \Delta Q)^2} = \\ &= 1,04 \cdot \Delta Q\end{aligned}$$

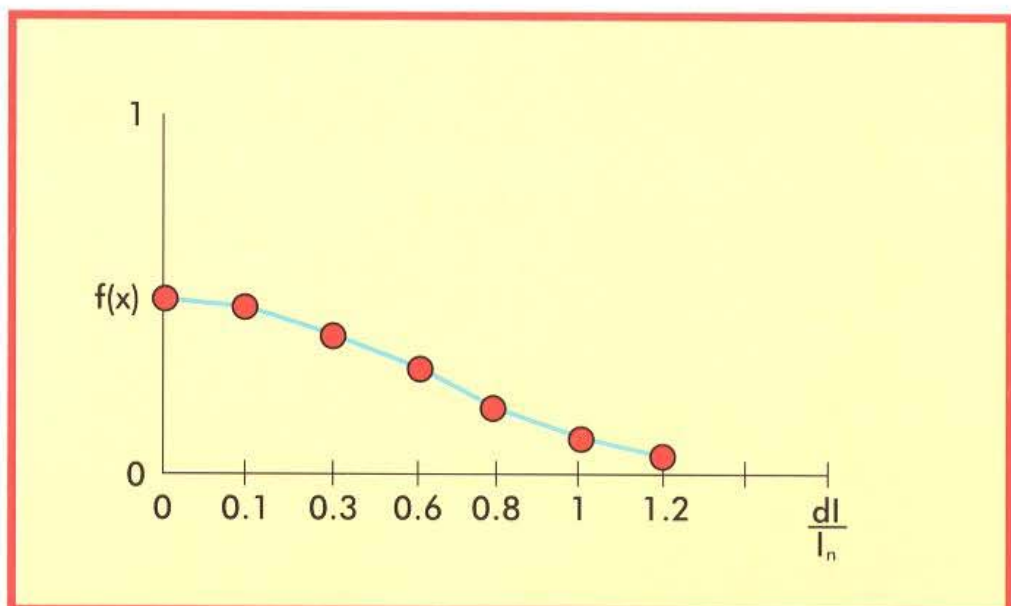
Odtud

$$\Delta Q \approx 0,96 \Delta S$$

Pro výpočet úbytku napětí s využitím výše uvedených zjednodušení

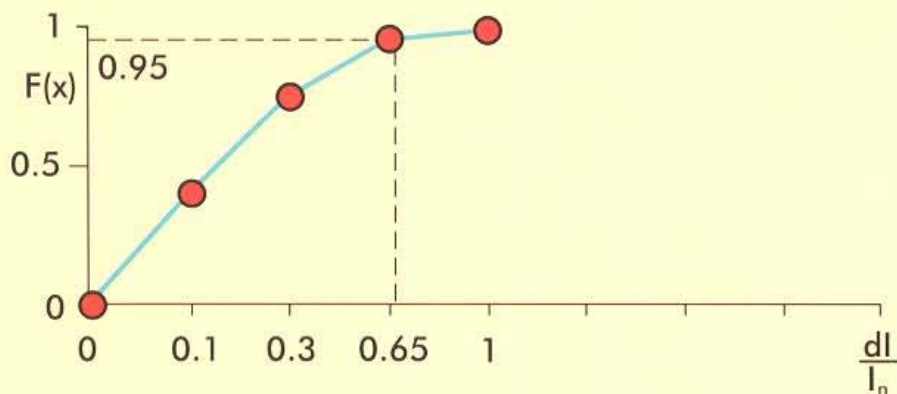
$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{\Delta Q}{S_k} \approx 0,96 \frac{\Delta S}{S_k}$$

Známe statistické charakteristiky (hustotu pravděpodobnosti a distribuční funkci) proudových změn v tavící periodě EOP. Tyto uvádí obrázek 17 a obrázek 18.



Obrázek 17

Funkce hustoty pravděpodobnosti proudu



Obrázek 18

Distribuční funkce proudu

S uvažováním 95% pravděpodobnosti v distribuční funkci získáme hodnotu proudových změn

$$\frac{\Delta I}{I_n} = 0,65$$

a výkonové změny pak budou

$$\frac{\Delta S}{S_n} = 0,65$$

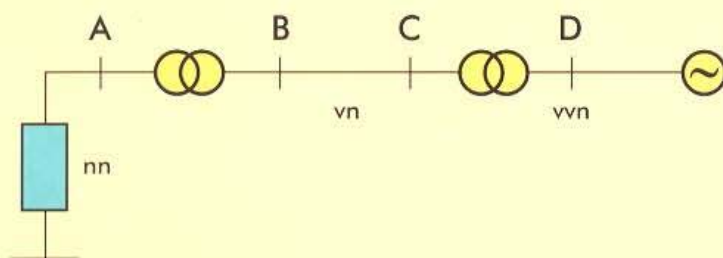
kde S_n je jmenovitý zdánlivý výkon a I_n je jmenovitý proud EOP. Při použití těchto hodnot můžeme získat 95% pravděpodobnostní hodnotu změny napětí při provozu EOP

$$\frac{\Delta U}{U} \approx 0,96 \cdot 0,65 \frac{S_n}{S_k} = 0,624 \frac{S_n}{S_k}$$

S využitím tohoto postupu lze stanovit změny napětí v nízkonapěťové síti při proudovém rázu u spotřebiče.

1.4.3. Šíření flikru v síti

Obrázek 19 zobrazuje analyzovanou síť. Nejprve budeme řešit případ, kdy zdroj flikru je v síti nízkého napětí a nebudeme uvažovat jiné zdroje rušení. Rušení generovaná v síti níz-

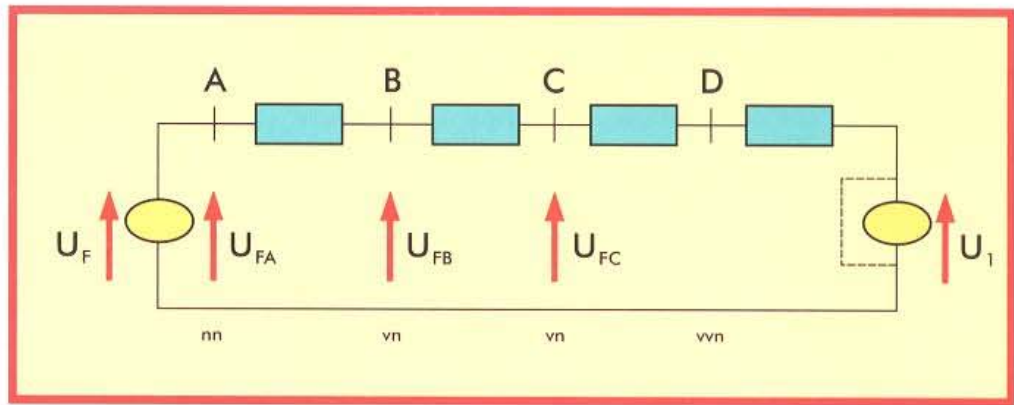


Obrázek 19

Zjednodušené schema sítě

Obrázek 20

Zdroj flickru
na straně nn



kého napětí a šířena do sítě vysokého napětí ukazuje obrázek 20.

U_1 je napětí sítě, body B a C jsou umístěny v síti vn, zatímco bod A reprezentuje stranu nn sítě. Napětí U_F je rušení způsobené zařízením v síti nn. Efekt rušení v napájecí síti bude menší, protože napětí U_F se rozdělí v poměru sériových impedancí. Pak lze stanovit hodnoty flikru na všech napěťových úrovních (body A,B,C) dle vztahu

$$U_{FA} : U_{FB} : U_{FC} = \frac{1}{S_K^{(A)}} : \frac{1}{S_K^{(B)}} : \frac{1}{S_K^{(C)}}$$

kde jsou zkratové výkony v bodech A,B,C. Uvažujeme-li pouze body A,B pak

$$\frac{U_{FA}}{U_{FB}} = \frac{S_K^{(B)}}{S_K^{(A)}}$$

Je-li flikr úměrný změnám napětí, pak krátkodobá míra vjemu blikání P_{st} (definice je v kap. 1.4.5) na těchto dvou úrovních je

$$P_{st}^{(B)} = \frac{P_{st}^{(A)} S_K^{(A)}}{S_K^{(B)}}$$

Tyto vztahy lze užít i pro další napěťové úrovně změnou příslušných indexů. Výsledky potvrzují dřívější úvahy, že rušení generovaná v síti nn se redukuje v síti vn, tedy jejich vliv je lokální.

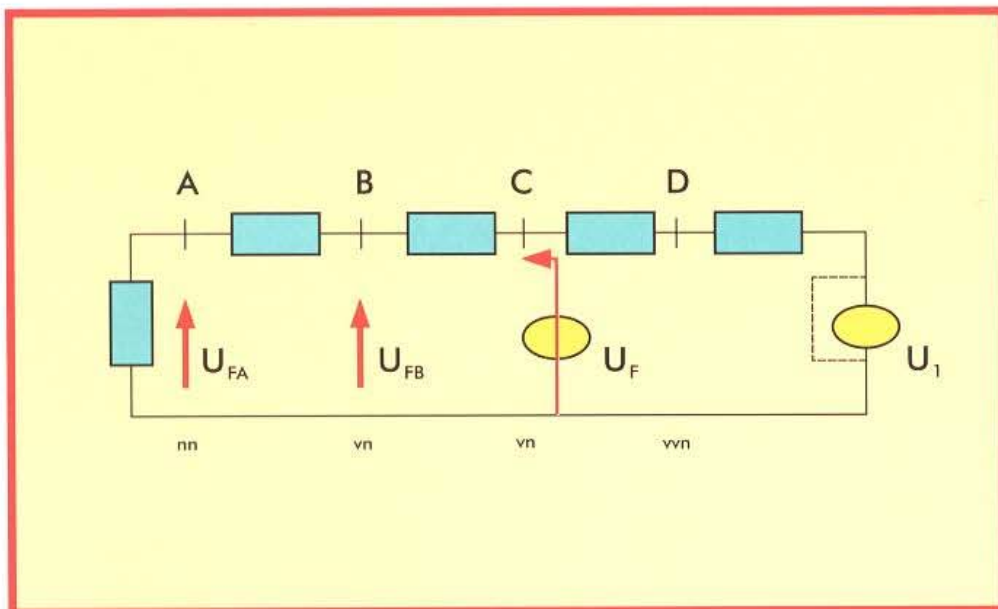
Charakteristiky zdrojů rušení v sítích vn a vvn jsou méně příznivé. Model sítě v tomto případě uvádí obrázek 21.

U_1 je napětí sítě, body B,C a D jsou měřené body sítě vn a vvn, bod A je umístěn v síti nn. Rušivé napětí U_F je generováno v bodě C sítě vn. Jelikož reaktance mezi body A a C je mnohem menší, než mezi bodem A a zemí, objeví se U_F prakticky nezměněné v bodě A. Tedy

$$P_{st}^{(A)} \approx P_{st}^{(B)} \approx P_{st}^{(C)}$$

V bodě D bude efekt rušení značně nižší, podobně jako v případě zdroje v síti nn. Je to dáno tím, že reaktance mezi body C a D je téměř rovna reaktanci mezi bodem D a zemí. Proto lze stanovit

$$P_{st}^{(D)} = \frac{P_{st}^{(C)} S_K^{(C)}}{S_K^{(D)}}$$



Obrázek 21

Zdroj flikru
na straně vn a vvn

1.4.4. Rušivý vliv flikru

Je obtížné objektivně změřit rušivý vliv flikru. Metoda, vyvinutá UIE/IEC pro měření flikru vychází z modelu, který simuluje řetězec "napěťová změna - světelný zdroj - oko - proces vnímání v lidském mozku", dává pozorovateli spolehlivým způsobem reakce na různé druhy flikru. Napěťové změny mají dvě charakteristiky a obě ovlivňují rušivý vliv flikru: amplituda a frekvence (obrázek 22 uvádí povolené hodnoty uvedené v normách).

Bylo zjištěno, že člověk je nejcitlivější na změny napětí o frekvenci 8,8 Hz.

Rušivý vliv flikru se určuje pomocí speciálního přístroje - flikrmetru (měřiče blikání).

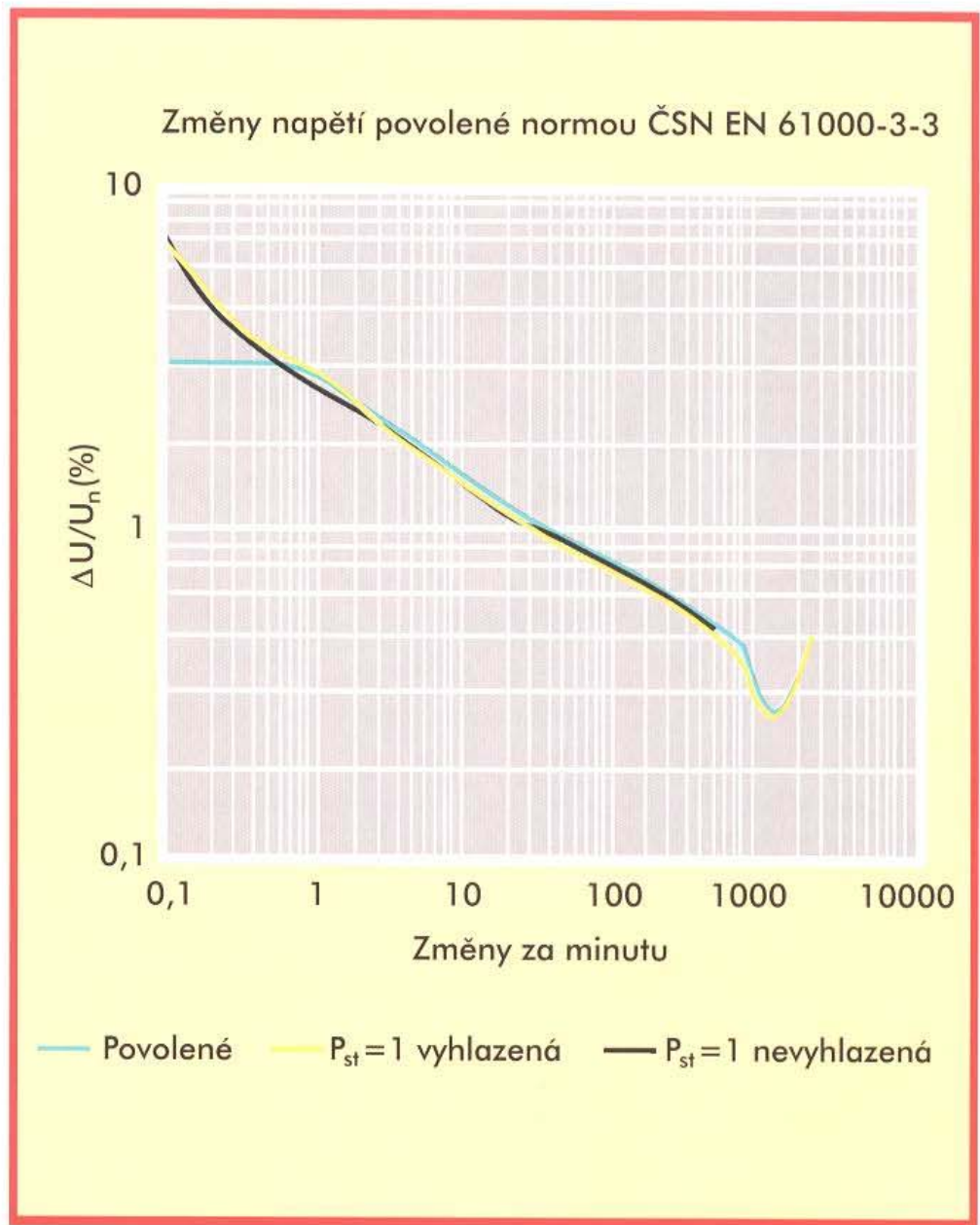
1.4.5. Měřicí metoda

Přístroj, doporučený normou pro měření flikru sestává z 5 jednotek, jak ukazuje obrázek 23.

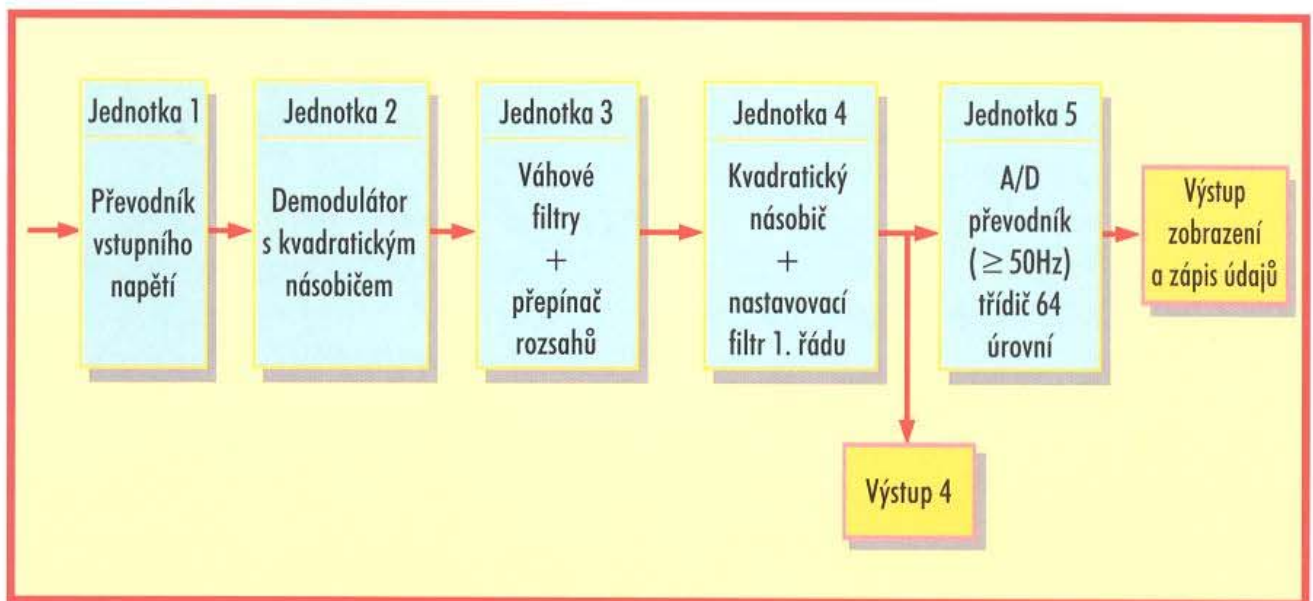
Účelem jednotky 1 je přijmout vstupní napětí a generovat vnitřní referenční napětí. Pak může být měření flikru prováděno nezávisle na napětí sítě a výsledky mohou být zpracovány v procentech.

V jednotce 2 se oddělí napěťové změny způsobující flikr od základního napětí (50 Hz). To se provádí s využitím kvadratické demodulace.

Jednotka 3 obsahuje dva filtry a volič rozsahu. První filtr odstraní stejnosměrnou složku a složku s dvojnásobným kmitočtem sítě na výstupu demodulátoru. Druhý filtr tvoří přeno-



Obrázek 22
Maximální kolísání napětí specifikované normou ČSN EN 61000-3-3



Obrázek 23 Blokové schéma flikrmetru UIE

sovou funkci flikrmetru, což je odezva na kolísání napětí (filtr simuluje frekvenční odezvu lidského zraku na změny svítivosti žárovky, způsobené sinusovou modulací napětí). Přenosová funkce bloku 3 je definována

$$F(s) = \frac{k \omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)}$$

kde

s - Laplaceova
komplexní proměnná

$$k = 1,74802$$

$$\lambda = 2\pi \cdot 4,05981$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot 9,15494$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot 2,27979$$

$$\omega_3 = 2\pi \cdot 1,22535$$

$$\omega_4 = 2\pi \cdot 21,9$$

Jednotka 4 obsahuje kvadratickou násobičku a dolní propust prvního řádu. Simulace lidského vnímání flikru pomocí řetězce - žárovka, oko a mozek - je provedena kombinací jednotek 2,3 a 4. Tedy výstupem z jednotky 4 je okamžitá míra vjemu flikru.

Jednotka 5 obsahuje mikroprocesor, který provádí průběžné hodnocení úrovně flikru a umožňuje přímý výpočet důležitých parametrů. Výstup z jednotky 4 lze využít i pro dodatečné zpracování, které bude popsáno dále.

Jelikož je flikr náhodná veličina vlivem stochastických změn zatížení, předpokládáme, že během sledované periody (v uvažovaném časovém intervalu) se může hodnota flikru měnit v širokém intervalu a nepředvídatelně. Je důležité zjistit nejen nejvyšší hodnotu, ale i zjistit v kolika procentech překročí hodnota flikru určitou úroveň během sledované periody. K tomuto účelu se využívají statistické metody s následujícím postupem

- nejdříve se roztřídí hodnoty naměřených úrovní okamžité míry vjemu flikru na výstupu jednotky 4
- po skončení sledované periody se spočítá distribuční funkce.

Délka sledované periody je 10 min. Dle normy je definován algoritmus pro stanovení krátkodobé míry vjemu blikání

$$P_{st} = \sqrt{(K_1 P_1 + K_2 P_2 + \dots + K_n P_n)}$$

kde K_1 až K_n jsou váhové koeficienty a P_1 až P_n jsou úrovně překročení v distribuční funkci (percentily). V algoritmu dle IEC je definováno 5 úrovní

- $P_{0,1}$ je úroveň, která je překročena jen v 0,1% doby ve sledované periodě
- P_1 je úroveň, která je překročena jen v 1% doby ve sledované periodě
- P_3 je úroveň, která je překročena jen v 3% doby ve sledované periodě

- P₁₀** je úroveň, která je překročena jen v 10% doby ve sledované periodě
- P₅₀** je úroveň, která je překročena jen v 50% doby ve sledované periodě

Odpovídající váhové koeficienty jsou

K_{0,1}	pro úroveň 0.1%	= 0,0314
K₁	pro úroveň 1%	= 0,0525
K₃	pro úroveň 3%	= 0,0657
K₁₀	pro úroveň 10%	= 0,28
K₅₀	pro úroveň 50%	= 0,08

U zátěží, které způsobují během provozu konstantní rušení a mají stabilní cyklus ZAP/VYP bylo pozorováno, že malé změny v délce cyklu mohou změnit jednu z percentil P a tím i vypočtenou hodnotu flickru. Aby se zamezilo nestabilitě při výpočtu, byly zavedeny pro výpočet tzv. vyhlazené hodnoty percentil

$$P_{50s} = \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3}$$

$$P_{10s} = \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5}$$

$$P_{3s} = \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3}$$

$$P_{1s} = \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3}$$

Hodnota **P_{0,1}** se nevyhlazuje, protože se nemůže náhle změnit vlivem zabudované časové konstanty 0,3s ve flickrometru.

Hraniční křivka, viz. obrázek 22, byla mírně upravena dle tohoto algoritmu v oblasti 1 až 0,1 změn/min, byla prodloužena k 7,5% na 0,1 změn/min. Další malý rozdíl je na pravé straně obrázku mezi limitní křivkou a úrovní jednotky vjemu (viz. vyhlazená a nevyhlazená hodnota **P_{st}** obrázek 22). Chyba měřicí metody je pod 5%. Test byl potvrzen v praxi a ukázal, že tato metoda dává správné výsledky pro různé typy rušení, přičemž tato metoda byla vyvinuta tak, že lidé vnímají rušivý vliv flickru pro **P_{st} ≥ 1**.

Krátkodobá míra vjemu blikání **P_{st}** v intervalu 10 min je vhodná pro ověření jednoho zdroje rušení. Pro ověření skupiny zdrojů rušení jako například skupiny zátěží s delším a proměnlivým pracovním cyklem, se používá dlouhodobé míry vjemu blikání **P_{lt}**, která se vypočítá pro intervaly 2 hod. s využitím 12 hodnot **P_{st}** dle vztahu

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Podle normy ČSN EN 50160 nesmí 95% hodnota **P_{lt}** během libovolné měřené týdenní periody překročit hodnotu 1,0.

2. Doporučení dle norem

Část zařízení připojených do napájecí sítě způsobuje rušení a jiná část zařízení je tímto rušením nepříznivě ovlivňována. Je zřejmé, že zavedení regulačních principů (norem) je nutné pro zamezení chaosu, takže je pak dodavatel elektrické energie schopen zvládnout rušení v síti a výrobce je schopen produkovat zařízení odolná proti rušení.

2.1. Harmonické

Zajištění elektromagnetické kompatibility znamená, že emise elektromagnetického rušení jednotlivých zařízení musí být omezena tak, aby výsledné rušení nezpůsobilo vadnou funkci zařízení citlivých na rušení. Tedy norma definuje výslednou celkovou úroveň rušení, kterou pak musí respektovat výrobci tak, aby jejich výrobky byly funkční až do těchto úrovní.

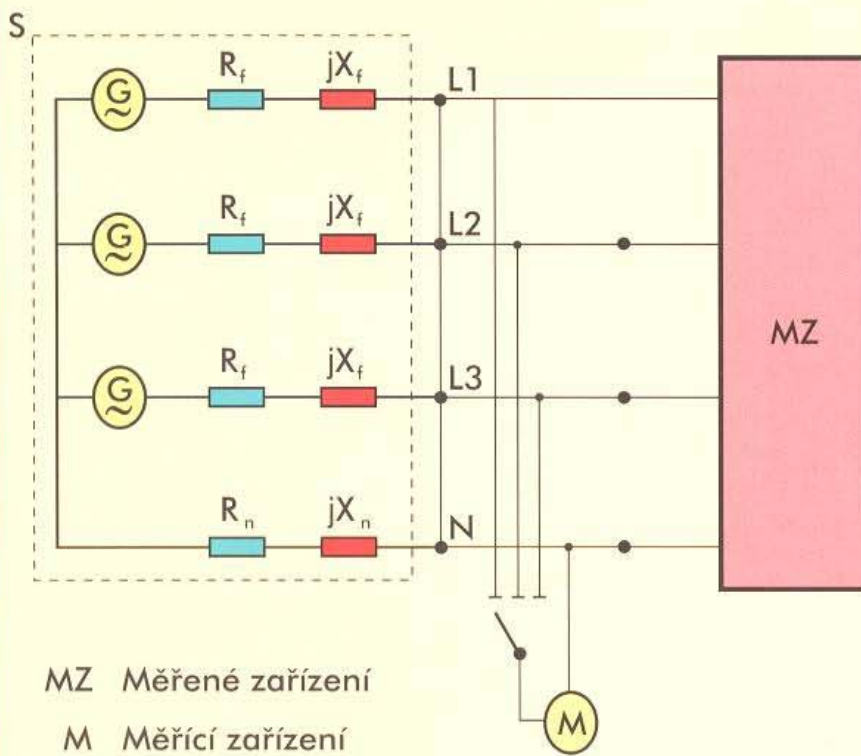
Na druhé straně musí být stanovena dovolená úroveň rušení pro každé rušící zařízení tak, aby jejich výsledná úroveň rušení nepřesáhla dovolenou úroveň.

Normy stanoví úrovně rušení, testovací metody pro rušící zařízení a referenční napájecí síť pro tyto testy.

Obrázek 24 zobrazuje referenční napájecí síť. Musíme zde uvést, že normou udané hodnoty referenční impedance jsou pouze informativní, a protože zkreslení proudu a napětí se navzájem ovlivňují je důležité toto schéma použít pro testování individuálních zařízení.

Tabulka 2 udává mezní hodnoty harmonických proudů pro domácí spotřebiče s jmenovitým proudem do 16 A. Pro televizory a PC jsou mezní hodnoty uvedeny v tabulce 3.

Procentní hodnoty harmonických napětí pro distribuční sítě nízkého napětí jsou uvedeny v tabulce 4.



MZ Měřené zařízení

M Měřicí zařízení

S Napájecí síť s napěťovým zdrojem (G) a referenční impedancí (Z), kde:

$$R_f = 0.24 \Omega ; \quad jX_f = 0.15 \Omega \quad 50 \text{ Hz}$$

$$R_n = 0.16 \Omega \quad jX_n = 0.10 \Omega \quad 50 \text{ Hz}$$

G Napěťový zdroj

Obrázek 24

Referenční síť k testování jedno a třífázových spotřebičů

Řád harmonické (k)	Největší dovolený harmonický proud [A]
<i>Liché harmonické</i>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq k \leq 39$	$0,15 * 15 / k$
<i>Sudé harmonické</i>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq k \leq 40$	$0,23 * 8 / k$

Tabulka 2 Mezní hodnoty harmonických proudů pro domácí spotřebiče do 16 A.

Řád harmonické (k)	Největší dovolený harmonický proud [A]
Liché harmonické	
3	0,80
5	0,60
7	0,45
9	0,30
11	0,17
13	0,12
$15 \leq k \leq 39$	$0,10 * 15 / k$
Sudé harmonické	
2	0,30
4	0,15
ostatní	0,05

Tabulka 3 Mezní dohnoty harmonických proudů pro televizory a počítače

Liché harmonické				Sudé harmonické	
Násobky třetí harmonické		ostatní liché harmonické		řád harmonické	% k první harmonické
řád harmonické	% k první harmonické	řád harmonické	% k první harmonické		
3	5	5	6	2	2
9	1,5	7	5	4	1
15	0,5	11	3,5	6...24	0,5
21	0,5	13	3		
		17	2		
		19	1,5		
		23	1,5		
		25	1,5		

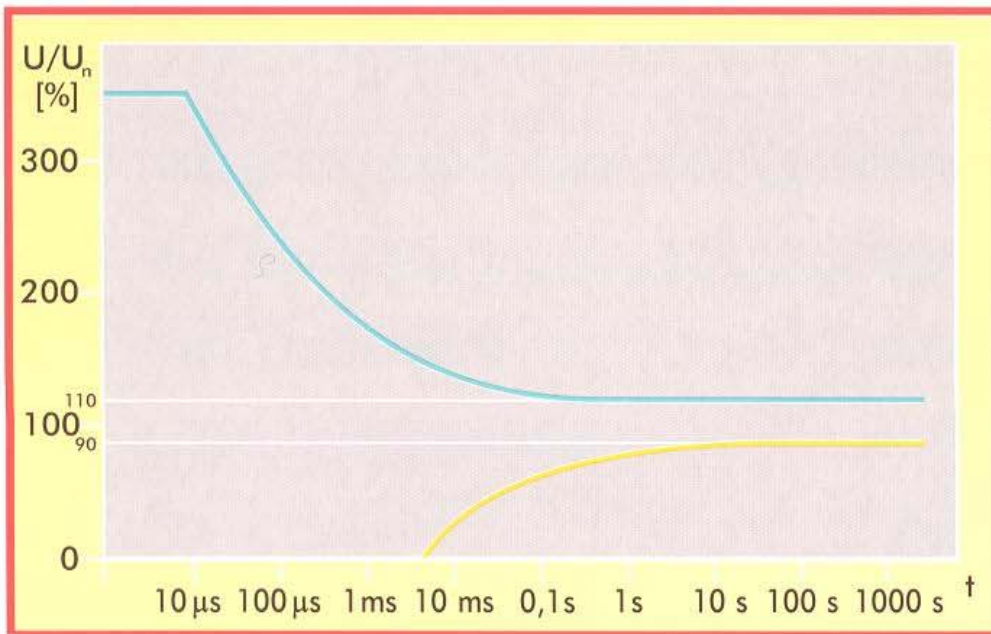
Tabulka 4 Procentní hodnoty harmonických napětí pro distribuční sítě nízkého napětí dle ČSN EN 50 160

2.2. Poklesy napětí, flickr

Existují různé stupně poklesů napětí. Při poklesu pod 85% jmenovité hodnoty po dobu 20 - 40 ms přídržný obvod magnetického spínače zapůsobí a vypne.

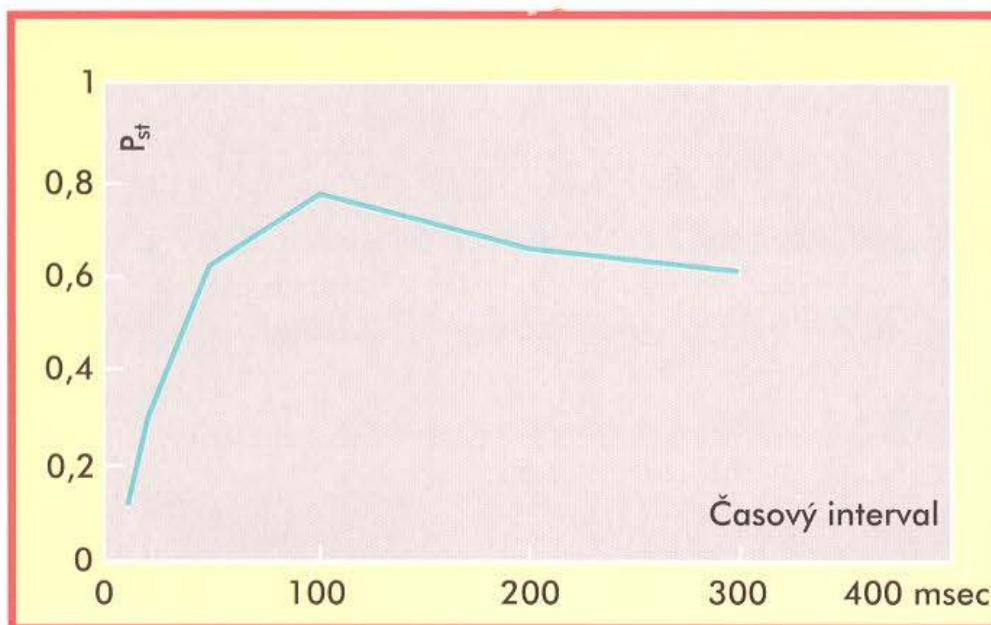
Napětí nad a pod interval označený spojitou čarou (obrázek 25) způsobuje poruchový provoz zařízení informačních technologií, pokud jsou napájená v označených časových periodách.

Pro zajištění bezpečného provozu nesmí spínání velkých průmyslových



Obrázek 25

Bezchybná funkční oblast IT zařízení (CBEMA křivka)



Obrázek 26

P_{st} jako funkce odběrového proudu počítána pro úbytek napětí 5,32%

spotřebičů způsobit poklesy pod 95% jmenovité hodnoty. To souhlasí s přípustnou úrovní flikru, kde změny napětí 5,32% stanoví EN 61000-3-3. Je to zřejmé i na dalším obrázku (obrázek 26), kde je ukázána závislost

P_{st} na době trvání poklesu napětí vlivem proudového rázu. Na obrázku je ukázáno, že pro spínací časy 50 - 200 ms je hodnota $P_{st} \leq 0,8$ pro zajištění bezpečnosti (při mezní hodnotě je $P_{st} = 1$).

3. Problémy způsobené používáním zařízení, které vyhovují normám

V této kapitole ukážeme pomocí jednoduchých příkladů, jaký druh problémů může vyvolat použití zařízení vyhovujících normám, pokud byl průřez vodičů spotřebitelské sítě zvolen podle tradičních principů.

Jak jsme mohli vidět na příkladu napájecí sítě (viz obrázek 24), impedance fázových vodičů a středního vodiče je různá. Impedance se skládá za dvou částí. Reálná část je určena odporem napájecí sítě a podstatný je zde odpor vodiče nn. Induktivní složka je určena zejména rozptylovou reaktancí transformátoru vn/nn a vlastní indukčností napájecího vodiče.

Pokud mluvíme o poklesech napětí způsobených zapnutím spotřebiče, musíme brát v úvahu impedanci celé sítě.

Jestliže předpokládáme, že ekvivalentní impedance referenční sítě představuje model sítě až do PCC, pak je třeba vzít v úvahu síť od PCC k spotřebiči, aby bylo možno modelovat napěťové vztahy uvnitř spotřebitelské sítě. Úvahy provedeme s uvažováním poklesů napětí a harmonických. V našich výpočtech předpokládáme, že průřez středního vodiče (a tedy i jeho odpor) je roven průřezu fázového vodiče.

Analyzujeme zapnutí 800W mikrovlnné trouby. Impedance referenční sítě v případě tohoto jednofázového spotřebiče je :

$$Z = Z_f + Z_n = 0,4 + j0,25 \Omega \Rightarrow$$

$$\Rightarrow |Z| = 0,471 \Omega$$

Maximální hodnota zapínacího proudu je 38,75A (viz. obrázek 27), tedy okolo desetinásobku jmenovitého proudu.

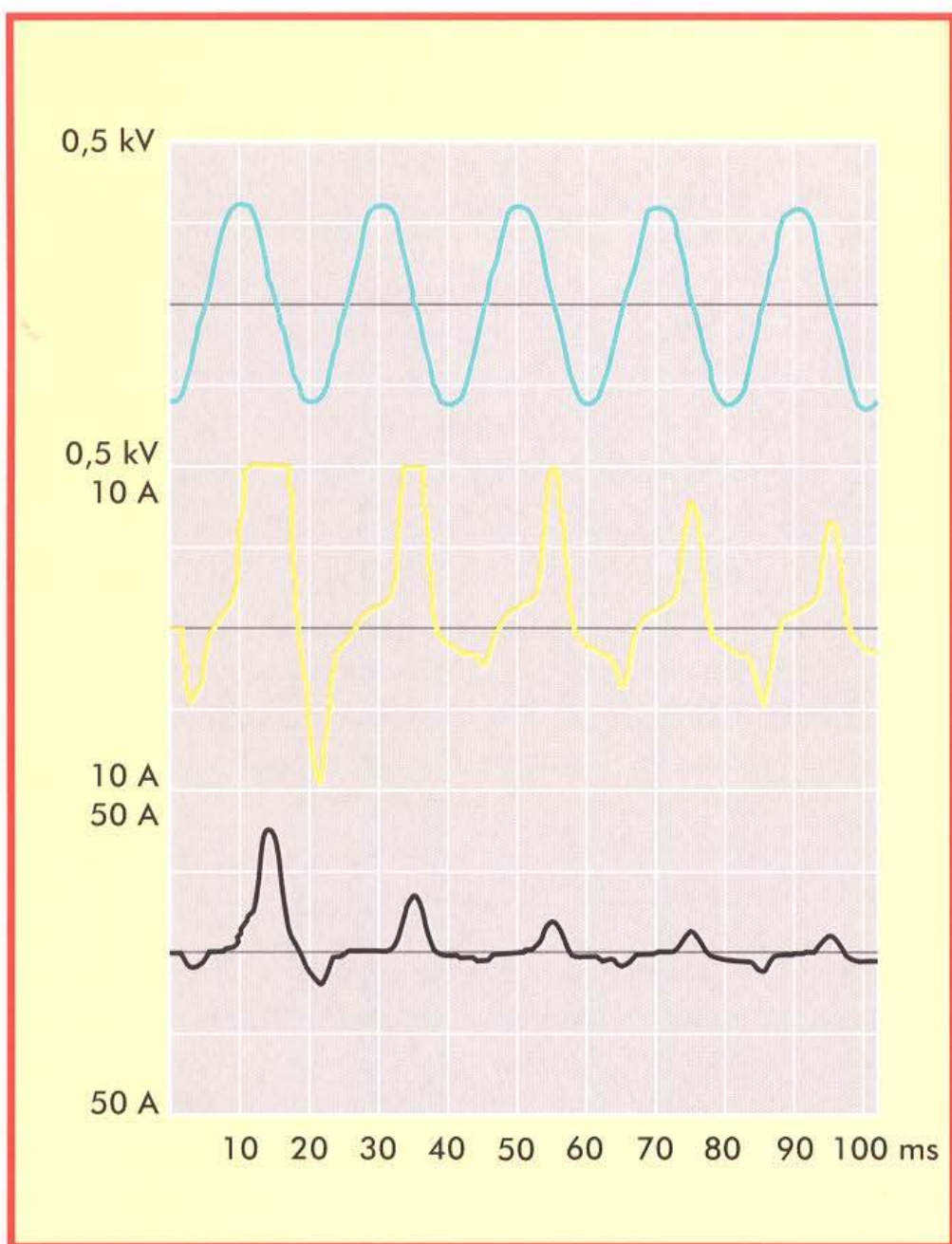
$$\Delta U \approx I |Z| = 38,75 \cdot 0,471 = 18,28 \text{ V}_{\max}$$

$$\frac{\Delta U}{\sqrt{2}U_n} \approx 5,62 \%$$

Maximální hodnota zapínacího proudu se sníží na dvojnásobek jmenovitého proudu asi během pěti period. Hodnota poklesu napětí, bereme-li v úvahu pouze referenční síť, nepře-

kračije hodnotu doporučenou normou. Dále uvažujme impedanci části vodiče mezi PCC (elektroměr) a přípojním bodem mikrovlnné trouby. Zde lze uvažovat pouze činnou složku impedance. Předpokládáme 20 m vodiče, počínaje od PCC, s průřezem 2,5 mm² Cu a 15 m s průřezem 1,5 mm² Cu až k zásuvce mikrovlnné trouby, jak ukazuje obrázek 28.

$$\begin{aligned} \Delta U &= \left[2 \cdot 15r(1,5 \text{ mm}^2) + 2 \cdot 20r(2,5 \text{ mm}^2) \right] \approx \\ &\approx 13,36 \text{ V}(1,5 \text{ mm}^2) + 10,69 \text{ V}(2,5 \text{ mm}^2) = \\ &= 24 \text{ V}_{\text{max}} \end{aligned}$$

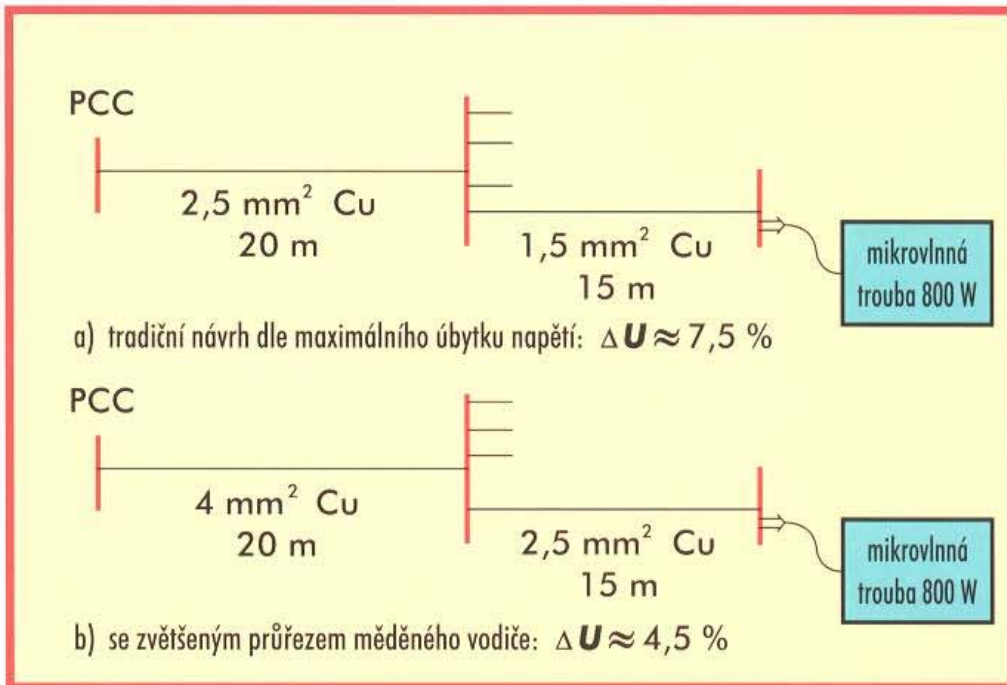


Obrázek 27

Zapnutí mikrovlnné trouby o výkonu 800 W

Obrázek 28

Připojení
mikrovlnné trouby
na napájecí síť



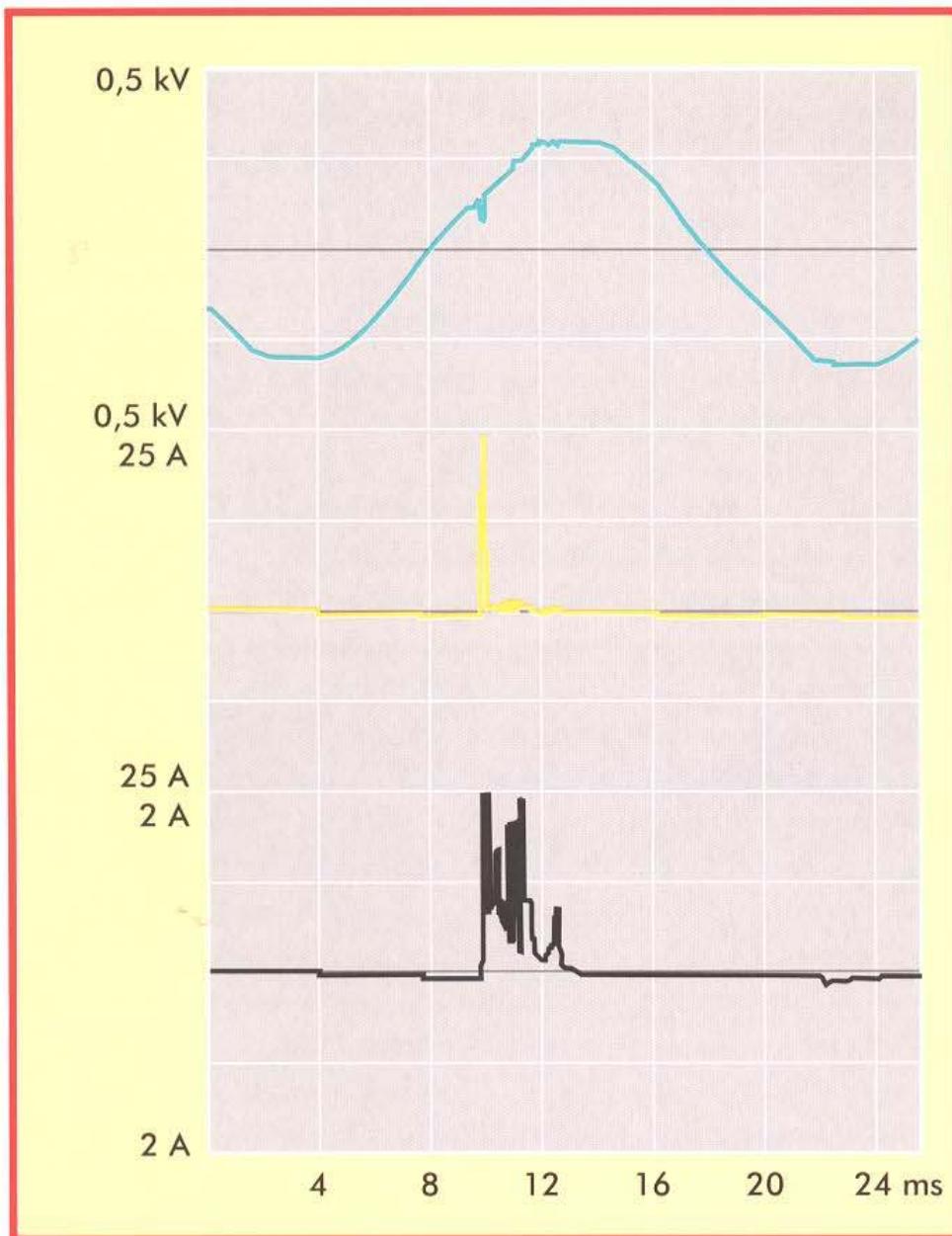
Je vidět, že při volbě tradičního průřezu měděného vodiče je úbytek napětí ve spotřebitelské části sítě o třetinu větší, než úbytek napětí v napájecí síti. Výše uvedené poklesy napětí mohou způsobit rušivé blikání světla, protože relativní změna napětí bude okolo 7,5% místo hodnoty 5,62%, což je blíže povolené hodnotě. Změnou průřezu vodiče z 2,5 mm² na 4 mm² a z 1,5 na 2,5 mm² se sníží poklesy napětí ze 7,5% na 4,5%.

Zapnutí mikrovlnné trouby je pouze příklad, kterým jsme ukázali jeden druh účinku spotřebiče na síť - flickr. Na základě tohoto příkladu můžeme říci, že tento druh odezvy sítě (flickr způsobený zapínacím proudem) může být omezen snížením maximální hodnoty zapínacího proudu - to může po adekvátním vývoji zajistit výrobce zařízení - nebo snížením odporu vnitřní spotřebitelské sítě - což může být zajištěno zvětšením průřezu vodičů. Pokles napětí způsobený zapínacím proudem kompaktních svítidel má

menší, ale ne zanedbatelný vliv na flickr efekt, jak ukazuje obrázek 29.

Nyní analyzujeme efekt harmonických v sítích. V případě televize je proud třetí harmonické $I_3 = 0,8A$, což odpovídá normou povolené hodnotě. Toto v podstatě také platí pro osobní počítače. V dalším příkladě považujeme jako průměr pouze $I_3 = 0,5A$. Jak jsme detailně vysvětlili v bodě 1.3, třetí harmonická generovaná zařízením informačních technologií se prakticky přičítá ve stejné fázi a to i v případě symetrické trojfázové zátěže (jednofázovou zátěž dokonale rovnoměrně rozdělenou do tří fází), ve středním vodiči teče součet tří fází proudu třetí harmonické zátěže.

Závěrem tedy je, že proudy třetí harmonické od všech nelineárních spotřebičů se uzavírají skrze střední vodič. Proudů třetí harmonické televizorů a osobních počítačů tedy mohou být sčítány aritmeticky.



Obrázek 29

Odběrový proud
20 W CFL

Prozkoumejme nejprve kancelářskou budovu, ve které je 6 pater s 20 kancelářemi na jedno patro a 10 počítači na jednu kancelář. To znamená celkem 1200 počítačů, z nichž předpokládejme 600 pracujících současně. V tomto případě samotný proud třetí harmonické ve středním vodiči má hodnotu 300 A. Přívodní fázové vodiče jsou navrženy na 250 A a vzhledem k tomu, že nebyla brána v potaz zátěž způsobující třetí harmonickou (počítače), byl střední vodič navržen také na 250 A. Střední vodič bude tedy zjevně

proudově a tepelně přetížen. Tento stav by měl být brán v úvahu při dimenzování.

Dalším příkladem je obytná čtvrť s 600 byty, kde v každém bytě je televizor a počítač. O víkendu každý z nich pracuje, což znamená 600 A třetí harmonické ve středním vodiči. Výše uvedené okolnosti způsobují kromě zhoršení kvality elektrické energie (velké harmonické napěťové zkreslení) také významné zvětšení ztrát.

Ve fázovém a středním vodiči je možno samostatně spočítat činitel harmonického zkreslení proudu

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}$$

Narůst ztrát, vzhledem ke ztrátám na základní frekvenci při zanedbání skin-efektu, je poměr mezi výslednými ztrátami (ΔP_c) a ztrátami na základní frekvenci (ΔP_1) :

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_1} = 1 + THD_I^2$$

Pro proudy v televizorech a počítačích je:

$$THD_I \approx 110\% = 1,1 \text{ a } \Delta P_c / \Delta P_1 = 2,21,$$

což platí pro fázové vodiče.

Zde jsou také dvě řešení. Jedna možnost je snížit obsah harmonických v odběrovém proudu spotřebiče některou z již dříve uvedených metod (tzn. v kancelářských budovách: použít UPS a vy-stavět separátní počítačovou síť). Jinou možností je zvětšení průřezu fázových vodičů zhruba o 50% a středních vodičů nejméně o 100% vzhledem k původnímu návrhu (pro proudy bez harmonických) .

4. Nejdůležitější důvody pro projektování dle nového stylu

Jako závěr z výše uvedeného vyplývá, že změna struktury spotřebičů změnila pohled na praktické návrhy instalací. Nové úvahy jsou následující:

- Poklesy (úbytky) napětí při neobvykle velkých záběrových proudech by měly být omezeny. Řešení: zvětšit průřez vodiče
- Při znalostech skladby nelineárních spotřebičů a hodnoty síťové impedance by měl být systém prověřen na pravděpodobné problémy s harmonickými a mělo by být nalezeno řešení (filtrace, oddělení spotřebičů, oddělení sítí).
- Správný průřez středního vodiče by měl být vybrán velmi pečlivě. Obecně lze považovat za vyhovující v síti s nelineárními spotřebiči, je-li dvojnásobkem průřezu fázového vodiče.
- Realizovaný systém by měl být prověřen měřením při různých předpokládaných pracovních režimech.
- Zemnicí systém by měl být velmi pečlivě navržen a instalován. Tato studie se však touto problematikou nezabývala.