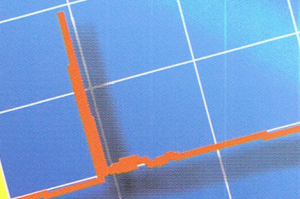
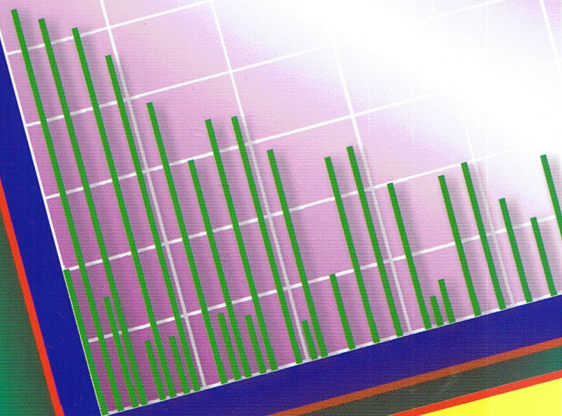
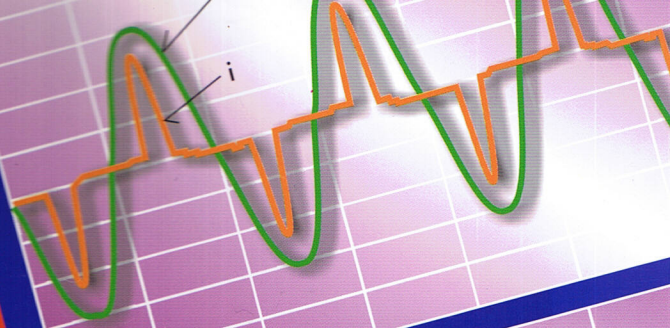
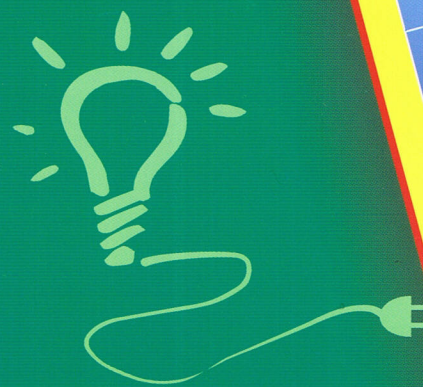
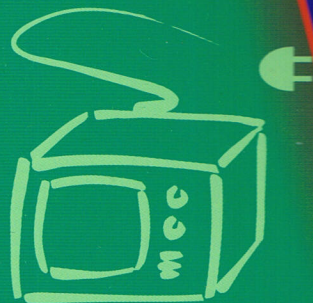


Kvalita dodávané elektrické energie v sítích nízkého napětí

(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, která vyhovují normám	41
4	Hlavní důvody pro projektování dle nového stylu	47

Úvod

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

V publikaci se rovněž budeme zabývat ukazateli, jež charakterizují kvalitu elektrické energie, dále pak vzájemnou vazbou mezi kvalitou elektrické energie, jednotlivými spotřebiteli a některými částmi norem, jež definují kvalitu elektrické energie. Následně porovnáme, jak na kvalitu elektrické energie působí spotřebič, jehož napájecí měděné vedení je projektováno „tradičně“, a spotřebič, při jehož projektování byly brány v úvahu jeho nové parametry.

V závěru je provedeno shrnutí všech důležitých závěrů týkajících se navrhnutého nového projektování průřezu měděného vedení.

1. Charakteristické ukazatele kvality elektrické energie

Budeme se zabývat pouze těmi ukazateli kvality elektrické energie, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 50160 pro síť nízkého napětí a mohou být zlepšeny zvětšením průřezu vodiče rozvodné 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 přírodním vedením ke spotřebiteli, vyvolává úbytky napětí, jež závisí na vzdálenosti spotřebitele. Tyto úbytky mohou způsobit změnu velikosti napětí v místech, kde jsou připojeni koneční spotřebitelé. Proto je napětí lokálním parametrem elektrické sítě. Na straně druhé i zátěže proměnlivé v čase 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):

$$\Delta U = I_\epsilon R_s + I_j X_s$$

kde R_s a X_s je činná a induktivní část síťové impedance, I_ϵ 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 $Z_f + Z_n$ (impedance fázového + středního vodiče)
- pro symetrické trojfázové odběry 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. V tomto případě nás tedy nezajímá úbytek napětí na napájecím kabelu vn/nn transformátoru, který vlastní rozvodná společnost. Impedance související s úbytkem napětí se skládá ze dvou částí, a to z induktivní části, která je dána zejména rozptylovou indukčností transformátoru, a z části odporové, kterou

tvoří zejména odpor vodiče nízkého napětí. Vzhledem k poměru velikostí obou částí impedance je možné v síti nízkého napětí uvažovat o tom, 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, zůstává napětí v mezích tolerance, které jsou specifikovány pro nejhorší případ spotřebitelského zatížení.

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

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 uživatele. Další pokles napětí může způsobit špatnou funkčnost, to závisí na typu zařízení (např. ztráta dat v zařízení IT), nebo úplné vypnutí zařízení (např. v případě magnetických vypínačů).

1.1.3. Měření napětí

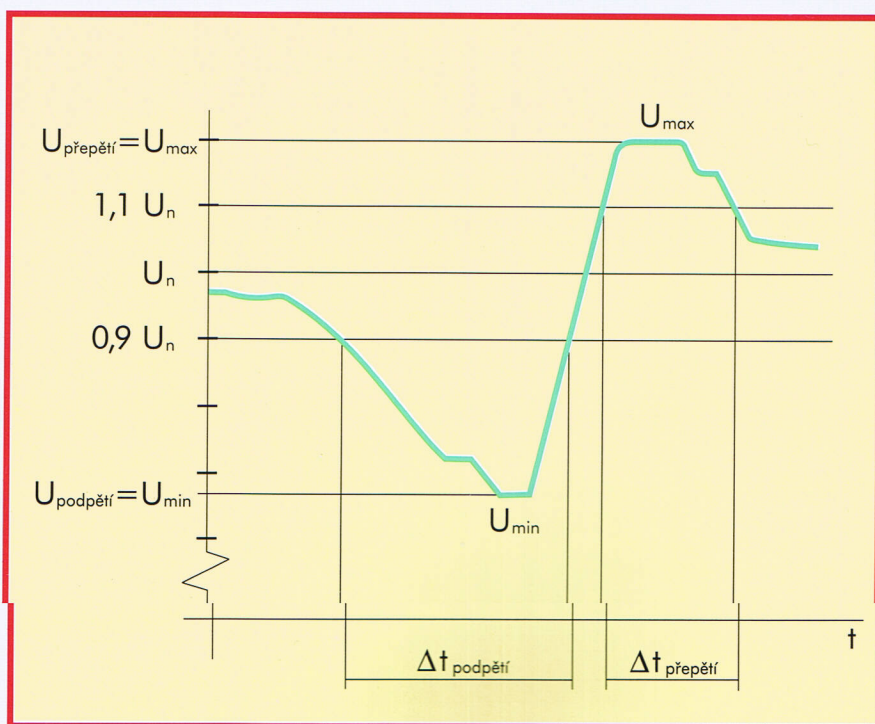
Napětí je možné měřit u spotřebitele, v PCC nebo kdekoliv jinde. Pro spotřebitele je důležitá velikost napětí v přípojném bodě, takže je možno měřit pouze amplitudu (velikost) napětí. Měřicím zařízením a měřicími metodami se zabývají normy ČSN EN 61000-4-7 a ČSN EN 50160. Měření je prováděno digitálními přístroji v reálném čase a základní měřené hodnoty se průměrují za 8 nebo 16 period, z nichž je stanovena 3 sec hodnota pro tzv. velmi krátký časový interval. Z nich je pak vypočítávána a zaznamenávána průměrná hodnota každých 10 minut. Tímto způsobem je definována metoda měření pomalých změn napětí, jejíž pomocí je možno vytvořit statistické podklady pro praktické využití 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: trváním napěťového poklesu a nejmenším poměrným napětím v době poklesu napětí. („Poměrné“ znamená, že změřená hodnota napětí je vztažena ke jmenovité hodnotě napětí.)

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



Obrázek 1
Definice poklesu napětí a přepětí

Pokud napětí poklesne pod 1% jmenovité hodnoty, nazýváme to přerušení 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 bereme v úvahu napětí, které překročilo 110% jmenovité hodnoty.

Definici poklesu napětí 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 zprůměrovaných 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 neznámá, 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 můžeme zabránit správnou činností ochran.

Delší přerušení nazýváme výpadky napájení.

Dalším důvodem přechodného poklesu napětí (přepětí) může být příliš pomalé napěťové řízení elektrického systému, za což je rovněž zodpovědná distribuční společnost (např. po náhlém odlehčení zátěže).

Pokles napětí nebo poruchové události způsobené uživateli jsou vytvářeny v síti spotřebitele; za předpokladu dobře navržené sítě jsou účinky těchto událostí v PCC velmi malé a další spotřebitel připojený do stejné sítě není při jejím 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 povoleny.

1.2.3. Poruchy a jejich působení na spotřebitelskou síť

Události a faktory působící poklesy napětí a jejich následky:

- 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

- spotřebiče s velmi dynamickým proudovým odběrem (mikrovlnné trouby, vysavače, bojler, různá 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 bere v úvahu nejkratší měřicí čas 1/2 periody. Měřicí 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 nastavenými na okamžik, kdy se napětí dostane mimo stanovený rozsah.

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

Je tedy možno provádět vypracování 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 zvyšují 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, již je možno použít pro statistické vyhodnocení měření poklesů napětí či přepětí. Tato matice byla 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

Jedním z faktorů ovlivňujících úbytky napětí je impedance vodiče a dalším pak velikost proudu tekoucího 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. úspornými spotřebiči, takže se odběrový proud sníží.

Obrázek 2 ukazuje časový průběh napětí a proudu odebíraného televizorem a Fourierovu transformaci tohoto proudu. 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

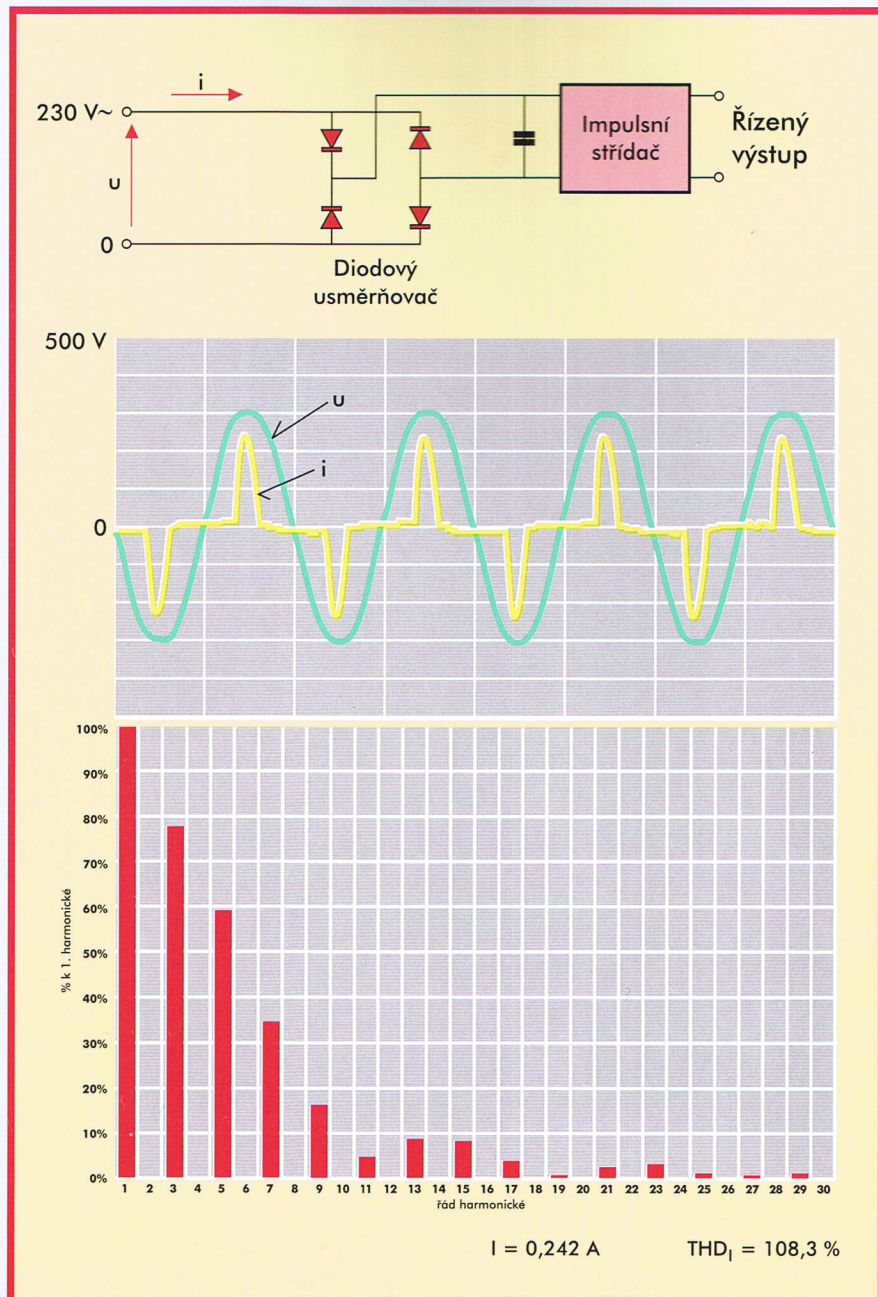
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad f = \frac{1}{T}$$

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

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

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

$$k = 1 \rightarrow \infty$$



Obrázek 2
Napětí a proud
napájecí strany
jednofázového
napěťového střídače

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

neárního 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 indexem k .

Spotřebiče podobné tomu na obrázku 2 nazýváme nelineární spotřebiče. Jsou napájeny sinusovým napětím, neodebírají však periodický sinusový proud. 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 nasycitelným železným jádrem, zařízení informační technologie, úsporná svítidla s elektronickým předřadníkem.

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

Rychlé změny: pohony s regulací rychlosti, zátěže s pulzně-modu-

lovaným napájením, svářecí zařízení.

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

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

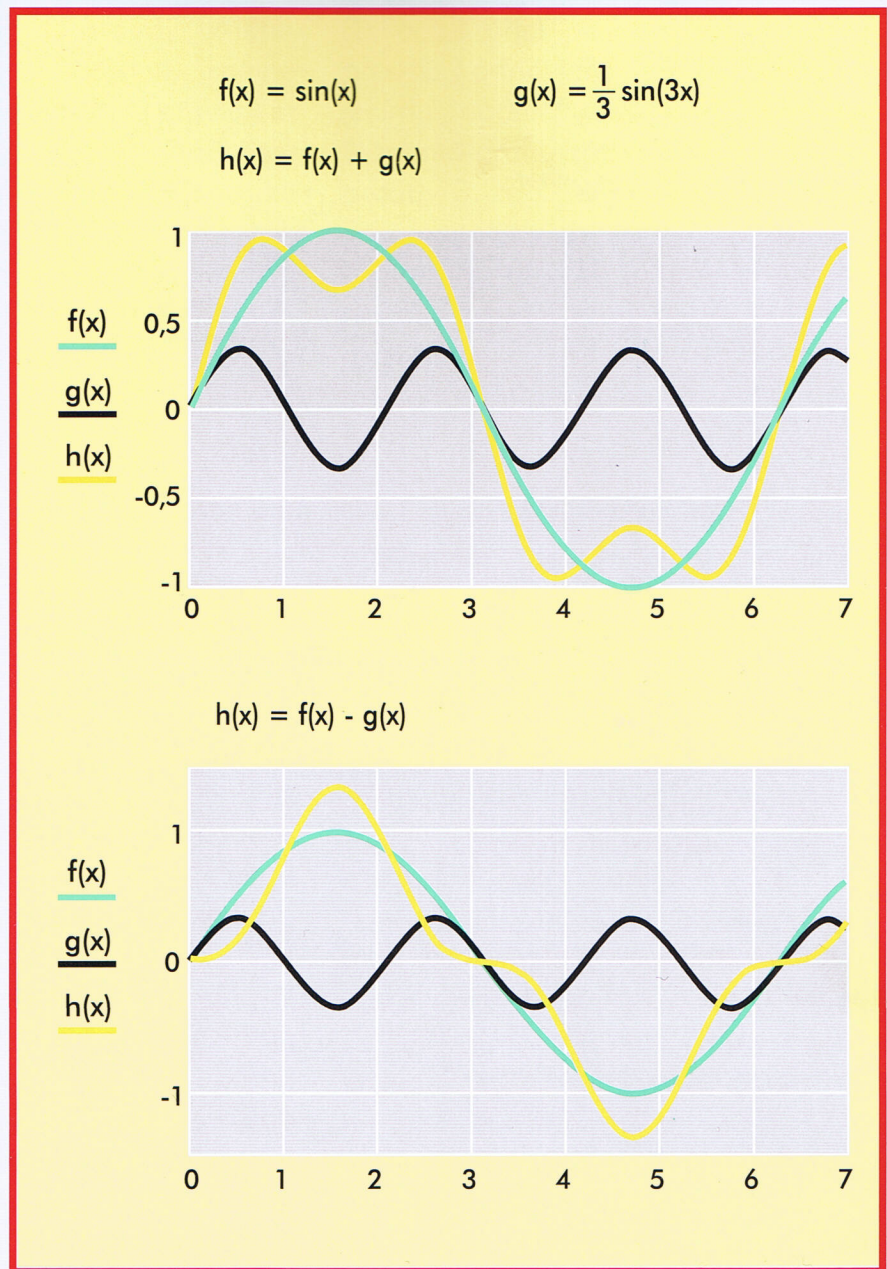
kde I_1 je proud základní harmonické
 I_k je proud k -té harmonické

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 jednotka pro spotřebiče s menším odběrovým proudem do 16 A tzv. impulzní napájecí jednotka. Jejich vstupním obvodem 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 takové 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 je v sítích nízkého napětí zkreslení 3. a 5. harmonickou charakteristické jak pro proud, tak pro napětí.



Obrázek 3
Účinek fázového úhlu třetí harmonické na výsledný průběh

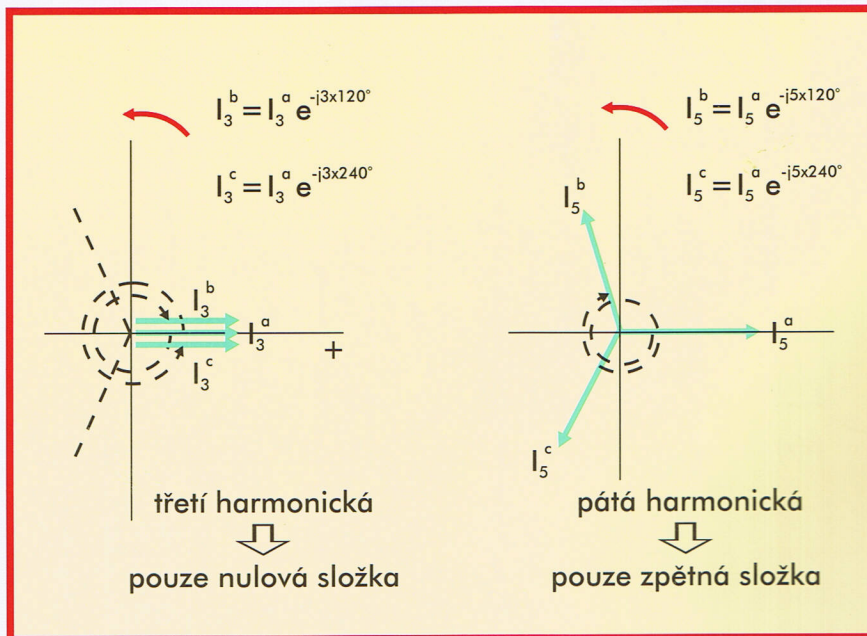
Obrázek 3 ukazuje příklad vlivu 3. harmonické na tvar výsledného průběhu.

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, stejně 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, příspěvek k proudu ve středním vodiči tedy potom odpovídá trojnásobku proudu třetí harmonické. Pokud je amplituda třetí harmonické proudu téměř rovna amplitudě základní harmonické, jak bychom

mohli vidět v obvodu 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, můžeme harmonické proudy generované každou nelineární zátěží sčítat 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 dává 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 zjednodušení se dále budeme zabývat pouze symetrickým stavem jak sítě, tak zátěže. Součet proudů je proveden pro každý řád harmonické podle následujících vztahů:

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

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

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

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 přípojnicích.

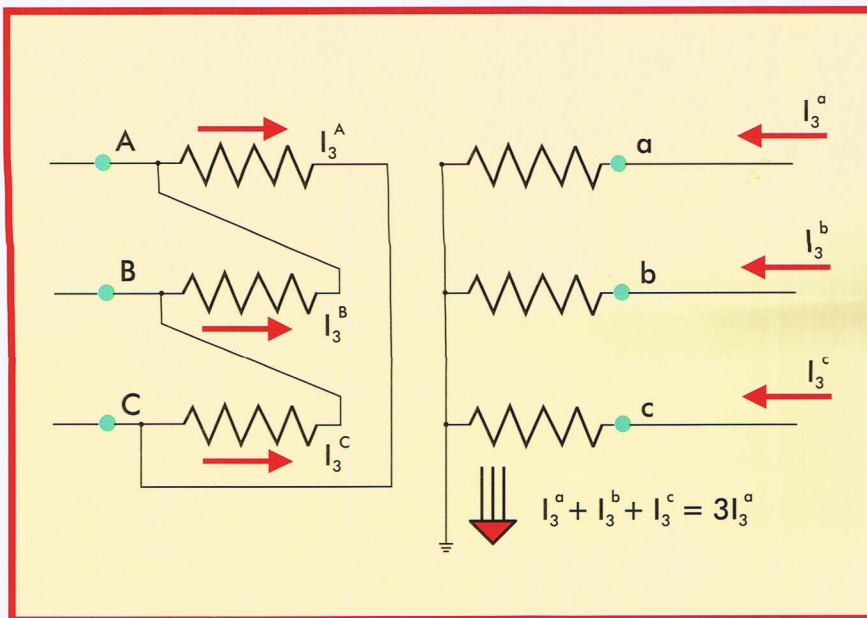
Musíme zmínit, že existují dvě metody modelování fázového úhlu harmonického proudu pro různé typy nelineárních zátěží. V případě proudových střídačů fázový posun harmonického proudu odpovídá proudu základní harmonické. Tzn. jestliže se proud základní harmonické zpožďuje vzhledem k napětí o úhel φ , fázový 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 úhlu $\varphi = 0$. 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.

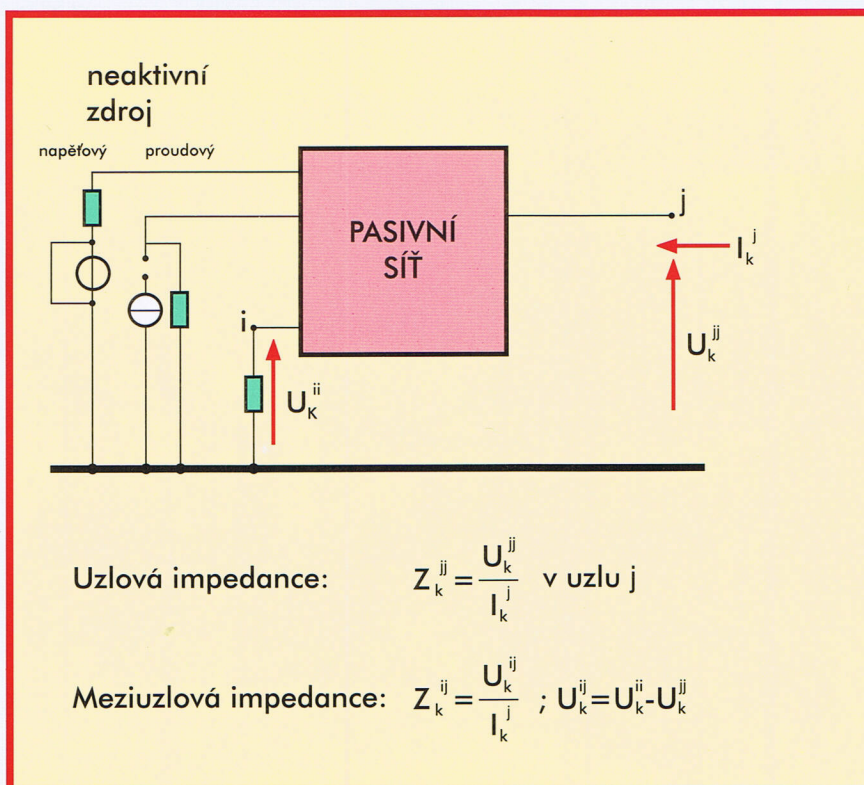
Tyto transformátory mají zapojení trojúhelník / zemněná hvězda (D/yn). Nulová složka způsobená třetí harmonickou produkuje buzení transformátoru ze strany nízkého napětí. Nicméně na straně vysokého napětí může nulová složka vyvolávat odbuzení. Tento jev ukazuje obrázek 5. Jádro transformátoru na straně 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 vlivem této složky proudu třetí harmonické.

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

Třetí harmonická proudu způsobuje deformaci napětí transformátoru třetí harmonickou, která je určena třetí harmonickou nulové složky impedance



Obrázek 5
Proudy třetí harmonické u transformátoru trojúhelník/zemněná hvězda



Obrázek 6
Definice uzlové a meziuzlové impedance harmonické k-tého řádu

transformátoru, jež je přibližně trojnásobkem sousledné složky impedance základní harmonické:

Situace je jiná 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 značně rozdílná od hodnoty, kterou lze spočítat použitím zkratového výkonu základní frekvence v bodě připojení zátěže.

Pokud známe jmenovité napětí je uzlová impedance pro základní harmonickou:

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

kde \underline{Z} je impedance pro základní harmonickou

U_n je jmenovité napětí

S_K 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 pro určitou frekvenci můžeme určit odstraněním aktivního spotřebitele ze strany sítě, pro kterou chceme stanovit impedanci, a tím učiníme síť pasivní. (Tímto způsobem by měly být ze sítě odstraněny všechny proudy a napětí generátorů - tedy tak, že jsou modelovány pouze jejich vstupní impedance.) Poté výše popsaným způsobem injektujeme proud k-tého řádu do sítě ve vybraném bodu 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 dané 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

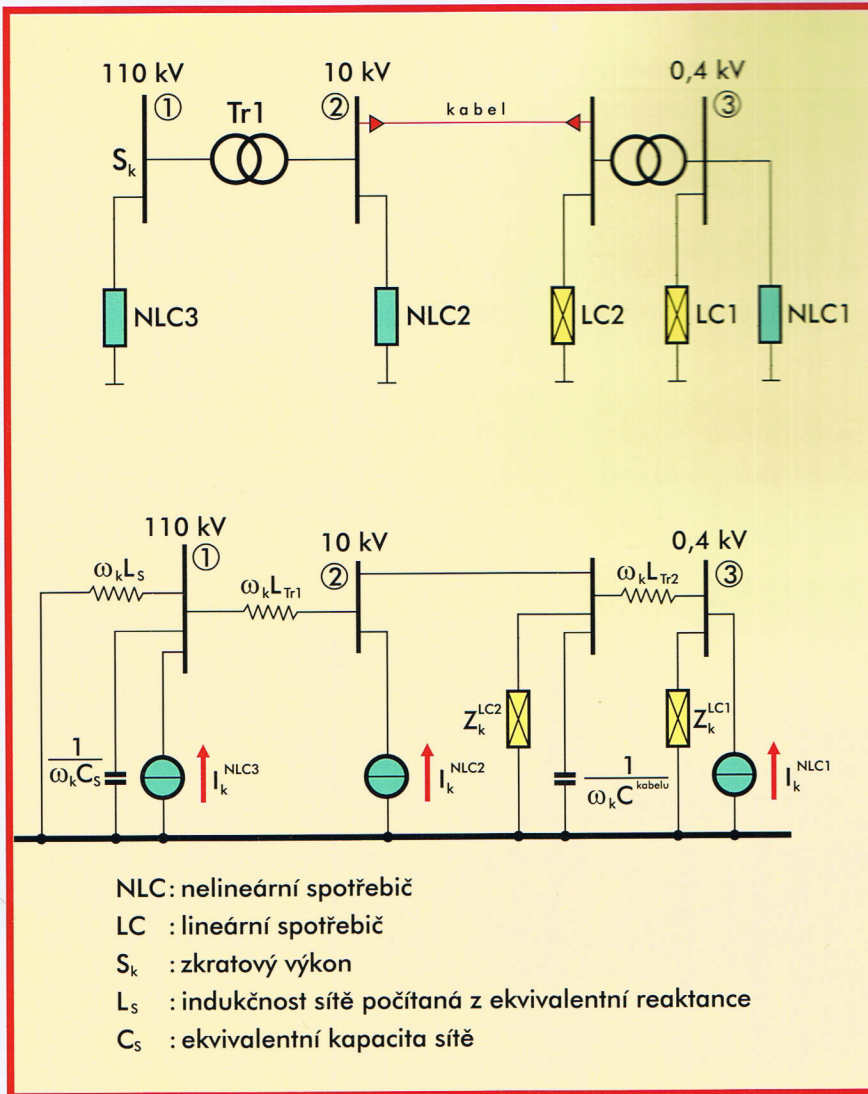
$$\underline{I}_k = \underline{Y}_k \underline{U}_k \quad \underline{U}_k = [\underline{Y}_k]^{-1} \underline{I}_k$$

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

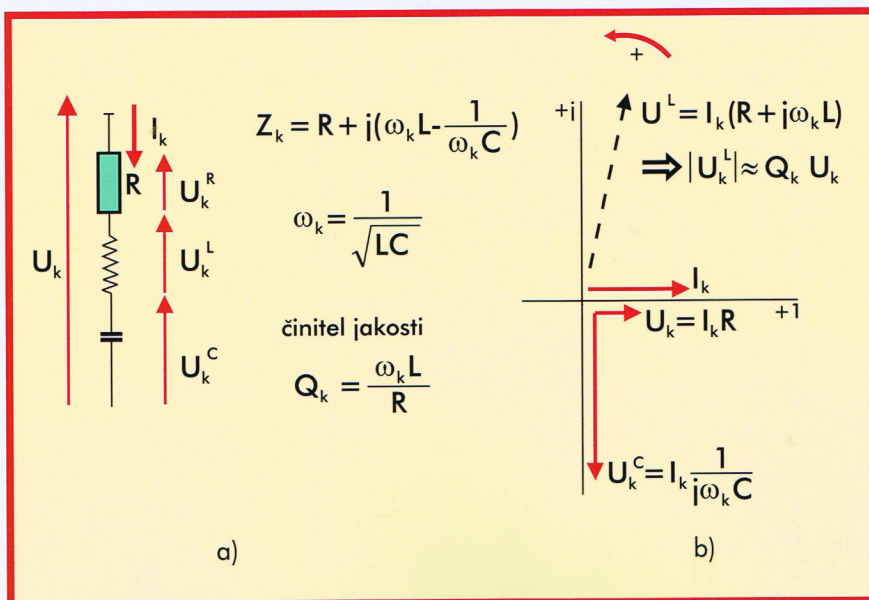
Diagonálními prvky impedanční matice jsou hodnoty uzlových impedancí. Dalšími prvky matice jsou meziuzlové impedance mezi jednotlivými uzly sítě. Definice uzlové a meziuzlové impedance pro k-tý řád harmonické ukazuje obrázek 6.

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 přípojnici násobené proudem \underline{I}_k :

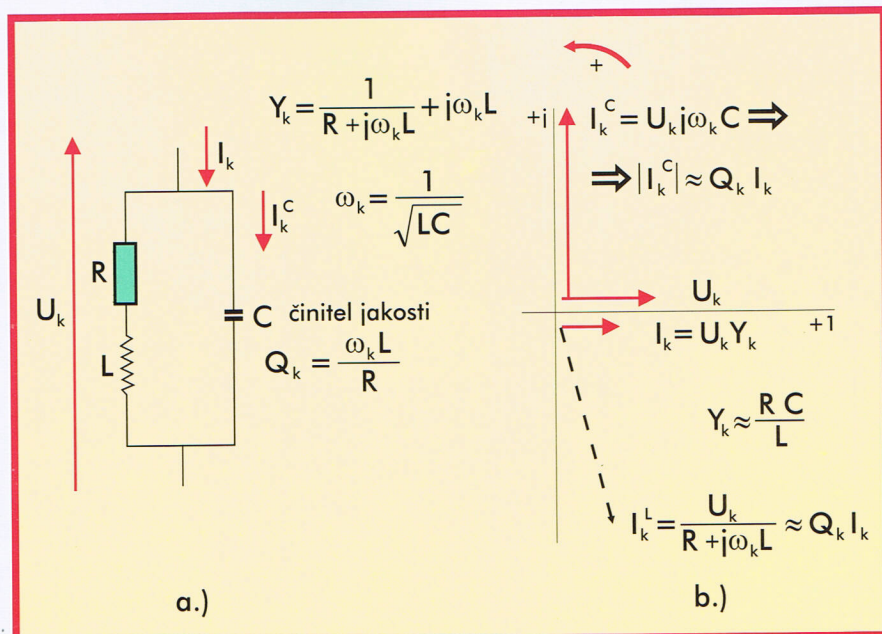
$$\underline{U}_k^{0,4kV} = \underline{Z}_k^{0,4kV} \underline{I}_k^{NLC1}$$



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



Obrázek 8
 Sériová rezonance v R - L - C obvodu



Obrázek 9

Paralelní rezonance
v R - L - C
obvodu

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

Obrázek 8 a obrázek 9 ukazují, že zvětšení napětí v důsledku vlastností sériového rezonančního obvodu a zvětšení proudu vlivem 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 tlumicí 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 nalezeno řešení 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 odlišná od impedance provozované sítě). Z výše uvedeného vyplývá, 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 představují 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 způsobeným vlivem impulzního napájení s vyhlazovací kapacitou na stejnosměrné straně. Toto se vyskytuje převážně v energeticky nenáročných zařízeních. Tento 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, 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 vyplývá, že nebude nulová složka proudu. Ale v případě třetí harmonické (jak ukazuje obrázek 4) bude fázový posun $3 \times 120^\circ = 360^\circ$, výsledně pak bude středním vodičem protékat součet třetích harmonických proudů.

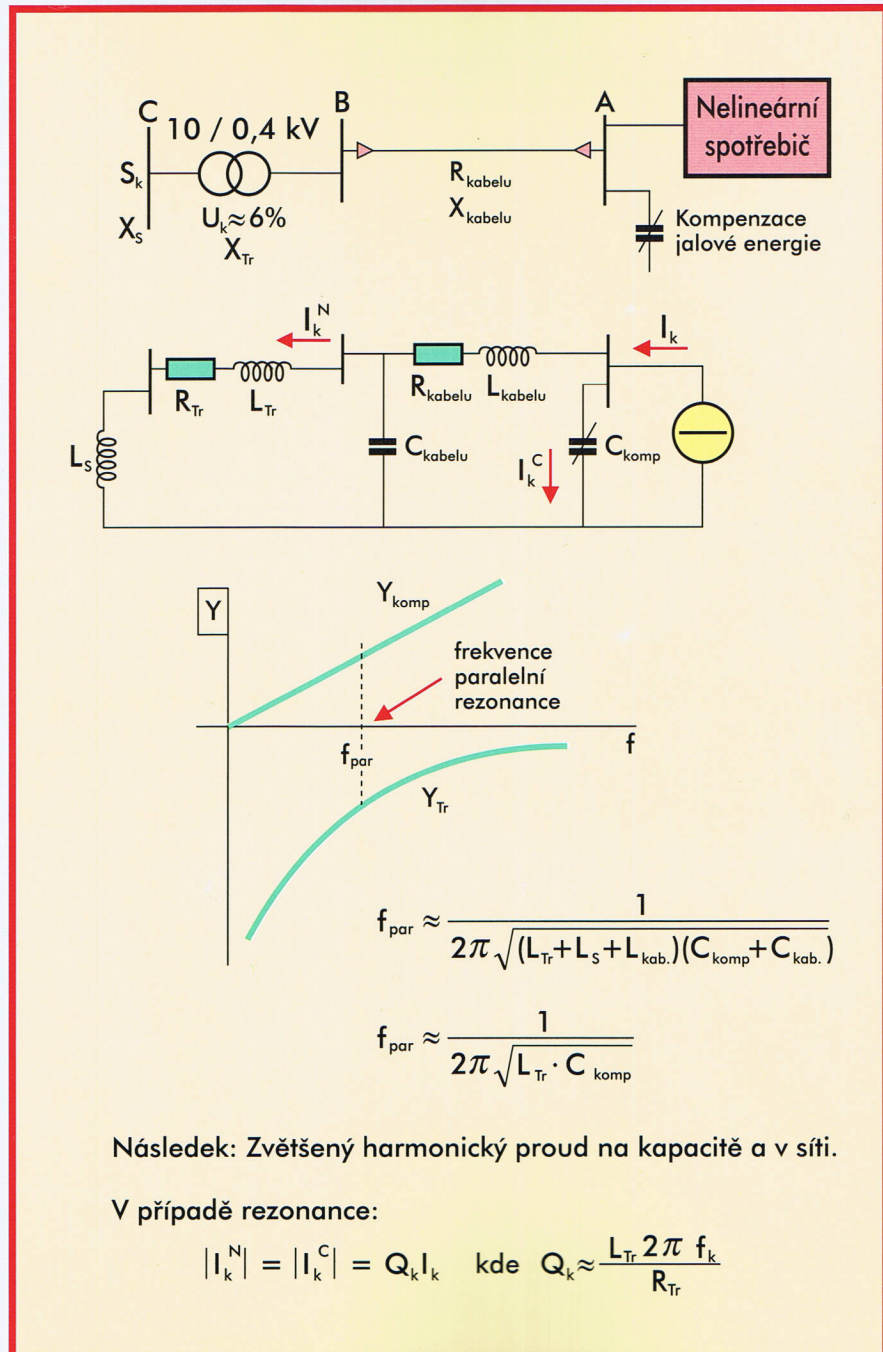
V malé vstupní impedanci napájecího obvodu napěťového střídače třetí harmonická proudu může převýšit hodnotu proudu základní harmonické. V případě čtyřvodičové sítě nízkého napětí se efektivní hodnota proudu ve středním vodiči může rovnat 2-3 násobku proudu ve fázovém vodiči,

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

diče fázového. Za takové situace můžeme očekávat přehřívání středního vodiče.

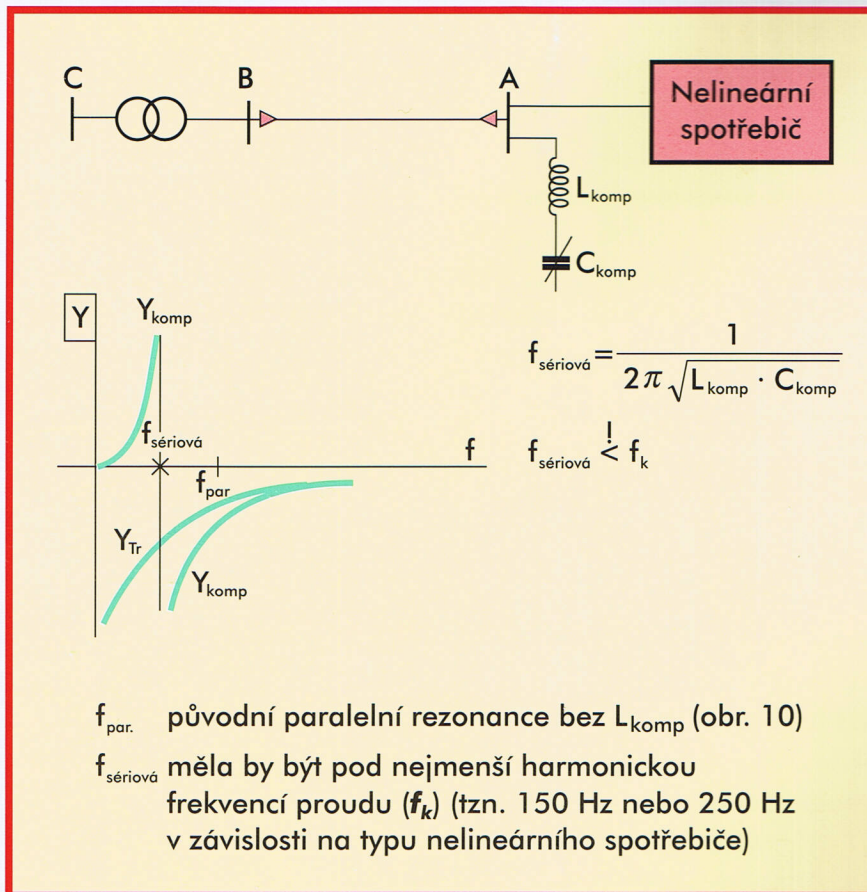
Tato skutečnost není mezi projektanty příliš známa. Takže průřez středního vodiče je ve většině případech roven, nebo dokonce menší než průřez vo-

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



Obrázek 10

Paralelní rezonance způsobená kompen. kapacitou a indukčností sítě



Obrázek 11

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

různosti napětí. Různost zapalovacího úhlu vede ke změně svítivosti lamp. Nazývá se 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 rovněž.

Vznik rezonance způsobené hrazenou kompenzací v síti nízkého napětí ukazuje obrázek 11.

Větší odběratelé (jako např. kancelářské budovy a obchodní centra) mají bez výjimky kompenzaci 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 je 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. Výjimku tvoří obsah třetí harmonické, která činí 100-120%, a nikoliv 33%. Pokud zůstaneme u onoho případu, poměr maximální/efektivní hodnota v případě výsledného proudu je $1,33/0,75 = 1,77$, což se liší od známé hodnoty 1,41 v případě sinusového proudu.

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

Měření harmonických může být prováděno přístroji vyhovujícími normě ČSN EN 61000-4-7. Tato norma se rozsáhle zabývá požadavky na měřicí metody a měřicí přístroje. Dále uvádí výčet nejdůležitějších kritérií digitálních měřicích přístrojů třídy "A" pro měření harmonických.

- 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 třísekundová vyhodnocovací doba
- možnost souvislého měření nejméně po dobu jednoho týdne
- antialiasing filtr

Mimo výše uvedené je rovněž důležitá zásada, která se týká určení zdroje harmonických měření, a sice současnost měření. Tato zásada není v normě zmíněna. 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, že je tento zdroj harmonických nevýrazný vzhledem ke svému okolí a jeho vliv na deformování napětí není rozhodující. V takové situaci je nezbytné vyhodnotit výsledky měření správnou metodou, pro niž je nutný na straně jedné speciální software a na straně druhé dovednost osoby, jež hodnocení provádí.

1.3.5. Omezení problémů způsobených harmonickými

V předešlé kapitole jsme popsali původ harmonických, jejich šíření a průnik, problémy jimi způsobené a měřicí metody. Ukázali jsme, že problémy jsou složité, limituje je velikost harmonického zkreslení a je společným zájmem konečných spotřebitelů a distribučních společností, aby byly odstraněny. Otázka tedy zní: Kdo může přispět k dosažení společného cíle? A jakými prostředky?

Možnost zlepšení kvality elektrické energie ze strany spotřebitelů

Pro spotřebitele na úrovni nízkého napětí existují následující možnosti:

- zesílení a rekonstrukce vlastní sítě. To tedy znamená, že spotřebitel by měl vybudovat samostatnou síť pro nelineární spotřebiče vyvedenou do PCC a pro její střední vodič navrhnout 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, jež bude vyvolána 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. K tomuto účelu je vhodné 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. Vzhledem k napájecí síti tedy představuje pro naladěné harmonické zkrat. Toto řešení je možné pouze za předpokladu, že filtr nebude přetěžován harmonickými proudy produkovanými vnějšími nelineárními zařízeními. Např. v případě, kdy větší množství zátěží (kancelářské budovy, nákupní střediska) má vlastní napájecí transformátor vn/nn. Na základě dobré znalosti podmínek (harmonické proudy, harmonické poměry na straně vn, zatížitelnost transformátoru, jalová energie) je tedy 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 pulzně-šířkově modulovaný řízený střídač, jenž je automaticky řízen mikroprocesorem, který generuje nezbytný proud a který se přidává "proti zkreslení" ke zkreslenému proudu. Výsledkem je pak téměř sinusový proud. Aktivní filtr může být použitý také tam, kde

z určitých důvodů nemůžeme použít filtr pasivní, např. k filtrování meziharmonických (tento druh harmonických je generován pohony s regulací rychlosti, kaskádami asynchronních motorů atd.). Jejich jedinou nevýhodou je v současnosti vysoká cena.

V žádném případě nelze opomenout zvětšení průřezu středního vodiče, filtrování se totiž vztahuje vždy na několik spotřebičů najednou, neboť filtrace jednotlivých spotřebičů je ekonomicky náročná.

V sítích nízkého a vysokého napětí je aktivní a pasivní filtrace nelineárních spotřebičů nebo jejich kombinace řešením, které vede ke zlepšení kvality elektrické energie.

Zlepšení kvality elektrické energie ze strany distribučních společností

Distribuční společnosti musí dodávat elektrickou 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. Přesto může dodavatel poměry v síti přímo ovlivňovat. Může 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

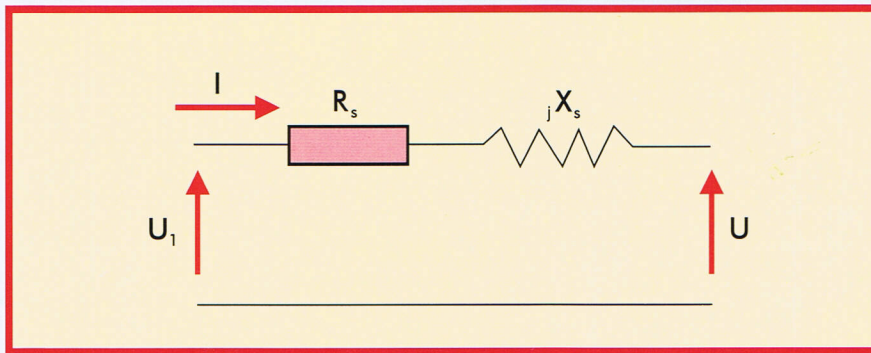
Elektrické spotřebiče, jako například žárovky připojené do veřejné distribuční sítě, vyžadují pro správnou funkci konstantní napětí. Odběratelé s proměnlivým výkonem však bohužel způsobují měnící se úbytky napětí. Rychlé periodické změny napětí, které nazýváme kolísání napětí, způsobují jev zvaný flikr.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

1.4.2. Původ flikru

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, kdy bereme v úvahu reálnou část, lze vyjádřit přibližně takto:

$$U = |U_1| - (I_e R_s + I_j X_s) =$$



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:

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

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

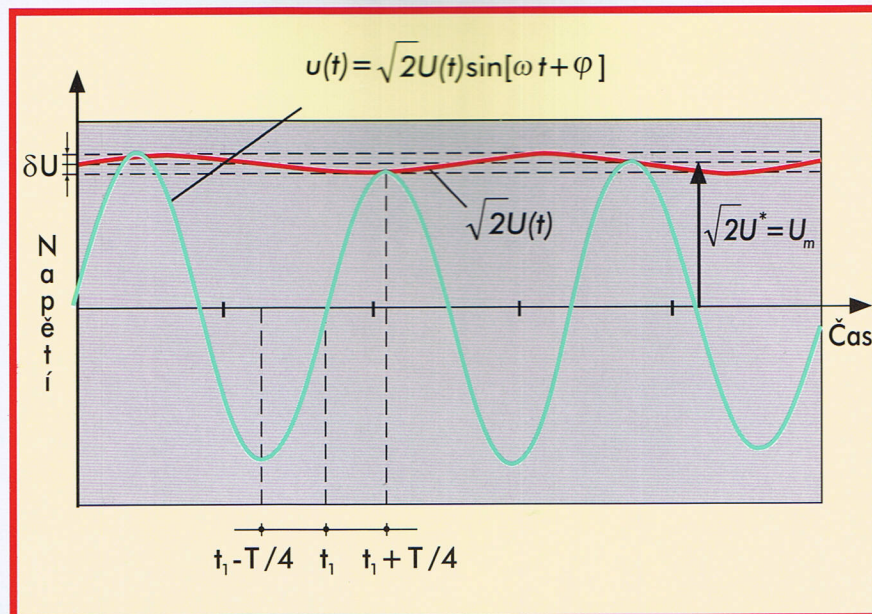
$$U_{(stř)} = \lim \left[\frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot dt \right] = U^*$$

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 (zvláště, 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

Všechna rušení způsobená elektrickou obloukovou pecí tedy procházejí PCC. Do série s vn stranou pecního transformátoru je zapojen reaktor, jenž omezuje zkratový proud během natavování, protože během tohoto technologického procesu se často vyskytují zkraty.

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

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

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

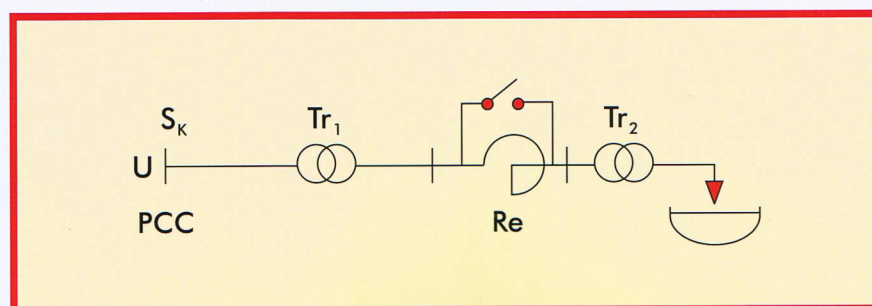
Označme x reaktanci napájecí sítě a transformátoru. Její typická hodnota přepočtená na sekundární stranu pecního transformátoru je

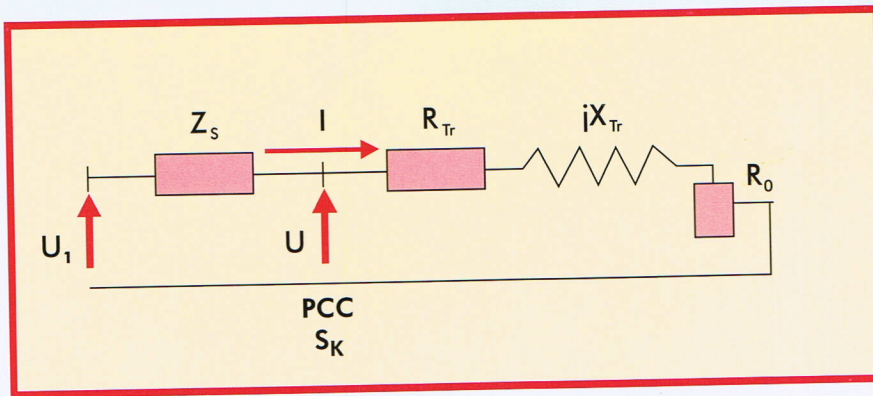
$$x = X_{Tr} + X_s \approx 3 \dots 6 \text{ m}\Omega$$

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

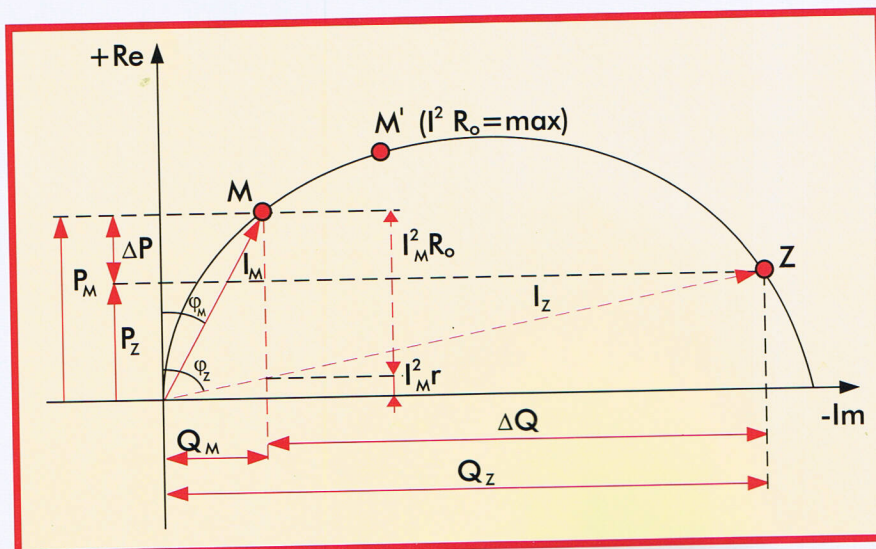
Po úpravě této rovnice

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

Za 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 . Zkratový proud je pak určen impedancí napájecí sítě

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

Jestliže vzroste I , pak na PCC poklesne U vlivem úbytku na impedanci sítě. Změny rezistance R_o oblouku tedy 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. Změny napětí U lze tudíž rozdělit na dvě části, jednu - způsobenou změnami činného výkonu P , a druhou - vyvolanou 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

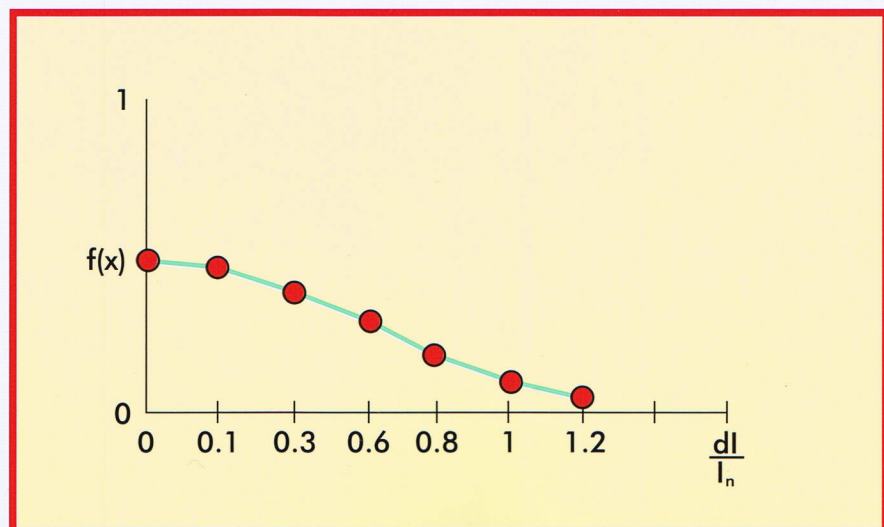
$$\Delta Q \approx 0,96 \Delta S$$

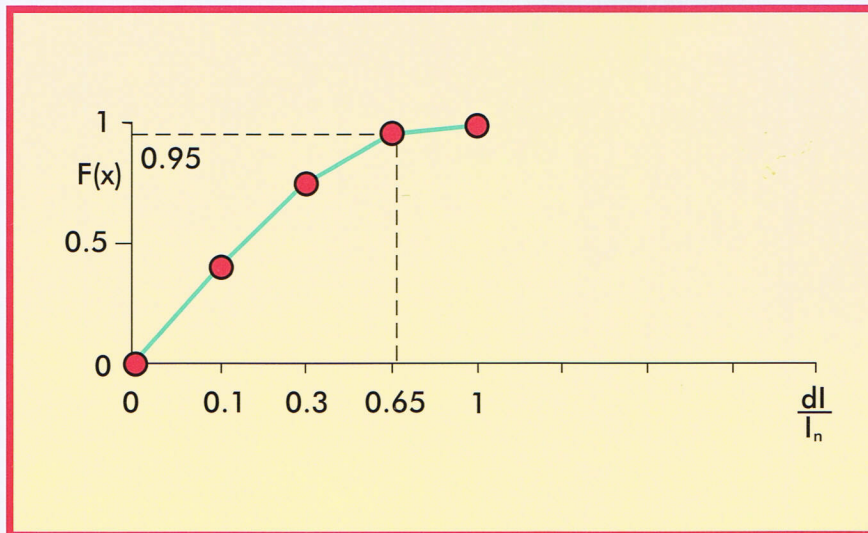
Pro výpočet úbytku napětí s využitím výše uvedených zjednodušení

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

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

Obrázek 17
Funkce hustoty pravděpodobnosti proudu





Obrázek 18
Distribuční funkce proudu

Bereme-li v potaz 95% pravděpodobnost v distribuční funkci, získáme hodnotu proudových změn

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

a výkonové změny pak budou

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

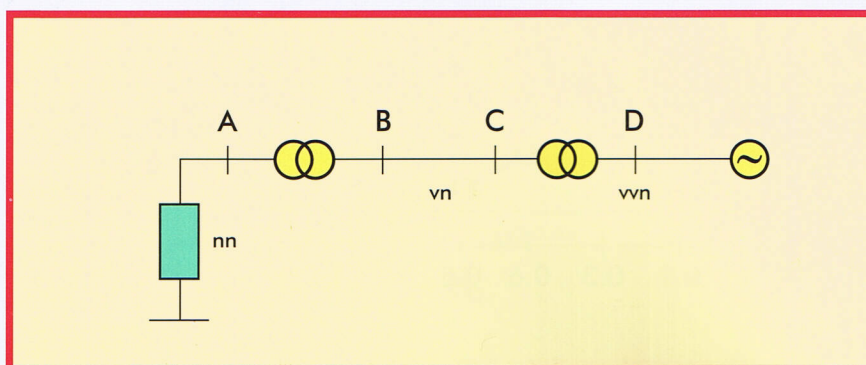
kde S_n je jmenovitý zdánlivý výkon a I_n je jmenovitý proud EOP. Při použití těchto hodnot můžeme získat 95% pravděpodobnostní hodnotu změny napětí při provozu EOP.

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

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

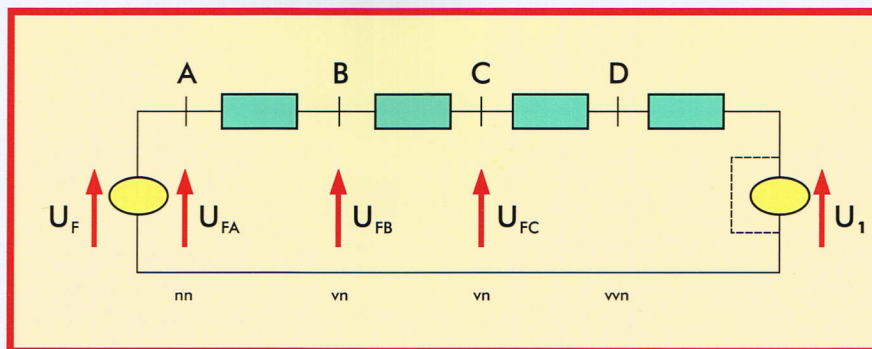
1.4.3. Šíření flikru v síti

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



Obrázek 19
Zjednodušené schema sítě

Obrázek 20
Zdroj flikru
na straně nn



kého napětí a šířená 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) podle vztahu

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

kde S_K jsou zkratové výkony v bodech A,B,C. Bereme-li v potaz 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 obou 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, jejich vliv je tedy lokální.

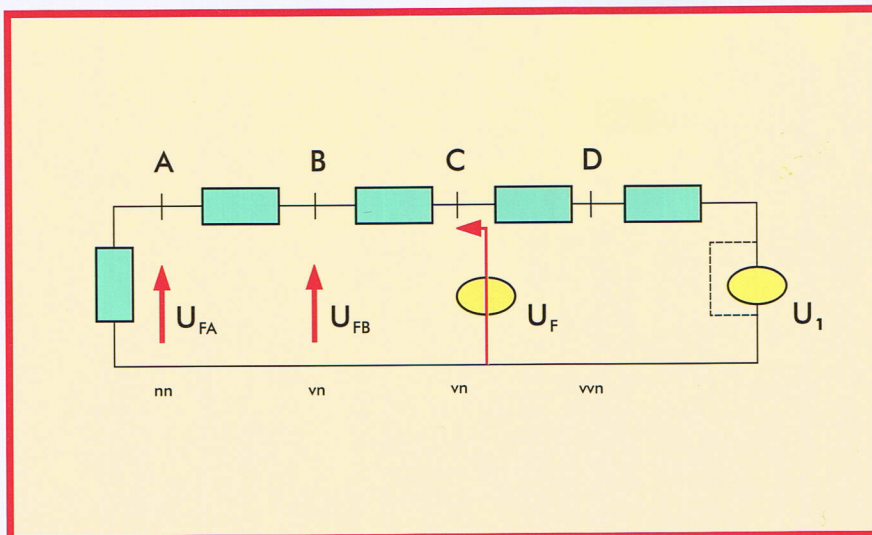
Charakteristiky zdrojů rušení v sítích nn a vvn jsou méně příznivé. Model sítě v tomto případě uvádí obrázek 21.

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". Definuje pozorovatelův spolehlivým způsobem reakce na různé druhy flikru. Napěťové změny mají dvě charakteristiky a obě ovlivňují rušivý vliv flikru: amplitudu a frekvenci (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

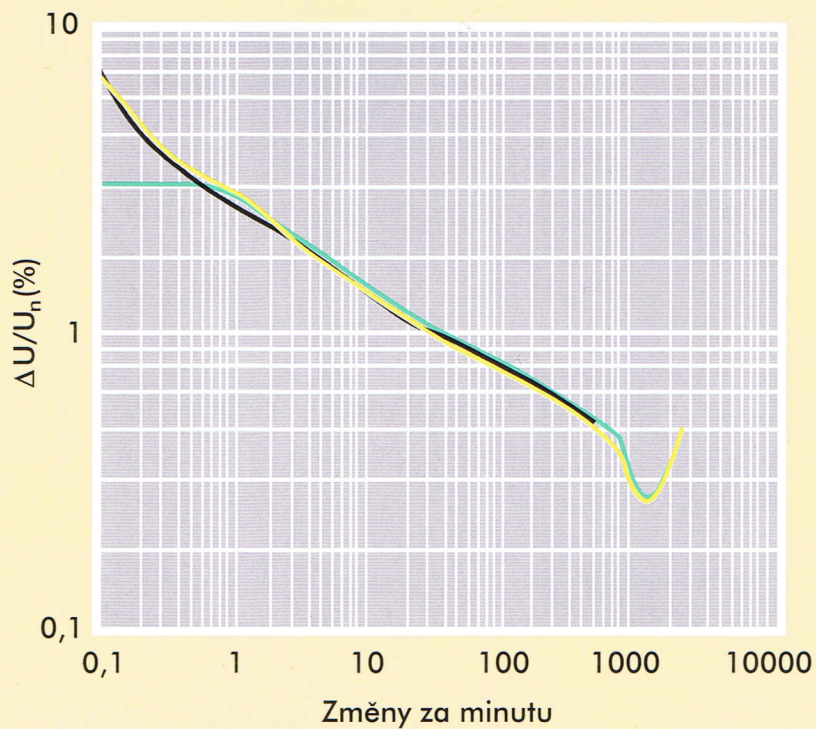
Přístroj, doporučený normou pro měření flikru, sestává z 5 jednotek, jak ukazuje obrázek 23.

Účelem jednotky 1 je přijmout vstupní napětí a generovat vnitřní referenční napětí. Měření flikru pak může být 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-

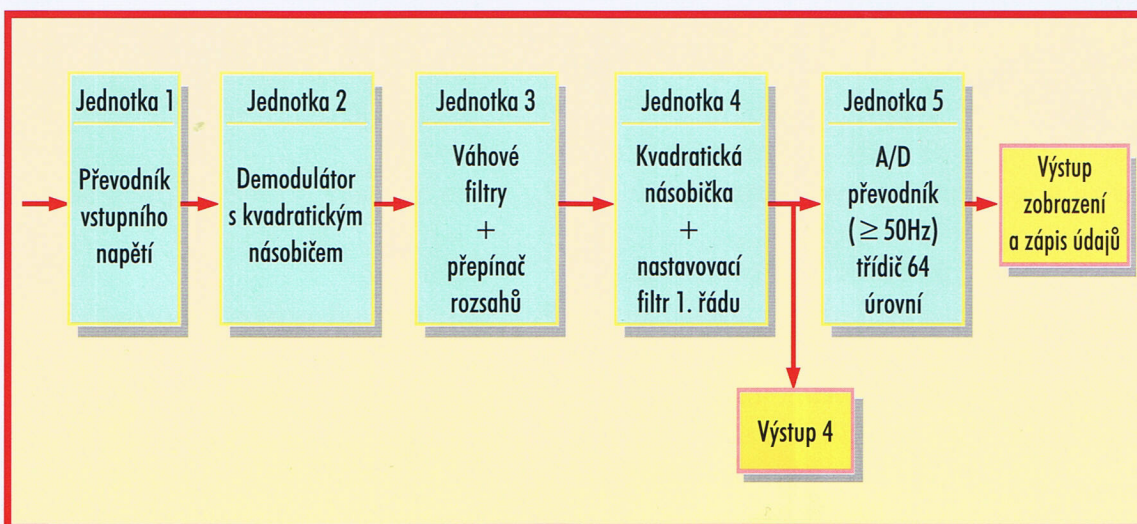
Změny napětí povolené normou ČSN EN 61000-3-3



Obrázek 22

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

— Povolené — $P_{st}=1$ vyhlazená — $P_{st}=1$ nevyhlazená



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, předpokládáme, že během sledované periody (v zamýšleném časovém intervalu) se může hodnota flikru měnit vlivem stochastických změn zatížení v širokém intervalu a nepředvídatelně. Je důležité zjistit nejen nejvyšší hodnotu, ale také 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 blíkaní

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

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

- P_{10} je úroveň, která je překročena jen v 10% doby ve sledované periodě
- P_{50} 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
K_1	pro úroveň 1%	= 0,0525
K_3	pro úroveň 3%	= 0,0657
K_{10}	pro úroveň 10%	= 0,28
K_{50}	pro úroveň 50%	= 0,08

U zátěží, jež 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 flikru. 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 flikrometru.

Hraniční křivka, viz obrázek 22, byla mírně upravena podle tohoto algoritmu v oblasti 1 až 0,1 změn/min, kde 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 dává správné výsledky pro různé typy rušení, přičemž tato metoda byla vyvinuta tak, že lidé vnímají rušivý vliv flikru pro $P_{st} \geq 1$.

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_{sti} 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 zavedením regulačních principů (norem) je nutné pro zamezení chaosu, aby dodavatel elektrické energie byl schopen zvládnout rušení v síti a výrobce produkoval 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. Norma tedy definuje výslednou celkovou úroveň rušení, kterou pak výrobci musí respektovat tak, aby jejich výrobky byly funkční až do těchto úrovní.

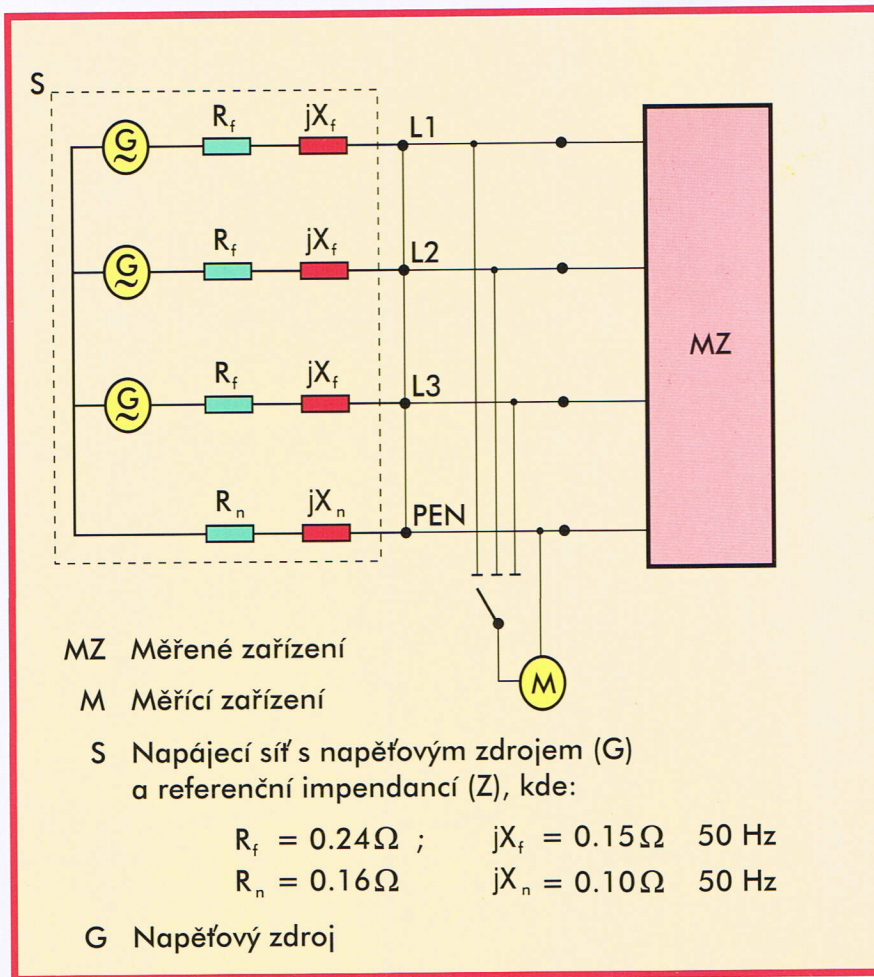
Na druhé straně musí být stanovena dovolená úroveň rušení pro každé rušící zařízení tak, aby jejich výsledná úroveň rušení nepřesáhla povolenou úroveň.

Normy stanoví úroveň 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.



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 dle ČSN EN 61000-3-2 zařízení třídy "A".

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

Tabulka 3 Mezní hodnoty harmonických proudů pro zařízení třídy "D", jejichž vstupní proud je „se zvláštním tvarem průběhu vlny“ (např. napájecí obvody televizorů a počítačů).

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		

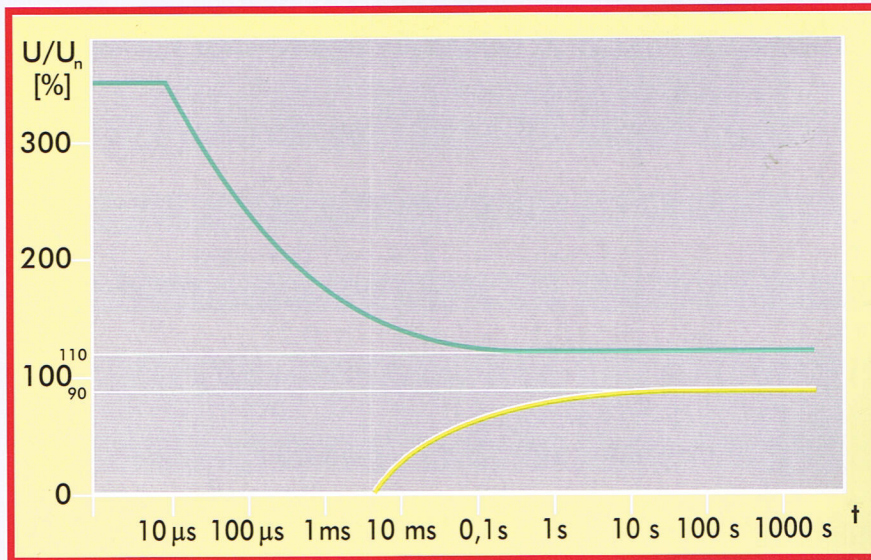
Tabulka 4 Procentní hodnoty harmonických napětí pro distribuční sítě nízkého napětí dle ČSN EN 50 160

2.2. Poklesy napětí, flickr

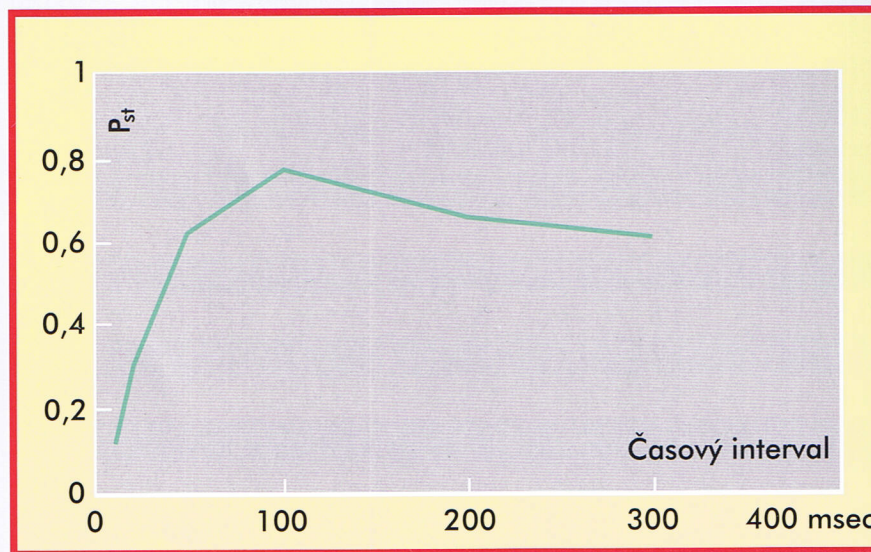
Existují různé stupně poklesů napětí. Při poklesu pod 85% jmenovité hodnoty po dobu 20 - 40 ms přídržný obvod magnetického spínače zapůsobí a vypne ho.

Napětí nad horní a pod spodní toleranční 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 pro zajištění bezpečnosti hodnota $P_{st} \leq 0,8$ (při mezní hodnotě je $P_{st} = 1$).

3. Problémy způsobené používáním zařízení, která 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 ze 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. V našich úvahách budeme mít na zřeteli poklesy napětí a harmonické. 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.

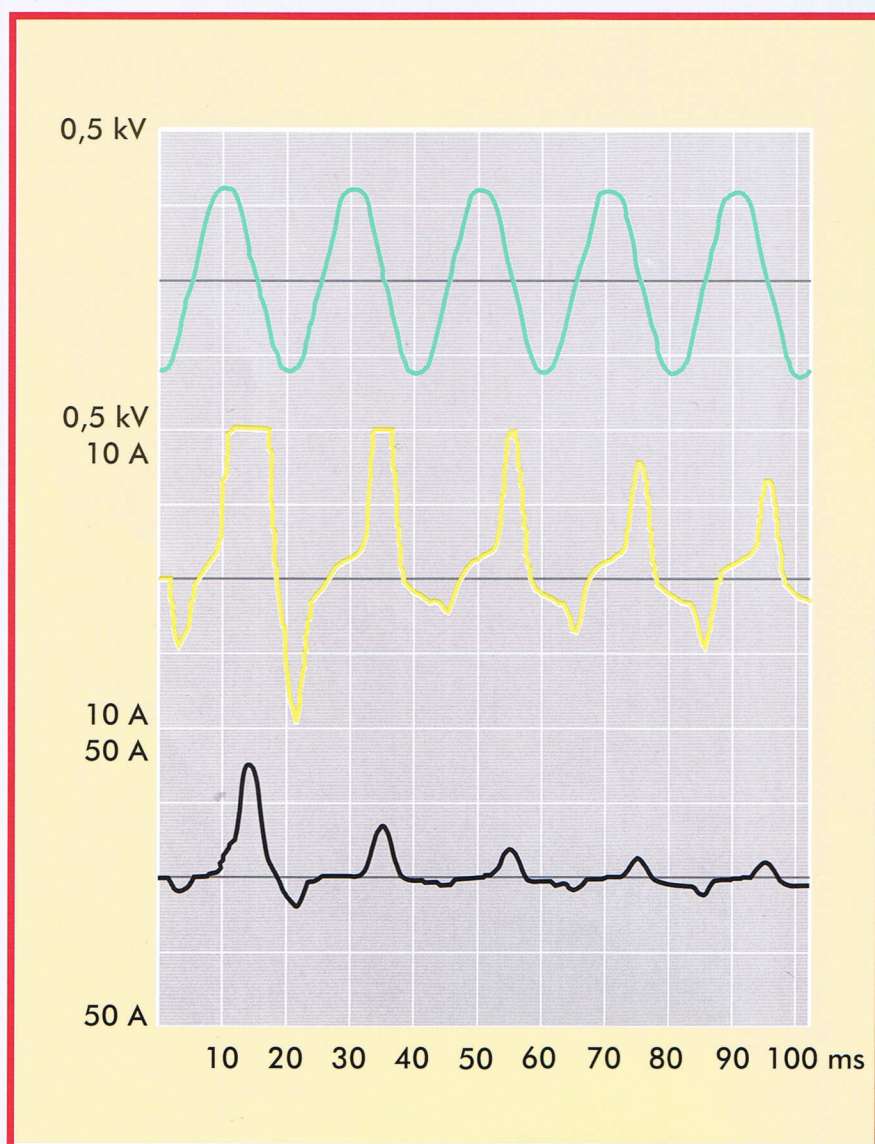
$$\Delta U \approx I |Z| = 38,75 \cdot 0,471 = 18,28 \text{ V}_{\max}$$

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

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-

kračuje hodnotu doporučenou normou. Dále uvažujeme o impedanci části vodiče mezi PCC (elektroměr) a přípojným bodem mikrovlnné trouby. Zde je možno brát v potaz pouze činnou složku impedance. Předpokládáme, že vodič má od PCC 20 m a průřez 2,5 mm² Cu a potom až k zásuvce mikrovlnné trouby má 15 m s průřezem 1,5 mm² Cu, jak ukazuje obrázek 28.

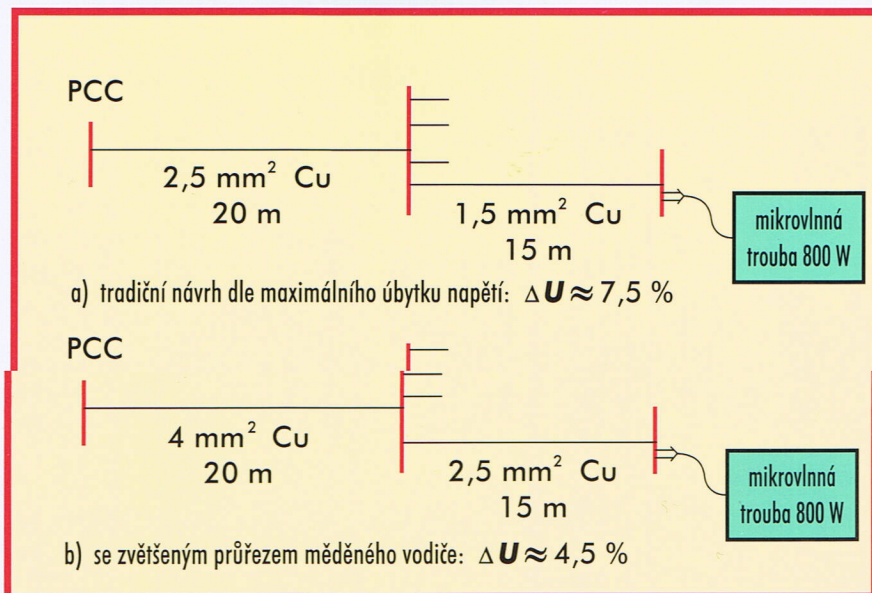
$$\begin{aligned} \Delta U &= [2 \cdot 15r(1,5 \text{ mm}^2) + 2 \cdot 20r(2,5 \text{ mm}^2)] \approx \\ &\approx 13,36 \text{ V}(1,5 \text{ mm}^2) + 10,69 \text{ V}(2,5 \text{ mm}^2) = \\ &= 24 \text{ V}_{\text{max}} \end{aligned}$$



Obrázek 27

Zapnutí mikrovlnné trouby o výkonu 800 W

Obrázek 28
Připojení
mikrovlnné trouby
na napájecí síť



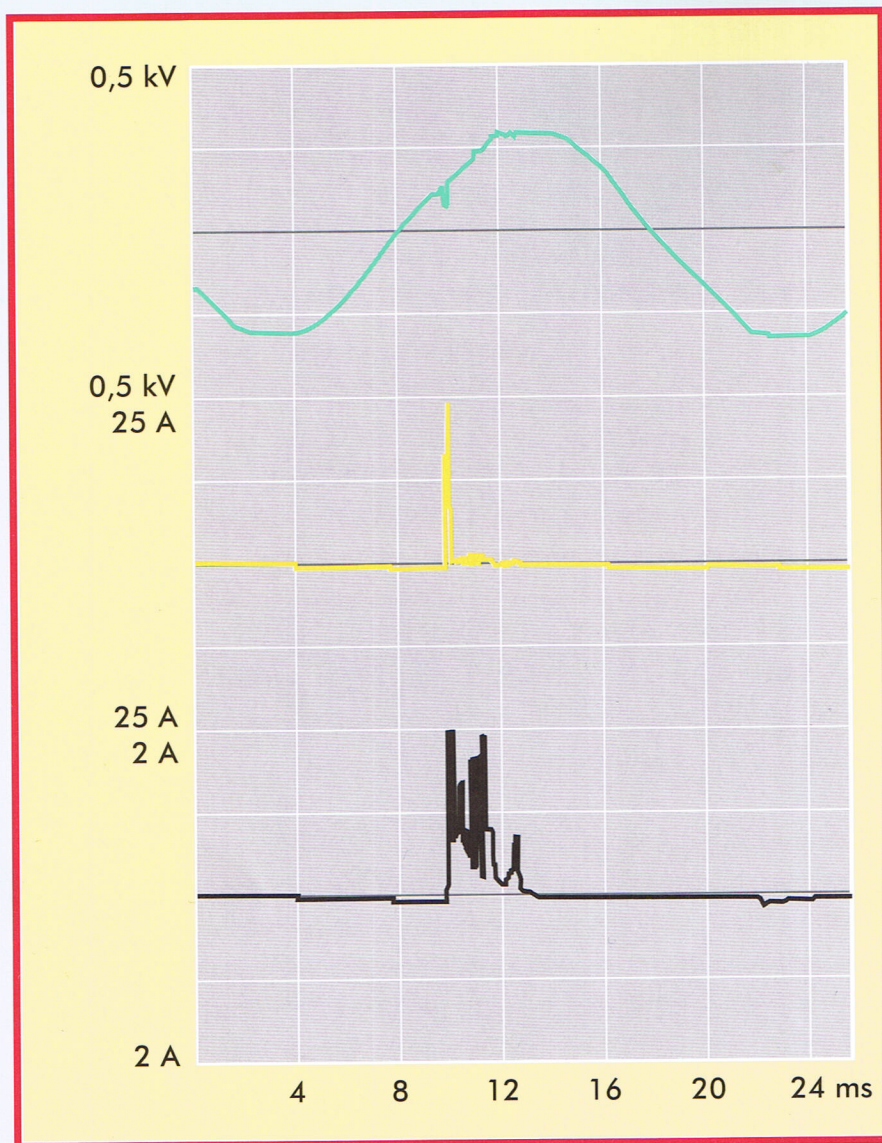
Je vidět, že při volbě tradičního průřezu měděného vodiče je úbytek napětí ve spotřebitelské části sítě o třetinu větší než úbytek napětí v napájecí síti. Výše uvedené poklesy napětí mohou způsobit rušivé blikání světla, protože relativní změna napětí bude okolo 7,5% místo hodnoty 5,62%, která je blíží 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 nikoliv 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 za 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 (za předpokladu jednofázových zátěží dokonale rovnoměrně rozdělených do tří fází), ve středním vodiči teče součet tří fázových proudů 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 mohou tedy být sčítány aritmeticky.



Obrázek 29

Odběrový proud
20 W CFL

Prozkoumejme nejprve kancelářskou budovu, ve které je 6 pater s 20 kanceláři na jedno patro a 10 počítači na jednu kancelář. To znamená celkem 1200 počítačů, z nichž předpokládáme 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. Tato skutečnost by neměla být opomenuta 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 významný nárůst ztrát.

Ve fázovém a středním vodiči je možno samostatně spočítat činitel harmonického zkraslení 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 poměrem 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. Jednou z možností je snížit obsah harmonických v odběrovém proudu spotřebiče některou z již dříve uvedených metod (tzn. například v kancelářských budovách použít UPS a vybudovat separátní napájecí síť pro IT). 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. Hlavní důvody pro projektování dle nového stylu

Z výše uvedeného vyplývá závěr, 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 napájecí systém prověřen z hlediska možných problémů 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, aby síť s nelineárními spotřebiči měla průřez středního vodiče dvojnásobný než je průřez vodičů fázových.
- 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.

Druhé upravené vydání.
2001

Náklad: 2000 ks

Tento materiál byl zpracován s podporou
International Copper Association
© Hungarian Copper Promotion Centre - Budapest, Hungary.



HUNGARIAN COPPER PROMOTION CENTRE

1241 Budapest, POB 62 Phone (36 1) 317-2421 Fax (36 1) 266-6794

E-mail: hpcp.bp@euroweb.hu