

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 334

ISSN 1213-418X

Jiří Drápela

**BLIKÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ
ZPŮSOBENÉ MEZIHARMONICKÝMI
SLOŽKAMI NAPĚTÍ**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**BLIKÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ ZPŮSOBENÉ
MEZIHARMONICKÝMI SLOŽKAMI NAPĚTÍ**

LIGHT FLICKER OF LAMPS CAUSED BY INTERHARMONIC
VOLTAGES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2009

Klíčová slova

Kolísání napětí, Meziharmonické složky napětí, Světelné zdroje, Blikání světla, Mezní křivka meziharmonických napětí, Flikrmetr, Objektivní flikrmetr

Keywords

Voltage variation, Interharmonic voltages, Lamps, Light flicker, Interharmonic-flicker curve, Flickermeter, Objective flickermeter

Místo uložení práce

Originál habilitační práce je uložen na vědeckém oddělení FEKT VUT v Brně.

© Jiří Drápela, 2009

ISBN 978-80-214-4007-4

ISSN 1213-418X

OBSAH

1 ÚVOD	5
1.1 Rychlé změny a kolísání napětí	5
1.2 Světelné zdroje	8
1.3 Vjem rušivého blikání	9
1.4 Meze kolísání napětí pro rušení systému světelný zdroj-oko-mozek	12
1.5 Měření míry vjemu blikání	13
2 KOLÍSÁNÍ VELIKOSTI NAPĚTÍ ZPŮSOBENÉ INTERAKCÍ HARMONICKÝCH A MEZIHARMONICKÝCH SLOŽEK.....	16
2.1 Kolísání napětí způsobené jednou meziharmonickou složkou	17
2.2 Kolísání napětí způsobené dvěma meziharmonickými složkami	19
2.3 Kolísání napětí v důsledku interakce harmonických a meziharmonických složek.....	20
3 KOLÍSÁNÍ SVĚTELNÉHO TOKU ZDROJŮ ZPŮSOBENÉ MEZIHARMONICKÝMI	21
3.1 Přenosová funkce a zesílení světelných zdrojů.....	22
4 MEZNÍ KŘIVKY MEZIHARMONICKÝCH NAPĚTÍ.....	24
4.1 Určení mezních křivek meziharmonických napětí s využitím křivek zesílení – Metoda A	24
4.2 Měření mezních křivek meziharmonických napětí s využitím mezní křivky kolísání světelného toku – Metoda B.....	25
4.3 Návrh měření mezních křivek meziharmonických napětí s využitím „Objektivního“ flickmetru – Metoda C.....	26
5 FLIKRMETR S ODEZVOU NA MEZIHARMONICKÉ S FREKVENCÍ NAD 100 HZ	27
5.1 Návrh a realizace Flickmetru s odezvou na Meziharmonické s vysokou frekvencí pracující v časové oblasti	27
5.2 Validace modelů	31
6 OBJEKTIVNÍ FLIKRMETR.....	32
7 ZÁVĚR.....	33
8 POUŽITÁ LITERATURA.....	35
ABSTRACT.....	37

AUTOR

Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Narozen 10. 2. 1976 v Novém Městě na Moravě

Kontakt Ústav elektroenergetiky, FEKT,
Vysoké učení technické v Brně
Technická 2848/8, 616 00 Brno,
email: drapela@feec.vutbr.cz.



Vzdělání

- 1990 - 1994 Střední průmyslová škola v Jihlavě, obor Elektroenergetika
1994 - 1999 FEI VUT v Brně, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika
2005 VUT v Brně, Centrum vzdělávání a poradenství, doplňující pedagogické studium pro pedagogy VUT
1999 - 2006 FEKT VUT v Brně, postgraduální doktorské studium v oboru Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika – disertační práce na téma: „Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť“

Praxe

- 2004 – 2006 FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, technický pracovník
2005 – dosud FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, vedoucí Laboratoře kompatibility spotřebičů s elektrickými sítěmi při ÚEEN FEKT VUT v Brně
2007 – dosud FEKT VUT v Brně, Ústav elektroenergetiky, odborný asistent
2008 Seconda Universita di Napoli, Italy, (prof. Alfredo Testa) třítýdenní stáž

1 ÚVOD

Podle studie provedené organizací European Copper Institute v roce 2001 [27], zahrnující 1 400 sítí v 8 zemích, existuje v sítích (nizkého napětí) provozovaných v Evropě 5-20% pravděpodobnost výskytu jednoho či více problémů souvisejících s kvalitou elektrické energie. Typicky, polovina sítí se soustředěným odběrem (průmyslové sítě nebo sítě kancelářských budov) je postiženo dvěma a více problémy. Velice málo elektrických sítí je provozováno bez potíží souvisejících s kvalitou elektrické energie. Jedním z největších problémů v oblasti kvality elektrické energie jsou dle [27] i rychlé změny a kolísání napětí, způsobující blikání světelných zdrojů, které může vést k rušení zrakového vjemu.

Fenomén rušivého blikání zdrojů světla je znám od dob realizace prvních elektrických sítí. Napájecí napětí se v elektrické síti, v důsledku změn vznikajících během procesu výroby, přenosu, distribuce a spotřeby elektrické energie, neustále mění. Tyto změny ve svém důsledku vedou k blikání světelných zdrojů, které může u člověka vyvolat významný fyziologický dis-komfort, fyzickou a psychickou únavu a dokonce může mít i patologické následky [24].

Průběh okamžité hodnoty napájecího napětí spolu s principem funkce světelného zdroje (v závislosti na předřadných (napájecích) obvodech, zapojení, dimenzování, atd.) určuje průběh okamžité hodnoty jeho příkonu [12]. Výstupní výkon zdroje světla, časový průběh zářivého toku, je potom úměrný časovému průběhu příkonu světelného zdroje, který je vyhlazován setrvačnostmi, jako například tepelná setrvačnost vlákna u žárovek, dynamika výboje u výbojek, či zpoždění zářivého přechodu luminoforů u zářivek a na polovodičových přechodech u svítivých diod [39][37][16][17]. Generované světlo je distribuováno do osvětlovaného prostoru a osvětlovaná scéna vyvolává v zorném poli pozorovatelů specifický, na mnoha faktorech závislý, zrakový vjem [24][38][19].

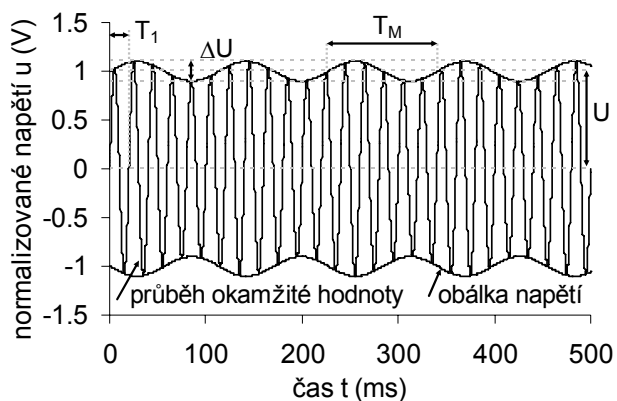
Jestliže se bude měnit velikost napájecího napětí, napětí bude kolísat, potom bude kolísat i velikost činného příkonu a zářivý tok světelného zdroje. Změnami zářivého toku, v závislosti na místních objektivních i subjektivních podmínkách pro zrakový vjem, vzniká tzv. flickr efekt. Z hlediska vnímání kolísání světla lidským okem jsou potom podstatné změny v rozsahu 0,1–35 (40) Hz a zrakový vjem je rušen v případě, že velikost kolísání světelného toku, či další parametry světla, dosáhne v tomto frekvenčním rozsahu nadprahové úrovně. V tom případě mluvíme o vjemu blikání, který u člověka vyvolává již výše popsané interakce. Kolísání napětí a rušivé blikání světelných zdrojů může být kromě jiného způsobeno i přítomností mezharmónických složek v napájecím napětí.

1.1 RYCHLÉ ZMĚNY A KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ

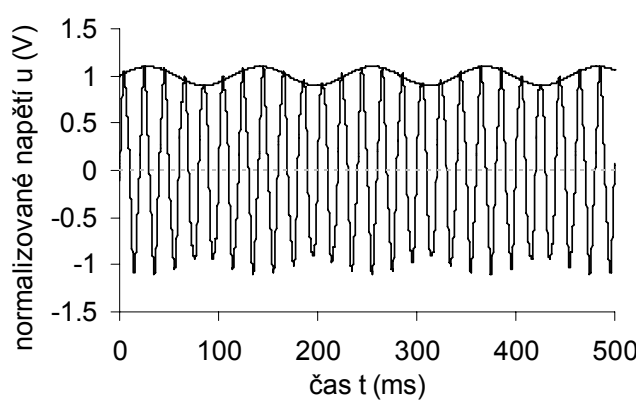
Fluktuace napětí je přímou příčinou blikání světelných zdrojů a může být popsána jako opakující se nebo náhodné změny obálky okamžité hodnoty napětí. Ke kolísání – změnám velikosti napětí v síti může vést kolísání a změny odběru, přerušovaný odběr a z historických důvodů, se na tento typ rušení pohlíží jako na důvod vzniku blikání světelných zdrojů. Charakter změn velikosti napětí potom závisí na typu a velikosti zátěže, resp. průběhu odebíraného proudu a výkonové kapacitě napájecího systému, přesněji impedanci napájecí sítě [14][35]. Příklad kolísání průběhu okamžité hodnoty napětí je na Obr. 1.1. Méně častěji může být původ fluktuace napětí v napájecí síti.

Fluktuace napětí může být rozdělena na dva základní typy: cyklické a necyklické. Cyklické fluktuace napětí jsou výsledkem periodického kolísání napětí, zatímco necyklické výsledkem náhodných rychlých změn velikosti napětí. Příklad periodického kolísání napětí je i na Obr. 1.1. Pro popis fluktuace napětí jsou podstatné dva parametry, a to velikost kolísání a frekvence kolísání obálky v případě periodického kolísání, a velikost změn a jejich četnost v čase v případě náhodných rychlých změn velikosti napětí. Oba parametry, velikost fluktuace i výskyt v čase, jsou pro hodnocení negativního důsledku fluktuace napětí velmi podstatné.

Dle definice se kolísání a změny napětí odehrávají uvnitř normálních provozních tolerancí, tzn. v rozsahu $\pm 10\%$ jmenovité velikosti napětí [3]. Pokud velikost napětí vybočí mimo uvedené meze, např. jako důsledek výjimečných změn zatížení, nebo spínacích operací v napájecí síti, je to považováno za jiný typ problému. Nicméně i náhlé poklesy napětí nebo naopak zvýšení napětí mimo uvedené meze způsobují vznik rušivého vjemu a nelze tedy tento jev vyloučit pouze na základě terminologie. Frekvence kolísání obálky napětí popřípadě četnost změn potom souvisí s frekvencí, resp. četností blikání světelných zdrojů.



Obr. 1.1. Příklad normalizovaného průběhu kolísání napětí (amplitudová modulace jmenovitého napětí sinusovým signálem, hloubka modulace $\Delta U/U=20\%$, frekvence modulace $f_M=8,8$ Hz



Obr. 1.2. Kolísání normalizovaného průběhu jmenovitého napětí způsobené injektovanou meziharmonickou složkou s velikostí $m_{IH}=10\%$ a frekvencí $f_{IH}=141,2$ Hz

Na vzniku kolísání napětí se podílí všechny prvky připojené do elektrické sítě. Jestliže si představíme elektrickou síť jako zdroj elektrické energie, přenosovou síť a spotřebič, pak nejčastější příčinou kolísání napětí jsou změny odebíraného proudu spotřebiče, které způsobují kolísající úbytek napětí na impedanci přenosové sítě a ten mění časový průběh velikosti napětí v jednotlivých uzlech sítě. Druhou možností je vznik změny úbytku napětí v čase v důsledku změny impedance přenosové sítě. Anebo jsou změny napětí, kolísání napětí, generovány do sítě přímo ze zdroje.

Na kolísání napětí lze pohlížet jako na jeho:

- Amplitudovou modulaci (AM) – periodické (Obr. 1.1), kvazi-periodické, rychlé a skokové změny velikosti napětí [14][20].
- Fázovou modulaci (PM) – periodické, kvazi-periodické, rychlé a skokové změny fáze napětí [34][29].
- Deformaci meziharmonickými (IHD) – periodické (Obr. 1.2), kvazi-periodické a přechodné frekvenční složky v napětí, jejichž frekvence nejsou celistvým násobkem základní harmonické [33][22][28].

Ideální periodické kolísání velikosti napájecího napětí lze chápat jako jeho amplitudovou modulaci (AM), kde je celkový průběh okamžité hodnoty napětí kompozicí nosného signálu, v případě elektrické sítě základní harmonické složky napětí s frekvencí 50Hz, a modulační složky. Pro vjem blikání je důležitá kromě velikosti modulace, rovněž její frekvence. Typický frekvenční rozsah modulace napětí, při které dochází, při hloubce modulace do 1%, k vjemu blikání (v závislosti na typu světelného zdroje, který reaguje na kolísání napájecího napětí kolísáním výstupního záření), je 0,5 až 20 Hz. Nejjednodušší případ amplitudové modulace napětí je jeho periodické sinusové kolísání, které lze při uvažování sinusového napájecího napětí zapsat rovnicí:

$$u(t) = U_{1,pk} \sin(2\pi f_1 t + \Phi) \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta U}{U_{1,pk}} \right) \frac{1}{2} \sin(2\pi f_M t + \varphi) \right] \quad (1.1)$$

kde $U_{l,pk}$ je amplituda základního harmonického napětí, f_l základní frekvence, Φ fázový úhel základního harmonického napětí, $\Delta U/U_{l,pk}$ relativní hloubka modulační složky, f_M modulační frekvence a φ počáteční fázový úhel modulační složky. Velikost základního harmonického napětí, stejně jako jeho počáteční fáze, není v této fázi podstatná a rovnici (1.1) lze převést na:

$$u(t) = \sin(\omega_l t) \cdot [1 + m_M \sin(\omega_M t + \varphi)] \quad (1.2)$$

kde ω_l , ω_M je úhlová frekvence základní harmonické složky, resp. modulační složky a m_M je relativní velikost vrcholové hodnoty modulační složky, která se rovná polovině velikosti relativní hloubky modulační složky. S využitím vztahů pro goniometrické funkce lze rovnici (1.2) převést na tvar:

$$u(t) = \sin(\omega_l t) + \frac{m_M}{2} \cdot \sin\left[(\omega_l - \omega_M)t + \left(-\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right] + \frac{m_M}{2} \cdot \sin\left[(\omega_l + \omega_M)t + \left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)\right] \quad (1.3)$$

Výsledný vztah je součtem tří sinusových – harmonických funkcí, jedné nosné a dvou postranních frekvenčních složek posunutých na obě strany od základní nosné frekvence o rozdíl a součet nosné a modulační úhlové frekvence. Symetricky posunuté frekvenční složky vytvářející modulaci napětí mají stejnou velikost, která je rovna polovině velikosti modulační složky, resp. $\frac{1}{4}$ hloubky modulační složky a jejich počáteční fáze odpovídající počáteční fázi modulační funkce jsou v opozici.

Pokud je napětí periodicky amplitudově modulováno jakýmkoliv jiným signálem, je možné základní vztah opět převést na sumu jednotlivých frekvenčních složek, které se řídí určitými pravidly a které jsou rozloženy v dolním a v horním postranním frekvenčním pásmu od nosné frekvence [7]. Ke stejným výsledkům lze dojít i v případě periodické fázové modulační složky (PM) napětí [29]. Ovšem pravidla pro velikosti, frekvence a fáze jednotlivých frekvenčních složek budou odlišná. V každém případě jakákoliv periodická modulační složka napětí vede na diskretní frekvenční spektrum, zatímco jakákoliv aperiodická modulační složka napětí bude ve frekvenční oblasti vyjádřena jednou diskretní složkou odpovídající nosné základní harmonické a spojitou funkcí v dolním i horním pásmu od frekvence nosné vlny.

Můžeme tedy zobecnit, že každé periodické (kvazi-periodické) kolísání napětí se ve frekvenční oblasti projevuje jako skupina subharmonických a/nebo mezharmionických diskretních složek superponovaných na základní harmonickou složku [33]. Mezharmionické a subharmonické jsou neceločíselným násobkem základní harmonické a mohou být definovány ve smyslu jejich spektrálních složek v kvazi-ustáleném stavu přes rozsah frekvencí. Mezharmionické můžeme dále rozdělit na mezharmionické s nízkou a vysokou frekvencí, které jsou spolu s ostatními složkami ve frekvenční oblasti definovány následovně [22]:

Tab. 1.1. Definice spektrálních složek

Spektrální složka	Popis vztahu k frekvenční oblasti
Harmonická	$f = h \cdot f_1$, kde h je celé číslo >0
Stejnoseměrná	$f = 0\text{Hz}$, (případně $f = h \cdot f_1$ kde $h=0$)
Subharmonická	$0 < f < f_1$
Mezharmionická s nízkou frekvencí	$f_1 < f < 2f_1$
Mezharmionická s vysokou frekvencí	$f > 2f_1$ a zároveň $f \neq h \cdot f_1$, kde h je celé číslo >2

Jinými slovy, každé periodické kolísání napětí s čistou AM či PM lze rozložit na součet třech a více frekvenčních složek, přičemž pro frekvence, amplitudy a fáze frekvenčních složek spodního a horního postranního pásma kolem nosné frekvence platí jistá pravidla. Správnou kombinací - superpozicí frekvenčních složek, je tedy možné vytvořit opět čistě amplitudově nebo fázově modulovaný signál. Je zcela evidentní, že výsledný průběh napětí bude kolísat i v případě nesymetrických mezharmionických frekvenčních složek superponovaných na základní harmonické napětí. Nesymetrické znamená, že jednotlivé mezharmionické tvoří páry se stejnou amplitudou,

symetricky rozdělené na frekvence dolního a horního postranního pásma, a s přesně definovaným fázovým posuvem.

Sinusového kolísání napětí lze dosáhnout i v případě, že na základní napětí bude superponována pouze jedna frekvenční složka (subharmonická nebo meziharmonická) podle rovnice:

$$u(t) = \sin(\omega_1 t) + m_{IH} \sin(\omega_{IH} t + \varphi_{IH}) \quad (1.4)$$

kde m_{IH} , ω_{IH} a φ_{IH} je relativní amplituda, úhlová frekvence, resp. fázový úhel meziharmonické složky. Přičemž se fakticky nejedná o čistou amplitudovou modulaci napětí.

Dle [29] je možné signál s jednou základní harmonickou a jednou superponovanou meziharmonickou převést na sumu čistě amplitudově modulovaného signálu (AM) a čistě fázově modulovaného signálu (PM), jejichž součet je přibližně roven vzorovému průběhu. Potom aplikací postupu uvedeného v [29] lze rovnici (1.4) upravit do tvaru:

$$u(t) \cong \frac{1}{2} \sin(\omega_1 t) \cdot \left[1 + 2 \cdot m_{IH} \cdot \sin\left((\omega_1 - \omega_{IH})t - \varphi_{IH} + \frac{\pi}{2}\right) \right] + \frac{1}{2} \sin[\omega_1 t + 2 \cdot m_{IH} \cdot \sin((\omega_1 - \omega_{IH})t - \varphi_{IH} + \pi)] \quad (1.5)$$

První člen rovnice reprezentuje čistě amplitudově modulovaný signál s poloviční amplitudou nosné vlny a dvojnásobkem velikosti modulačního signálu než je velikost meziharmonické. Druhý člen reprezentuje perfektně fázově modulovaný signál s poloviční amplitudou a indexem modulační, který je roven dvojnásobku velikosti injektované meziharmonické.

Obecně lze konstatovat, že nesymetrické frekvenční složky superponované na základní harmonické napětí způsobují současně jeho AM i PM [29] a to i v případě deformace dalšími harmonickými a meziharmonickými složkami. Meziharmonické složky v napájecím napětí jsou každopádně schopny, tak jako amplitudová či fázová modulace, měnit jeho velikost, a to i vysokofrekvenční meziharmonické [22][40][40] a mohou tedy způsobit i blikání světelných zdrojů. Příklad průběhu je na Obr. 1.2.

Kolísání napětí způsobené všemi zdroji rušivého kolísání napětí se v jednotlivých uzlech napájecí sítě sčítá a výsledné kolísající napětí je přivedeno na spotřebiče připojené do daného uzlu a tedy i světelné zdroje. „Šíření“ a dosah kolísání napětí od svého zdroje je dáno obsáhlým souborem parametrů zdroje kolísání napětí a parametrů přenosové elektrické sítě. Vzhledem k nepredikovatelnosti časového a plošného rozložení změn parametrů a provozních charakteristik prvků v elektrickém systému, lze považovat průběh velikosti napětí a tedy i průběh velikosti kolísání napětí ve všech uzlech sítě za nedeterministický. Výsledné průběhy napětí jsou obvykle kombinací všech uvedených typů kolísání napětí. Na druhou stranu kolísání napětí může vykazovat výrazné charakteristické znaky v závislosti na dominanci prvku - jevu (jeho rušivém výkonu, topologickém umístění, atd.) způsobujícího dané kolísání napětí v daném bodě napájecí sítě. Příčinou kolísání napětí jsou především změny odběru zátěží – elektrických spotřebičů, které způsobují změny úbytku napětí na impedanci napájecí sítě. Změny napětí v síti však způsobují i změny provozních stavů napájecí sítě. V neposlední řadě může být původ kolísání napětí přímo ve zdroji elektrické energie.

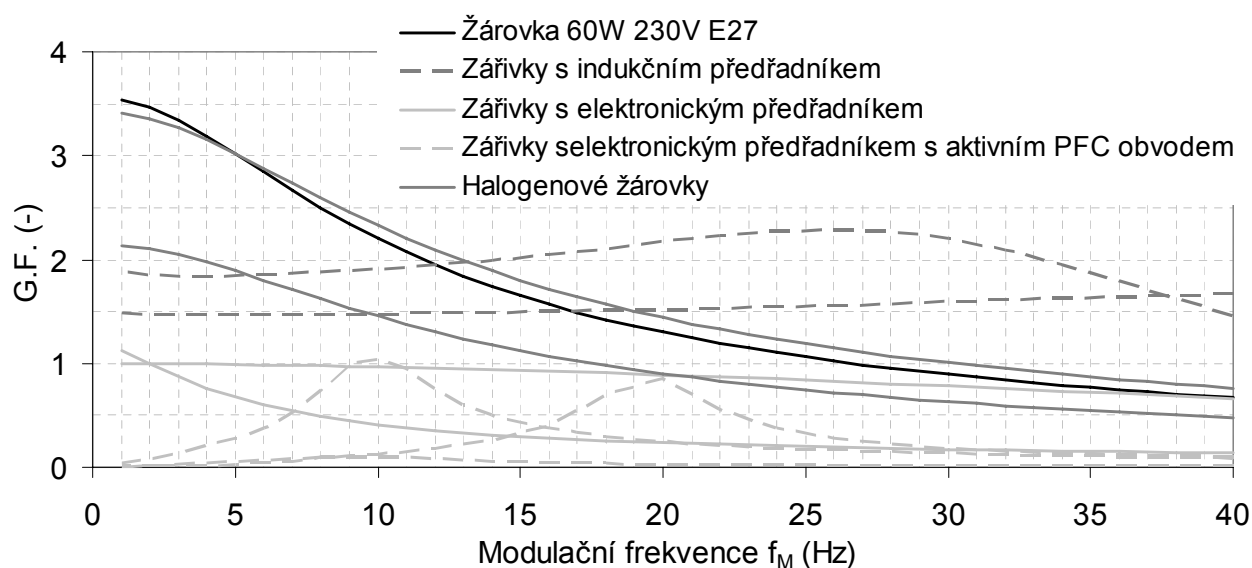
1.2 SVĚTELNÉ ZDROJE

Jakákoliv změna napájecího napětí vyvolá u světelných zdrojů změnu generovaného zářivého toku. Přenos kolísání napětí na kolísání výstupního záření světelných zdrojů je velice komplexní problém závislý na principu funkce světelného zdroje, jeho konstrukci, dimenzování, napájení, ale i provozních podmínkách, atd. [12]. Odezva světelného zdroje na změnu či kolísání napětí (aperiodickou či periodickou amplitudovou modulaci napětí) může být vyjádřena jeho přenosovou funkcí, kterou je popsána očekávaná změna výstupního parametru na základě změny parametru vstupního, kdy vstupním parametrem je obvykle relativní velikost změny velikosti napětí $\Delta U / U$

a výstupním parametrem relativní velikost změny velikosti světelného toku $\Delta\Phi/\Phi$. Jejich podíl definuje zesílení přenosu

$$G.F. = \frac{\Delta\Phi/\Phi}{\Delta U/U} \quad (1.6)$$

Každý světelný zdroj má svou vlastní přenosovou funkci, kterou lze získat vyhodnocením odezvy světelného zdroje na periodickou amplitudovou sinusovou modulaci napětí v rozsahu modulačních frekvencí (0;50) Hz [17], nebo vyhodnocením odezvy na skokovou změnu velikosti napětí [39]. Odezvu je přitom možné měřit, nebo i simulovat na modelu světelného zdroje [37][16]. Změřené amplitudové frekvenční charakteristiky vybraných typů světelných zdrojů jsou na Obr. 1.3.



Obr. 1.3. Křivky zesílení světelných zdrojů při amplitudové sinusové modulaci napětí

1.3 VJEM RUŠIVÉHO BLIKÁNÍ

Zrakový systém je velmi složitá biologická soustava s komplikovanou anatomickou strukturou [19][24]. Vjem rušivého blikání je dán fyziologií zraku popisující proces vidění a činnost zraku a to zejména spektrální citlivostí oka a jeho jednotlivých částí - fotoreceptorů [24][31][6][38], zorným polem [24][19] a adaptačními mechanismy oka [19][24].

Je zřejmé že osoby s rozdílnou anatomii a fyziologií oka mohou mít významně odlišný zrakový vjem stejných objektů. Zrakový vjem může být specifikován na základě parametrů objektu v prostoru. Některé z těchto parametrů jsou [24]:

- jas objektu,
- jas pozadí (adaptační jas),
- kontrast,
- spektrum světla objektu a pozadí,
- čas trvání vjemu,
- kmitočtové charakteristiky změn,
- velikost objektu,
- umístění objektu od hlavní osy pohledu,
- pohyb v zorném poli,
- jasové nerovnoměrnosti objektu a pozadí.

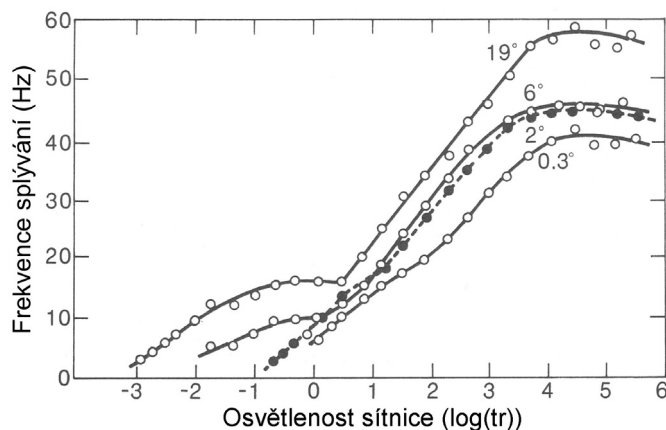
Viditelnost jakéhokoliv objektu je potom funkcí všech uvedených parametrů, i případně dalších, například kognitivních faktorů jako je pozornost, očekávání a návyk, které mohou významně ovlivnit detekci a rozpoznávání objektů.

Každý objekt může být rozlišen od svého pozadí na základě rozdílu - kontrastu jasu nebo kontrastu barev. Kromě zdrojů světla jsou oba typy kontrastů funkcí odrazných vlastností povrchů osvětlované scény a dopadajícího osvětlení. Zrakový systém není prakticky schopen poskytnout

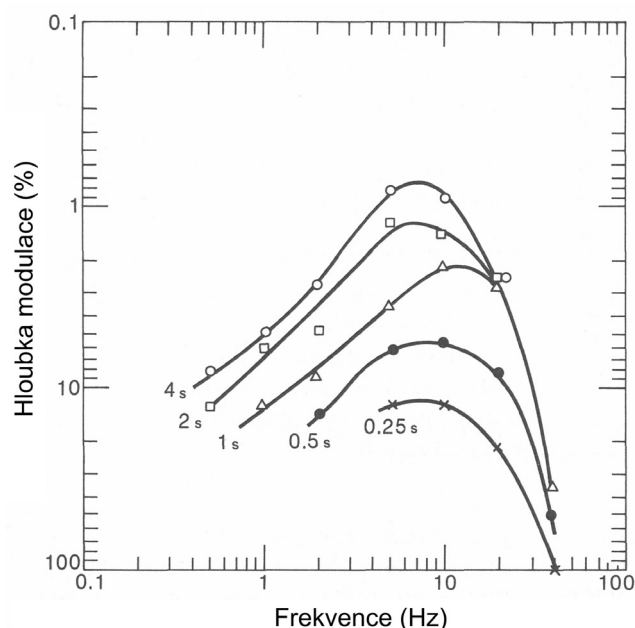
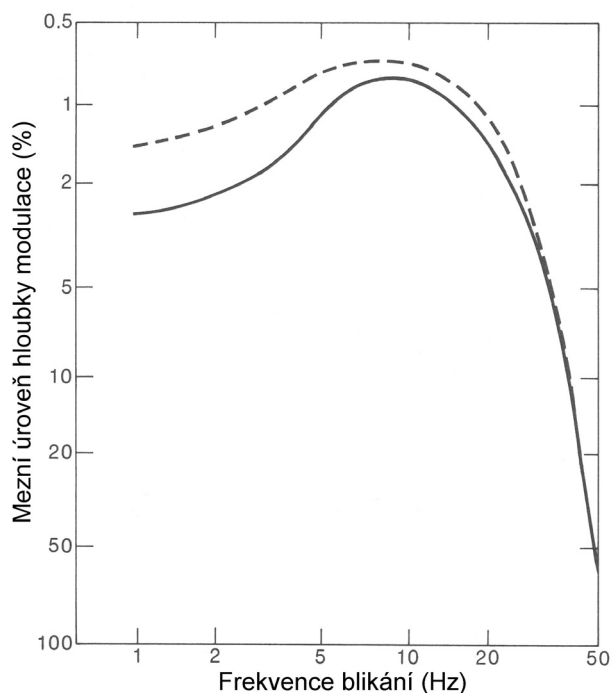
žádnou užitečnou informaci pokud je sítnice osvětlena rovnoměrně, ale je vysoce specializovaný informovat o nespojitostech a gradientech jasů v zorném poli. Objekt, který má stejný jas jako pozadí, může být stále rozpoznán na základě barevné informace. Barevný kontrast je ale méně zřetelný než bezbarvý kontrast jasů. Nicméně je rovněž viditelný, obzvláště v případě ostrých prostorových nespojitostí mezi dvěma barvami. Rozdílnost barevné hranice může být odhadnuta porovnáním s nebarevnou hranicí [24]. Model pro barevný kontrast byl vyvinutý na základě odezvy čípků na dlouhé a střední vlnové délky světla. Vjem kontrastu okem je tedy kompozicí jasů i barevné informace. Na velikosti kontrastu podle rovnice závisí i pravděpodobnosti vjemu kontrastu. 50-procentní percentil detekovatelnosti kontrastu se potom nazývá prahovou úrovní kontrastu a liší se u každého pozorovatele v závislosti na době expozice, velikosti objektu a jasu pozadí. Přitom detekovatelnost kontrastu s velikostí objektu vzrůstá a rovněž se mění s umístěním podnětu, což souvisí s expozicí určité části sítnice s danou hustotou jednotlivých typů fotoreceptorů.

Obdobné zákonitosti platí i pro zrakový podnět vyvolaný časovými změnami parametrů objektu, které vedou ke vjemu blikání. Lze oprávněně předpokládat, že prostorové a časové změny jasu a barevnosti vyvolávají obdobný zrakový vjem, s tím že v případě časových změn jasu a barevnosti jsou nadto zahrnuty dynamické vlastnosti adaptačních mechanismů zraku. Zrakový vjem nevzniká ani nezaniká současně s podnětem, ale s určitým časovým zpožděním. Rychlost vnímání závisí na jasu předmětu v zorném poli a zvyšuje se s růstem jasu. Rychlost vnímání roste též se zvětšováním kontrastu jasu detailu a pozadí. Trvání zrakového vjemu podstatně ovlivňuje hladina jasu pozadí a doba trvání světelného popudu [19]. Zrakový vjem má i určitou setrvačnost, kdy se uplatňuje fyziologické zpoždění odezvy zrakového systému, v důsledku probíhajících fotochemicko-elektrických procesů. Jestliže se záblesky, např. pravoúhlé opakují periodicky s frekvencí mezi 2 a 20 Hz, může být jejich viditelnost lepší, než když je stimul kontinuální. Se zvyšující se frekvencí blikajícího podnětu lze dosáhnout bodu, kdy je zrakový vjem stejný jako při podnětu s jasnem rovným aritmetickému průměru intenzit periodického podnětu (Talbotův zákon) [19]. Tento bod se nazývá kritická frekvence splývání blikání (CFF). Frekvence, při které splývání nastává, je závislá na velikosti podnětu, tvaru, pozici popudu na sítnici, spektrálním složení světla, adaptačním jasu, hloubce modulace a stavu adaptace oka. Závislost CFF na adaptačním jasu pro centrálně fixovaný testovací objekt různých velikostí je na Obr. 1.4. Frekvence splývání téměř nepřekračuje 60 Hz.

Pro střídavý podnět je hloubka modulace, nezbytná pro detekci – vjem blikání, funkcí opakovací frekvence podnětu. Přenosovou funkci zraku pro tyto časové změny určují právě dynamické vlastnosti adaptačních funkcí oka. Příklad mezní úrovně hloubky modulace v závislosti na frekvenci blikání je na Obr. 1.5. Obdobné průběhy jsou známy jako DeLangeovi křivky a určují přenosovou funkci pro časovou modulaci jasu zrakového podnětu. Plocha pod křivkou vymezuje oblast s parametry, které vedou ke vjemu blikání. Na Obr. 1.6 je potom mezní úroveň modulace pro vjem blikání v závislosti na celkové době trvání blikání. Tento jev, změna průběhu a zvyšování citlivosti vjemu blikání s prodlužující se dobou expozice, souvisí s částí s paměťovým efektem mozku.



Obr. 1.4. CFF v závislosti na osvětlení sítnice pro různé velikosti popudu [21]



Obr. 1.5. Mezní úroveň hloubky modulace v závislosti na frekvenci blikání pro vjem blikání pro malé blikající pole na neblíkajícím pozadí Langeovi křivky [24] s průměrným jasem blikajícího pole(---) ostré přechody, (—) neostré přechody [24]

Obr. 1.6. Prahová úroveň blikání v závislosti na frekvenci blikání pro různé doby trvání blikání (De Langeovi křivky) [24]

Při změnách velikosti zářivého toku světelných zdrojů v důsledku změn velikosti napětí dochází v závislosti na typu světelného zdroje k větší či menší změně spektra zářivého toku. S časovou změnou velikosti záření vyvolávající zrakový vjem se může v čase měnit i jeho spektrální složení. A stejně jako existuje chromatický kontrast, může změna spektra světla podnětu i při stejném jasu vyvolat vjem chromatického blikání. Za normálních – běžných podmínek jsou ale změny spektra světelných zdrojů při změně zářivého toku relativně malé a jejich vliv tedy není významný. Studie zabývající se chromatickým flikrem je např. v [30].

V centrech nervové soustavy vyvolávají vyříděné, upravené a zpracované informace o světelných popudech dvě kvalitativně odlišné reakce. První probíhá nezávisle na vědomí člověka jako reflexní reakce organismu na určité dávky záření (vliv na metabolismus, krevní skladbu apod.) a současně jako adaptační a akomodační, popřípadě i motorické přizpůsobení zrakového orgánu světelným vlivům. Druhý komplex reakcí vyplývá ze zrakového vjemu, uvědomění si situace, a to za spoluúčasti jiných smyslových orgánů v souvislosti s poznatky z předcházejících podnětů i vzhledem ke zkušenostem zahrnutým v záznamech paměti. Uvědomění si určité vizuální informace o prostředí vyvolává také nervové impulsy v asociačních psychických zónách, které souvisí s myšlením, cítěním, pozorností, představivostí, vzrušením apod. Všechny tyto vlivy určují konečný postoj a reakci člověka na vizuální vjem. Funkce paměťových a pozornostních mechanismů je nezanedbatelnou součástí a podmínkou činnosti zraku [19]. Jinými slovy, soustředěné zcela záměrně smyslově orientované pokusy, kterým odpovídají výsledky vjemu blikání uvedené v předchozím, měly za cíl za daných podmínek najít právě prahovou úroveň pro detekci blikání. Za normálních podmínek však pozorování změn v časovém rozložení jasů osvětlované scény není hlavním zrakovým úkonem. Člověk konající v podmínkách přirozeného nebo umělého osvětlení činnost ale může být blikáním či změnami v prostorovém a časovém rozložení jasů rušen. Rušení spočívá v uvědomění si těchto změn a tehdy mluvíme o rušivém

vjemu blikání. Jeho mezní – prahová úroveň je tedy zcela logicky vyšší než v případě cílené detekce blikání. Nicméně funkce paměťových a pozornostních mechanismů nemá téměř žádný vliv na tvar průběhu mezní křivky, který je naopak dán adaptačními mechanismy oka.

V návaznosti na experimenty zkoumající odezvu systému oko-mozek na kolísání napětí resp. blikání světelných zdrojů byly vytvořeny i zjednodušené modely uvedeného systému a provedeny jejich parametrické simulace (např. v [15]). Nicméně tyto modely mapují pouze několik základních funkcí zraku, souvisejících s vjemem rušivého blikání.

1.4 MEZE KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ PRO RUŠENÍ SYSTÉMU SVĚTELNÝ ZDROJ-OKO-MOZEK

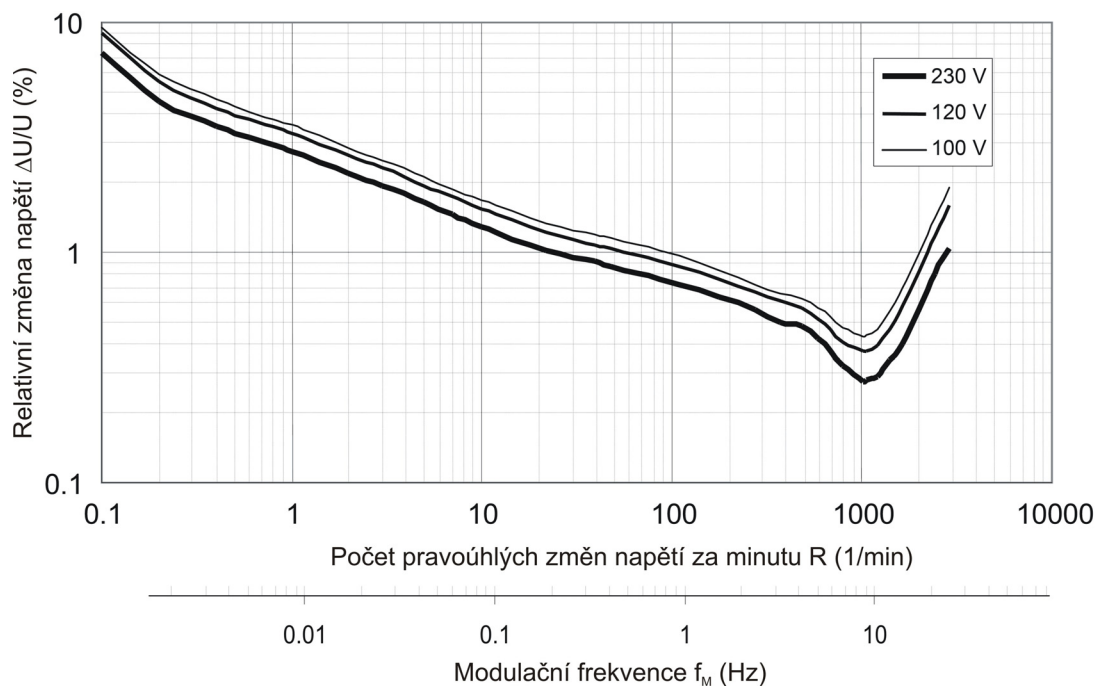
Vjem blikání je velice komplexní problém závislý na mnoha specifických podmínkách (kap. 1.3). Neopomenutelnými faktory jsou subjektivita vjemu blikání a rozdíl mezi jeho detekovatelností a mezi rušivých účinků na činnost člověka. Blikání světla je produkováno světelnými zdroji a jeho příčinou jsou změny a kolísání jejich napájecího napětí. Přenos kolísání napětí na kolísání světla zdroje je dáno typem, principem funkce a mnoha dalšími vlastnostmi světelných zdrojů (kap. 1.2). Jak je popsáno výše, změnu nebo kolísání velikostí napětí lze vyjádřit jeho amplitudovou a fázovou modulací nebo stejně tak deformací meziharmonickými složkami napětí (kap. 1.1). Výsledný vjem blikání je potom důsledkem celého řetězce a pro jeho specifické parametry lze pro rušení zrakového vjemu stanovit mezní velikost kolísání nebo rychlých změn napětí.

První meze rychlých změn napětí v závislosti na počtu změn byly vytvořeny okolo roku 1920 na základě studie změn napětí v důsledku spouštění pohonů, způsobující blikání žárovkového světelného zdroje a jejich vlivu na zrakový vjem člověka [36]. Rozdíl mezi prahovou úrovní pro viditelné a rušivé blikání byl poprvé souhrnně zkoumán a publikován fy GE Company již před rokem 1930, a dále fy Westinghouse v roce 1959 [35].

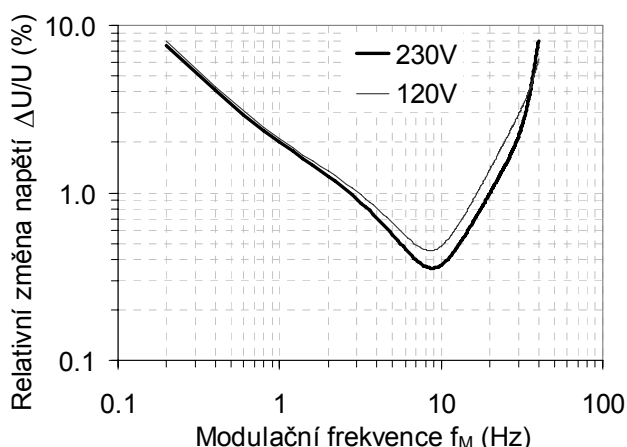
V průběhu třicátých až sedmdesátých let minulého století se otázkou vjemu blikání zabývala celá řada psychologů a výsledkem jejich zkoumání bylo zmapování základních funkcí především adaptačních mechanismů zrakového systému. Následující práce v Evropě v sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století [35][1] vedly vytvoření meze pro pravoúhlé změny velikosti napětí v závislosti na jejich četnosti pro žárovku 60W 230V způsobující rušení zrakového vjemu průměrného pozorovatele. Výsledná křivka, která je uvedena na Obr. 1.7, je výsledkem analýzy laboratorních zkoušek provedených na rozsáhlém vzorku pozorovatelů a odpovídá hranici vjemu rušivého blikání pro 50% pozorovatelů. Tzn., že změny napětí s parametry nad mezní křivkou způsobily u více než 50% respondentů rušivý vjem blikání a pod křivkou nezaznamenalo více než 50% respondentů úroveň blikání jako rušivé. Později byla tato křivka zavedena do EMC norem řady ČSN EN 61000 jako kompatibilní úroveň pro pravoúhlé změny napětí, a v posledních edici normy ČSN EN 61000-2-2 [4] je nazvána křivkou stejné míry vjemu blikání.

K mezní křivce pro žárovku 60 W 230 V byly postupně přidány i mezní křivky pro 60W žárovky pro napájecí systémy 120 V 60 Hz a 100 V 50 Hz. Žárovka 60 W s dvojitě vinutým spirálovým vláknem použitá při testech, které vedly k sestrojení mezní křivky na Obr. 1.7, byla v té době považována za základní, nejpoužívanější a citlivý světelný zdroj, díky čemuž se stala i referenčním světelným zdrojem.

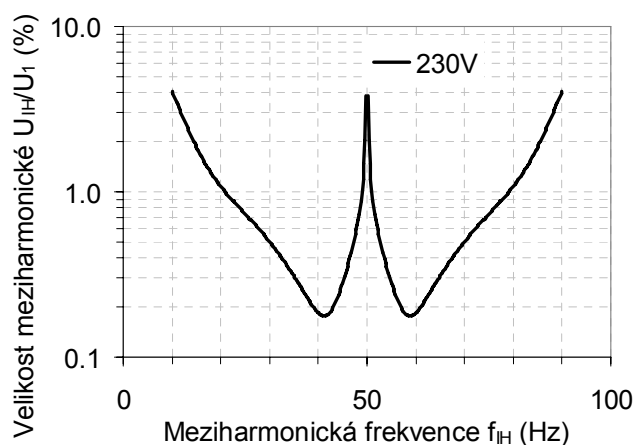
Na základě mezní křivky pro pravoúhlé změny napětí byla odvozena i mezní křivka pro sinusové změny napětí (Obr. 1.8) a následně v devadesátých letech i mezní křivka meziharmonických napětí v závislosti na meziharmonické frekvenci do 100 Hz, která byla do druhé edice ČSN EN 61000-2-2 [4] zavedena jako kompatibilní úroveň pro meziharmonická napětí. Na obrázku Obr. 1.9 je uvedena mezní velikost meziharmonických napětí v závislosti na meziharmonické frekvenci pro žárovku 60 W a napájecí systém 230V 50Hz.



Obr. 1.7. Křivka stejné míry vjemu ($P_{st}=1$) pro pravoúhlé změny napětí v rozvodných sítích nízkého napětí systému referenční 60 W žárovka 230 V (Evropa), 120 V (Severní Amerika) [4], 100 V (Japonsko) – normalizovaný pozorovatel



Obr. 1.8. Křivka stejné míry vjemu ($P_{st}=1$) pro sinusové kolísání napětí v rozvodných sítích nízkého napětí systému referenční 60 W žárovka 230 V (120 V) – průměrný pozorovatel



Obr. 1.9. Kompatibilní úroveň pro meziharmonická napětí související s blikáním referenční 60W žárovky 230V jako funkce meziharmonické frekvence do 100 Hz [2] [4]

1.5 MĚŘENÍ MÍRY VJEMU BLIKÁNÍ

Měřit objektivně rušivý vjem blikání je velmi obtížné, čemuž odpovídá i dlouhá cesta vývoje prvního měřiče blikání. Na základě výzkumů v šedesátých a sedmdesátých letech zaměřených na odezvu zrakového systému a paměťovou funkci mozku [24][1] byly sestaveny první modely pro určování odezvy oko-mozek. Následné dlouhodobé práce zabývající se odezvou zrakového systému na sinusové kolísání napětí a sumačním efektem více frekvenčních složek vedly až k sestavení Evropského měřiče blikání [35]. První měřiče blikání zahrnovali standardní 60W 230V žárovku, jako nejběžnější světelný zdroj používaný v Evropě, s fotočlánkem a analogovým modelem simulujícím odezvu zrakového systému průměrného pozorovatele. Následující výzkumy z 80. let 20. století v oblasti vyhodnocení flikru, spadající především do aktivit UIE, vyústily ve

vytvoření standardizovaného modelu měřiče, který měří kolísání napětí a simuluje odezvu referenčního světelného zdroje, kterým je vakuovaná žárovka 60 W 230 V s dvojitě vinutým spirálovým vláknem a průměrného pozorovatele [5].

Metoda vyvinutá UIE a převzatá IEC pro měření blikání je tedy založena na modelu, který simuluje odezvu řetězce „napětíová změna – světelný zdroj – oko – proces vnímání v lidském mozku“. Měřené kolísání napětí je zpracováno s využitím modelu referenčního světelného zdroje, který přenáší kolísání napájecího napětí na kolísání světelného toku a modelu odezvy průměrného pozorovatele na kolísání světelného toku. Výstupem je časový průběh okamžité míry vjemu blikání $P_f(t)$. Nicméně okamžitá míra vjemu blikání odpovídá odezvě na ustálené kolísání (blikání). Flicker je více tolerovatelný pokud nastává zřídka s krátkou dobou trvání. Na druhou stranu se jeho tolerovatelnost snižuje v případě zvyšování úrovně intenzity blikání, frekvence opakování, nebo doby trvání blikání. Následuje tedy statistické zpracování, zahrnující uvedené hodnocení, jehož výstupem je krátkodobá míra vjemu blikání P_{st} odpovídající ekvivalentní hodnotě míry vjemu blikání za určitou pozorovací periodu. Normalizovaná odezva flickrmetru odpovídá invertované a normalizované křivce na Obr. 1.7 pro pravoúhlé kolísání napětí a invertované a normalizované křivce na Obr. 1.8 pro sinusové kolísání napětí. Metoda byla ověřena pro různé typy průběhů změn a kolísání napětí a zrakový vjem člověka je rušen v případě, že je hodnota krátkodobé míry vjemu blikání $P_{st} \geq 1$.

V současné době je UIE/IEC flickrmetr popsán v normě ČSN EN 61000-4-15 [5]. Popis činnosti je založen na analogové realizaci a zahrnuje jednotlivé bloky včetně metod pro verifikaci a validaci jeho funkce. Flickrmetr je v zásadě specializovaný analyzátor amplitudově modulovaného signálu s nosnou frekvencí odpovídající základní harmonické frekvenci elektrické sítě, s následným vyhodnocením frekvenční odezvy systému referenční světelný zdroj-ok-mozek průměrného pozorovatele. Blokované funkční schéma UIE/IEC flickrmetru je na Obr. 1.10. Strukturu měřiče můžeme rozdělit do třech částí:

- úprava měřeného signálu, která je realizována v bloku 1,
- modelování odezvy řetězce světelný zdroj – oko – mozek, prováděné v blocích 2, 3 a 4,
- statistická analýza signálu blikání v reálném čase s prezentací výsledků, uskutečňovaná blokem 5.

Blok 1 – upravuje, kromě jiného, velikost vstupního napětí na referenční úroveň, tak aby bylo měření prováděno nezávisle na velikosti napětí.

Blok 2 – úkolem bloku je provést kvadratizaci průběhu vstupního napětí se zvýrazněním modulační složky a tak modelovat chování světelného zdroje s tím, že průběh světelného toku je úměrný průběhu výkonu. Kvadratizace což je první krok k získání signálu lineárně úměrnému modulační složce vstupního napětí.

Blok 3 – je tvořen kaskádou frekvenčních filtrů a přepínačem měřících rozsahů. V blokovém schématu (Obr. 1.10) jsou uvedeny dva, nicméně jsou tři.

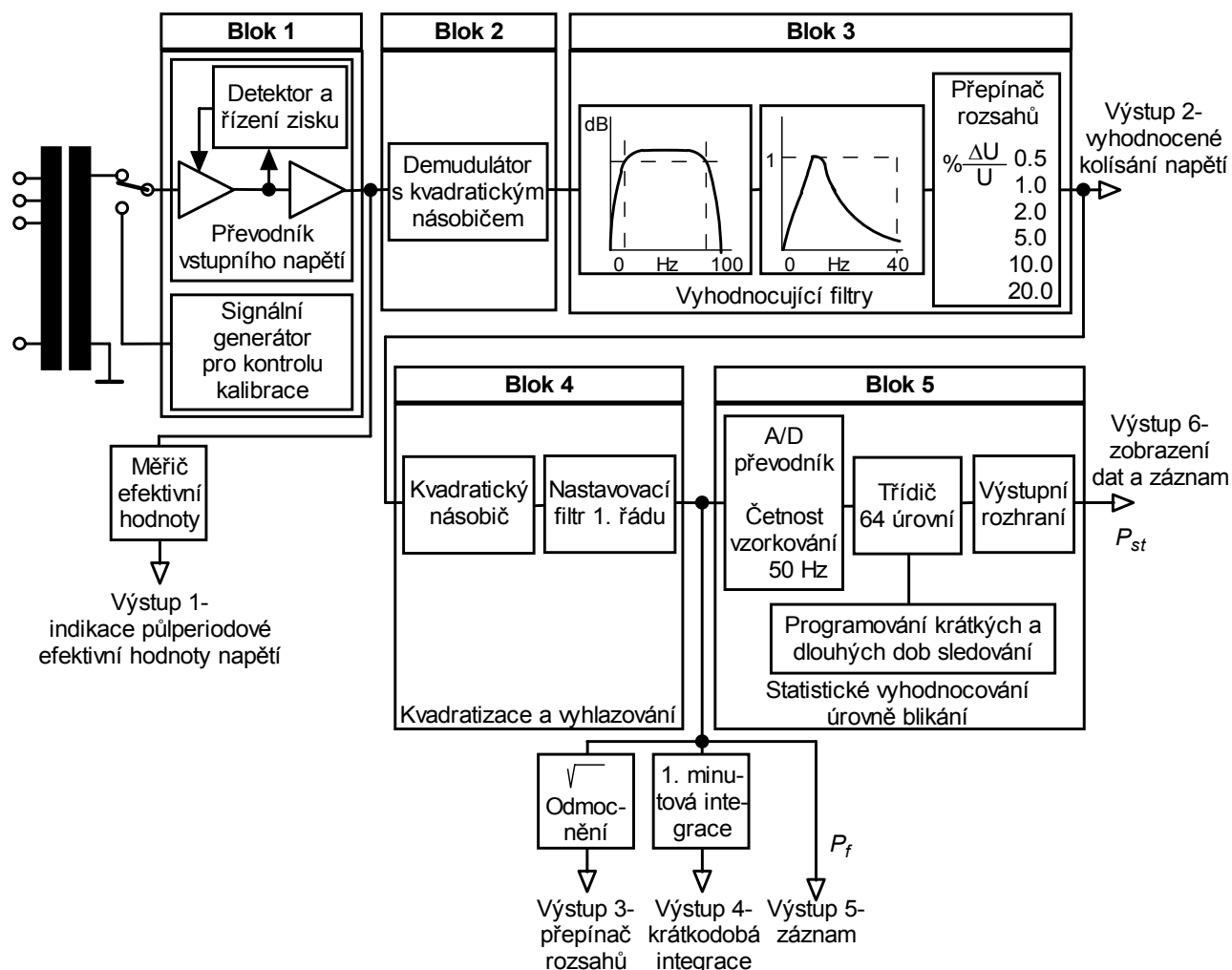
První filtr je hornopropustný a eliminuje stejnosměrnou složku.

Druhý je dolnopropustný, který potlačuje sudé násobky základní harmonické frekvence sítě, vzniklé kvadratizací vstupního signálu. Čímž je fakticky dokončena demodulace vstupního napětí a do dalších částí měřiče vstupuje pouze signál úměrný modulační složce vstupního napětí.

Třetím filtrem bloku 3 je váhový filtr, emulující odezvu systému světelný zdroj (referenční žárovka 60W 230V – spolu s předchozími úpravami) – oko.

Blok 4 – zajišťuje dvě funkce. Za prvé kvadratizaci signálu blikání pro modelování nelineárního vnímání při přenosu blikání z oka do mozku. Za druhé, průměrování signálu modelující paměťový efekt v mozku. Výstup bloku 4 představuje okamžitou hodnotu míry vjemu blikání P_f .

Blok 5 –vyhodnocuje rušivost kolísání napětí s ohledem na jeho neustále změny a v zásadě stochastický průběh a zahrnuje tedy statistické zpracování výstupního signálu bloku 4, jehož součástí je třídící postup s dělením pro určení funkce kumulativní pravděpodobnosti typu čas na úroveň za nastavitelný měřicí interval, ze které se vypočte krátkodobá míra vjemu blikání P_{st} a po uplynutí předepsaného počtu intervalů následně dlouhodobá míra vjemu blikání P_{lt} . Výstupem bloku 5 jsou tedy posloupnosti těchto dvou parametrů.



Obr. 1.10. Funkční schéma UIE/IEC měřiče blikání [5]

2 KOLÍSÁNÍ VELIKOSTI NAPĚTÍ ZPŮSOBENÉ INTERAKCÍ HARMONICKÝCH A MEZIHARMONICKÝCH SLOŽEK

Je zřejmé, že pokud základní průběh napětí obsahuje mezharmonickou složku, efektivní hodnota i maximální hodnota výsledného napětí se mění (kolísá) (kap. 1.1). Přičemž každý světelný zdroj reaguje na určitý typ kolísání napětí (kap. 1.2). Například, teplotní zdroj jako žárovka je citlivá na kolísání efektivní hodnoty napětí, protože její příkon je úměrný efektivní hodnotě napájecího napětí. A naopak výbojové světelné zdroje s elektronickým předřadníkem jsou zcela jistě citlivé na kolísání maximální hodnoty napětí, protože usměrňovač s vyhlazovacím kondenzátorem, který tvoří vstupní napájecí obvod elektronického předřadníku, se chová jako detektor maximální hodnoty a tedy příkon výbojky je úměrný tomuto vyhlazenému napětí. Pro oba případy potom můžeme napsat (s tím, že světelný tok světelného zdroje je úměrný jeho příkonu):

$$P \approx U_x \rightarrow \frac{\Delta P}{P} \approx \frac{\Delta U_x}{U_x} \quad (2.1)$$

kde x představuje buď efektivní (RMS) hodnotu:

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} u(t)^2 dt} \quad (2.2)$$

kde $T_1 = f_1^{-1}$, nebo maximální, vrcholovou (pk) hodnotu:

$$U_{pk} = \max[u(t)]_{t=0}^{T_1/2} = \max[\sqrt{u(t)^2}]_{t=0}^{T_1/2} \quad (2.3)$$

Definice velikosti kolísání napětí může být, obdobně jako v [40], vyjádřena následovně:

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{(\max[U_x(t)] - \min[U_x(t)])/2}{U_{1,x}} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Pro identifikaci spektrálních složek napětí, které mohou potenciálně způsobit kolísání světelného toku v citlivé oblasti (1-40) Hz, můžeme zapsat periodický ale i neperiodický obecně deformovaný průběh napájecího napětí pomocí následujícího vztahu:

$$u(t) = u_1(t) + u_h(t) + u_{IH}(t) \quad (2.5)$$

kde $u_1(t)$ je základní jmenovité napětí sítě:

$$u_1(t) = U_{1,pk} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) \quad (2.6)$$

Dále $u_h(t)$ je suma harmonických složek napětí:

$$u_h(t) = \sum_{h \geq 2} U_{h,pk} \cdot \sin(2\pi \cdot f_h \cdot t + \varphi_h) \quad (2.7)$$

kde $U_{h,pk}$ je amplituda harmonické složky řádu h , f_h frekvence harmonické řádu h , φ_h fázový posuv harmonické řádu h . A nakonec $u_{IH}(t)$ je suma všech mezharmonických složek napětí:

$$u_{IH}(t) = \sum_{IH} U_{IH,pk} \cdot \sin(2\pi \cdot f_{IH} \cdot t + \varphi_{IH}) \quad (2.8)$$

kde $U_{IH,pk}$ je amplituda mezharmonické složky s frekvencí f_{IH} , a fázovým posuvem φ_{IH} .

Z definic (2.2) a (2.3) je patrné, že efektivní hodnota i maximální hodnota napětí v daném intervalu je funkcí kvadrátu okamžité hodnoty napětí $u(t)^2$. Je tedy třeba umocnit pravou stranu rovnice (2.5) a po úpravě dostaneme:

$$u^2 = u_1^2 + u_h^2 + u_{IH}^2 + 2 \cdot u_1 \cdot u_h + 2 \cdot u_1 \cdot u_{IH} + 2 \cdot u_h \cdot u_{IH} \quad (2.9)$$

Cílem je především vyjádřit frekvence kolísání jednotlivých komponent vztahu (2.9) a proto bude zapotřebí následujícího vztahu pro úpravu goniometrických funkcí:

$$\sin \omega_i \cdot \sin \omega_j = \frac{1}{2} (\cos(\omega_i - \omega_j) - \cos(\omega_i + \omega_j)) \quad (2.10)$$

Komponenty u_I^2 a u_h^2 (tedy kvadráty harmonických) vedou, s použitím rovnice (2.10), na stejnosměrné složky a na složky kolísající s dvojnásobnou frekvencí. Tyto komponenty sice mění velikost efektivní i maximální hodnoty, nicméně pokud jsou velikosti U_I a U_h stacionární, pak podle definice nezpůsobí žádné kolísání velikosti napětí. Příspěvek výrazu u_{IH}^2 vytvoří opět stejnosměrnou složku a dále složku s dvojnásobnou frekvencí dané meziharmonické $2f_{IH}$, která pro určitý rozsah meziharmonických frekvencí může způsobit kolísání velikosti napětí s frekvencí v citlivé oblasti, tedy (1-35) Hz. Nicméně velikost meziharmonických je v praxi malá a tato složka bude mít ve vztahu k jiným převážně zanedbatelný vliv. Výsledkem součinu základní harmonické s harmonickými $2 \cdot u_I \cdot u_h$ jsou složky s frekvencemi $(h \pm 1) \cdot f_I$, přičemž nejnižší frekvence je f_I . Opět platí, že tyto komponenty mění velikost efektivní i maximální hodnoty, nicméně pokud jsou velikosti U_I a U_h stacionární, pak podle definice nezpůsobí žádné kolísání velikosti napětí. Podobně, $2 \cdot u_I \cdot u_{IH}$ vytváří komponenty na součtových a rozdílových frekvencích:

$$|f_I \pm f_{IH}| \quad (2.11)$$

Tyto komponenty mají potenciál způsobovat kolísání napětí na frekvencích v citlivé oblasti (1-35) Hz a jsou jeho hlavní příčinou, jak již ostatně vyplývá z rozborů provedených v kap. 1.1. A nakonec, výraz $2 \cdot u_h \cdot u_{IH}$ vede na spektrální složky s frekvencemi:

$$|f_h \pm f_{IH}| \quad (2.12)$$

Tyto složky mohou opět způsobit kolísání velikosti napětí v citlivé oblasti, avšak z hlediska velikosti jde pouze o přírůstek závislý na velikosti harmonické složky.

Dále je třeba přihlídnout k tomu, že dle definice RMS (2.2) může RMS hodnota kolísat maximálně s frekvencí 25 Hz, jelikož je počet vypočtených efektivních hodnot za sekundu pouze 50. Pokud bychom vypočetli efektivní hodnotu napětí každou půlperiodu, zvýšila by se šířka pásma průběhu půl-periodových efektivních hodnot a tedy počet vzorků na dvojnásobek, tedy na 100 S/s. Pro vrcholovou hodnotu je dle definice (2.3) maximální frekvence kolísání 50 Hz. Na druhou stranu minimální frekvence kolísání velikosti napětí je 0 Hz.

Ve většině případů je napětí deformováno více než jednou harmonickou a jednou meziharmonickou složkou. Pro zjednodušení však začneme s analýzou napájecího napětí, které je tvořeno základní složkou napětí a jednou injektovanou meziharmonickou složkou.

2.1 KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ ZPŮSOBENÉ JEDNOU MEZIHARMONICKOU SLOŽKOU

Signál obsahující pouze základní harmonickou a jednu meziharmonickou s amplitudou meziharmonické složky zadanou jako násobek amplitudy základní harmonické, tedy relativní hodnotou $m_{IH} = U_{IH,pk} / U_{I,pk}$: je podle (2.5):

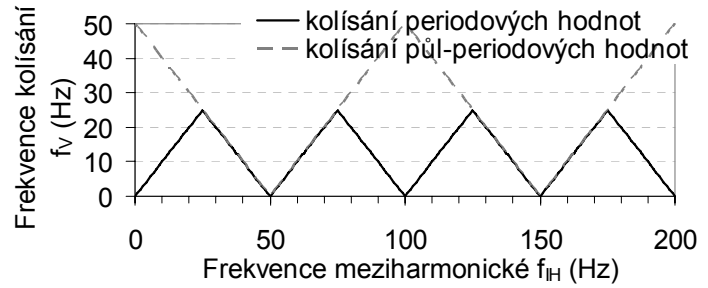
$$u(t) = u_1(t) + u_{IH}(t) = U_{I,pk} \cdot [\sin(2\pi f_1 t) + m_{IH} \cdot \sin(2\pi f_{IH} t + \varphi_{IH})] \quad (2.13)$$

Základní frekvence kolísání velikosti napětí, časového průběhu efektivní a maximální hodnoty, určená rovnicí (2.11) je formována maximální možnou frekvencí kolísání těchto průběhů, která je pro periodové hodnoty 25 Hz a pro půl-periodové hodnoty 50 Hz. Základní frekvence kolísání průběhu půl-periodových a periodových hodnot v závislosti na frekvenci meziharmonické je na Obr. 2.1 a je dána upravenou rovnicí (2.11) respektující mezní frekvence kolísání:

$$f_V = |k \cdot f_1 - f_{IH}| \quad (2.14)$$

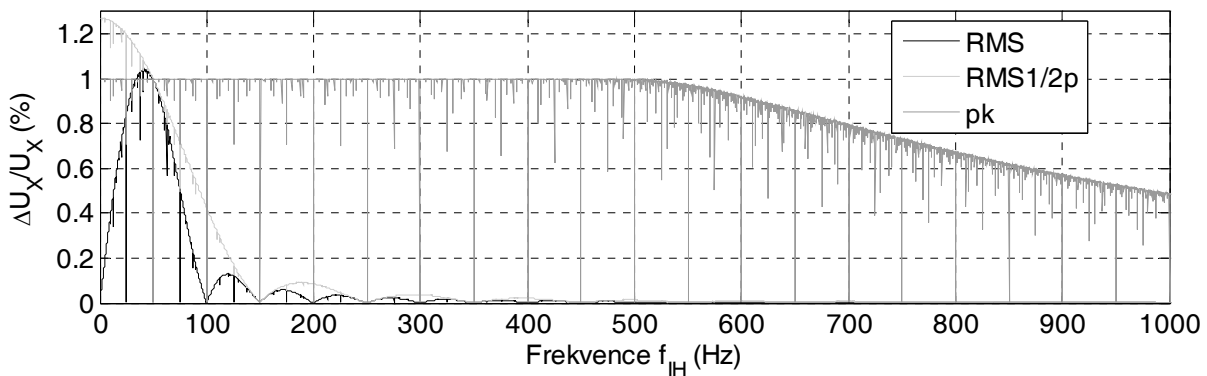
kde $k \cdot f_1$ je pro výpočet frekvence kolísání velikosti periodové efektivní hodnoty celočíselný násobek základní systémové frekvence ($k=0,1,2,3,\dots$) nejbližší k frekvenci f_{IH} a pro výpočet velikosti půlperiodové efektivní a maximální hodnoty lichý násobek základní harmonické frekvence ($k=1,3,5,\dots$) nejbližší k frekvenci f_{IH} .

Závislosti velikosti kolísání periodové a půl-periodové efektivní a půlperiodové maximální hodnoty napětí na frekvenci meziharmonické byly vypočteny numericky v Matlabu z okamžitého průběhu napětí s dobou trvání 20 s se vzorkovací frekvencí 102,4 kS/s pro meziharmonické frekvence v rozsahu $f_{IH}=0,1-3000$ Hz s krokem 0,1 Hz a pro relativní velikost meziharmonické $m_{IH}=0,05, 0,1, 0,3, 0,6, 1, 3, 6, 10$ a 30% U_I . Příklady pro $m_{IH}=1\%$ jsou uvedeny na Obr. 2.2.



Obr. 2.1. Grafické zobrazení rovnice (2.14)

Je zřejmé, že vliv modulace na velikost kolísání efektivní hodnoty je podstatný v případě, je-li meziharmonická blízká základní harmonické. Kolísání efektivní hodnoty klesá se zvyšující se frekvencí injektované meziharmonické složky a je zanedbatelné pro frekvence vyšší než $f_{IH} > 8 \cdot f_I$. Průběh velikosti kolísání půlperiodové efektivní hodnoty je odlišný od průběhu velikosti kolísání periodové efektivní hodnoty, nicméně se zvětšující se meziharmonickou frekvencí opět velmi rychle klesá. Oproti tomu, velikost kolísání maximální velikosti napětí je úměrná velikosti injektované meziharmonické složky, ale pouze pro určitý rozsah frekvencí.

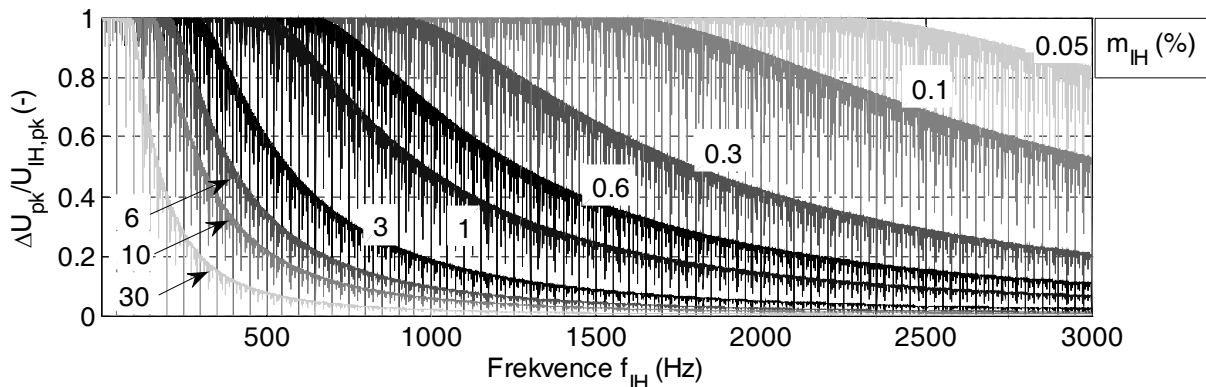


Obr. 2.2. Velikost kolísání periodové (RMS) a půlperiodové efektivní (RMS1/2p) a půlperiodové maximální (pk) hodnoty napětí v závislosti na frekvenci a velikosti injektované meziharmonické

Pro úplný popis je však nutné vědět jak se tato závislost mění s velikostí injektované meziharmonické složky. Z toho důvodu definujeme relativní velikost kolísání efektivní hodnoty podle vztahu:

$$\frac{\frac{\Delta U_X}{U_X}}{m_{IH} \cdot 100\%} = \frac{\Delta U_X / U_{1,X}}{U_{IH,X} / U_{1,X}} = \frac{\Delta U_X}{U_{IH,X}} \quad (2.15)$$

Jak je uvedeno např. v [11], průběhy relativní velikosti kolísání efektivní hodnoty napětí jsou téměř shodné pro jakoukoliv úroveň meziharmonické m_{IH} až do meziharmonické frekvence přibližně 700 Hz. Pro vyšší frekvence je potom velikost kolísání zanedbatelná. To znamená, že vztah mezi velikostí kolísání efektivní hodnoty a velikostí meziharmonické složky můžeme považovat lineární v celém rozsahu frekvencí. Vzájemný vztah mezi velikostí kolísání maximální hodnoty napětí a velikostí meziharmonické přes celý frekvenční rozsah je dle Obr. 2.3 nelineární.



Obr. 2.3. Relativní velikost kolísání maximální hodnoty

2.2 KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ ZPŮSOBENÉ DVĚMA MEZIHARMONICKÝMI SLOŽKAMI

Napětí obsahující základní harmonickou a dvě mezharmionické je podle (2.5):

$$u(t) = u_1(t) + u_{IH1}(t) + u_{IH2}(t) \quad (2.16)$$

Přičemž obě mezharmionické složky superponované na základní harmonické napětí se podílí na kolísání výsledného průběhu napětí. V závislosti na symetrii mezharmionických složek (kap. 1.1), mohou mezharmionické vytvořit amplitudovou, fázovou nebo amplitudově-fázovou modulaci napětí s jednou základní modulační frekvencí. Anebo v případě nesymetrických frekvencí amplitudově-fázovou modulaci se dvěma základními frekvencemi kolísání.

Obě mezharmionické složky se podílejí na kolísání výsledného průběhu napětí, stejně tak jako na kolísání velikosti jeho efektivní a maximální hodnoty. Ve shodě s rovnicí (2.14), první a druhá mezharmionická způsobí kolísání velikosti napětí s frekvencí:

$$f_{v1} = |k_1 \cdot f_1 - f_{IH1}|, \quad f_{v2} = |k_2 \cdot f_1 - f_{IH2}| \quad (2.17)$$

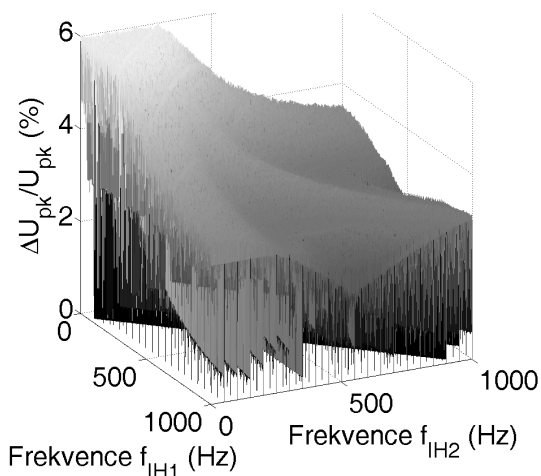
Dále bude velikost napětí kolísat s dvojnásobkem frekvence každé mezharmionické. Navíc budou mezharmionické složky produkovat kolísání velikosti napětí v důsledku jejich vzájemné interakce, které se projeví na součtové a rozdílové frekvenci obou mezharmionických. Vliv každé složky kolísání velikosti napětí na celkovou velikost kolísání je závislý na velikosti obou mezharmionických složek.

Příklad závislosti velikosti kolísání púlperiodové maximální hodnoty napětí na frekvencích dvou injektovaných mezharmionických složek je na Obr. 2.4. Výpočty byly provedeny pro mezharmionické s frekvencemi f_{IH1} a f_{IH2} v rozsahu 1-1000 Hz, s velikostí $m_{IH1} = m_{IH2} = 3\% U_1$ a fázovým úhlem $\varphi_{IH1} = \varphi_{IH2} = 0^\circ$. Na Obr. 2.5 je potom řez Obr. 2.4 odpovídající $f_{IH1} = 40$ Hz.

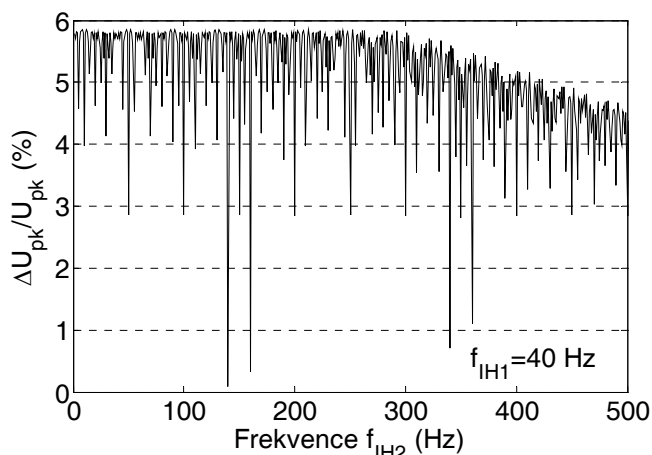
V principu je obálka průběhu celkové velikosti kolísání efektivní [11] nebo maximální hodnoty napětí v důsledku přítomnosti dvou mezharmionických složek dána aritmetickým součtem jednotlivých velikostí kolísání napětí způsobených každou z mezharmionických samostatně. To platí i pro velikost kolísání maximální hodnoty, ovšem pouze v limitovaném prostoru velikostí a frekvencí mezharmionických, kdy je vztah mezi velikostí injektovaných mezharmionických a výslednou velikostí kolísání maximální hodnoty lineární závislost. Tato podmínka může být vyjádřena následujícím vztahem:

$$(m_{IH1}(\%) + m_{IH2}(\%)) \leq \left(\frac{490}{(f_{ih1}(\text{Hz}) + f_{ih2}(\text{Hz})) - 4} \right)^{1,95} \quad (2.18)$$

Skutečná výsledná součtová hodnota je závislá na interakci a synchronizaci mezharmionických navzájem i se základní harmonickou složkou. Tedy pro výsledek sčítání je rozhodující frekvence a fázový posun každé mezharmionické složky a jejich korelace.



Obr. 2.4. Příklad velikosti kolísání púlperiodové maximální hodnoty napětí v závislosti na frekvencích dvou injektovaných mezharmónických složek



Obr. 2.5. Velikosti kolísání púlperiodové maximální hodnoty napětí způsobené dvěma mezharmónickými složkami s velikostí $3\%U_1$ v závislosti na frekvenci druhé mezharmónické, přičemž frekvence první je 40 Hz

2.3 KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ V DÚSLEDKU INTERAKCE HARMONICKÝCH A MEZHARMÓNICKÝCH SLOŽEK

Rovnice (2.5) pro obecně deformovaný průběh napájecího napětí může být přepsána následovně:

$$u(t) = U_{1,pk} \cdot \left[\sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) + \sum_{h \geq 2} m_h \cdot \sin(2\pi \cdot h \cdot f_1 \cdot t + \varphi_h) + \sum_{IH} m_{IH} \cdot \sin(2\pi \cdot h \cdot f_{IH} \cdot t + \varphi_{IH}) \right] \quad (2.19)$$

kde m_h je relativní velikost harmonické složky $m_h = U_h/U_1$.

V porovnání s předchozími příklady obsahuje napětí kromě základní harmonické a mezharmónických i harmonické složky s řádem $h \geq 2$. Potom mezharmónické mohou vytvářet spolu s harmonickými vyšších řádů další složky kolísání velikosti napětí s frekvencemi, které jsou shodné s frekvencemi kolísání velikosti napětí pro kombinace základní harmonické napětí s mezharmónickými složkami. Rovnice pro frekvence kolísání tedy vychází z rovnice (2.14). Nicméně velikosti harmonických napětí jsou prakticky malé v porovnání s velikostí základní harmonické, avšak vliv těchto komponent na velikost kolísání efektivní a maximální hodnoty napětí může být překvapivý.

3 KOLÍSÁNÍ SVĚTELNÉHO TOKU ZDROJŮ ZPŮSOBENÉ MEZIHARMONICKÝMI

Základním stavem světelného zdroje je časový průběh světelného toku při sinusovém jmenovitém napájecím napětí. Pro jeho amplitudové spektrum můžeme použít označení $\Phi(f_\phi)_{Un}$. Časový průběh světelného toku je dán průběhem příkonu světelného zdroje (3.1) a setrvačnostmi, které ovlivňují přeměnu elektrické energie na světelný tok. V případě žárovky je to tepelná setrvačnost, u výbojek potom setrvačnost dynamiky výboje a v případě zářivek dále zpoždění zářivého přechodu v luminoforu.

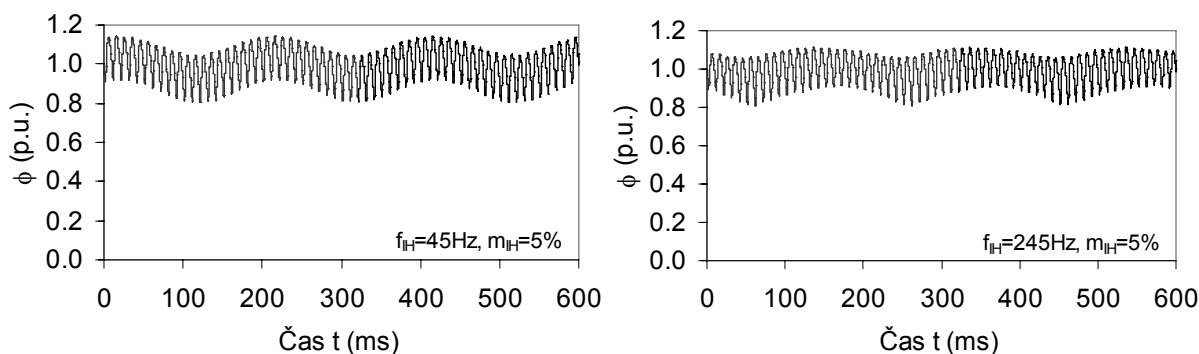
$$\Phi(t) \approx p_L(t) = u_L(t) \cdot i_L(t) \quad (3.1)$$

kde $u_L(t)$ je napětí na světelném zdroji a $i_L(t)$ je proud světelným zdrojem. Amplitudové spektrum světelného toku obsahuje DC složku a složky na sudých násobcích základní frekvence. Během vývoje asymetrie výboje mezi dvěma polaritami vzniká ve světelném toku i složka se základní frekvencí sítě a její liché násobky. To platí například pro zářivky s indukčním předřadníkem nebo s některými typy elektronických předřadníků.

Jestliže je do napájecího napětí injektována mezharmonická složka, do spektra $\Phi(f_\phi)_{Un}$ se přidají složky na následujících frekvencích kolísání světelného toku:

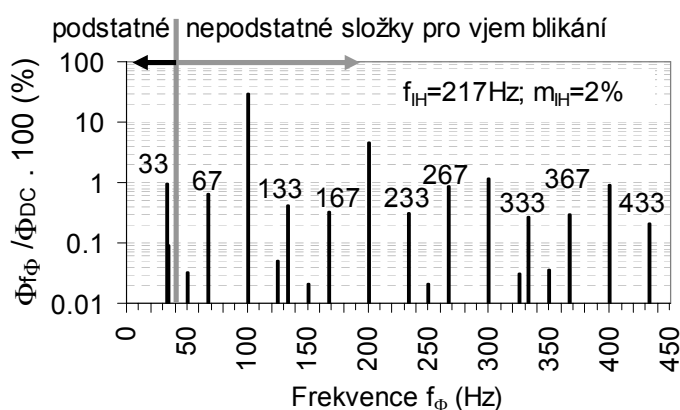
$$f_\phi = |f_1 \cdot k \mp f_{IH}| \quad \text{kde } k = 1, 3, 5, 7, 9, \dots, K \quad (3.2)$$

(platí v případě, že liché harmonické složky světelného toku jsou zanedbatelné). Příklady průběhů okamžité hodnoty světelného toku kompaktní zářivky napájené jmenovitým harmonickým napětím se superponovanou mezharmonickou s velikostí 5% U_1 a frekvencí 45 a 254 Hz je na Obr. 3.1. V obou případech je evidentní kolísání světelného toku se základní opakovací frekvencí 5 Hz.



Obr. 3.1. Příklady průběhů okamžité hodnoty světelného toku světelného zdroje napájeného jmenovitým harmonickým napětím se superponovanou mezharmonickou s velikostí 5% U_1 a frekvencí 45 a 254 Hz

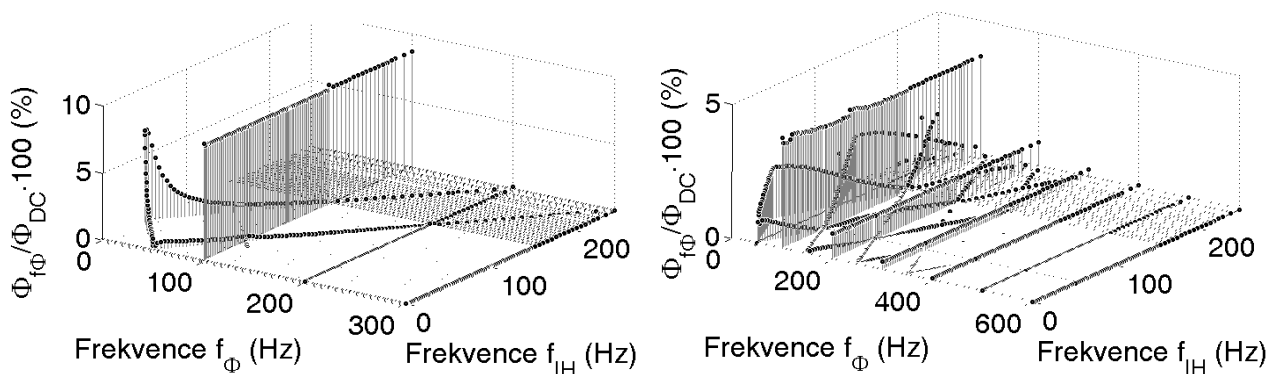
Velikosti složek na frekvencích f_ϕ (3.2) jsou úměrné velikostem na harmonických frekvencích spektra $\Phi(f_\phi)_{Un}$. Tedy například, jestliže $f_{IH} = 217$ Hz, pro zářivkový světelný zdroj jako je kompaktní zářivka se zabudovaným elektronickým předřadníkem můžeme očekávat frekvenční složky světelného toku (v rozsahu $f_\phi = 0 \div 500$ Hz) na frekvencích $f_\phi = 33, 67, 133, 167, 233, 267, 333, 367, 433, 467$ Hz (Obr. 3.2). Naopak spektrum žárovky bude vzhledem k velké tepelné setrvačnosti vláknem



Obr. 3.2. Příklad amplitudového spektra světelného toku

zahrnovat pouze složky pro $k=1$ (3.2), tedy $f_\phi = 110$ a 210 Hz, ostatní jsou zanedbatelné. Přitom zrakový vjem může být rušen pouze složkami světelného toku v rozsahu frekvencí $f_\phi = (0.1;40)$ Hz.

Příklady amplitudového spektra světelného toku jako funkce frekvence injektované mezharmnické složky pro vybrané typy světelných zdrojů jsou na Obr. 3.3. Jak je patrné, žárovka nemůže generovat složky světelného toku na frekvencích rušivého blikání pro frekvence injektované mezharmnické složky $f_{IH} > 100$ Hz, protože spektrum $\Phi(f_\phi)_{U_n}$ je potlačeno velkou tepelnou setrvačností vlákna. Jak můžeme vidět, kolísání okamžité hodnoty napětí s frekvencí f_V (2.17) není pro kolísání světelného toku podstatné. Co je podstatné, je frekvence složky f_{IH} , která kolísání způsobuje.



Obr. 3.3. Amplitudová spektra světelného toku v závislosti na injektované mezharmnické s velikostí $2\% U_1$ pro žárovku 60W 230V (nalevo), a kompaktní zářivku s integrovaným EP 23W (napravo)

3.1 PŘENOSOVÁ FUNKCE A ZESÍLENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Poměr mezi změnou světelného toku a změnou napájecího napětí pro danou modulační frekvenci určuje zesílení, tzv. Gain Factor (G.F.). G.F. je úměrný citlivosti světelného zdroje odpovídá tedy jeho přenosové funkci. Aby G.F. byl základní přenosovou funkcí musí platit, že vztah mezi kolísáním napětí a odpovídajícím kolísáním světelného toku je zcela lineární. Pokud ne, G.F. platí pouze pro měřenou velikost mezharmnické složky.

Definice a popis zesílení je uvedena například v [17][28], kde je zesílení určeno z časových průběhů okamžitých hodnot světelného toku a napětí. Ovšem pokud je modulace světelného toku dána jako rozdíl mezi extrémními středními hodnoty zahrnuje i kolísání s rychlejšími změnami (>100 Hz). Tento postup může být použit v případě, že vstupní úprava měřeného signálu zahrnuje dolno-propustný filtr s frekvencí řezu 40 Hz a s útlumem na frekvenci 100 Hz alespoň -80dB (Obr. 3.2). Při použití frekvenčních složek můžeme zesílení pro odpovídající frekvenční složky definovat jako [10]:

$$(G.F.)_{f_{IH}} = \frac{\left(\frac{\Phi_{f_\phi}}{\Phi_{DC}} \right)_{f_{IH}}}{\left(\frac{U_{IH}}{U_1} \right)_{f_{IH}}} \quad (3.3)$$

kde Φ_{f_ϕ} je velikost – amplituda složky světelného toku s frekvencí blikání,

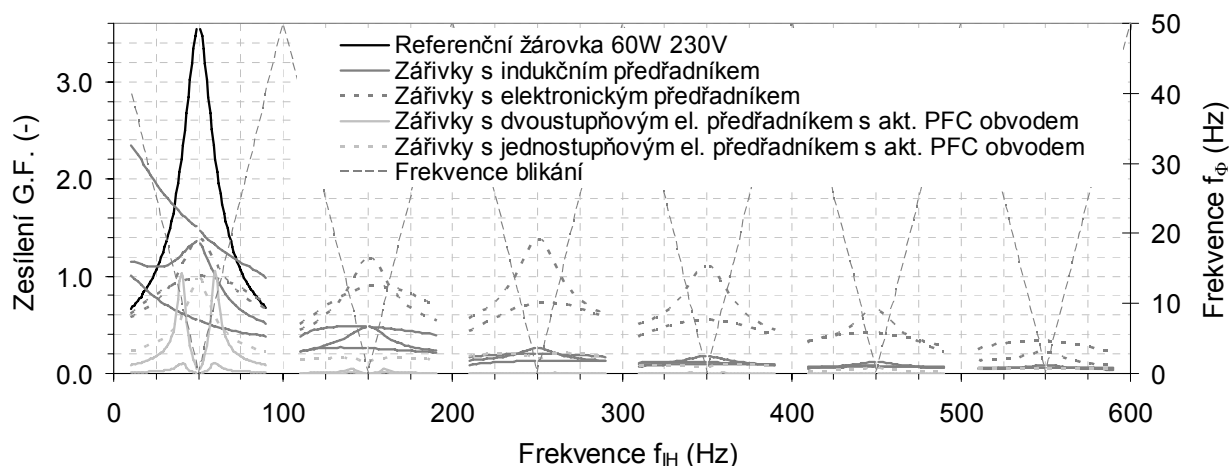
Φ_{DC} stejnosměrná složka světelného toku;

U_{IH} amplituda mezharmnické napětí na frekvenci f_{IH} , která je superponována na základní napětí s amplitudou U_1 a frekvencí f_1 .

Přičemž frekvence blikání v rovnici (3.3) odpovídá frekvenci mezharmnické složky podle rovnice (3.2).

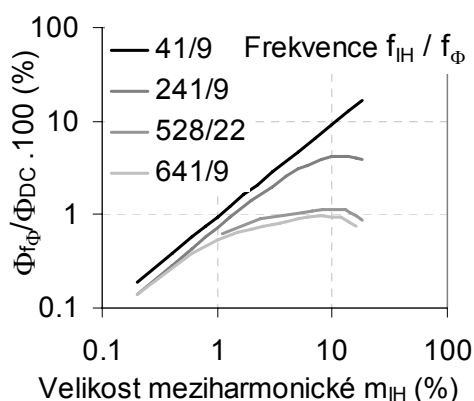
Zesílení se mění v závislosti na frekvenci injektované složky a při respektování citlivosti oka na blikání jsou podstatné frekvence $f_{\phi} = 1 \div 35$ (40) Hz. Křivky funkční závislosti zesílení jsou rozdílné pro každý jednotlivý zdroj a musí být určeny měřením. Vyšší hodnota zesílení značí větší citlivost světelného zdroje na dané kolísání napětí.

Příklady průběhů zesílení pro měřené světelné zdroje jsou na Obr. 3.4. Pro vyhodnocení byly vybrány zářivkové a vysokotlaké výbojové světelné zdroje. Základní rozdíly průběhů jsou v maximech gain faktoru, ale i v průběhu v rozsahu meziharmonických frekvencí DC do 100Hz a v dalších pásmech (100 až 200, 200 až 300Hz atd.). Na gain faktor má tedy vliv typ předřadníku ale i provedení zářivky (výbojky obecně), její výkon a dokonce i typ luminoforu.

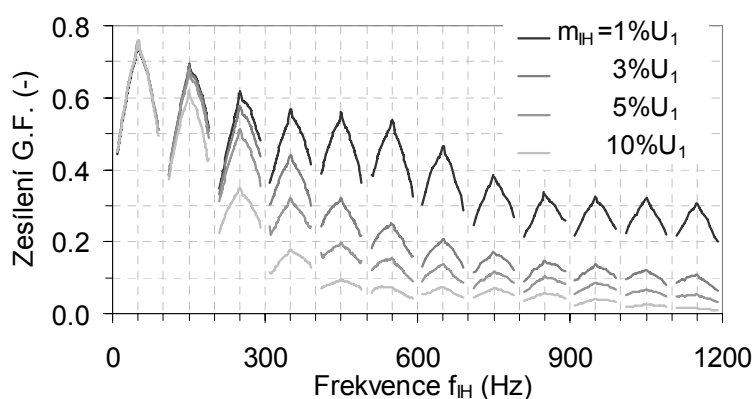


Obr. 3.4. Příklady křivek zesílení vybraných typů světelných zdrojů

Jak již bylo napsáno, funkce zesílení G.F. je úplnou přenosovou funkcí, pouze pokud je závislost mezi velikostí kolísání světelného toku a velikostí injektované meziharmonické pro všechny frekvence zcela lineární. Z měření vyplývá, že tento předpoklad je splněn pouze v určitém rozsahu velikostí a frekvencí meziharmonických napětí [10][13]. To znamená, pro m_{IH} do 5% a f_{IH} do 250 Hz. Největší nelinearitů představuje zářivka s elektronickým předřadníkem bez jakéhokoliv PFC obvodu s obvyklou velikostí vyhlazovacího kondenzátoru v DC obvodu (Obr. 3.5), což je dáno principem funkce tohoto typu světelného zdroje. Změnu v průběhu křivek zesílení stejného světelného zdroje v závislosti velikosti meziharmonické ukazuje Obr. 3.6.



Obr. 3.5. Závislost mezi relativní velikostí světelného toku a velikostí injektované meziharmonické



Obr. 3.6. Příklady křivek zesílení vybraných světelných zdrojů měřených při různé velikosti injektované meziharmonické

4 MEZNÍ KŘIVKY MEZIHARMONICKÝCH NAPĚTÍ

Limit pro blikání světelných zdrojů způsobené mezharmonickými složkami napětí je pro praktické použití definován právě limity mezharmonických složek napětí. Křivku limitů mezharmonických napětí můžeme označit mezní křivkou. Tedy mezní křivka mezharmonických napětí světelného zdroje určuje pro každou mezharmonickou frekvenci maximální akceptovatelnou velikost mezharmonické složky napětí, při které u průměrného pozorovatele nevznikne rušivý vjem blikání. To znamená, že mezní křivka odpovídá hodnotě $P_{st}=1$ [5]. Ve skutečnosti byla tato mezní křivka určena pouze pro žárovku 60W 230V (120V) [2]. Kompatibilní úroveň pro mezharmonická napětí jako funkce frekvence mezharmonické (v současnosti je platnost kompatibilní úrovně omezena do 100 Hz) je na Obr. 1.9.

Jednou z metod jak určit mezní křivky mezharmonických napětí pro ostatní světelné zdroje, je zopakovat analogický experiment, který byl použit pro stanovení křivky stejné míry vjemu blikání pro referenční 60W žárovku. Tzn., za stejných laboratorních podmínek vystavit velký (statisticky významný) počet pozorovatelů blikání světelných zdrojů způsobené mezharmonickými, a to pro každý světelný zdroj, s následným statistickým vyhodnocením výsledků [28]. Takovýto typ experimentů je ale velmi časově náročný a výsledky jsou silně závislé na podmínkách experimentu a dané skupině pozorovatelů.

Jestliže připustíme, že pro stanovení křivky stejné míry vjemu blikání pro referenční 60W žárovku byla využita skutečně relevantní skupina pozorovatelů a že se odezva takto stanoveného „průměrného“ pozorovatele od té doby nezměnila, lze alternativní metody pro určení mezních křivek mezharmonických napětí pro ostatní světelné zdroje založit na využití známé mezní křivky mezharmonických napětí referenční 60W žárovky (Obr. 1.9) v kombinaci s vhodnou měřicí technikou a vyhodnocovací procedurou.

4.1 URČENÍ MEZNÍCH KŘIVEK MEZIHARMONICKÝCH NAPĚTÍ S VYUŽITÍM KŘIVEK ZESÍLENÍ – METODA A

Lidské oko není citlivé na kolísání napětí, ale na kolísání světelného toku. Z mezní křivky mezharmonických napětí [4][2] (Obr. 1.9 – v prostoru frekvence kolísání napětí) a změřené křivky zesílení pro žárovku 60W 230V (Obr. 1.3) můžeme pomocí upravené rovnice (3.3) vypočítat mezní křivku kolísání světelného toku v závislosti na frekvenci následovně:

$$\left(\frac{\Phi_{f\Phi}}{\Phi_{DC}} \right)_{f_{\Phi},ref,Pst=1} = (G.F.)_{f_M,ref} \cdot \left(\frac{U_{IH}}{U_1} \right)_{f_M,ref,Pst=1} \quad (4.1)$$

Je známo, že pro žárovku platí lineární závislost mezi velikostí kolísání světelného toku a změřenou velikostí vjemu blikání P_{st} . To znamená, že můžeme předpokládat, že blikání světla způsobené jednou mezharmonickou složkou a vytvořené jakýmkoliv typem světelného zdroje je stejné jako vytvořené referenční žárovkou 60W 230V. Následně tedy můžeme definovat ekvivalentní P_{st} [28]:

$$P_{st,eq} = \left(\frac{\Phi_{f\Phi}}{\Phi_{DC}} \right)_{f_{\Phi}} / \left(\frac{\Phi_{f\Phi}}{\Phi_{DC}} \right)_{f_{\Phi},ref} \quad (4.2)$$

Ve skutečnosti je rovnice (4.2) platná pouze za předpokladu, že referenční zdroj a ostatní světelné zdroje způsobí stejný zrakový vjem. Tzn., že mají stejné spektrum světla, přesněji, že mají stejné spektrum změn světla v průběhu blikání. Pro první přiblížení můžeme předpokládat, že tomu tak je a pro zjednodušení zavedeme, že výsledek rovnice (4.2) je aplikovatelný na blikání světla produkované všemi typy světelných zdrojů.

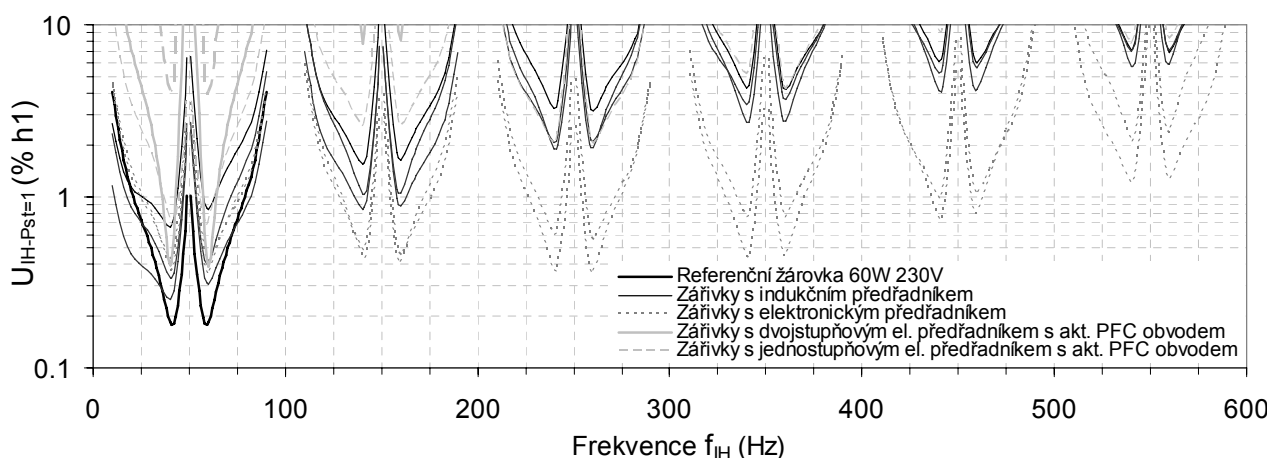
Nyní je možné pomocí modifikované numerické metody [28] založené na rovnicích (4.1) a (4.2) stanovit ze změřené křivky zesílení mezní křivku mezharmonických napětí pro každý světelný zdroj. Dosazením rovnice (4.1) do rovnice (4.2) a upravením, za předpokladu že P_{st} musí

být rovno jedné, dostaneme vztah pro výpočet procentních velikostí mezipharmonických napětí způsobujících $P_{st}=1$ pro daný světelný zdroj:

$$U_{IH-Pst=1}(\%) = \frac{(G.F.)_{f_{IH,ref}}}{(G.F.)_{f_{IH}}} \cdot \left(\frac{U_{IH}}{U_1} \right)_{f_{IH,ref},Pst=1} (\%) \quad (4.3)$$

Kde se křivky zesílení a mezní křivka mezipharmonických napětí pro referenční žárovku dosazují jako funkce mezipharmonické frekvence. Přičemž křivka zesílení (Obr. 3.4) a mezní křivka mezipharmonických napětí (Obr. 1.9) pro referenční žárovku se kopírují z frekvenčního pásma 0-100 Hz do dalších pásem 100-200, 200-300, ... Hz. Čím větší je mezní velikost mezipharmonické, tím více je světelný zdroj odolný na dané kolísání napětí.

Pro automatizované měření mezních křivek byla navržena měřicí procedura a realizována odpovídající měřicí sestava. Příklady mezních křivek mezipharmonických napětí pro vybrané typy zářivkových světelných zdrojů vypočtených ze změřených křivek zesílení jsou na Obr. 4.1.



Obr. 4.1. Mezní křivky mezipharmonických napětí vybraných světelných zdrojů (metoda A)

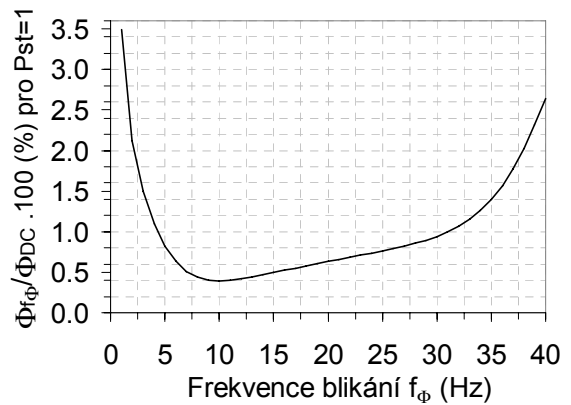
Uvedená metoda má celou řadu předpokladů, které vplývají z její definice a omezují spolehlivost výsledků. Zásadním problémem metody je, že změřená křivka zesílení jako přenosová funkce naprostě většiny světelných zdrojů platná pouze v omezeném rozsahu velikosti a frekvence injektované mezipharmonické (Obr. 3.5 Obr. 3.6), a proto jsou vypočtené mezní křivky mezipharmonických napětí platné také ve stejném rozsahu. Metoda je tedy vhodná jako startovací pro předběžnou představu o odolnosti světelného zdroje na daný typ rušení.

4.2 MĚŘENÍ MEZNÍCH KŘIVEK MEZIHARMONICKÝCH NAPĚTÍ S VYUŽITÍM MEZNÍ KŘIVKY KOLÍSÁNÍ SVĚTELNÉHO TOKU – METODA B

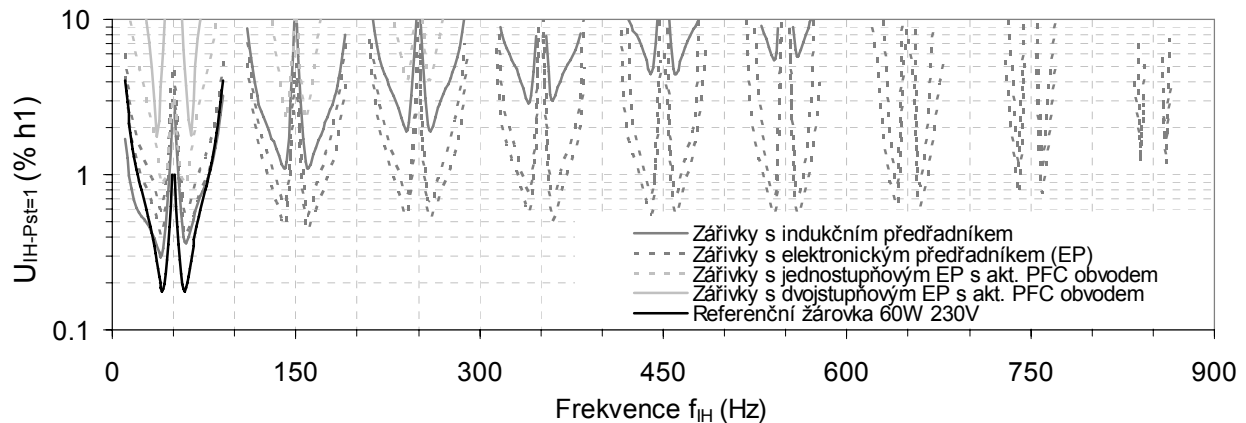
Nevýhoda či lépe řečeno nedostatek metody A popsany v předchozím může být odstraněn, pokud budeme velikost mezipharmonických napětí způsobujících mezní kolísání světelného toku měřit přímo. Tedy tato druhá měřicí metoda pro určení mezních křivek mezipharmonických napětí světelných zdrojů je založena na nastavení úrovně injektované mezipharmonické složky na takovou hodnotu, kdy měřená relativní velikost frekvenční složky světelného toku na odpovídající frekvenci blikání odpovídá limitu mezní „referenční“ křivky kolísání světelného toku. Nastavené relativní velikosti mezipharmonických napětí v závislosti na frekvenci mezipharmonické potom tvoří výslednou mezní křivku mezipharmonických napětí daného světelného zdroje [13].

Mezní křivka kolísání světelného toku „normalizovaného“ pozorovatele může být získána dvěma postupy: výpočtem pomocí rovnice (4.1) nebo měřením. Výsledná změřená mezní křivka kolísání světelného toku je na Obr. 4.2 [13].

Metoda B využívá stejného měřicího řetězce jako metoda A s pozmeněnou měřicí procedurou. Příklady změřených mezních křivek meziharmonických napětí pro vybrané světelné zdroje metodou B jsou na Obr. 4.3. Rozdíly ve výsledných křivkách mezi metodou A a B jsou podle očekávání (usuzováno ze změřených křivek zesílení při různých velikostech meziharmonické na Obr. 3.6) pro zářivky s elektronickým předřadníkem na meziharmonických frekvencích nad 100 (200) Hz a naopak pro zářivky s indukčním předřadníkem především ve frekvenčním pásmu do 100 (200) Hz.



Obr. 4.2. Mezní křivka kolísání světelného toku



Obr. 4.3. Mezní křivky meziharmonických napětí světelných zdrojů (metoda B)

Metoda A i B jsou založeny mimo jiné na předpokladu, že pro každou injektovanou meziharmonickou existuje právě jedna frekvenční složka světelného toku v rozsahu frekvencí 0,1 až 40 Hz. Ovšem prakticky vždy je ve spektru světelného toku do 50 Hz více než jedna frekvenční složka. Pokud je ve spektru světelného toku v rozsahu 0,1-40 Hz více frekvenčních složek, budou se všechny podílet na výsledném rušení zrakového vjemu v závislosti na nelineární frekvenční odezvě řetězce oko-mozek „průměrného“ pozorovatele (inverzní křivka k Obr. 4.2). Metodu B (A) lze tedy využít pro měření mezních křivek meziharmonických napětí světelných zdrojů za předpokladu, že injektované meziharmonické napětí nevytvoří ve spektru světelného toku další sekundární frekvenční složky s celkovou úrovní vyšší než 1% dominantní frekvenční složky odpovídající frekvenci injektované meziharmonické.

4.3 NÁVRH MĚŘENÍ MEZNÍCH KŘIVEK MEZIHARMONICKÝCH NAPĚTÍ S VYUŽITÍM „OBJEKTIVNÍHO“ FLIKRMETRU – METODA C

Dalšího zpřesnění v měření mezní křivky meziharmonických napětí obecného světelného zdroje lze tedy dosáhnout měřením souhrnného efektu všech frekvenčních složek v pásmu 0,1-40 Hz, které vzniknou ve spektru světelného toku. Podstata navrhované metody C je ve vážení jednotlivých frekvenčních složek světelného toku frekvenční odezvou řetězce oko-mozek „průměrného“ pozorovatele v měřicím řetězci metody B. Vážení frekvenčních složek je podstatou funkce flikrmetru. V tomto případě se však jedná o měření a vyhodnocení blikání světelného toku, nicméně postup zpracování signálu musí být analogicky. Potom flikrmetr měřící a vyhodnocující přímo blikání světelného toku světelných zdrojů, s odezvou „průměrného“ pozorovatele, může být označen za objektivní. Jeho popis a základní teze návrhu jsou uvedeny v kapitole 6. Třetí navrhovaná měřicí metoda je tedy založena na nastavení úrovně injektované meziharmonické složky na takovou hodnotu, kdy je velikost P_{st} měřená „objektivním“ flikrmetrem rovna jedné.

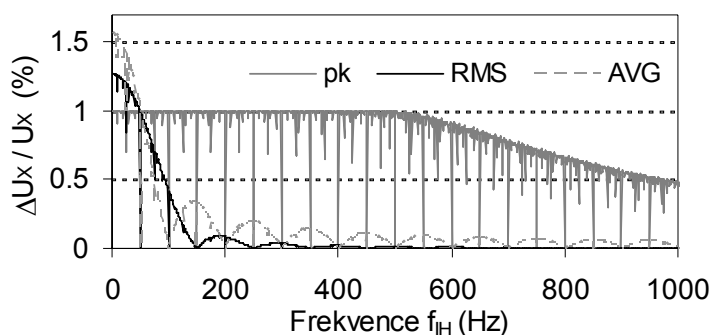
5 FLIKRMETR S ODEZVOU NA MEZIHARMONICKÉ S FREKVENCÍ NAD 100 HZ

Míra vjemu blikání je součástí parametrů kvality elektrické energie, kvality napětí [3] a jako součást parametrů napětí musí být měřena a vyhodnocována z napětí. Současná verze standardního flikrmtru (kapitola 1.5), která byla navržena pro měření odezvy systému [referenční světelný zdroj (žárovka 60W)-oko-mozek průměrného pozorovatele] na amplitudovou modulaci napětí, však již nespĺňuje nebo není schopna adoptovat řadu požadavků jako jsou: přizpůsobení přenosu váhového filtru (odezvy flikrmtru) jiným typům světelných zdrojů v souvislosti s vývojem jejich používání, a relevantní odezva na změny a kolísání napětí způsobené mezharmonickými složkami s frekvencí nad 100 Hz v napájecím napětí (kapitola 4), které zcela objektivně mohou rovněž způsobit rušivý vjem blikání. Zároveň to ale neznamená, že by standardní flikrmtr nepracoval správně, pokud je jeho implementace korektní [22]. Standardní flikrmtr pouze přesně simuluje odezvu řetězce s referenčním světelným zdrojem, kterým je referenční 60W žárovka. Vlastnosti UIE/IEC flikrmtru jsou analyzovány např. v [33][25][34][23][8].

5.1 NÁVRH A REALIZACE FLIKRMETRU S ODEZVOU NA MEZIHARMONICKÉ S VYSOKOU FREKVENCÍ PRACUJÍCÍ V ČASOVÉ OBLASTI

Pro flikrmtr standardní známé konstrukce, který pracuje v časové oblasti, je možným řešením náhrada kvadratického demodulátoru s dolnopropustným filtrem jiným typem demodulace s fixací kolísání obálky – velikosti napětí v signálu blikání i pro mezharmonické složky v napětí s frekvencemi nad 100Hz.

Z kapitoly 2 vyplývá, že kolísání napětí způsobené subharmonickými a mezharmonickými složkami s nízkou i vysokou frekvencí je uchováno v průběhu velikosti napětí, kterou je jeho efektivní, střední či maximální hodnota. Efektivní hodnota napětí může být vypočtena a) za jednu periodu základní frekvence sítě s posloupností výpočtu efektivních hodnot po jedné periodě, b) nebo po půlperiodě, anebo může být vypočtena c) za jednu půlperiodu s posloupností výpočtu rovněž po půlperiodě. Jelikož je ale šířka pásma kolísání periodové RMS hodnoty s periodovým krokem (případ a) pouze 25 Hz, vzorkovací frekvence je 50S/s, lze v tomto ohledu využít pouze půlperiodové RMS hodnoty (případ c) jejíž průběh má vzorkovací frekvenci dvojnásobnou a tudíž šířku pásma do 50Hz. Rozhodující je rovněž linearita přenosu velikosti mezharmonické složky na velikost kolísání napětí v závislosti na frekvenci mezharmonické (kapitola 2.1). Průběhy relativní velikosti kolísání půlperiodové střední, efektivní a maximální hodnoty v závislosti na frekvenci injektované mezharmonické složky, s relativní velikostí 1% jsou v souhrnu na Obr. 5.1. Je zřejmé, že odezva flikrmtru bude funkcí uvedených signálů.

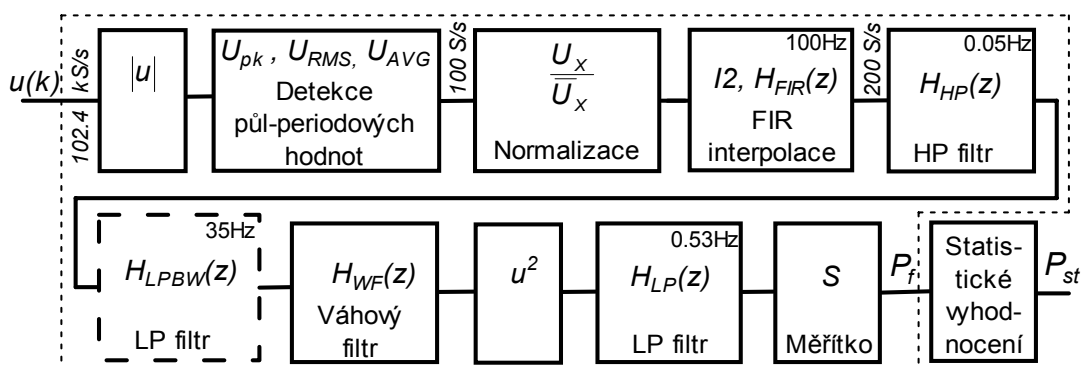


Obr. 5.1. Průběhy relativní velikosti kolísání půlperiodové střední, efektivní a maximální hodnoty v závislosti na frekvenci injektované mezharmonické složky, s relativní velikostí 1%

Nový způsob vyhodnocování signálu blikání vyžaduje i úpravu jeho zpracování. Při sestavování bloků nové verze flikrmtru vyjdeme ze stávající konstrukce digitálního IEC flikrmtru. Nový typ flikrmtru bude stejně jako standardní konstrukce pracovat v časové oblasti a jeho jednotlivé části jsou:

- Blok 1** – stejně jako v případě standardního flikrmetru je třeba nejdříve měřený signál kmitočtově přizpůsobit anti-alias filtrem navzorkovat A/D převodníkem s vhodnou vzorkovací frekvencí a rozlišením a následně upravit na referenční úroveň.
- Blok 2** – úkolem bloku 2 je rovněž demodulace, která se ovšem provede výpočtem po sobě jdoucích půlperiodových velikostí napětí z navzorkovaného normalizovaného průběhu okamžité hodnoty. Počítanou půlperiodovou velikostí napětí potom může být RMS, AVG, nebo MAX hodnota. Vzorkovací frekvence průběhu půlperiodových hodnot velikosti napětí je vždy dvojnásobek základní frekvence sítě. To je v případě $f_i=50\text{Hz}$ 100S/s. Pro přesnost a především stabilitu následných diskretních filtrů je však tato vzorkovací frekvence nedostatečná. Je tedy nutné provést převzorkování signálu alespoň na čtyř násobek základní síťové frekvence, tj. na 200S/s. Z toho důvodu musí v bloku 2 následovat sub-blok pro převzorkování signálu alespoň na uvedenou frekvenci.
- Blok 3** – je také tvořen kaskádou frekvenčních filtrů, ale v tomto případě pouze dvou (tří). Konkrétně kaskádou hornopropustného filtru a váhového filtru, stejných parametrů jako u standardního flikrmetru. Přičemž hornopropustný filtr opět filtruje ze signálu stejnosměrnou složku. Nezbytné už není použití dolnopropustného filtru s frekvencí řezu 35Hz, jelikož signál blikání již neobsahuje frekvenční složky s frekvencemi nad 50Hz. Ovšem je třeba si uvědomit, že výslednou odezvu flikrmetru tvoří přenosové funkce všech tří filtrů bloku 3, a kromě váhového filtru se na ní podílí výraznou měrou i právě dolnopropustný filtr. Z toho důvodu je výhodnější jej v kaskádě ponechat. V opačném případě by bylo nezbytné navrhnout novou přenosovou funkci pro váhový filtr.
- Blok 4 (5)** – je shodný se digitální verzí standardního flikrmetru.

Blokové schéma modelu pro simulaci odezvy flikrmetru vyhodnocujícího vstupní diskretní signál půlperiodových středních, efektivních a maximálních hodnot napětí v prostředí Matlab-Simulink je na Obr. 5.2. Jednotlivé modely se liší pouze počítanou velikostí napětí. Simulace byly provedeny pro všechny tři varianty, nazvané RMS, AVG a MAX flikrmetr.



Obr. 5.2. Blokový diagram bloků 2 až 4 digitálního AVG, RMS a MAX flikrmetru pro Matlab-Simulink

První část modelu na Obr. 5.2 zahrnuje generování diskretního normalizovaného signálu, který odpovídá rovnicím (1.2), (1.4), a dalším, pomocí základních funkcí Matlabu, se vzorkovací frekvencí $f_s=102,4\text{kS/s}$. V dalším je vypočtena absolutní hodnota signálu a následuje výpočet půlperiodových po sobě jdoucích středních, efektivních nebo maximálních hodnot a jejich normalizace vyhlazenou hodnotou velikosti napětí. Výsledný diskretní signál je v následující části převzorkován vložením nul mezi jednotlivé vzorky na dvojnásobek vzorkovací frekvence (200S/s) a vyhlazen dolnopropustným filtrem typu FIR s poloviční frekvencí řezu (100Hz). Následuje

hornopropustný digitální filtr prvního řádu s přenosovou funkcí získanou bilineární z-transformací s-přenosové funkce:

$$H_{HP}(z) = \frac{a(1-z^{-1})}{1+bz^{-1}} \quad (5.1)$$

kde $a = \frac{2f_s}{1+2f_s}$, $b = \frac{1-2f_s}{1+2f_s}$, f_s je vzorkovací frekvence a τ časová konstanta filtru $\tau = (2\pi \cdot f_{HP})^{-1}$,

kde $f_{HP}=0,05$ Hz. Následuje dolnopropustný Butterworthův digitální filtr šestého řádu se z-přenosovou funkcí získanou bilineární Z-transformací s-přenosové funkce v kaskádním tvaru:

$$H_{LPBW}(z) = \prod_{i=1}^3 \left[\frac{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}} \right] \quad (5.2)$$

kde

$$a_{0i} = a_{1i} / 2 = a_{2i} = (1 + cd_i + c^2)^{-1} \quad b_{0i} = 1, b_{1i} = 2a_{0i} \cdot (1 - g^2), b_{2i} = a_{0i} \cdot (1 - g\alpha_i + g^2) \quad (5.3)$$

kde $g = 1/(\tan(\pi f_{LPBW} / f_s))$, $\alpha_1=1,93185165$, $\alpha_2=1,41421356$, $\alpha_3=0,51763809$, f_{LPBW} je frekvence řezu $f_{LPBW}=35$ Hz a f_s vzorkovací frekvence.

Váhový filtr je jednou z podstatných částí standardního IEC flickmetru a proto amplitudová odezva jeho digitální realizace musí pokud možno co nejvíce odpovídat odezvě standardizovaného analogového filtru. To může být problém zejména pro tak nízkou vzorkovací frekvenci vstupního signálu jakou je 200Hz. Amplitudovou odezvu digitálního váhového filtru lze zpřesnit použitím jiné než bilineární Z-transformace analogové přenosové funkce. Nejmenší maximální chybu amplitudové odezvy vykazuje pro vzorkovací frekvenci 200Hz digitální váhový filtr získaný kovariantně-invariantní Z-transformací s následující z-přenosovou funkcí [26]:

$$H_{WF}(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}}{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}} \quad (5.4)$$

kde $a_0=0,09487215$, $a_1=-0,1582865$, $a_2=0,04023729$, $a_3=0,02317702$, $b_0=1$, $b_1=-3,167151$, $b_2=3,752054$, $b_3=-1,958255$ a $b_4=0,3747149$ [26] (pro žárovku 60W 230V).

Výstup signálu blikání z váhového filtru je kvadratizován a vyhlazen dolnopropustným digitálním filtrem prvního řádu se z-přenosovou funkcí:

$$H_{HP}(z) = \frac{a \cdot (1 + z^{-1})}{1 + bz^{-1}} \quad (5.5)$$

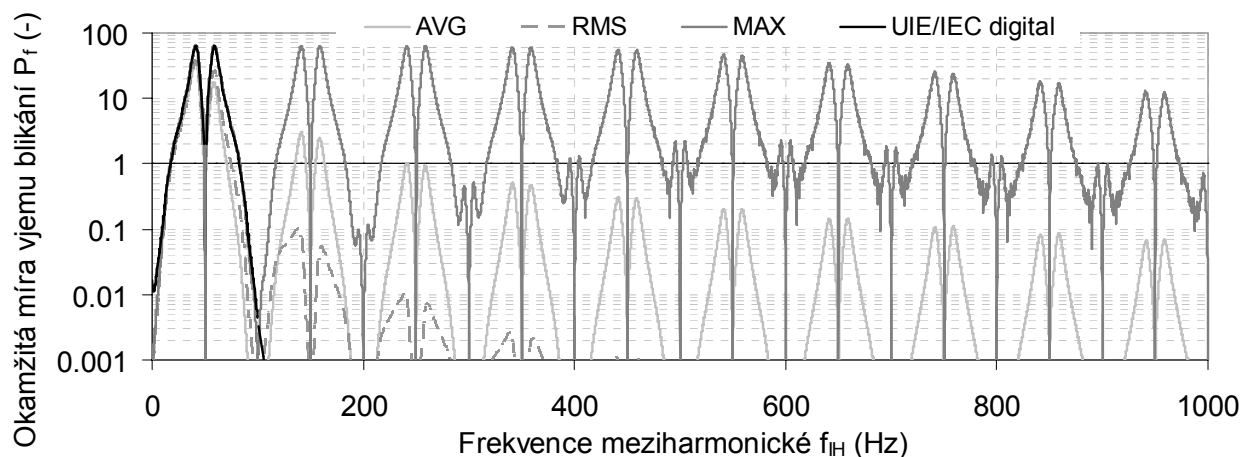
kde $a = \frac{1}{1+2f_s}$, $b = \frac{1-2f_s}{1+2f_s}$, f_s je vzorkovací frekvence a τ časová konstanta filtru $\tau=300$ ms.

Výstup digitálního flickmetru je normalizován násobícím faktorem, který byl stanoven pro sinusovou modulaci s hloubkou 0,25% a modulační frekvencí 8,8Hz a to na základě odsimulované odezvy, tak aby byla okamžitá míra vjemu blikání $P_f=1$.

Frekvenční odezvy modelů AVG, RMS a MAX flickmetru jsou v porovnání s odezvou modelu digitálního UIE/IEC flickmetru [8] na meziharmonickou složku v napájecím napětí s relativní velikostí 1% na Obr. 5.3. Simulace byly provedeny ve frekvenčním rozsahu 0,1-1000 Hz s krokem 0,1 Hz. Jestliže je vstupní signál periodický, jako v našem případě, lze pro účely simulace nahradit blok statistického vyhodnocení pro výpočet krátkodobé míry vjemu blikání vztahem:

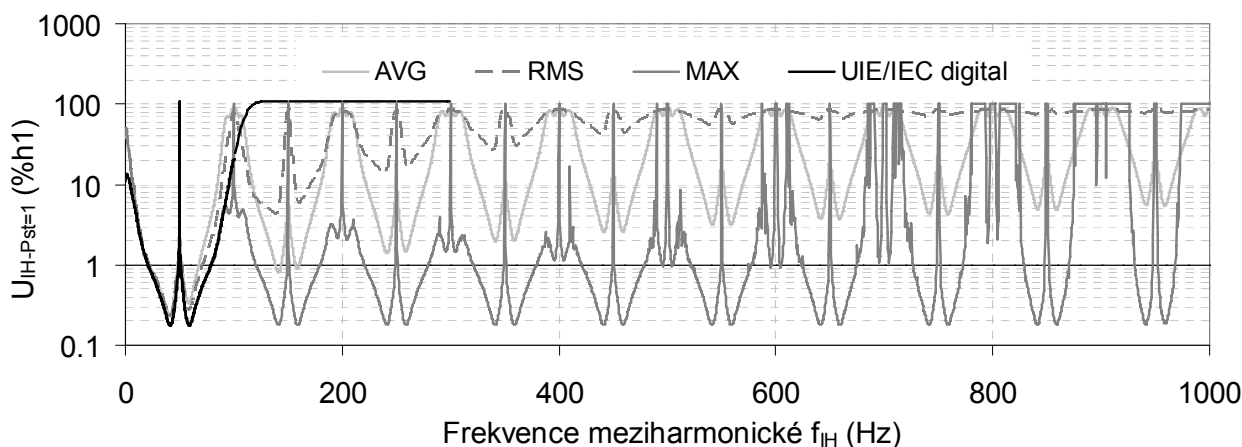
$$P_{st} = \sqrt{0,5096 \cdot P_f} \quad (5.6)$$

kde P_f je maximální hodnota ustáleného průběhu výstupu bloku 4, tzn. $P_f(t)$.



Obr. 5.3. Odezvy modelů AVG, RMS a MAX flikrmetru v porovnání s odezvou modelu digitálního UIE/ IEC flikrmetru na mezipharmonickou složku v napájecím napětí s velikostí 1% v závislosti na její frekvenci

S ohledem na to, že flikrmetr simuluje odezvu světelný zdroj – oko – mozek průměrného pozorovatele lze pro každý z modelovaných flikrmetrů vyjádřit jejich vlastní mezní křivku mezipharmonických napětí, která bude odpovídat $P_{st}=1$ na výstupu (Obr. 5.4).



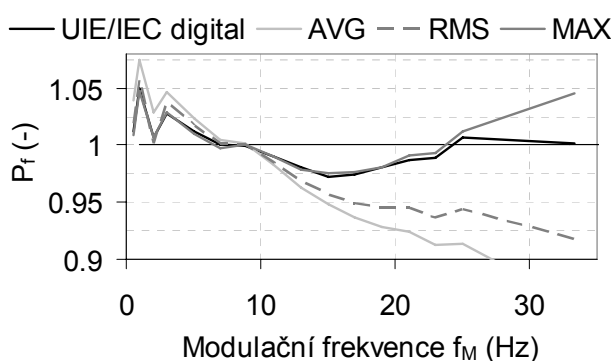
Obr. 5.4. Velikost mezipharmonické složky v závislosti na její frekvenci pro jednotlivé simulované flikrmetry pro dosažení stejné krátkodobé míry vjemu blikání $P_{st}=1$

Z obrázku je zřejmé, že výsledná odezva AVG a RMS flikrmetru na mezipharmonické v pásmu 0-100Hz nekoresponduje s odezvou IEC flikrmetru a i když je odezva flikrmetru v dalších pásmech větší než nula, pro měření míry vjemu blikání je tato koncepce nepoužitelná. Průběhy jsou určeny závislostí relativní velikosti kolísání střední a efektivní hodnoty na mezipharmonické frekvenci pro konstantní velikost mezipharmonické, které jsou uvedeny na Obr. 5.1. Naopak uspokojivé výsledky dává MAX flikrmetr s odsimulovanou odezvou, která je v pásmu 0-100Hz prakticky shodná s odezvou IEC flikrmetru a která je pro pásma frekvencí 100-200Hz, 200-300Hz atd. obrazem pásma 0-100Hz (nebo alespoň na frekvencích, které jsou pro vjem blikání podstatné). Odchytky od požadovaného průběhu jsou pouze v okolí frekvence 200, 300Hz a další celistvých násobků 100Hz, které vedou na frekvence blikání nad 35Hz. Tyto odchytky by mohli být odstraněny vhodnějším nastavením filtrů. Zúžení průběhu odezvy MAX flikrmetru na Obr. 5.4 ve vyšších frekvenčních pásmech koresponduje s průběhem, který je typický pro mezní křivky mezipharmonických napětí zářivek napájených elektronickým předřadníkem s usměrňovačem a vyhlazovacím kondenzátorem v prvním stupni, který pracuje jako detektor maximální hodnoty (Obr. 4.3). Je tedy patrné, že odezva realizovaného MAX flikrmetru na mezipharmonické je kompozicí odezvy uvedeného typu světelného zdroje a rovněž referenční 60W žárovky.

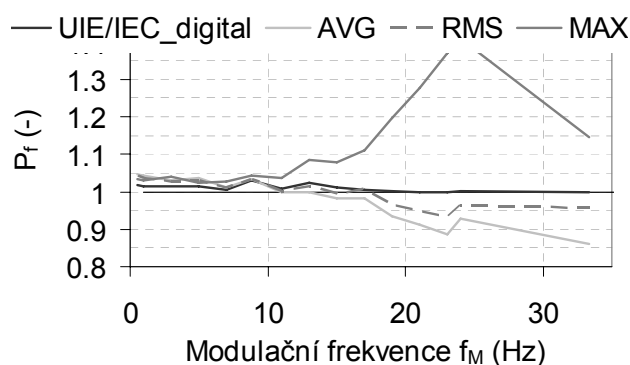
5.2 VALIDACE MODELŮ

Kromě požadované odezvy na vysokofrekvenční mezipharmonické se očekává, že odezva flikrmetru na amplitudovou modulaci napětí bude shodná (či v dovolených tolerancích) s odezvou standardního UIE/IEC flikrmetru. Validace funkce flikrmetru je specifikována v normě ČSN EN 61000-4-15 [5].

Výsledek kontroly odezvy modelovaných flikrmetrů na sinusové a obdélníkové kolísání s normalizovanou hloubkou modulace pro jednotkové míhání je na Obr. 5.5, resp. Obr. 5.6. Toleranční meze jsou $P_f=1\pm 0,05$. Modely všech flikrmetrů, kromě AVG a RMS flikrmetru, splňují požadavky na přesnost pro sinusovou modulaci, se současným nastavením nebo po korekci násobícího faktoru. Avšak ani jeden z navržených typů flikrmetrů vyhodnocující časový průběh velikosti napětí požadavky na přesnost při obdélníkové normalizované modulaci napětí nespĺňuje. Odchýlení odezvy MAX flikrmetru je důsledkem použité interpolace při procesu převzorkování. Pro odstranění tohoto důsledku je navrženo použití lineární interpolace.



Obr. 5.5. Odezva modelovaných typů flikrmetrů na sinusové kolísání napětí s normalizovanou hloubkou modulace pro jednotkové míhání

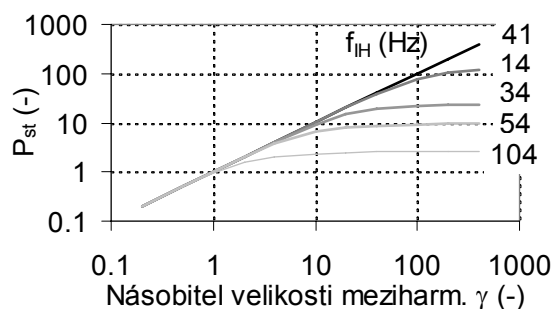


Obr. 5.6. Odezva modelovaných typů flikrmetrů na pravoúhlé kolísání napětí s normalizovanou hloubkou modulace pro jednotkové míhání

Dalším testovanou vlastností flikrmetru je linearita odezvy v širokém rozsahu velikosti kolísání napětí. Výsledky testu linearity MAX flikrmetru podle specifikací uvedených v [23] jsou v Tab. 5.1. Jak vyplývá z tabulky odezva MAX flikrmetru na obdélníkovou modulaci napětí je v celém rozsahu hloubky modulace lineární a ve shodě s požadavky, zatímco jeho odezva na mezipharmonické je dle očekávání a v souladu s Obr. 2.3 nelineární (Obr. 5.7).

Tab. 5.1. Výsledek testu linearity pro obdélníkovou modulaci napětí na frekvenci 13,5Hz

Násobitel γ (-)	Hloubka modulace $\Delta U/U$ (%)	Simulované P_{st}	Očekávané P_{st}
0.2	0.0804	0.2043	0.20±0.11
1	0.402	1.014	1.00±0.15
2	0.804	2.031	2.00±0.20
4	1.608	4.059	4.00±0.30
10	3.216	10.14	10.0±0.6
20	6.432	20.31	20.0±1.1



Obr. 5.7. Omezení výstupu MAX flikrmetru v závislosti na velikosti a frekvenci mezipharmonické

6 OBJEKTIVNÍ FLIKRMETR

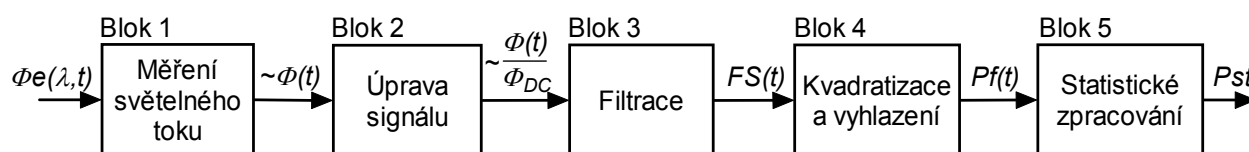
Měření míry vjemu blikání z napájecího napětí musí z principu funkce zahrnovat přenosovou funkci reálného nebo fiktivního světelného zdroje. Ve svém důsledku to znamená, že při měření míry vjemu blikání takovýmto flikrmetrem v napájecí síti se a priori předpokládá, že připojenými světelnými zdroji jsou právě světelné zdroje s přenosovou funkcí implementovanou ve flikrmetru. Jestliže jsou připojeny jiné typy světelných zdrojů, mohou nebo nemusí v důsledku kolísání napětí produkovat kolísání světla způsobující rušení zrakového vjemu, a to bez ohledu na změřenou velikost Pst . Možností je eliminovat z měřicího procesu světelný zdroj a míru vjemu blikání měřit přímo z okamžitého průběhu světelného toku „objektivním“ flikrmetrem.

Objektivní měřič blikání pracuje přímo s kolísáním a dalšími parametry záření, které je generováno světelnými zdroji a tedy bez závislosti na konkrétním typu zdroje světla. Jinými slovy je jeho funkcí emulovat odezvu zrakového systému včetně mozku. Fyziologicko-psychologický vjem světla a jeho změn – kolísání byl popsán v kapitole 1.3 a je kombinací vlastností všech částí zrakového systému a ovlivňujících faktorů, z nichž celá řada doposud nebyla dostatečným způsobem popsána, a které vedou k výslednému časo-prostorové vnímání změn jasu a barev a jejich uvědomování. Dalším podstatným faktorem pro modelování odezvy zrakového systému je odlišnost fyziologie a psychika každého jedince, navíc měnící se v čase. Jelikož z principu – filozofie měření rušivého blikání není možné přizpůsobovat se každému jedinci a jeho aktuálnímu stavu, je třeba zohlednit populační změny odezvy jejich statistickým zpracováním.

Objektivní flikrmetr s popsanou funkcí není novinkou, jelikož byl použit již před realizací standardního UIE/IEC flikrmetru v osmdesátých letech minulého století (kap. 1.5). Poslední návrh a realizace je publikována např. v [18]. Ve všech případech je však technické řešení doprovázeno celou řadou zjednodušení, které zanedbávají základní vlastnosti a funkce zraku. Měření záření je obvykle provedeno fotodetektozem se spektrální citlivostí normalizovaného pozorovatele pro fotopické vidění, která odpovídá souhrnné citlivosti všech tří typů čípků při určité úrovni jasu, a změny světelného toku jsou váženy přenosovou funkcí „průměrného“ pozorovatele, která byla získána za zcela specifických podmínek. Jejich použití je tedy možné pouze pro srovnávací měření, například pro stanovení mezních křivek meziharmonických napětí srovnávací metodou uvedenou v kap. 4.3. Nicméně, v současné době není realizace objektivního flikrmetru bezchybně emulující odezvu zrakového systému možná a to ze znalostních ale i technologických důvodů.

Navrhovaná konstrukce objektivního flikrmetru vychází z konstrukce standardní verze [5] (kap. 1.5) s modifikacemi zejména ve vstupní části, která musí měřit průběh relativní velikosti světelného toku a dále v bloku filtrů, jejichž frekvenční odezva musí reprezentovat pouze frekvenční odezvu řetězce oko-mozek „normalizovaného“ pozorovatele (invertovaný průběh na Obr. 4.2). Zjednodušené blokové schéma navrhovaného objektivního flikrmetru je na Obr. 6.1 se strukturou, kterou lze rozdělit do následujících čtyřech částí:

- měření okamžité hodnoty zářivého toku, které je realizováno blokem 1, fotočlánkem s $v(\lambda)$ korekcí s transimpedančním zesilovačem a s šířkou pásma do 100 kHz,
- úprava-normalizace signálu úměrného světelnému toku v bloku 2,
- modelování odezvy řetězce oko – mozek „normalizovaného“ pozorovatele, prováděné v blocích 3 (HP a váhový filtr) a 4 (kvadratický násobič a vyhlazovací filtr),
- statistická analýza signálu blikání v reálném čase s prezentací výsledků uskutečňovaná blokem 5, který je shodný se standardním UIE/IEC flikrmetrem.



Obr. 6.1. Blokové schéma objektivního flikrmetru

7 ZÁVĚR

Náplní práce je analýza kolísání napětí způsobené meziharmonickými složkami v napájecím napětí s nízkou a vysokou frekvencí a jejich přenosu na kolísání světelného toku různých typů světelných zdrojů způsobující rušení zrakového vjemu člověka. Výsledky byly využity pro definici metod pro měření citlivosti a odolnosti světelných zdrojů na daný typ rušení a uplatněny při návrhu nových typů měřičů blikání pro měření míry vjemu v důsledku přítomnosti meziharmonických napětí s vysokou frekvencí.

Meziharmonické jsou generovány spotřebiči, jako jsou obloukové pece, výkonové měniče, asynchronní motory, atd. anebo jsou meziharmonická napětí přímo injektována do napájecí sítě jako signál HDO. Frekvenční rozsah meziharmonických v napájecí síti je přítom od desetin hertzů až po několik kilohertz. Meziharmonické složky způsobují kolísání napětí v kombinaci s harmonickými. Největší harmonickou je základní harmonická a tedy interakce meziharmonických se základní harmonickou má na vznik kolísání napětí největší vliv. Kolísání napětí a jeho velikosti způsobené interakcí meziharmonických a ostatních harmonických se v závislosti na fázovém posuvu mezi jednotlivými složkami, jejich frekvencích a velikostech obecně sčítají. V tomto ohledu více interakcí může vytvořit podstatný příspěvek ke kolísání napětí, i když jednotlivě jsou zanedbatelné. Výsledky sumačního efektu harmonických a meziharmonických uvedené v práci jsou zaměřeny především na velikost a frekvenci výsledného kolísání napětí.

Napájení světelného zdroje napětím deformovaným meziharmonickými složkami vytvoří odpovídající frekvenční složky v odbíraném výkonu, které způsobují kolísání světelného toku mj. na všech rozdílových a součtových frekvencích jednotlivých frekvenčních složek napájecího napětí. Potenciál rušit zrakový vjem mají potom rozdílové frekvence, které mohou způsobit kolísání světelného toku v rozsahu pro zrak citlivých frekvencí 0,1-40 Hz. Z principu funkce světelného zdroje, nebo z důvodu použitých předradných obvodů, je však příkon všech světelných zdrojů deformován dalšími frekvenčními složkami, a to i při napájení harmonickým napětím. Meziharmonická složka v napájecím napětí potom vytváří složky světelného toku v citlivém rozsahu frekvencí i pro meziharmonické s frekvencemi nad 100 Hz. Přesná odezva a přenos meziharmonických složek napětí na rušivé kolísání světelného toku je pro každý typ světelného zdroje jedinečná a definuje jejich citlivost na daný typ rušení. Na základě provedených rozborů byla sestavena metoda pro měření křivek zesílení světelných zdrojů, které určují zesílení přenosu velikosti meziharmonických napětí na velikost kolísání světelného toku v rozsahu 0,1-40 Hz v závislosti na frekvenci meziharmonické. Zároveň byl proveden rozsáhlý soubor měření s následnou analýzou výsledků. Mezi jednotlivými světelnými zdroji existují enormní rozdíly, které ovšem odpovídají jejich principu funkce a typu napájení. Nejvyšší zesílení mají z principu funkce žárovkové světelné zdroje, které je v průměru 4x a maximálně až 40x vyšší než maximální zesílení jiných typů světelných zdrojů. Na druhou stranu žárovky nemohou za normálních okolností produkovat kolísání světelného toku s frekvencemi 0,1-40 Hz pro meziharmonické s frekvencemi nad 100Hz, zatímco jiné typy světelných zdrojů jsou citlivé i na meziharmonické s frekvencemi nad 1 kHz.

Mez pro blikání světelných zdrojů způsobené meziharmonickými složkami napětí je pro praktické použití definována limity meziharmonických složek napětí. Pro tento účel byla definována mezní křivka meziharmonických napětí světelného zdroje, která pro každou meziharmonickou frekvenci určuje maximální akceptovatelnou velikost meziharmonické složky napětí, při které u průměrného pozorovatele nevznikne rušivý vjem blikání. Pro určování mezních křivek meziharmonických napětí světelných zdrojů, které zároveň definují odolnost světelného zdroje na daný typ rušení, byly vyvinuty tři srovnávací metody, které vycházejí z všeobecně uznávané mezní křivky meziharmonických napětí pro referenční žárovku 60W. Jednotlivé srovnávací metody postupně eliminují četná omezení použitelnosti vyplývající z rozdílů mezi

funkcí referenční žárovky a ostatních světelných zdrojů. Záměrem eliminace jednotlivých zjednodušujících předpokladů je postupné zpřesňování mezních křivek meziharmonických napětí pro obecnější odezvy světelných zdrojů, s cílem vytvořit konečnou nepodmíněnou metodu s maximální spolehlivostí výsledku. Výhodou vyvinutých srovnávacích metod je zejména stanovení mezní křivky meziharmonických napětí světelného zdroje bez účasti „průměrného“ vzorku pozorovatelů. První dvě metody byly doplněny souborem změřených křivek, které mohou být s ohledem na rušivé blikání světelných zdrojů velmi užitečné pro zajištění kompatibility v elektrických sítích.

Vliv kolísání napětí v elektrických sítích na blikání světelných zdrojů je vyjádřen mírou vjemu blikání a měřen standardizovaným měřičem blikání, který modeluje odezvu systému [referenční světelný zdroj (žárovka 60W)-oko-mozek „průměrného“ pozorovatele] na amplitudovou modulaci napětí. To ve svém důsledku znamená, že nereaguje na přítomnost meziharmonických složek s frekvencí nad 100 Hz v napájecím napětí, které zcela objektivně mohou rovněž způsobit rušivý vjem blikání. Na základě výsledků analýz velikosti kolísání napětí v důsledku interakce harmonických a meziharmonických, byl navržen a v prostředí Matlab-Simulink realizován alternativní flickrmetr vyhodnocující časové průběhy kolísání velikostí napětí. Z provedených simulací vyplývá, že i přes jistá omezení a nedostatky může vyvinutý alternativní flickrmetr poskytovat doplňující informace o přítomnosti meziharmonických složek s vysokými frekvencemi, které souvisí s blikáním jiných než žárovkových světelných zdrojů. Jeho výhodou je relativně snadná implementace ve stávajících PQ monitorech a analyzátoch. Naopak hlavní nevýhodou je striktní závislost odezvy na vyhodnocované veličině, s možností korekce v jednotlivých frekvenčních pásmech prostřednictvím úpravy přenosových funkcí filtrů. Nicméně celkový průběh odezvy přes všechna frekvenční pásma je pevně dán. Možným řešením je druhý navržený typ flickrmetru, který převádí část vyhodnocovacího procesu do frekvenční oblasti, která umožňuje jednoduché přizpůsobení jeho amplitudově-frekvenční odezvy.

PODĚKOVÁNÍ

Práce byla podporována následujícími granty:

- *Zdroje, akumulace a optimalizace využití energie v podmínkách trvale udržitelného rozvoje. Výzkumný záměr MŠMT č. MSM0021630516,*
- *Výzkum rušivého kolísání světelného toku světelných zdrojů způsobeného přítomností harmonických a meziharmonických složek v napájecím napětí. Grantová agentura České republiky, č. projektu GP102/08/P582.*

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Ashmole, P. Quality of Supply-Voltage Fluctuations- Part 1. *Power Engineering Journal*, June 2000
- [2] Bergeron, R. Compatibility level for interharmonics voltages [Online]. IEC SC77A WG8, 2001, 6pp. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/iharm/docs/rbwg8.pdf>
- [3] ČSN EN 50160:2000. Napěťové charakteristiky elektrické energie dodávaná z veřejné distribuční sítě. Vydána červen 2000
- [4] ČSN EN 61000-2-2 ed.2:2003. Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 2-2: Prostředí - Kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí. idt IEC 61000-2-2:2002. Vydána leden 2003
- [5] ČSN EN 61000-4-15:1999. Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 15: Měřič blikání – Specifikace funkce a dimenzování.
- [6] DeCusatis, C. et al. *Handbook of Applied Photometry*. Springer-Verlag, NY, USA, 1997, ISBN 1-56396-416-3
- [7] Drápela, J. Interference mezi svítidly a signálem HDO. *Sborník konference ČK CIRED 2004*. Konference ČK CIRED 2004, České Budějovice: ČK CIRED, 2004, 21 stran
- [8] Drapela, J. A Time Domain Based Flickermeter with Response to High Frequency Interharmonics. In *Proceedings of 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. 1. University of Wollongong: IEEE PES, 2008. s. 1-7. ISBN: 978-1-4244-1770-4
- [9] Drapela, J. Performance of a Voltage Peak Detection-Based Flickermeter. In *Proceedings of the 8th WSEAS Int. Conf. on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal processing*. Spain: WSEAS, 2009, 6pp., (in print)
- [10] Drapela, J. Kratky, M., Weidinger, L., Zavodny, M. Light Flicker of Fluorescent Lamps with Different Types of Ballasts Caused by Interharmonics. *2005 IEEE St. Petersburg PowerTech Proceedings*. St. Petersburg, Russia, IEEE PES, 2005, 7pp., ISBN 5-93208-034-0
- [11] Drapela, J. Voltage fluctuation caused by integer and non-integer harmonics. *Proceedings of the 7th International Conference Electric Power Engineering 2006*. Brno, Czech Republic, 2006, pp. 261-270, ISBN 80-214-3180-6
- [12] Drápela, J. *Zpětné rušivé vlivy osvětlovacích soustav na napájecí síť*. Disertační práce, VUT v Brně, 2006, 233 stran.
- [13] Drapela, J., Toman, P. Interharmonic – Flicker Curves of Lamps and Compatibility Level for Interharmonic Voltages. *2007 IEEE Laussane Powertech Proceedings*. Switzerland: IEEE PES, 2007, pp. 1552-1557, ISBN 978-1-4244-218
- [14] Dugan, R.C., et al. *Electrical Power System Quality*. McGraw-Hill, NY, USA, 2002, 2nd ed., 528 pp., ISBN 0-07-138622-X
- [15] Emanuel, A.E., Peretto, L. A Simple Lamp-Eye-Brian Model for Flicker Observations. *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. 19, No. 3, July 2004, pp. 1308-1313, ISSN 0885-8977
- [16] Emanuel, A.E., Peretto, L. The Response of Fluorescent Lamp with Magnetic Ballast to Voltage Distortion. *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 289-294, ISSN 0885-8977
- [17] EPRI Power Electronics Applications Center. Lamp Flicker Predicted by Gain-Factor Measurements, *Energy Tech Brief*, Brief n°36, July 1996, 3pp.
- [18] Gallo, D. Landi, C., Pasquino, N. Design and Calibration of an Objective Flickermeter. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* vol. 55, no. 6, Dec. 2006
- [19] Habel, J. a kolektiv. *Světelná technika a osvětlování*. FCC Public, spol.s.r.o., Praha, 1995, str. 13-47.
- [20] Hanzelka, Z., Bien, A. Power Quality Application Guide. Voltage Disturbances. Flicker [online]. Cooper Development Association, 2006, 12 pp., www.lpqi.org

- [21] Hecht, S., Smith, E.L. Intermittent Stimulation by Light. *Journal of General Physiology*, Vol 19, 1936, pp. 979-989
- [22] IEEE Interharmonic Task Force Working Document, Draft 3 (2001, July 14), [Online]. Available: <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ih519c.pdf>
- [23] Joint Working Group on Power Quality Cigré C4.1.01/CIRED 2 CCO2/UIE WG2, *Test Protocol for IEC Flickermeter used in Power System Voltage Monitoring*, Draft 11. July, 2004
- [24] Kaufman, J.E., et al. *IES Lighting Handbook. Reference Volume*. IES, Waverly Press, USA, 1984, ISBN 0-87995-015-3
- [25] Keppler, T., Watson, N., Arrillaga, J., Chen, S. Theoretical Assessment of Light Flicker Caused by Sub- and Interharmonic Frequencies. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 18, No. 1, January 2003, pp. 329-333
- [26] Keppler, T., Watson, N.R., Chen, S. Arrillaga, J. Digital flickermeter realization in the time and frequency domains. AUPEC01, 2001, 6pp.
- [27] Keulenaer, H. Power Quality Self-assessment Guide. *Power Quality Application Guide*. Copper Development Association. European Copper Institute. May 2002. www.cda.org.uk
- [28] Koster, M., Jaeger, E., Vancoetsem, W. Light Flicker Caused by Interharmonics. Laborelec, Belgium, 10pp.
- [29] Langella, R., Testa, A. Amplitude and Phase Modulation Effect of Waveform Distortion in Power Systems. *Electrical Power Quality and Utilization Journal*, Vol. XIII, No. 1, 2007, pp. 25-32
- [30] Lee, B.B., Martin, P.R., Valberg, A. Sensitivity of Macaque Retinal Ganglion Cells to Chromatic and Luminance Flicker. *Journal of Physiology*. Vol. 414, pp. 223-243, 1989
- [31] McCluney, R. *Introduction to Radiometry and Photometry*. Artech House, MA, USA, 1994, 402 pp., ISBN 0-89006-678-7
- [32] Mombauer, W. Calculating a New Reference Point for the IEC Standard Flickermeter. *European Trans. On Electrical Power*, Vol. 8, Part 6, December 1998, pp 429-436.
- [33] Mombauer, W. Flicker caused by interharmonics. *etzArchiv* Vol. 12 (1990) p. 391-396
- [34] Mombauer, W. Flicker caused by phase jumps. *European Trans. On Electrical Power*, Vol. 16, No. 6, 2006, pp. 545-567.
- [35] Morcos, M.M., Gomez, J.C. Flicker Sources and Mitigation. *IEEE Power Engineering Review*, November 2002, pp. 5-10, ISSN 0272-1724
- [36] Owen, E. Power disturbance and quality: light flicker voltage requirements. *IEEE Industry Appl. Magazine*, Jan./Febr. 1996
- [37] Peretto, L., Emanuel, A.E. A Theoretical Study of the Incandescent Filament Lamp Performance under Voltage Flicker. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, January 1997, pp. 279-288, ISSN 0885-8977.
- [38] Rea, M.S. et al. *The IESNA Lighting Handbook. Reference and Application*. IESNA, USA, 2000, 9th ed., ISBN 0-87995-150-8
- [39] Sakulin, M., Renner, H. Strategy for worldwide applicability of the UIE/IEC flickermeter. 3rd International Conference on Power Quality PQA94, Amsterdam, 1994, 7 pp.
- [40] Tayjasanant, T., Wang, W., Xu, W. Interharmonic-Flicker Curves. *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 20, April 2005, pp. 1017-1024

ABSTRACT

This work deals with the disturbing light flicker of lamps caused by voltage fluctuation due to presence of sub- and inter-harmonic components and consists of three main parts.

First of them is analysis of the voltage fluctuation caused by beating of harmonic and interharmonics components with view to magnitude and frequency of resulting voltage variation. The second part is focused on the light flicker of different lamp types supplied by fundamental voltage containing single interharmonic. There is introduced the method for measurement of a lamp sensitivity to interharmonics and results of large set of measurements were shown. The lamp sensitivity is presented as the lamp gain factor at flicker frequencies vs. frequency of injected interharmonic component and is called the gain factor curve. Furthermore the interharmonic-flicker curve of lamp which represents the lamp immunity to interharmonics is determined by utilizing the lamp gain factor concept and by utilizing the published limits on voltage flicker. Then other two interharmonic-flicker curves measurement methods improving the curves accuracy were proposed and also the first of these methods was realized and verified.

The last part of the work is aimed at proposal and realization of a time domain based flickermeter having response in wide range of interharmonics frequencies including high-frequency interharmonics up to few kHz while the standard UIE/IEC flickermeter response is limited to double of fundamental system frequency. The proposed flickermeter types are based on the standard UIE/IEC flickermeter and the changes are performed in the block 1 to block 3 of the standard flickermeter scheme. The new flickermeter type implements the analysis of voltage magnitude fluctuation caused by integer and non-integer harmonics in range of DC to 3 kHz, with respect to the measured interharmonic-flicker curves of lamps. Realization of the new flickermeter types in Matlab Simulink is discussed and its characteristics in terms of numerical simulations are shown.