



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

KLASIFIKACE LED Z HLEDISKA CITLIVOSTI NA KOLÍSÁNÍ NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ

LED LAMPS CLASSIFICATION REGARDING VOLTAGE FLICKER SENSITIVITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Štefek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Roman Štefek

ID: 177533

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Klasifikace LED z hlediska citlivosti na kolísání napájecího napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Příčiny blikání světelných zdrojů
2. Klasifikace kolísání napětí způsobující blikání světelných zdrojů, včetně reálných kolísání napětí
3. Úprava měřicího systému a SW v prostředí LabView pro testování odezvy světelných zdrojů
4. Realizace souboru testů a jejich vyhodnocení
5. Klasifikace LED/LED driverů podle jejich odolnosti

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a časovou optimalizací metody určené pro stanovení klasifikace světelných zdrojů LED vzhledem k jejich odolnosti vůči kolísání napájecího napětí. Zatřídění světelných zdrojů v klasifikační škále a jejich označení klasifikačním indexem má za úkol jednoduchým způsobem informovat zájemce o schopnosti konkrétního světelného zdroje fungovat korektně, bez rušivého blikání, v podmínkách elektromagnetického rušení.

Klíčová slova

Klasifikace, Kolísání napětí, Blikání světla, Světelné zdroje LED, Napájecí obvody, Flikrmetr, Objektivní flikrmetr, LabView

Abstract

The master's thesis deals with the design and time optimization of the method designed to determine the classification of LED lamps due to their resistance to power supply fluctuations. Classification of LED lamps in the classification scale and their labelling by the classification index is the task of informing in a simple way those interested in the ability of a concrete light source to function properly, without disturbing flickering, in conditions of electromagnetic interference.

Keywords

Classification, Voltage variation, Light flicker, LED lamps, Drivers, Flickermeter, Objective flickermeter, LabView

Bibliografická citace:

ŠTEFEK, Roman. *Klasifikace LED z hlediska citlivosti na kolísání napájecího napětí* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119207>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jiří Drápela.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Klasifikace LED z hlediska citlivosti na kolísání napájecího napětí jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 20. května 2019

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	1
2. Příčiny blikání světelných zdrojů	2
2.1 Rušivý vjem blikání (flickr).....	2
2.2 Vlastní (samobuzené) oscilace světelných systémů	2
2.3 Vnější příčiny blikání světelných zdrojů	3
2.4 Kombinace obou předchozích.....	3
2.5 Křivky stejné míry vjemu blikání.....	4
3. Klasifikace kolísání napětí	6
3.1 Amplitudová modulace (AM)	8
3.2 Fázová modulace (PM).....	11
3.3 Meziharmonické zkreslení (IHD).....	11
3.4 Reálná kolísání napětí.....	13
4. Měřicí systém	14
4.1 IEC standardní flickrmetr	14
4.2 Objektivní flickrmetr	17
4.3 Testovací systém FEKT VUT	18
5. Metodika klasifikace	23
5.1 Klasifikační index.....	23
5.1.1 Měření křivky zesílení - Gain Factor.....	23
5.1.2 Měření křivky citlivosti - krátkodobá míra vjemu flickru P_{st}	25
5.1.3 Měření křivky odolnosti $P_{st}=1$	26
5.1.4 Definice indexu	27
5.1.5 Definice referenčního stavu	28
5.2 Klasifikační stupnice	28
5.3 Základní požadavky.....	29
5.4 Časová a finanční náročnost měření	30
6. Realizace souboru testů a analýza dat	33
6.1 Testování citlivosti meziharmonickou.....	33
6.1.1 Stanovení hodnoty LFS pro referenční zdroj.....	35
6.1.2 Výpočet LFI pro zdroje LED	38
6.1.3 Posouzení vlivu váhových koeficientů	41

6.2	Testování odolnosti meziharmonickou	43
6.3	Optimalizace klasifikační metody	45
6.3.1	Volba typu testování	46
6.3.2	Volba rozsahu modulační frekvence	46
6.3.3	Změna kroku měření	47
6.4	Další možnosti optimalizace v závislosti na druhu modulace	50
6.4.1	Testování citlivosti modulací RAM	50
6.4.2	Testování odolnosti modulací RAM	52
6.4.3	Testování citlivosti RAM s omezeným počtem bodů měření	53
6.5	Porovnání klasifikačních indexů	55
6.6	Alternativní možnosti testování	56
7.	Klasifikace LED/LED driverů podle jejich odolnosti	58
7.1	Typové rozřídění driverů	58
7.2	Rozložení LED v klasifikační stupnici podle typu driveru	61
7.3	Označení světelných zdrojů	61
8.	Závěr	63

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

ES	elektrizační síť
LED	světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)
CFL	kompaktní zářivka (Compact Fluorescent Lamp)
IHD	meziharmonické zkreslení (Inter Harmonic Distortion)
NN	nízké napětí
AM	amplitudová modulace (Amplitude Modulation)
PM	fázová modulace (Phase Modulation)
OZE	obnovitelné zdroje energie
UIE	Mezinárodní unie pro elektrické aplikace (International Union for Electrical Applications)
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise (International Electrotechnical Commission)
ČSN	chráněné označení českých technických norem
EN	evropská norma
EMC	elektromagnetická kompatibilita (Electro Magnetic Compatibility)
IEEE	Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
Pf (Pinst)	okamžitá míra vjemu flikru
Pst	krátkodobá míra vjemu flikru
Plt	dlouhodobá míra vjemu flikru
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
EMI	elektromagnetická interference
PFC	obvod zlepšující účinnost (Power Factor Correction)
GF	faktor zesílení (Gain Factor)
LF	světelné blikání (Light Flicker)
LFS	závažnost světelného blikání (Light Flicker Severity)
LFI	index světelného blikání (Light Flicker Index)

Symboly:

U	napětí	[V]
ΔU	úbytek (změna) napětí	[V]
$U_{1, pk}$	amplituda harmonického napětí	[V]
E	napětí zdroje	[V]
I	proud	[A]
P	činný výkon	[W]
Q	jalový výkon	[VAr]
S	zdánlivý výkon	[VA]
S_{kz}	zkratový výkon	[VA]
Z	impedance	[Ω]
X	reaktance	[Ω]
R	činný odpor	[Ω]
f	frekvence	[Hz]
f_1	základní frekvence	[Hz]
$f_m (f_M)$	modulační frekvence	[Hz]
f_{IH}	meziharmonická frekvence	[Hz]
φ	fázový úhel	[rad]
ω	úhlová frekvence	[rad·s ⁻¹]
ω_1	úhlová frekvence základní harmonické složky	[rad·s ⁻¹]
ω_M	úhlová frekvence modulační složky	[rad·s ⁻¹]
t	čas	[s]
u	okamžitá hodnota napětí	[V]
k	index meziharmonické	[-]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Křivka stejné míry vjemu blikání ($P_{st}=1$), pravouhlé změny napětí pro žárovku 60 W, 230 V (Evropa), 120 V (Severní Amerika), 100 V (Japonsko) [2].....	4
Obr. 2-2 Křivka stejné míry vjemu blikání ($P_{st}=1$), sinusové kolísání napětí pro žárovku 60 W, 230 V (120 V) [2].....	5
Obr. 2-3 Kompatibilní úroveň pro mezipharmonická napětí související s blikáním referenční 60 W žárovky jako funkce mezipharmonické frekvence do 100 Hz [2].....	5
Obr. 3-1 Klasifikace změn napětí [3]	6
Obr. 3-2 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě [3].....	7
Obr. 3-3 Fázorový diagram pro R - L zátěž $E \geq U_0$ [3].....	7
Obr. 3-4 Příklad kolísání efektivní hodnoty napětí [3]	8
Obr. 3-5 Příklad normalizovaného průběhu kolísání napětí (amplitudová modulace) jmenovitého napětí sinusovým signálem, hloubka modulace $\Delta U/U=20\%$, frekvence modulace $f_M=8,8$ Hz [2].....	8
Obr. 3-6 Amplitudová modulace (AM) – sinusový modulační signál [1]	10
Obr. 3-7 Amplitudová modulace (AM) – pravouhlý modulační signál [1].....	10
Obr. 3-8 Fázová modulace (PM) – sinusový modulační signál [1]	11
Obr. 3-9 Příklady průběhu základní harmonické napětí a jedné subharmonické [1].....	12
Obr. 4-1 Blokové schéma IEC měřiče blikání (flickrmetru) [1]	15
Obr. 4-2 Blokové schéma objektivního flickrmetru [2].....	18
Obr. 4-3 Blokové schéma testovacího pracoviště [4]	19
Obr. 4-4 Sestavené testovací pracoviště v laboratoři	19
Obr. 4-5 Okno „Settings“ hlavního programu MAIN.....	20
Obr. 4-6 Okno „Measurement“ hlavního programu MAIN	21
Obr. 4-7 Okno „Setting“ programu měření OBF	21
Obr. 4-8 Okno „Measurement“ programu měření OBF	22
Obr. 5-1 Příklady křivek GF pro vybrané LED a ref. žárovku	24
Obr. 5-2 Příklad normalizovaných křivek $P_{st, IH}$ pro vybranou LED a ref. žárovku	25
Obr. 5-3 Příklad změřené křivky odolnosti pro vybranou LED	26
Obr. 5-4 Normalizovaná křivka odolnosti pro vybranou LED.....	27

Obr. 5-5 Doba testování světelného zdroje v závislosti na nastavených parametrech.....	31
Obr. 5-6 Grafické znázornění ceny testování	32
Obr. 5-7 Vybraná část ceníku služeb laboratoře PQ a EMC VUT v Brně	32
Obr. 6-1 Normalizovaná křivka citlivosti pro referenční žárovku 60 W, 230 V	35
Obr. 6-2 Normalizovaná křivka citlivosti – převrácená hodnota.....	36
Obr. 6-3 Amplitudové spektrum meziharmonické $f_{IH} = 41,2$ Hz a 58,8 Hz s velikostí modulace 20 % superponované na základní harmonickou	36
Obr. 6-4 Porovnání kolísání obálky napětí pro IH modulaci s $f_{IH} = 41,2$ Hz a 58,8 Hz..	37
Obr. 6-5 Grafické zobrazení korekce normalizované křivky P_{st} a hodnoty $LFS_{LED,IH}$...	40
Obr. 6-6 Graf indexů LFI_{IH} pro světelné zdroje LED a ref. žárovku	40
Obr. 6-7 Graf indexů LFI_{IH} pro různé hodnoty $W_{301-1000}$	41
Obr. 6-8 Graf indexů LFI_{IH} pro různé hodnoty $W_{101-300}$	42
Obr. 6-9 Graf indexů LFI_{IH} pro různé hodnoty $W_{101-300}$ a $W_{301-1000}$	42
Obr. 6-10 Příklad úpravy dat pro měření křivky odolnosti	43
Obr. 6-11 Porovnání křivky citlivosti a odolnosti pro LED 13	44
Obr. 6-12 Porovnání indexů světelného blikání LFI_{IH} , získaných měřením citlivosti a odolnosti.....	45
Obr. 6-13 Graf indexů LFI_{IH} s rozsahem měření $f_{IH} = 1-300$ Hz, $W_{1-100} = 1$, $W_{101-300} =$ 0,2, krok = 1 Hz.....	47
Obr. 6-14 Porovnání křivek v závislosti na zvoleném kroku měření	48
Obr. 6-15 Zobrazení změny hodnot integrace při zvyšování kroku měření	48
Obr. 6-16 Graf indexů LFI_{IH} s rozsahem měření $f_{IH} = 1-300$ Hz, $W_{1-100} = 1$, $W_{101-300} =$ 0,2, krok = 9 Hz.....	49
Obr. 6-17 Normalizované křivky citlivosti RAM.....	51
Obr. 6-18 Graf indexů LFI_{RAM} - citlivost.....	52
Obr. 6-19 Normalizované křivky odolnosti RAM	52
Obr. 6-20 Graf indexů LFI_{RAM} - odolnost	53
Obr. 6-21 Porovnání původní a zjednodušené norm. křivky citlivosti RAM.....	54
Obr. 6-22 Graf indexů LFI_{RAM} - citlivost, zjednodušená verze.....	55
Obr. 6-23 Příklad modulace s proměnnou modulační frekvencí	57
Obr. 6-23 Frekvenční amplitudové spektrum výsledného signálu	57
Obr. 7-1 Rozsah indexů LFI_{IH} v závislosti na typu driveru [8]	61

Obr. 7-2 Energetický štítek pro elektrické světelné zdroje prezentované v místě prodeje [10].....	62
--	----

Seznam tabulek

Tab. 5-1 Rozsah indexu závažnosti světelného blikání [8]	29
Tab. 5-2 Časová a finanční náročnost testování světelného zdroje	31
Tab. 6-1 Seznam testovaných světelných zdrojů LED.....	34
Tab. 6-2 Rozdíly indexu LFI_{IH} pro různé frekvenční rozsahy měření	46
Tab. 6-3 Hodnoty klasifikačních indexů pro popsané způsoby testování	56

1. ÚVOD

Důvodem pro rozsáhlé využívání elektrické energie dnešní společností jsou její vlastnosti. Nespornou výhodou, oproti jiným formám energie (mechanická, tepelná apod.), je relativně snadný způsob jejího přenosu na velké vzdálenosti. Neméně důležité jsou také široké možnosti jejího využití v místě spotřeby. S výrobou, přenosem a spotřebou elektrické energie se přesto pojí jisté problémy, které jsou způsobeny vzájemným ovlivňováním se jednotlivých částí elektrizační sítě (ES), a které mají v důsledku negativní vliv na kvalitu elektrické energie v síti.

Kvalita elektrické energie je zásadním parametrem ovlivňujícím správnou funkci elektrických spotřebičů, avšak současně jsou spotřebiče prvkem, který má na kvalitu elektrické energie největší vliv. Mezi závažné problémy v této oblasti patří kolísání napájecího napětí, které, mimo jiné, vyvolává u světelných zdrojů kolísání vyzařovaného světelného toku. To vede k nežádoucímu blikání, jenž má nepříznivý vliv na zrakový vjem člověka. Ke kolísání napětí v síti může docházet z různých důvodů. Pravidelné či nepravidelné změny v odběru elektrické energie, způsobené např. připojováním a odpojováním velkých spotřebičů nebo pulzním řízením jejich výkonu, je považováno za jednu ze základních příčin. K blikání světelných zdrojů však může vést jakýkoliv typ modulace napájecího napětí, která může za určitých podmínek v elektrické síti vzniknout a která má významně odlišný vliv na blikání světelných zdrojů, rovněž v závislosti na principu jejich funkce a konkrétním provedení.

Zpočátku byla tato problematika řešena pouze pro nejrozšířenější světelný zdroj, klasickou vakuovou žárovku se žhaveným vláknem. Citlivost na kolísání napájecího napětí se však týká i moderních světelných zdrojů, jakými jsou například kompaktní výbojky CFL (Compact Fluorescent Lamp) nebo svítidla na principu LED (Light Emitting Diode).

Předmětem této diplomové práce je stanovení optimální metody pro klasifikaci světelných zdrojů LED v závislosti na jejich citlivosti ke kolísání napájecího napětí.

Cílem práce je vytvořit, pokud možno, nepřiliš časově náročnou metodu testování, vyhodnocení a následného označení světelných zdrojů LED, uváděných na trh, jak pro potřeby odborné veřejnosti, tak i běžných spotřebitelů, jimž má pomoci v orientaci mezi širokou škálou nabízených výrobků.

2. PŘÍČINY BLIKÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

2.1 Rušivý vjem blikání (flikr)

Blikání světelných zdrojů, označováno jako flikr (z anglického flicker - blikat), znamená periodické, cyklické, nebo skokové změny osvětlení, které pozorovatel vnímá jako změny jasu či barvy osvětlované scény a které narušují jeho zrakový úkon. Původ negativního vlivu na člověka je v anatomii a fyziologii lidského zraku a psychologii jednotlivce. Vjem blikání je relativně složitý proces, daný interakcí kolísání osvětlení (jasu), zrakového orgánu a paměťového efektu mozku. Vjem blikání je u každého jedince jiný. Rušení zrakového vjemu blikajícím světlem může mít vedle iritujících účinků, zhoršujících soustředěnost, také medicínské následky, spojené s bolestmi hlavy, nebo až fatální důsledky, kdy může být spouštěčem epileptického záchvatu. Blikání světla, spojené s užitím umělého osvětlení, je přítomné vždy. Je však třeba rozlišovat prahové pocitové úrovně, kdy je blikání pouze rozpoznatelné, nebo kdy je již rušivé. Rozlišujeme tři základní typy blikání:

- časové,
- prostorové,
- barevné.

Časové změny světelného výkonu zdrojů (jasu osvětlovaných předmětů) jsou nejvýznamnějším typem flikru. Z pohledu frekvenčního rozsahu vjemu variací světla zrakovým orgánem jsou nejpodstatnější změny v rozsahu přibližně od 0,1 do 40 Hz, přitom úroveň vjemu je frekvenčně závislá. [1]

Principiálně existují dvě základní příčiny blikání světelných zdrojů.

1. Vlastní (samobuzené) oscilace
2. Rušení v napájecím napětí

V některých případech je také možná kombinace obou příčin.

2.2 Vlastní (samobuzené) oscilace světelných systémů

Jedná se o změny světelného toku vyzařovaného svítidlem, které vznikají i přesto, že napájení svítidla harmonickým ustáleným napětím je stabilní. Nejde tedy o ovlivnění funkčnosti světelného zdroje vnějším rušením, ale o vnitřní vlastnost konkrétního systému. Světelný systém obsahuje světelný zdroj, napájecí obvod a další konstrukční součásti, které zajišťují jeho provoz. Je důležité, aby všechny součásti svítidla byly navzájem dobře přizpůsobeny.

Samobuzené oscilace jsou poruchy obvykle způsobené nevhodným přizpůsobením světelného zdroje a jeho napájecího obvodu, ať již se jedná o elektronický či elektromagnetický předřadník halogenidových výbojek (zářivek) nebo napájecí měnič (driver) světelných zdrojů LED. Chybná funkce a následné blikání svítidla se nemusí projevovat stále. Vzhledem k použití polovodičových součástek v napájecích obvodech může záviset například na teplotě.

Jedná se také o typický jev u svítidel napájených zdrojem regulovaným pomocí triakového (externího) stmívače. Z principu jeho funkce pak není svítidlo napájeno ideálním harmonickým napětím, což může způsobit nekorektní funkci řízení napájecího obvodu světelného zdroje a následně jeho blikání. Nejde však o kolísání napětí ve smyslu vnějšího superponovaného rušení. Jeho efektivní hodnota je stálá (za předpokladu, že neměníme míru regulace), ale půlperiody napájecího napětí jsou „ořezány“ v závislosti na intenzitě regulace, což může ovlivnit řídicí obvody napájecího zdroje svítidla.

Obvykle se jedná o blikání náhodného nebo kvazi-periodického neustáleného průběhu. Tyto oscilace nejsou z hlediska klasifikace světelných zdrojů LED dále v této práci uvažovány.

2.3 Vnější příčiny blikání světelných zdrojů

Přímou vnější příčinou blikání světelných zdrojů je kolísání napětí, tedy opakující se nebo náhodné změny obálky jeho okamžité hodnoty. Kolísání napětí může být rozděleno na dva základní typy, cyklické a necyklické. Cyklické fluktuace napětí jsou výsledkem periodického kolísání napětí, zatímco necyklické výsledkem náhodných rychlých změn velikosti napětí v síti. 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, relativní velikost změny i výskyt v čase, jsou pro hodnocení negativního důsledku fluktuace napětí velmi podstatné [2].

Kolísání napájecího napětí může být více či méně převedeno světelným zdrojem na odpovídající změny světelného toku vyzařovaného svítidlem. Míra přenosu je dána principem funkce a konstrukcí svítidla. U moderních světelných zdrojů pak zvláště konfigurací jejich napájecího obvodu.

Tyto změny napětí jsou důležité pro klasifikaci odolnosti světelných zdrojů LED a jsou dále uvažovány v této práci jako hlavní zdroj rušení.

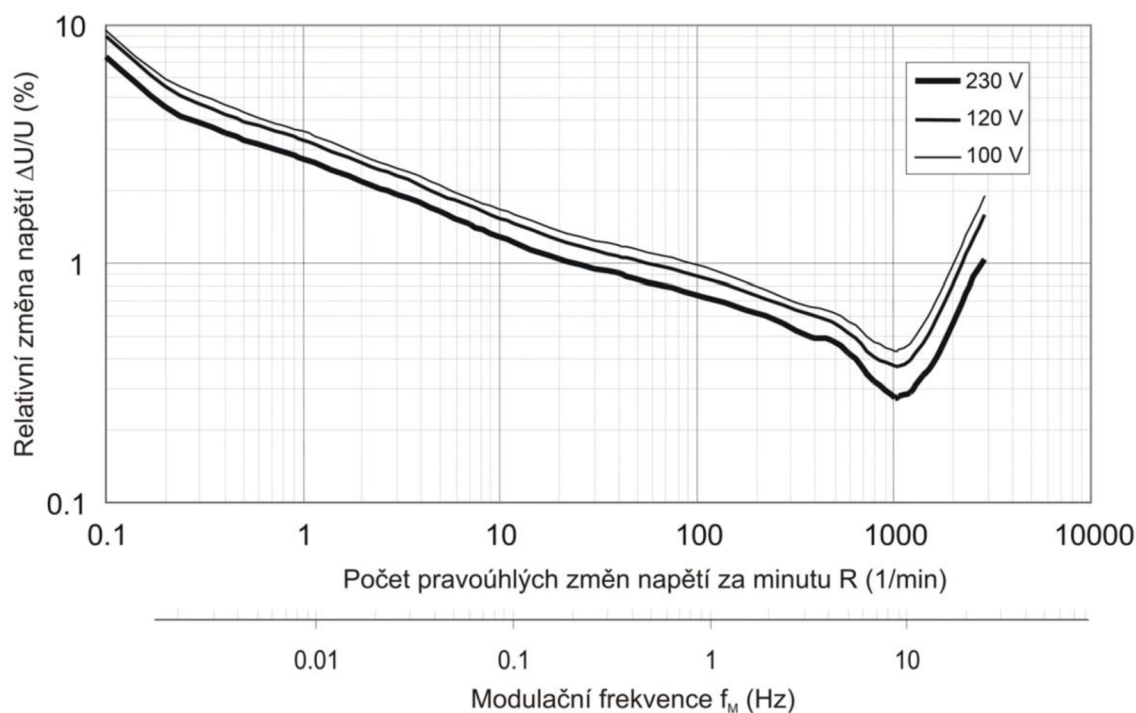
2.4 Kombinace obou předchozích

Může také nastat situace, kdy je světelný zdroj, včetně napájecího obvodu a dalších konstrukčních prvků, navržen správně a v případě napájení nerušeným harmonickým napětím funguje korektně. V případě, že dojde k rušení vstupního napětí určitým typem modulace, může dojít k ovlivnění řídicí části napájecího obvodu, které způsobí chybné řízení interního měniče napětí nebo proudu. Následkem může být opět blikání světelného zdroje, které však, na rozdíl od předchozího případu, není přímým přenosem velikosti

kolísání napájecího napětí do výkonu světelného toku, ale funkce svítidla je ovlivněna rušením nepřímo.

2.5 Křivky stejné míry vjemu blikání

Aby bylo možné problém blikání světelných zdrojů objektivně posuzovat, musela být stanovena hranice, od které je rušivý vliv na zrakový vjem člověka nežádoucí. Problematika stanovení mezní intenzity vjemu blikání je relativně složitý a komplexní problém, který je zkoumán již značnou řadu let a jeho vývoj je popsán v různých odborných a vědeckých publikacích. Podrobný popis dané problematiky není pro účely této práce natolik podstatný. Důležitý je výsledek, tedy stanovení mezních křivek stejné míry vjemu blikání pro různé modulační napětí. Tyto mezní křivky byly využity jako referenční hodnoty při návrhu a sestavení měřiče blikání – flickrmetru, jak bude uvedeno dále v kapitole (4). Stejně tak budou v této práci využity jako referenční hodnoty pro stanovení klasifikačního indexu.

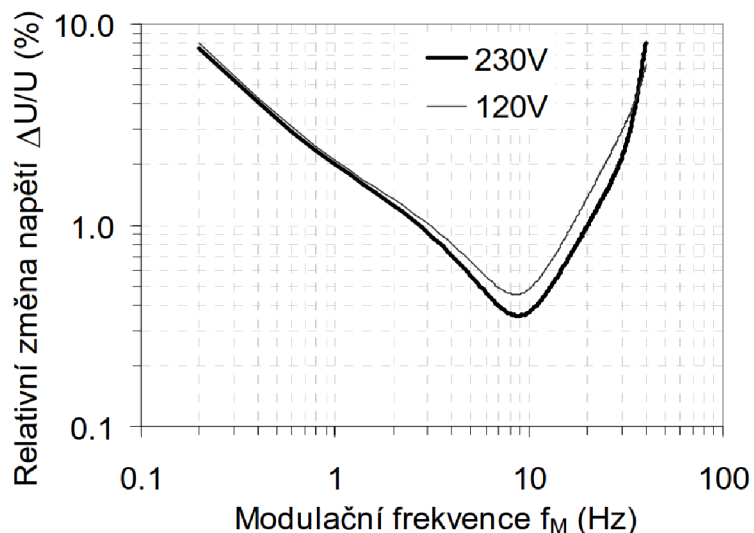


Obr. 2-1 Křivka stejné míry vjemu blikání ($P_{st}=1$), pravoúhlé změny napětí pro žárovku 60 W, 230 V (Evropa), 120 V (Severní Amerika), 100 V (Japonsko) [2]

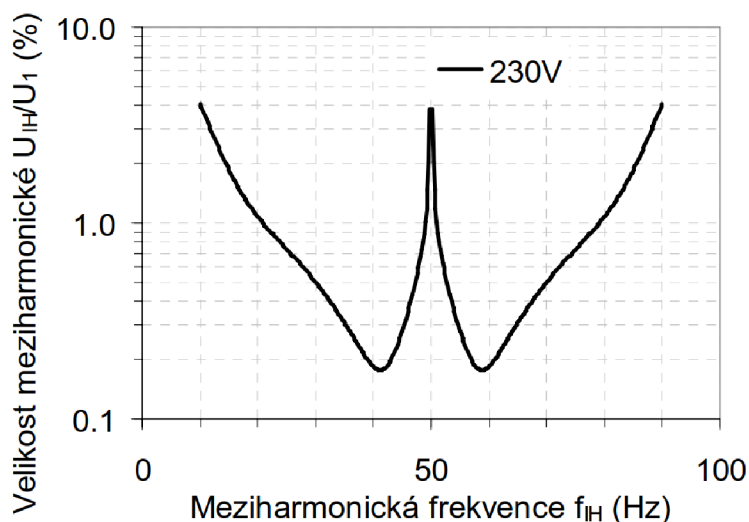
Výsledné křivky, které jsou uvedeny na obrázku (Obr. 2-1), jsou výsledkem analýzy laboratorních zkoušek provedených na rozsáhlém vzorku pozorovatelů a odpovídají hranici vjemu rušivého blikání pro 50 % pozorovatelů. Tzn., že změny napětí s parametry nad mezní křivkou způsobily u více než 50 % respondentů 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 pravouhlé změny napětí, a v poslední edici normy ČSN EN 61000-2-2 je nazvána křivkou stejné míry vjemu blikání.

Na základě mezní křivky pro pravouhlé změny napětí byla odvozena i mezní křivka pro sinusové změny napětí (Obr. 2-2) a následně v devadesátých letech i mezní křivka mezipharmonických napětí v závislosti na mezipharmonické frekvenci do 100 Hz, která byla do druhé edice ČSN EN 61000-2-2 zavedena jako kompatibilní úroveň pro mezipharmonická napětí (Obr. 2-3). [2]



Obr. 2-2 Křivka stejné míry vjemu blikání ($P_{st}=1$), sinusové kolísání napětí pro žárovku 60 W, 230 V (120 V) [2]

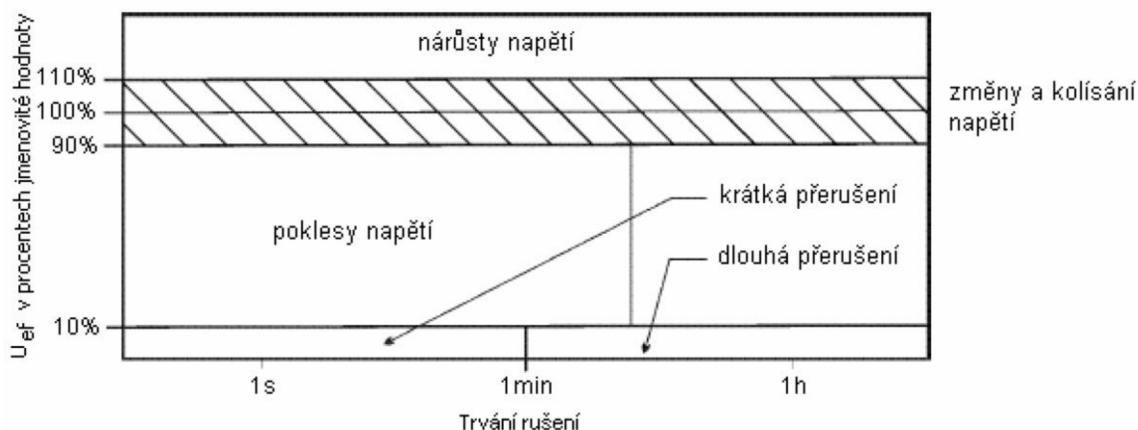


Obr. 2-3 Kompatibilní úroveň pro mezipharmonická napětí související s blikáním referenční 60 W žárovky jako funkce mezipharmonické frekvence do 100 Hz [2]

3. KLASIFIKACE KOLÍSÁNÍ NAPĚTÍ

Obecně lze kolísání napětí definovat jako určitý druh modulace základního harmonického průběhu síťového napětí, která způsobuje změny v okamžitých nebo efektivních hodnotách tohoto napětí v časové oblasti. Modulace může ovlivňovat amplitudu, fázi nebo frekvenci základního sinusového průběhu. Speciálním typem modulace (bude vysvětleno dále) je meziharmonické zkreslení (IHD), které vzniká vlivem meziharmonických složek, superponovaných na vlnu základního napětí. V současné době se tento druh modulace napětí v elektrické síti stává stále větším problémem z důvodu rozšiřování nelineárních zátěží s polovodičovými prvky.

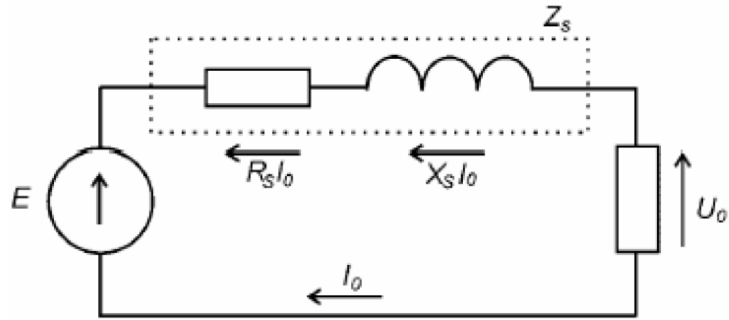
Je také nutno podotknout, že kolísání efektivní hodnoty napětí, způsobující blikání světelných zdrojů, je uvažováno v rozsahu dovolené tolerance velikosti síťového napětí, který je pro hladinu napětí $NN \pm 10\%$. Pásmo fluktuace efektivní hodnoty napětí je vyznačeno šrafovanou oblastí na obrázku (Obr. 3-1). 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 blikání 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. [2]



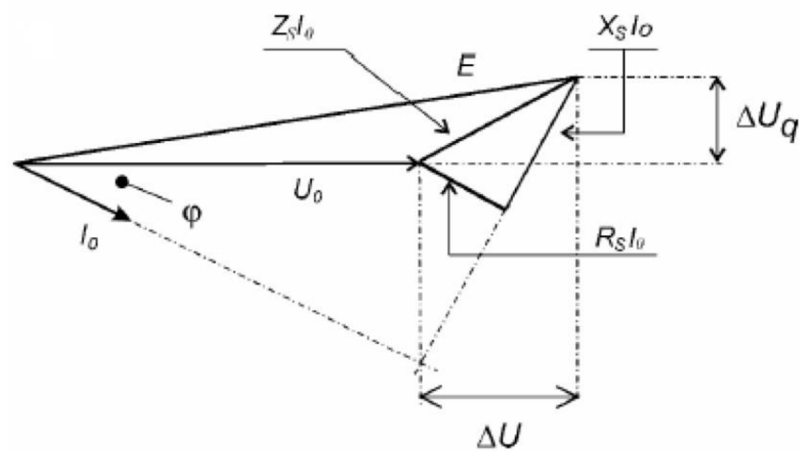
Obr. 3-1 Klasifikace změn napětí [3]

Za základní příčinu kolísání napětí jsou považovány změny velikosti odběru elektrické energie v síti, jak bylo již naznačeno v úvodu práce. Typicky jsou způsobeny velkou proměnlivou zátěží, tj. zátěží, u níž se rychle mění činný a jalový odběr elektrické energie.

Pro každé napájecí vedení je napětí na koncové zátěži odlišné od napětí na začátku u zdroje. To může být demonstrováno na jednofázovém náhradním obvodu dle obrázku (Obr. 3-2). Rovnice (2.1) ukazuje, jak může být rozdíl napětí ΔU odvozen z fázorového diagramu (Obr. 3-3).



Obr. 3-2 Jednofázový náhradní obvod napájecí sítě [3]



Obr. 3-3 Fázorový diagram pro R-L zátěž $E \geq U_0$ [3]

$$\frac{E - U_0}{U_0} \approx \frac{\Delta U}{U_0} = R_S \frac{P}{U_0^2} + X_S \frac{Q}{U_0^2} \cong R_S \frac{P}{U_0^2} + \frac{Q}{S_{kz}} \quad (2.1)$$

kde

E je napětí zdroje,

U_0 je napětí na svorkách zátěže,

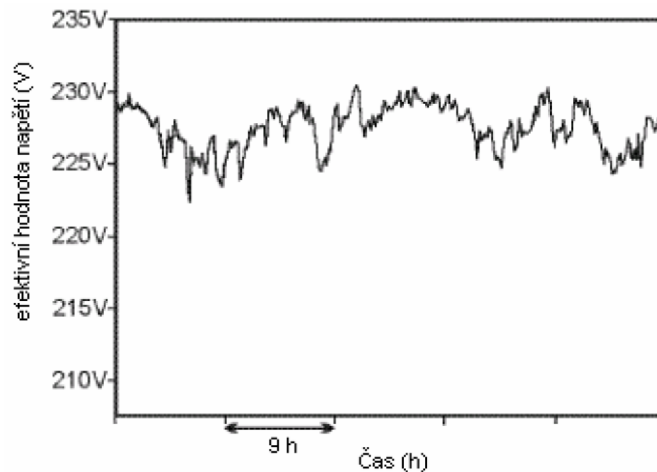
I_0 je proud,

Z_S, X_S, R_S jsou náhradní impedance, reaktance a odpor vedení,

P, Q jsou činný a jalový výkon zátěže,

S_{kz} je zkratový výkon v místě připojení zátěže.

Podle daného případu se může změna napětí ΔU projevit jako pokles napětí s konstantní hodnotou v dlouhém časovém intervalu, nebo jako pomalé či rychlé změny napětí, nebo jako kolísání napětí. Kolísání napětí je definováno jako série změn efektivní hodnoty napětí nebo jako cyklické změny obálky křivky napětí viz obrázky (Obr. 3-4). [3]

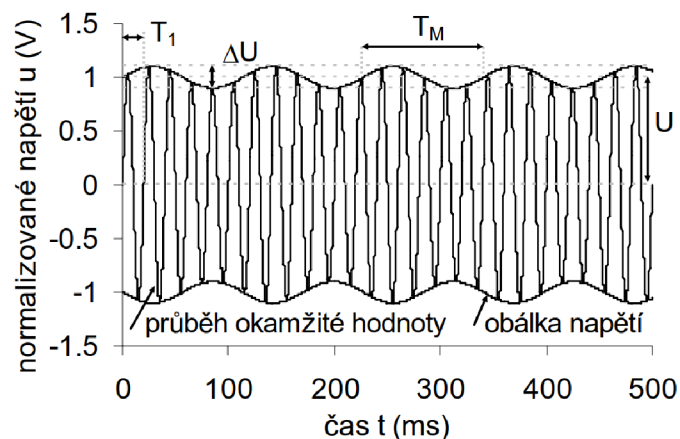


Obr. 3-4 Příklad kolísání efektivní hodnoty napětí [3]

3.1 Amplitudová modulace (AM)

Amplitudovou modulaci lze definovat jako periodické, kvazi-periodické, nebo aperiodické změny ve velikosti napětí. Principiálně se jedná o modulaci základního průběhu harmonického napětí další jednoduchou funkcí, sinus, obdélník, apod. Patří mezi spojité modulace. V závislosti na změně modulačního signálu se mění amplituda základního signálu. Frekvence ani fáze se u této modulace nemění.

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.



Obr. 3-5 Příklad normalizovaného průběhu kolísání napětí (amplitudová modulace) jmenovitého napětí sinusovým signálem, hloubka modulace $\Delta U/U=20\%$, frekvence modulace $f_M=8,8$ Hz [2]

Nejjednodušší případ amplitudové modulace napětí je jeho periodické sinusové kolísání, které lze při uvažování sinusového napájecího napětí zapsat rovnicí:

$$u(t) = U_{1,pk} \sin(2\pi f_1 t + \Phi) \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta U}{U_{1,pk}} \right) \frac{1}{2} \sin(2\pi f_M t + \varphi) \right] \quad (2.2)$$

kde

- $U_{1,pk}$ je amplituda základního harmonického napětí,
- f_1 je základní frekvence,
- Φ je fázový úhel základního harmonického napětí,
- $\Delta U / U_{1,pk}$ je relativní hloubka modulace,
- f_M je modulační frekvence,
- φ je počáteční fázový úhel modulace.

Velikost základního harmonického napětí, stejně jako jeho počáteční fáze, není v této fázi podstatná a rovnici (2.2) lze převést na tvar:

$$u(t) = \sin(\omega_1 t) \cdot [1 + m_M \sin(\omega_M t + \varphi)] \quad (2.3)$$

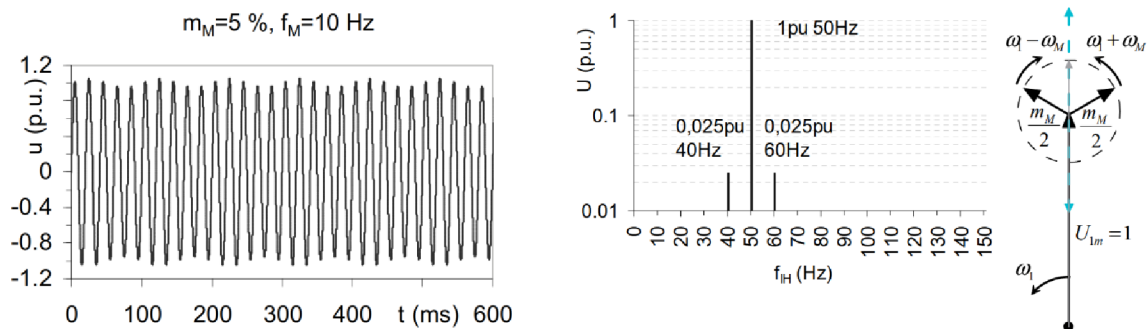
kde

- ω_1 je úhlová frekvence základní harmonické složky,
- ω_M je úhlová frekvence modulační složky,
- m_M je relativní velikost vrcholové hodnoty modulační složky, která se rovná polovině velikosti relativní hloubky modulace

S využitím vztahů pro goniometrické funkce lze rovnici (2.3) převést na tvar:

$$u(t) = \sin(\omega_1 t) + \frac{m_M}{2} \cdot \sin \left[(\omega_1 - \omega_M)t + \left(-\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{m_M}{2} \cdot \sin \left[(\omega_1 + \omega_M)t + \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (2.4)$$

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 modulace, resp. $\frac{1}{4}$ hloubky modulace a jejich počáteční fáze, odpovídající počáteční fázi modulační funkce, jsou v opozici. [2]



Obr. 3-6 Amplitudová modulace (AM) – sinusový modulační signál [1]

Modulační signál však nemusí mít pouze sinusový průběh. Dalším z možných je např. signál pravoúhlý. Tato modulace vzniká např. průchodem proudu vedením s určitou impedancí, při napájení spotřebiče, jehož výkon je řízen kvazi-periodickým spínáním napájecího napětí. Vlivem pravidelného spínání zátěže o určité frekvenci vzniká na impedanci vedení úbytek napětí, měnící se v závislosti na tomto spínání. Rovnici pro amplitudovou modulaci pravoúhlým signálem:

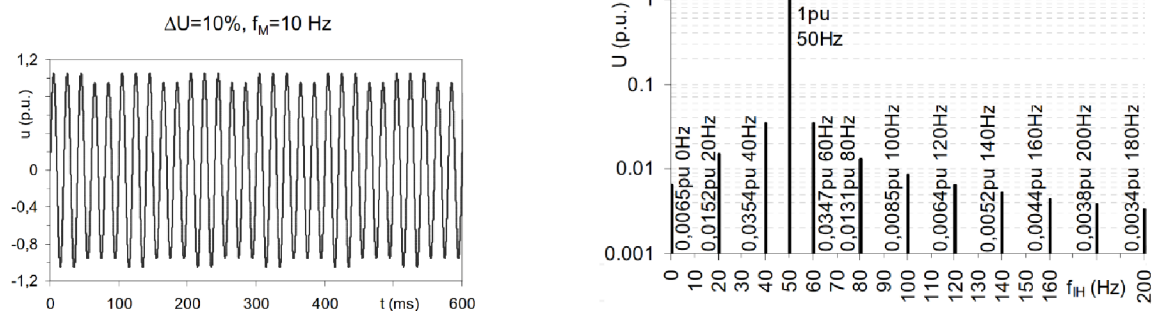
$$u(t) = \sin(\omega_1 t) \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \frac{1}{2} \text{sign}[\sin(\omega_M t + \varphi)] \right] \quad (2.5)$$

lze převést na tvar:

$$u(t) = \sin(\omega_1 t) + \sum_{v=1}^N \left[m_{IHv} \cdot \sin\left(\omega_{IHv}^- t - \varphi_{IHv} + \frac{\pi}{2}\right) + m_{IHv} \cdot \sin\left(\omega_{IHv}^+ t + \varphi_{IHv} + \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (2.6)$$

$$\omega_{IHv}^{\pm} = |\omega_1 \pm v \cdot \omega_M| \quad \text{kde } v = 1, 3, 5 \dots$$

$$m_{IHv} = \frac{4 \cdot m_M}{\pi} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{1}{2}$$

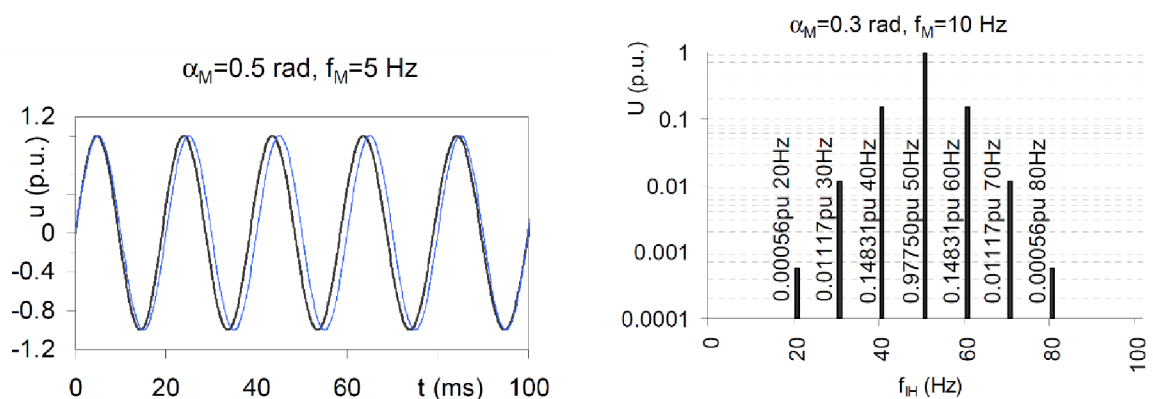


Obr. 3-7 Amplitudová modulace (AM) – pravoúhlý modulační signál [1]

3.2 Fázová modulace (PM)

Jiným typem modulace sinusového průběhu síťového napětí je fázová modulace. V tomto případě je modulačním signálem ovlivněna fáze základního průběhu. I když princip fázové modulace harmonického napětí je jiný než u amplitudové modulace a pravidla pro velikosti, frekvence a fáze jednotlivých frekvenčních složek jsou odlišná, výsledné kolísání napětí má podobný charakter. Rovnice pro fázovou modulaci sinusovým modulačním signálem:

$$u(t) = \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + u_M(t)) = \cos[\omega_1 t + \alpha_M \cos(\omega_M t + \varphi_M)] \quad (2.7)$$



Obr. 3-8 Fázová modulace (PM) – sinusový modulační signál [1]

3.3 Meziharmonické zkreslení (IHD)

V úvodu této kapitoly je modulace základní vlny napětí meziharmonickými složkami označena jako „speciální“ typ modulace. Důvodem k tomuto označení je úvaha, že amplitudová a fázová modulace napětí může být reprezentována skupinou symetrických meziharmonických párů superponovaných na základní harmonickou napětí a naopak. Také jedna meziharmonická či skupina asymetrických meziharmonických, přidaných k základní harmonické napětí, může být vyjádřena současnou amplitudovou a fázovou modulací napětí. Lze tedy říci, že kolísání napětí v důsledku zkreslení meziharmonickými je možno vyjádřit kombinací amplitudové (AM) a fázové modulace (PM). [1]

Zkreslení meziharmonickými složkami je, z dosud popsanych modulací napájecího napětí, nejbliže reálnému stavu v elektrické síti. Čistě amplitudová nebo fázová modulace se většinou v reálné síti nevyskytuje nebo jen výjimečně. Také svým frekvenčním rozsahem má meziharmonické zkreslení největší význam ve vztahu k blikání moderních světelných zdrojů, jelikož ty jsou z principu své funkce citlivé i na vyšší frekvence modulace, na rozdíl od klasické vakuové žárovky.

Průběh okamžité hodnoty napětí, obsahující kromě základní harmonické složky, případné stejnosměrné složky, harmonické vyšších řádů, i mezipharmonické složky, můžeme zapsat následovně:

$$u(t) = U_{DC} + u_1(t) + \sum_{h=1}^H u_h(t) + \sum_{k=1}^K u_{IHk}(t) \quad (2.8)$$

kde

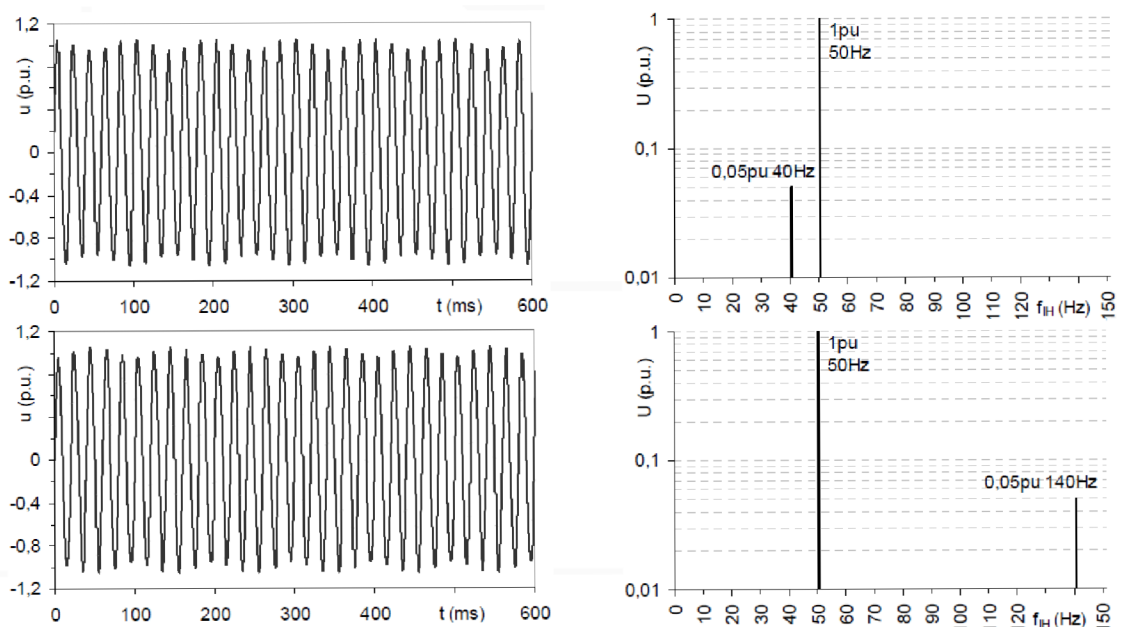
$$u_{IHk}(t) = U_{IHk,m} \sin(\omega_{IHk}t + \psi_{IHk}) \quad \text{a } k \text{ je index mezipharmonické}$$

Rovnici pro kolísání napětí způsobené jednou mezipharmonickou složkou:

$$u(t) = \sin(\omega_1 t) \cdot m_{IH} \sin(\omega_{IH} t + \varphi_{IH}) \quad (2.9)$$

lze převést na tvar:

$$u(t) \cong \frac{1}{2} \sin(\omega_1 t) \cdot \left[1 + 2 \cdot m_{IH} \cdot \sin\left((\omega_1 - \omega_{IH})t - \varphi_{IH} + \frac{\pi}{2}\right) \right] + \frac{1}{2} \sin[\omega_1 t + 2 \cdot m_{IH} \cdot \sin((\omega_1 - \omega_{IH})t - \varphi_{IH} + \pi)] \quad (2.10)$$



Obr. 3-9 Příklady průběhu základní harmonické napětí a jedné subharmonické [1]

3.4 Reálná kolísání napětí

Dosud uvedené typy modulace síťového napětí lze považovat za ideální. Ve skutečné elektrické síti je zapojeno mnoho prvků, které mají vliv na výsledný tvar napětí. Kolísání napětí v reálné síti pak má většinou stochastický charakter.

Mezi typické zdroje, způsobující kolísání napětí, patří:

- rozběh velkých motorů (speciálně je-li periodicky opakován),
- zapínání tepelných čerpadel, transformátorů a kondenzátorů,
- motory provozované s proměnným zatížením (katry, drtiče kamení, lisy, výtahy),
- proměnlivá zátěž (např. řízený ohřev s velkým výkonem),
- svářecí stroje (např. obloukové a odporové svářečky),
- obloukové pece,
- fázové řízení tyristorového měniče,
- proměnné dodávky elektrické energie z OZE (větrné a fotovoltaické elektrárny).

4. MĚŘÍCÍ SYSTÉM

Vzhledem ke skutečnosti, že vjem rušivého blikání je z principu subjektivní záležitostí a každý člověk může být různě citlivý na změny světelného toku, bylo potřeba vyvinout objektivní metodu měření míry vjemu flikru pro vyhodnocování a porovnávání stavu napětí a jeho rušení v jakékoliv konkrétní části elektrické sítě. Práce na vývoji metodiky a zařízení pro měření flikru (flikrmtru) se datují již od sedmdesátých let minulého století. První výsledky byly prezentovány mezinárodnímu společenství na kongresu UIE (Nevries, 1984). První normou, ve které byla zakotvena funkční a konstrukční specifikace flikrmtru byla IEC 868 (1986).

Současný standard obsahující specifikace měřicího přístroje je ČSN EN 61000-4-15, která je převzatou normou z IEC 61000-4-15 - Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Techniky zkoušení a měření - Flickermeter - Funkční a konstrukční specifikace (IEC-61000-4-15, 2010). V roce 2011 byl uveden standard IEEE Std 1453™ 2011 doporučující přijetí normy IEC 61000-4-15: 2010. [4]

Standardní flikrmtr je přístroj:

- který musí měřit jakoukoliv velikost flikru,
- který musí být schopen přímo měřit všechny typy výkyvů napětí,
- jehož výstupem je hodnota krátkodobé míry flikru P_{st} ,
- který emuluje průměrné vnímání blikání žárovky 230 (120) V, 60 W.

4.1 IEC standardní flikrmtr

IEC flikrmtr simuluje odezvu referenční žárovky pro danou síť a odezvu průměrného pozorovatele. Jeho výstupní veličinou je míra vjemu blikání, a to okamžitá P_f , krátkodobá P_{st} , vyhodnocovaná standardně v intervalu 10 min, a dlouhodobá P_{lt} , vyhodnocovaná z dvanácti, po sobě jdoucích, hodnot P_{st} .

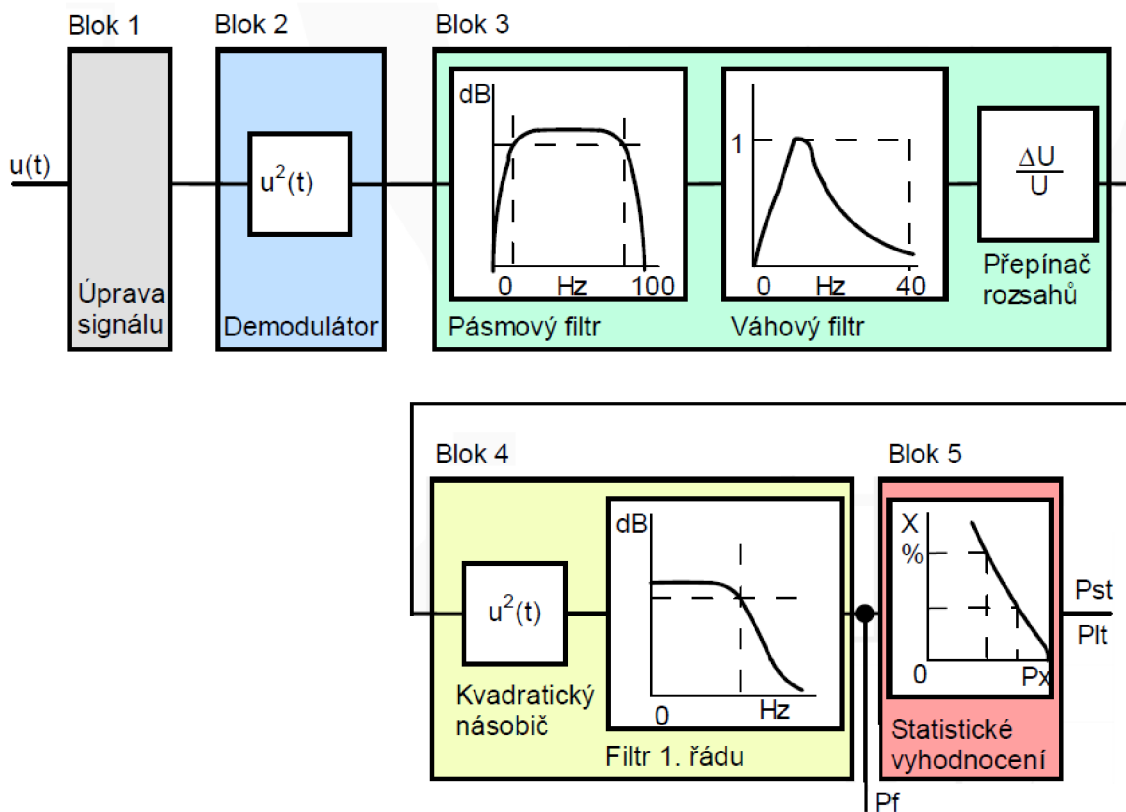
Nastavení měřiče blikání je takové, aby na jeho výstupu byla hodnota $P_{st}=1$ v případě, že blikání referenčního zdroje je při daném kolísání/změnách napětí na mezi rušení zrakového vjemu průměrného pozorovatele za specifických pozorovacích podmínek. Flikrmtr průběžně vyhodnocuje změny napětí bez závislosti na tom, zda jsou změny nepravidelné či pravidelné nebo jestli dochází ke kolísání pouze na základní harmonické, či je napětí zároveň deformováno časově proměnlivými harmonickými složkami atd. [5]

Výchozí podmínky pro konstrukci standardního IEC měřiče blikání jsou následující:

- Kolísání napětí: pravouhlé změny napětí – AM způsobená kolísáním odběru zátěží,
- Referenční světelný zdroj: žárovka s dvojitě vinutým wolframovým vláknem 230 (120) V, 60 W

- Specifické podmínky pro vjem blikání – osvětlovaná scéna: úroveň osvětlení, geometrie, barevnost,
- Specifická skupina pozorovatelů: statisticky významný vzorek pozorovatelů, různých věkových skupin, profese a pohlaví,
- Statistické zpracování: 50 % pravděpodobnostní úroveň.

Přístroj se principiálně skládá z pěti funkčních bloků.



Obr. 4-1 Blokové schéma IEC měřiče blikání (flickrmetru) [1]

Blok 1

Funkcí vstupního bloku je převedení velikosti měřeného napětí na referenční úroveň. Díky tomu může být měření flickru prováděno nezávisle na velikosti napětí sítě a výsledky mohou být zpracovány v poměrných jednotkách.

Blok 2

Ve druhém bloku se oddělí modulační složka od nosné frekvence (50 Hz) s využitím kvadratické funkce, čímž se modeluje chování světelného zdroje s tím, že průběh světelného toku je úměrný průběhu výkonu.

Blok 3

Třetí blok představuje dva filtry a volič rozsahu. První filtr odstraní stejnosměrnou složku a složku s dvojnásobným kmitočtem sítě na výstupu demodulátoru. De facto se jedná o dva různé filtry. První filtr je hornopropustný prvního řádu, navržený s útlumem 3 dB na frekvenci 0,05 Hz, a eliminuje stejnosměrnou složku. Druhý je dolnoproústný Butterworthův filtr šestého řádu s útlumem 3 dB na frekvenci 35 Hz, 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.

Druhý filtr (váhový) tvoří přenosovou funkci flikrmetru, což je odezva na kolísání napětí (filtr simuluje frekvenční odezvu lidského zraku na změny svítivosti žárovky, způsobené sinusovou modulací napětí).

Přepínač rozsahů pouze zvyšuje citlivost měření, tím že mění zesílení signálu do bloku 4.

Přenosová funkce bloku 3 je definována:

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{\left(1 + \frac{s}{\omega_3}\right) \cdot \left(1 + \frac{s}{\omega_4}\right)} \quad (3.1)$$

kde

s je Laplaceova komplexní proměnná,

$$k = 1,74082$$

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

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

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

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

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

Blok 4

Čtvrtý blok 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, které je provedeno dolnoproústným filtrem prvního řádu s časovou konstantou 300 ms, tzn. s frekvencí řezu 0,53 Hz. Simulace lidského vnímání flikru pomocí řetězce žárovka, oko a mozek je provedena kombinací jednotek 2, 3 a 4. Tedy výstup z jednotky 4 představuje hodnotu okamžitého vjemu flikru P_f . Výstup z jednotky 4 lze tedy využít i pro dodatečné zpracování naměřených dat.

Blok 5

Poslední blok obsahuje mikroprocesor, který provádí průběžné hodnocení úrovně flikru a umožňuje přímý výpočet důležitých parametrů. Zahrnuje třídící postup s logaritickým 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 Plt . Výstupem bloku 5 je tedy posloupnost těchto dvou parametrů. [2] [6]

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_{1S} + 0,0657P_{3S} + 0,28P_{10S} + 0,08P_{50S}} \quad (3.2)$$

$$P_{50S} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3 \quad (3.3)$$

$$P_{10S} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \quad (3.4)$$

$$P_{3S} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3 \quad (3.5)$$

$$P_{1S} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3 \quad (3.6)$$

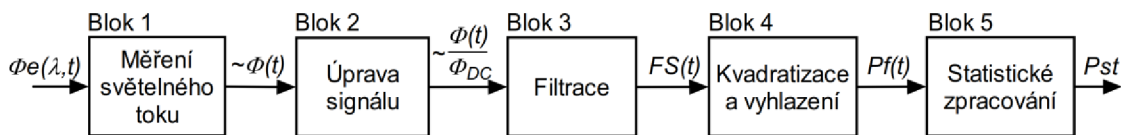
Z popsaného principu funkce IEC měřiče blikání je zřejmé, že není pro účel klasifikace světelných zdrojů použitelný, jelikož neměří skutečné blikání konkrétního světelného zdroje, ale simuluje odezvu žárovky 230 V, 60 W na kolísání napájecího napětí v místě měření. Popis nám však posloužil jako zdroj informací o procesu přenosu kolísání napětí na vstupu až po výsledný efekt, kterým je změřená a vyhodnocená hodnota krátkodobé míry vjemu blikání P_{st} , případně dlouhodobé míry vjemu blikání Plt , na výstupu.

4.2 Objektivní flickrmetr

Abychom mohli měřit skutečnou odezvu světelných zdrojů na kolísání vstupního napětí, je potřeba skladbu standardního flickrmetru patřičně přizpůsobit. Pro možnost přímého měření blikání světelných zdrojů, pracujících na různých principech a s různými parametry, je vhodné mít univerzální měřicí aparaturu, která bude co nejlépe vyhovovat požadavkům na přesnost měření, ale současně nebude omezena přizpůsobením jednomu typu světelného zdroje, tak jako je tomu u standardního flickrmetru, a umožní měření v rozsahu modulační frekvence alespoň do 1 kHz.

Konstrukce objektivního flickrmetru vychází z konstrukce standardní verze IEC flickrmetru s modifikacemi zejména ve vstupní části, která musí měřit místo napětí průběh relativní velikosti světelného toku, vyzařovaného testovaným světelným zdrojem, a dále v bloku filtrů, jejichž frekvenční odezva musí reprezentovat pouze frekvenční odezvu řetězce oko-mozek „normalizovaného“ pozorovatele. Zjednodušené blokové schéma objektivního flickrmetru je na obrázku (Obr. 4-2) se strukturou, kterou lze rozdělit do následujících čtyř 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 flickmetrem. [2]



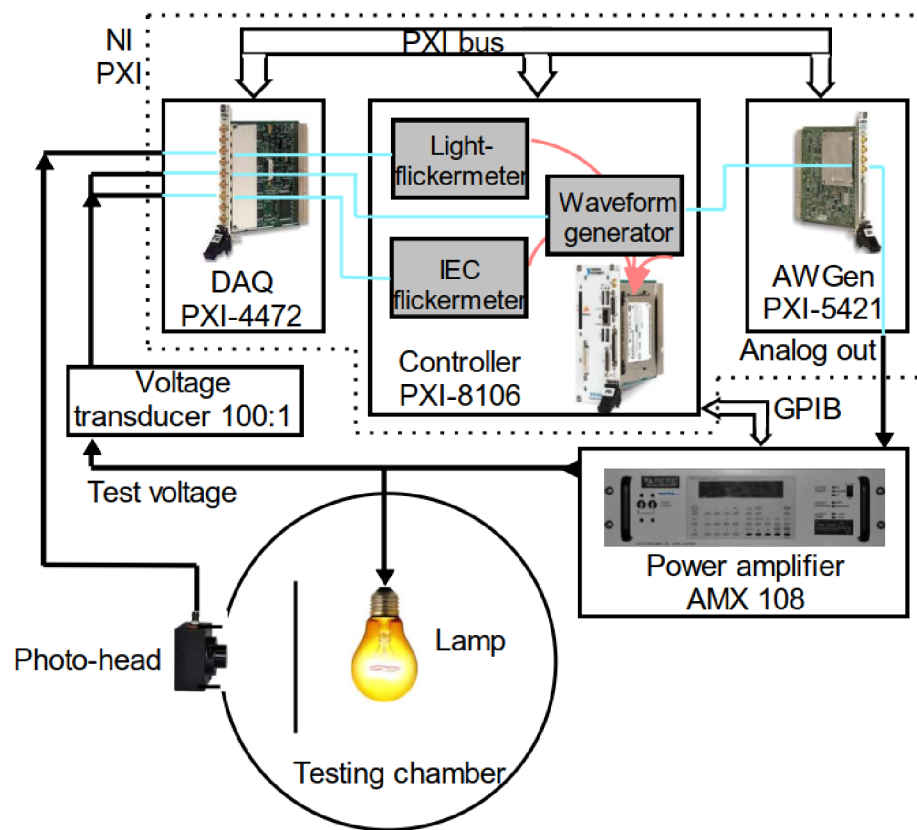
Obr. 4-2 Blokové schéma objektivního flickmetru [2]

4.3 Testovací systém FEKT VUT

Pro takovou aplikaci se jako nejvýhodnější jeví použití systému virtuální instrumentace LabView od společnosti National Instruments. Tento systém umožňuje, kromě samotného připojení potřebných senzorů, také naprogramování jednotlivých modulů (bloků) optického flickmetru a jejich případné přizpůsobení požadavkům, vyplývajícím z uvažovaných měření. Dále umožňuje záznam získaných dat pro jejich následné zpracování a vyhodnocení. Neméně důležitou součástí testovacího systému je možnost nastavení konkrétních parametrů modulace napájecího (testovacího) napětí, jako je průběh modulačního signálu, hloubka modulace a rozsah modulační frekvence s nastavením kroku inkrementace pro jednotlivá měření.

Systém by měl umožňovat automatické měření odolnosti (citlivosti) světelných zdrojů podle předem nastavených parametrů rušení napájecího napětí a jako výstup by měl poskytnout soubor dat pro jejich následné vyhodnocení, případně takové vyhodnocení provést již jako součást testovacího procesu.

Experimentální měřicí systém, který je používán pro měření citlivosti světelných zdrojů v laboratoři FEKT VUT v Brně, je vyobrazen na (Obr. 4-3 a Obr. 4-4). Testovaný světelný zdroj je umístěn do kulového integrátoru, který je osazen snímačem světelného toku. Ten je prostřednictvím měřicí karty připojen na systémovou sběrnici. Světelný zdroj je napájen pomocí signálového zesilovače, řízeného výstupem z karty signálového generátoru.



Obr. 4-3 Blokové schéma testovacího pracoviště [4]



Obr. 4-4 Sestavené testovací pracoviště v laboratoři

Všechny komponenty jsou řízeny algoritmem, který za prvé ovládá signálovou část tak, aby na testovaný světelný zdroj bylo přivedeno napětí s přesně definovaným zkrusem podle nastavených parametrů, a za druhé emuluje funkci objektivního flikrmetru při zpracování signálu z optického snímače, umístěném v integrátoru. Obslužný program je rozdělen na dvě části.

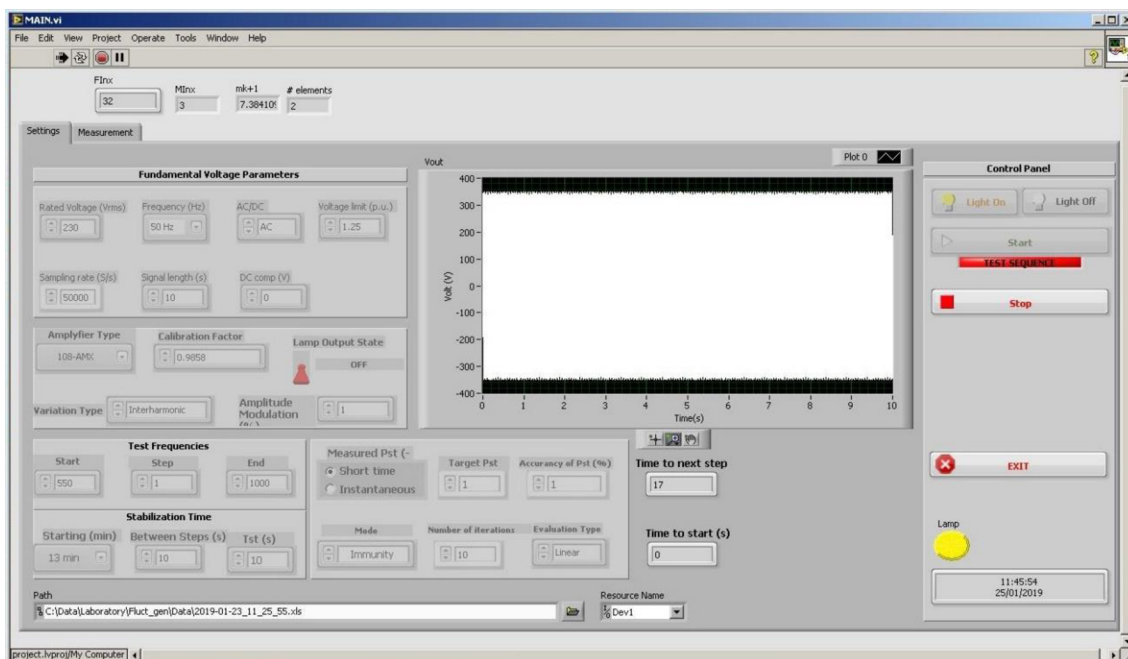
Hlavní program MAIN

Má dvě záložky „Settings“ a „Measurement“. V okně „Settings“ se nastavují parametry testování, lze zde ovládat napájení světelného zdroje, spustit a zastavit testování, zvolit umístění souboru měřených dat a sledovat průběh výstupního napětí v grafu.

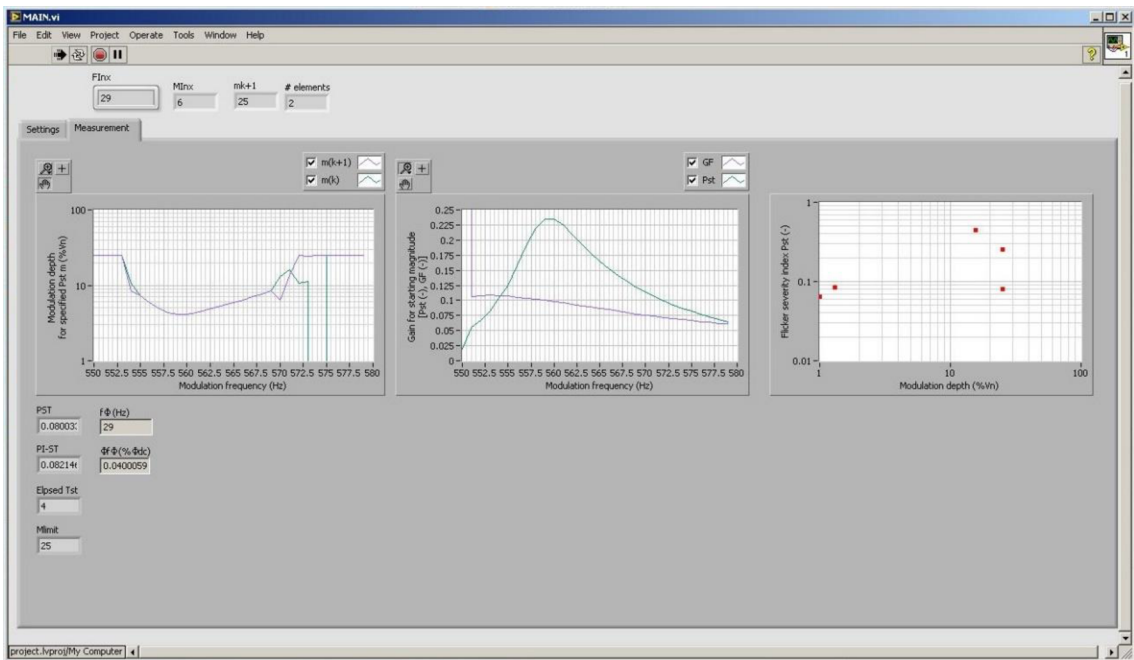
V záložce „Measurement“ je možné průběžně sledovat grafy hodnot modulace napětí $m(k)$, predikované modulace napětí v další iteraci $m(k+1)$, Gain Factor (zesílení), a krátkodobou míru vjemu flikru Pst .

Program měření OBF

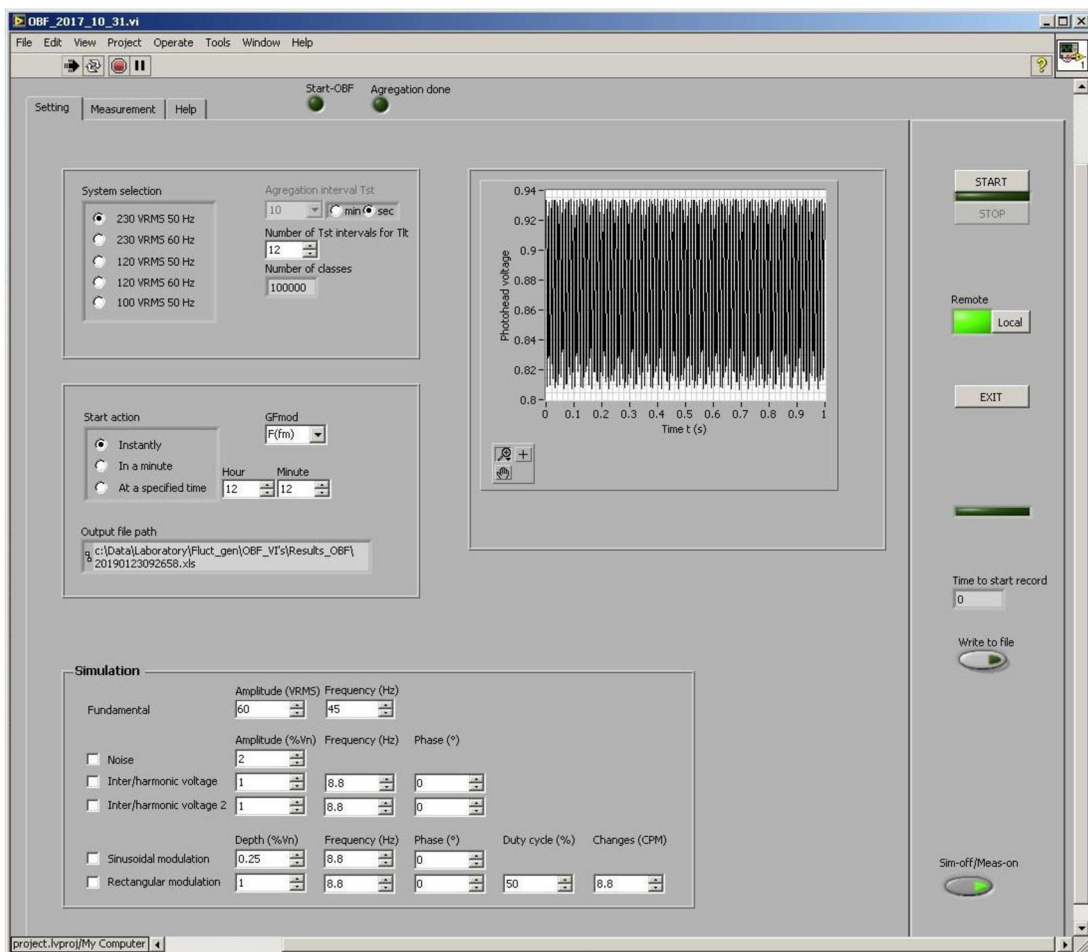
Přebírá instrukce pro měření od hlavního programu, provede změření hodnoty v daném měřícím bodu a výslednou hodnotu předá zpět do hlavního programu. Program obsahuje také záložky „Settings“ a „Measurement“, kde lze nastavit další parametry měření a sledovat měřené hodnoty. Navíc pak ještě záložku „Help“



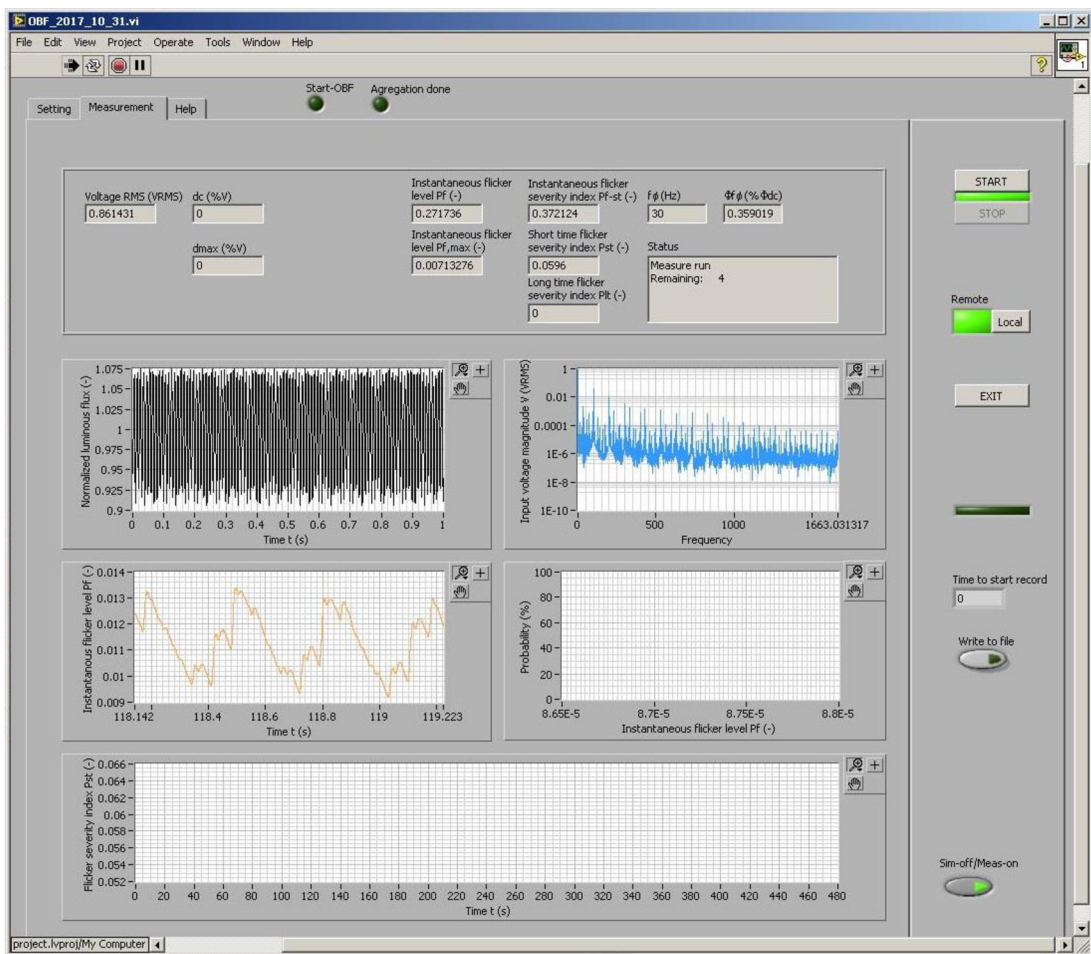
Obr. 4-5 Okno „Settings“ hlavního programu MAIN



Obr. 4-6 Okno „Measurement“ hlavního programu MAIN



Obr. 4-7 Okno „Setting“ programu měření OBF



Obr. 4-8 Okno „Measurement“ programu měření OBF

5. METODIKA KLASIFIKACE

Obecně pro jakoukoliv metodu klasifikace (třídění) jsou podstatné dva parametry, které společně vyjadřují hodnotu sledované vlastnosti, přiřazené k tříděnému objektu, a které poskytují jednoduchou a přehlednou informaci o této hodnotě. Jedná se o

- klasifikační index a
- klasifikační stupnici.

Oba parametry by měly být nastaveny tak, aby co nejlépe odpovídaly charakteru sledované vlastnosti klasifikovaných objektů a předpokládanému rozsahu jejich hodnot.

5.1 Klasifikační index

Klasifikační index a jeho vypovídací hodnota je zcela zásadní součástí celé metody. Proto by jeho správnému nastavení měla být věnována dostatečná pozornost. Prvním důležitým krokem je stanovení měřené (zjišťované) veličiny, která co nejlépe vyjadřuje sledovanou vlastnost klasifikovaných objektů. V tomto případě je sledovanou vlastností světelných zdrojů LED jejich citlivost na kolísání napájecího napětí. Pro získání měřené veličiny, korespondující s citlivostí světelných zdrojů, se nabízí následující možnosti:

- 1) měření křivky faktoru zisku GF (Gain Factor),
- 2) měření křivky citlivosti P_{st} pro danou poruchu / kolísání napětí (např. produkované jednou meziharmonickou (IHD), nebo sinusovou či obdélníkovou amplitudovou modulací (SAM, RAM) apod.,
- 3) měření křivky odolnosti $P_{st}=1$ vůči výše uvedeným poruchám napětí.

Index musí být reprezentován jednou číselnou hodnotou, aby bylo možno jej zařadit do příslušné třídy klasifikační stupnice. Jelikož výstupem všech výše uvedených měření je vždy soubor hodnot, musí být index stanoven výpočtem, který vhodným způsobem agreguje všechny změřené hodnoty do jednoho čísla. Zobrazíme-li výstupní hodnoty z měřicího systému v grafu jako křivku, pak je vhodnou metodou numerická integrace plochy, ohraničené touto křivkou a osou x na zvoleném intervalu modulační frekvence.

5.1.1 Měření křivky zesílení - Gain Factor

Gain Factor vyjadřuje míru přenosu (zesílení) kolísání světelného toku zdroje v závislosti na kolísání napájecího napětí. Metoda měření spočívá v napájení světelného zdroje nominálním napětím harmonického průběhu, které je modulováno přesně stanoveným modulačním signálem. Fotometrickým snímačem se měří výstupní světelný tok, vyzařovaný světelným zdrojem, a jeho změny v poměrných hodnotách se porovnávají s relativními změnami napájecího napětí. Měření probíhá v určitém rozsahu

modulační frekvence s pevně nastavenou poměrnou velikostí modulace vůči základní harmonické.

$$GF = \frac{\Delta\Phi/\Phi}{\Delta U/U} \quad (4.1)$$

kde

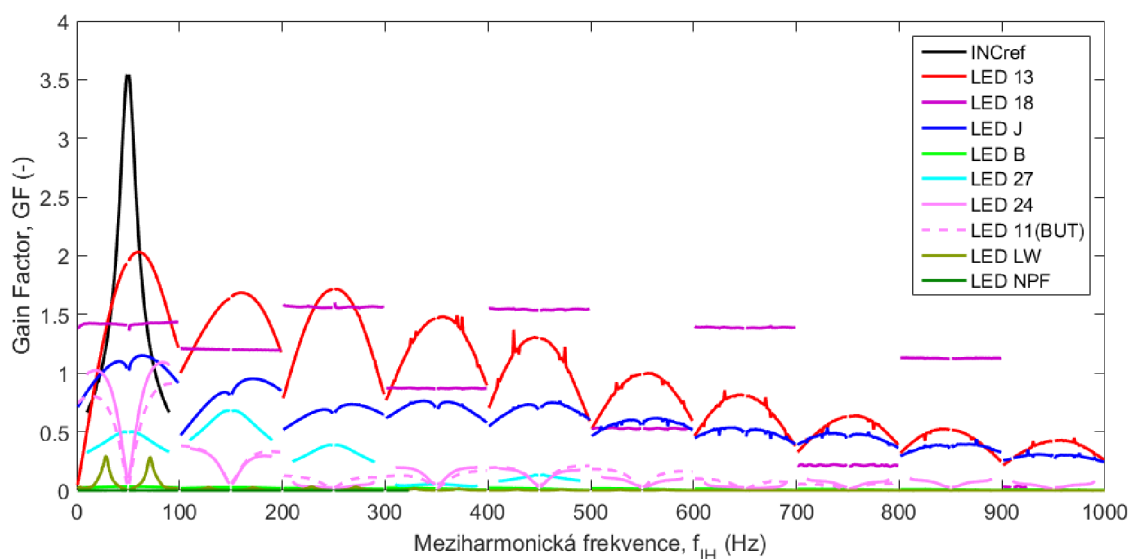
$\Delta\Phi/\Phi$ relativní změna světelného toku,
 $\Delta U/U$ relativní změna napájecího napětí.

Křivku lze relativně snadno změřit a poskytuje vcelku dobrou představu o citlivosti světelného zdroje, nicméně nebere v úvahu závažnost citlivosti působení blikání na člověka, která je rozhodující pro potřeby klasifikace. Jelikož míra vjemu blikání není v procesu měření implementována, není GF vhodným parametrem pro použití při klasifikaci světelných zdrojů.

Změřené GF křivky však lze využít, společně s dalšími diagnostickými metodami, ke zjištění typu napájecího obvodu světelného zdroje LED, aniž by se muselo přistoupit k jeho rozebrání a použití metody reverzního inženýrství, která navíc nemusí ve všech případech vést k cíli.

Získání informace o typu napájecího obvodu světelného zdroje sice pro finální metodu klasifikace není zásadní, ale při vývoji klasifikační metody, ve stádiu ověřování, umožňuje spojit výsledky klasifikace s konkrétním typem světelného zdroje, jak bude uvedeno dále.

Pro úplnost jsou na obrázku (Obr. 5-1) uvedeny GF křivky pro vybrané světelné zdroje LED a referenční žárovku. Je patrné, že různé typy světelných zdrojů vykazují relativně charakteristické průběhy GF křivek.

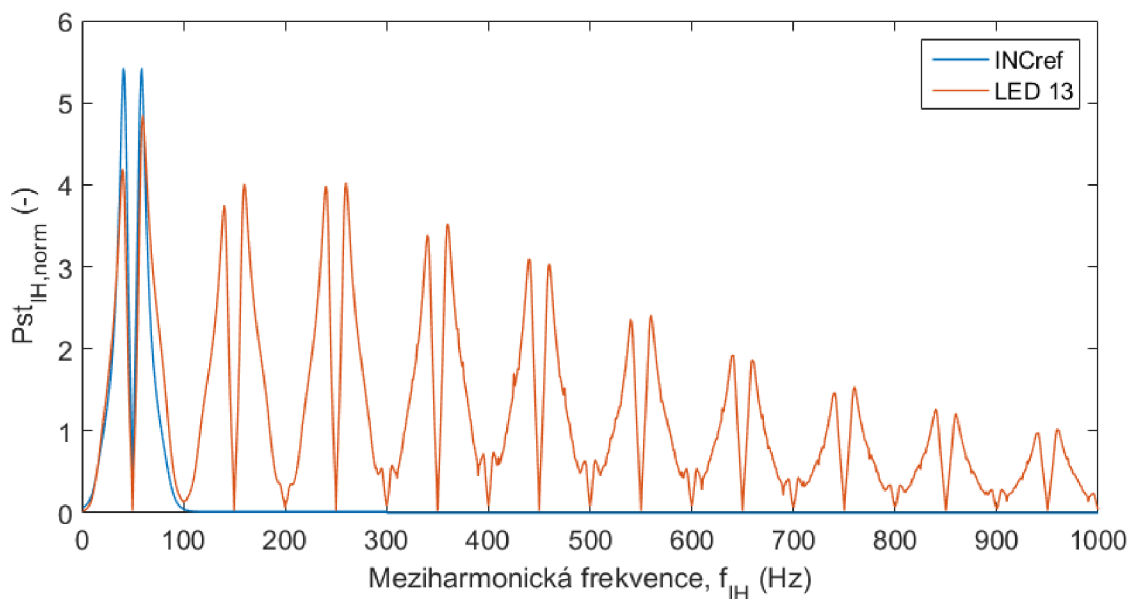


Obr. 5-1 Příklady křivek GF pro vybrané LED a ref. žárovku

5.1.2 Měření křivky citlivosti - krátkodobá míra vjemu flikru Pst

Na rozdíl od GF zahrnuje měření krátkodobé míry vjemu flikru i odezvu zrakového vjemu člověka. Změřené křivky citlivosti tedy mohou být měřena veličinou, kterou lze použít pro výpočet klasifikačního indexu. Výhodou měření křivky Pst je rychlost celkového testování světelného zdroje, jak bude upřesněno dále. V podstatě lze říci, že doba potřebná pro testování je při stejném počtu měřených bodů shodná s měřením GF křivek. Rozdíl spočívá právě v implementaci odezvy zrakového vjemu člověka v měřicím řetězci a ve způsobu vyhodnocení změřených hodnot. Standardně se měření krátkodobé míry vjemu flikru vyhodnocuje přes interval pozorování 10 min. Interval je odvozen od statistiky „čas na úroveň“, získané z třídiče (3.2-3.6) v kapitole (4.1). Statistické zpracování na tomto intervalu je však nutné pro reálnou elektrickou síť, jelikož průběh napětí a jeho změny v praxi mají ve většině případů stochastický charakter. Pokud však při testování pro napájení světelných zdrojů použijeme přesně definovaný průběh napětí základní harmonické, modulovaný amplitudovou nebo mezipharmonickou modulací s konstantními parametry, je možné interval měření a vyhodnocení výrazně zkrátit, a to až na hodnotu, dostatečnou pro spolehlivé změření výstupních hodnot světelného toku. Jako dostatečná se jeví hodnota měřicího intervalu jednoho měřeného bodu 10 s.

Nevýhodou použití křivky citlivosti je skutečnost, že měření je realizováno pro pevně nastavenou hodnotu modulace. Vzhledem k nelineární frekvenční závislosti napájecích obvodů světelných zdrojů LED mohou měření, s různými hodnotami nastavení, poskytovat odlišné výsledky a je tedy třeba zvolit optimální hloubku modulace. Na obrázku (Obr. 5-2) je uveden příklad změřených normalizovaných křivek citlivosti pro vakuovou referenční žárovku 60 W, 230 V a vybraný světelný zdroj LED s použitím IH modulace v rozsahu 1-1000 Hz.

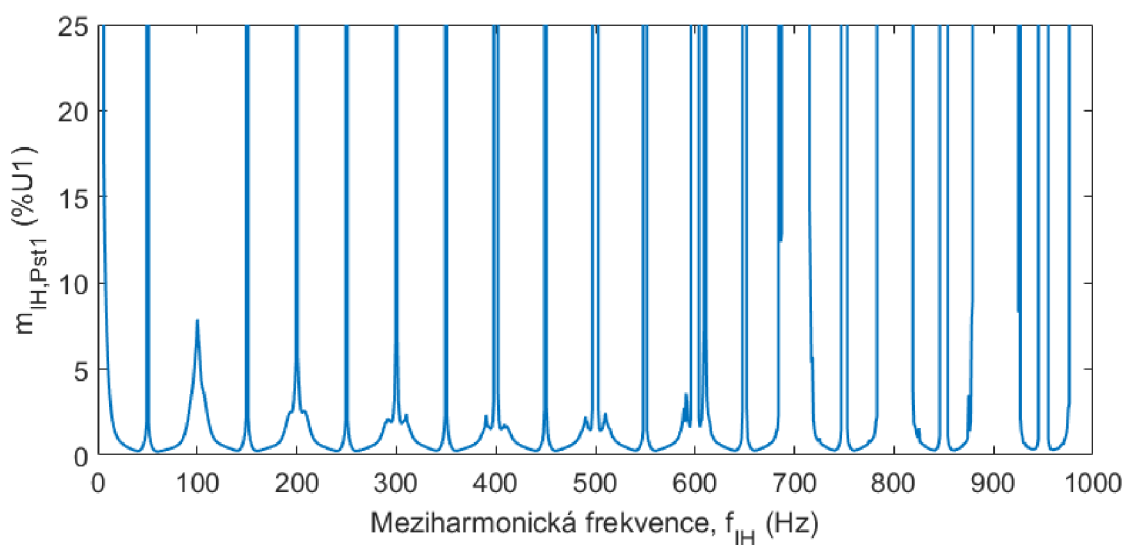


Obr. 5-2 Příklad normalizovaných křivek Pst_{IH} pro vybranou LED a ref. žárovku

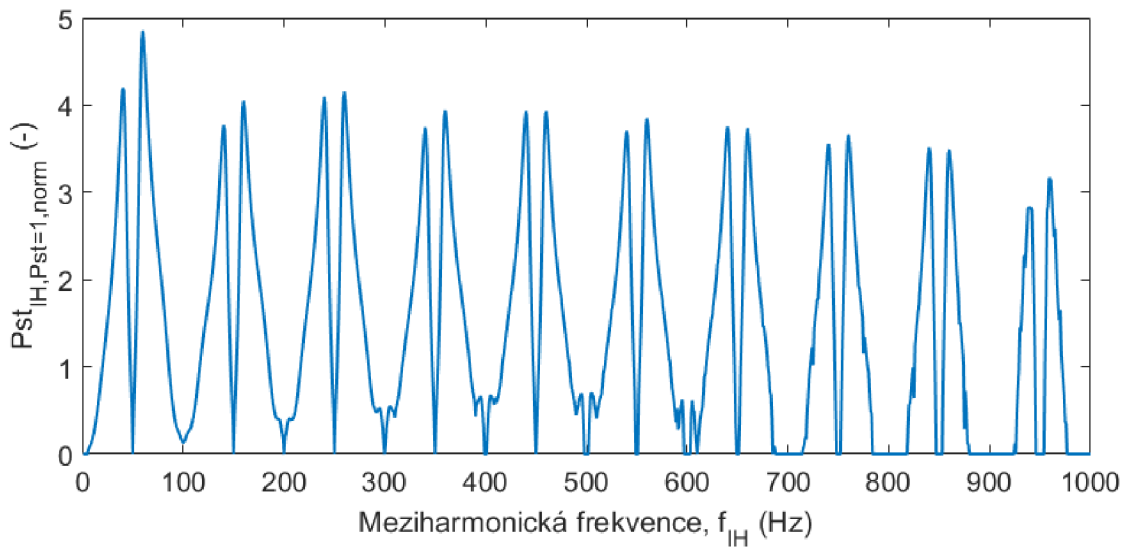
5.1.3 Měření křivky odolnosti $Pst=1$

Aby byl eliminován problém s nastavením velikosti modulace a jejího vlivu na výsledky klasifikace z předchozí metody, je možné měřit tzv. křivky odolnosti. V podstatě se jedná o shodný postup jako při měření křivek citlivosti, avšak s tím rozdílem, že se v každém měřeném bodu hledá taková velikost modulace základní harmonické, aby se krátkodobá míra vjemu flickru Pst rovnala jedné. Měření se tedy opakuje dle potřeby několikrát v každém bodu měření, což může násobně prodloužit čas potřebný pro změření celé křivky odolnosti světelného zdroje. Ze všech popsaných metod však poskytuje nejobjektivnější výsledky, jelikož získané hodnoty nejpřesněji odpovídají sledované vlastnosti, nezávisle na nelinearitě měřeného světelného zdroje.

Z hlediska vypovídací schopnosti klasifikační metody lze tedy konstatovat, že k získání klasifikačního indexu je nejvýhodnější použít měření křivek odolnosti. Časová náročnost měření je však významnou nevýhodou tohoto postupu, jak bude ukázáno dále. Určitou komplikací je také tvar změřených křivek, který je uveden na obrázku (Obr. 5-3). Z grafu je patrné, že na základní frekvenci a jejich násobcích vzniká nespojitost a křivka „utíká“ do vysokých hodnot. V těchto měřících bodech je nutné explicitně nastavit maximální hodnotu. Před výpočtem hodnoty klasifikačního indexu je také třeba křivky normalizovat, abychom získali průběh obdobný, jako při měření citlivosti a mohli použít vztahy pro výpočet klasifikačního indexu.



Obr. 5-3 Příklad změřené křivky odolnosti pro vybranou LED



Obr. 5-4 Normalizovaná křivka odolnosti pro vybranou LED

5.1.4 Definice indexu

Na základě výše uvedených úvah, a za účelem získání jedinečného kompaktního indexu, který je schopen kvantifikovat úroveň závažnosti světelného blikání *LFI* (Light Flicker Index), je třeba stanovit matematický model pro jeho výpočet. Jako podklad výpočtu slouží soubor naměřených diskrétních hodnot, který je výstupem některého z výše popsanych postupů měření.

Jako nejjednodušší by připadala do úvahy prostá sumarizace změřených hodnot, pokud by krok inkrementace modulační frekvence byl vždy roven 1 Hz. Pokud by však byl zvolen krok větší, pak by již prostá sumarizace nebyla vhodná. Aby klasifikační metoda nebyla závislá na zvoleném kroku měření, je tedy výhodnější použít numerickou integraci, např. lichoběžníkovou metodou. Rozsah modulační frekvence při měření může být různý, proto je jako základní vzorec použit vztah (4.2), vycházející z principu sumačního zákona (kvadratická verze), který je uveden v PNE 33 3430-2 [11]:

$$LFS_{\#} = \sqrt{\frac{1}{(f_{m,MAX} - f_{m,MIN})} \int_{f_{m,MIN}}^{f_{m,MAX}} \hat{P}st_{\#}^2(f_m) df_m} \quad (4.2)$$

kde

$LFS_{\#}$ je hodnota závažnosti světelného blikání,

$f_{m,MIN}$ je minimální modulační frekvence,

$f_{m,MAX}$ je maximální modulační frekvence,

$\hat{P}st_{\#}$ je normalizovaná hodnota krátkodobé míry vjemu blikání.

Normalizovaná hodnota krátkodobé míry vjemu blikání \hat{Pst} je zavedena pro možnost porovnání hodnot světelných zdrojů, změřených s různou velikostí modulace. Změřené hodnoty krátkodobé míry vjemu blikání Pst jsou děleny procentuální hodnotou velikosti modulačního signálu.

$$\hat{Pst}(f_m) = \frac{Pst(f_m)}{m_x} \quad (4.3)$$

kde

m_x je amplituda meziharmonické, vztažená na základní harmonickou v procentech, za x se dosadí typ modulačního signálu (IH – meziharmonická, RAM – amplitudová modulace obdélníkovým průběhem apod.)

f_m je modulační frekvence.

Normalizace je nezbytná kvůli frekvenční závislosti Pst na m_x . Prakticky by velikost modulace měla být nastavena mezi 1 až 2 % velikosti základního napětí.

5.1.5 Definice referenčního stavu

Referenční podmínku lze získat použitím rovnice (4.2) pro hodnoty měření standardní (referenční) žárovky 230 V, 60 W se žhaveným wolframovým vláknem. Vypočtená hodnota LFS_{ref} se následně použije jako referenční hodnota pro výpočet indexu relativního světelného blikání LFI pro testované světelné zdroje LED.

$$LFI_{LED} = \frac{LFS_{LED}}{LFS_{ref}} \cdot 10 \quad (4.4)$$







5.2 Klasifikační stupnice

Klasifikační index je sám o sobě pouze číslo. Aby v rámci klasifikace získal významovou hodnotu, musí být zařazen do některé z tříd klasifikační stupnice. Důležitou vlastností klasifikační stupnice je její rozsah, který by měl být nastaven tak, aby, pokud možno, rovnoměrně pokryl rozsah možných hodnot sledované vlastnosti. To prakticky znamená, že indexy intenzity světelného blikání testovaných objektů nebudou inklinovat k jednomu z okrajů klasifikační stupnice.

Horní hranice vychází z hodnoty 0, která představuje ideální případ necitlivých světelných zdrojů, tedy jinak řečeno zdrojů s maximální odolností proti kolísání napájecího napětí. Spodní hranice by měla odpovídat hodnotě 1, což je hranice akceptovatelnosti blikání pro referenční vakuovou žárovku. Spodní hranice však na rozdíl od té horní není definitivní, jelikož se mohou vyskytnout takové moderní světelné zdroje, které jsou ještě citlivější než referenční světelný zdroj.

Aby byl rozsah klasifikační stupnice přirozenější, je navrhovaný rozsah 0 až 1 násoben umělým koeficientem s hodnotou 10, jak je uvedeno v rovnici (4.4). Potom tedy upravený rozsah stupnice je 0 až 10 a rozdělení jednotlivých tříd je v první fázi navrženo rovnoměrné, jak je uvedeno v tabulce (Tab. 5-1).

Tab. 5-1 Rozsah indexu závažnosti světelného blikání [8]

Třída	LFI ROZSAH
A 	$LFI < 2$
B 	$2 \leq LFI < 4$
C 	$4 \leq LFI < 6$
D 	$6 \leq LFI < 8$
E 	$8 \leq LFI < 10$
F 	$10 \geq LFI$

5.3 Základní požadavky

Cílem této práce je snaha o vytvoření takové klasifikační metody, která bude splňovat dva základní požadavky.

- Dobrá vypovídací schopnost
 - Spolehlivost – metoda poskytuje konzistentní výsledky
 - Dostatečná přesnost – akceptovatelná chyba při zpracování dat
 - Opakovatelnost
 - Racionální rozložení v rámci klasifikační stupnice

- Co nejmenší časová náročnost
 - Závisí převážně na procesu testování

Vypovídací schopnost, jak již bylo uvedeno, je jednou ze stěžejních vlastností metody. Časová náročnost testování a vyhodnocení jednoho světelného zdroje je však neméně významným parametrem, jelikož přímo ovlivňuje cenu případné zakázky, a to velmi výrazně. Motivací je tedy postupné zjednodušování procesu testování světelného zdroje, při zachování jeho vypovídací hodnoty.

5.4 Časová a finanční náročnost měření

Doba testování světelného zdroje se skládá ze tří částí. Světelný zdroj je třeba přijmout do měření, tedy zjistit jeho jmenovité parametry deklarované výrobcem, aby bylo možné zvolit správné nastavení parametrů testu, umístit jej do kulového integrátoru a připojit napájecí vedení. Dále je provedeno samotné měření a na závěr vypracování protokolu o měření a jeho výsledku. Délka přípravy měření a zpracování protokolu se sice může případ od případu mírně lišit, nicméně největší význam z hlediska celkového času testu má způsob měření, tedy zvolená metoda, frekvenční rozsah a krok měření. V souhrnu, počet měření (měřených bodů), násobený časem, potřebným pro změření jedné hodnoty.

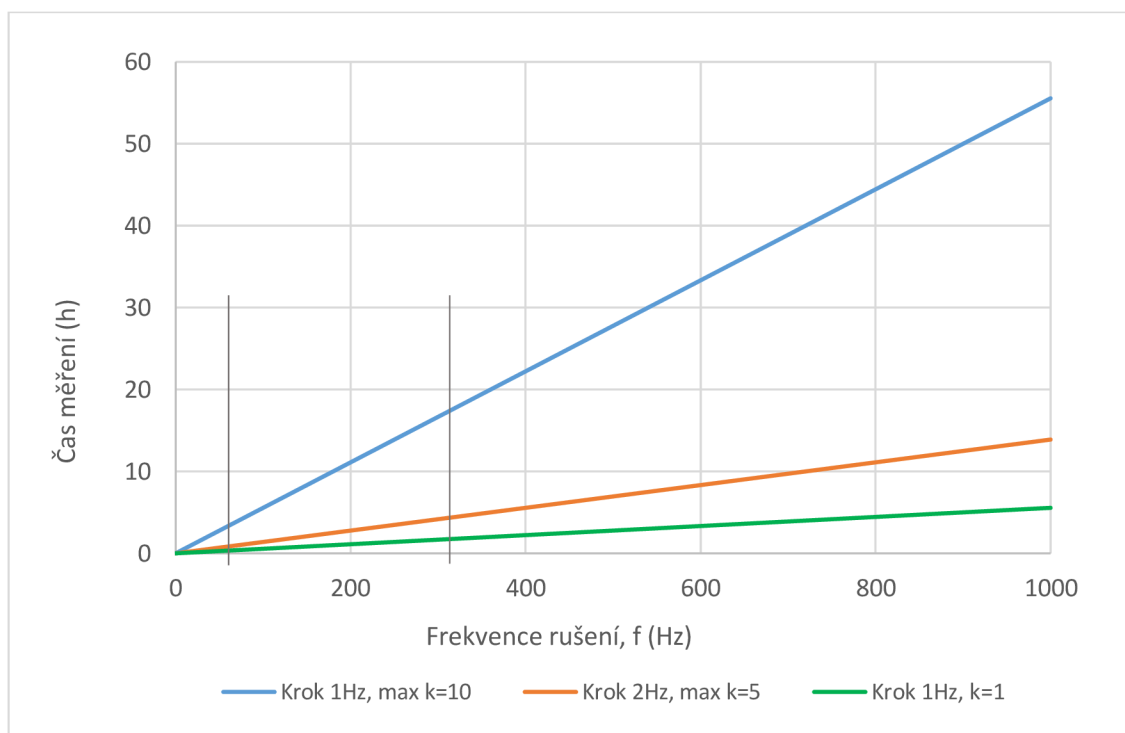
Pro výpočet času měření vycházíme z následujících předpokladů:

- 1) Před samotným měřením je nutné nechat světelný zdroj ustálit. Do zdroje je přivedeno jmenovité napájecí napětí bez modulace po dobu, než se ustálí světelný tok vyzařovaný zdrojem. Ustálení lze sledovat na grafu hodnot napětí z fotometrického snímače. Pro různé zdroje může být tato doba různá, avšak většinou postačuje čas mezi 5 až 10 minutami.
- 2) Doba měření jedné hodnoty, jak již bylo naznačeno v kapitole (5.1.2), se nastavuje na 10 s, i když je možné nastavit i jiné časy. Tato hodnota se na základě zkušeností jeví jako dostatečná pro spolehlivé měření v jednom měřicím bodu.
- 3) Pro měření dalšího bodu testovací systém nastaví novou hodnotu modulační frekvence, dle zvoleného kroku, nebo novou hodnotu velikosti modulace při měření odolnosti. Než započne další měření, nechá systém světelný zdroj ustálit opět po dobu 10 s.

Celková doba měření jednoho bodu je tedy 20 s. Tato výchozí hodnota je použita ve výpočtu časové náročnosti měření při různých nastaveních testovacího systému. V grafu na obrázku (Obr. 5-5) je vynesena závislost doby testování na rozsahu frekvence rušení pro tři situace:

- testování odolnosti s krokem měření 1 Hz a maximálním počtem iterací na každém bodu měření $k=10$ (explicitně zvolená max. hodnota),
- testování odolnosti s krokem měření 2 Hz a polovičním počtem iterací $k=5$,
- testování citlivosti jedním průchodem s krokem 1 Hz.

V grafu jsou také vyznačeny hranice frekvence rušení 50 Hz a 300 Hz. Tyto hodnoty budou důležité v postupu optimalizace klasifikační metody.



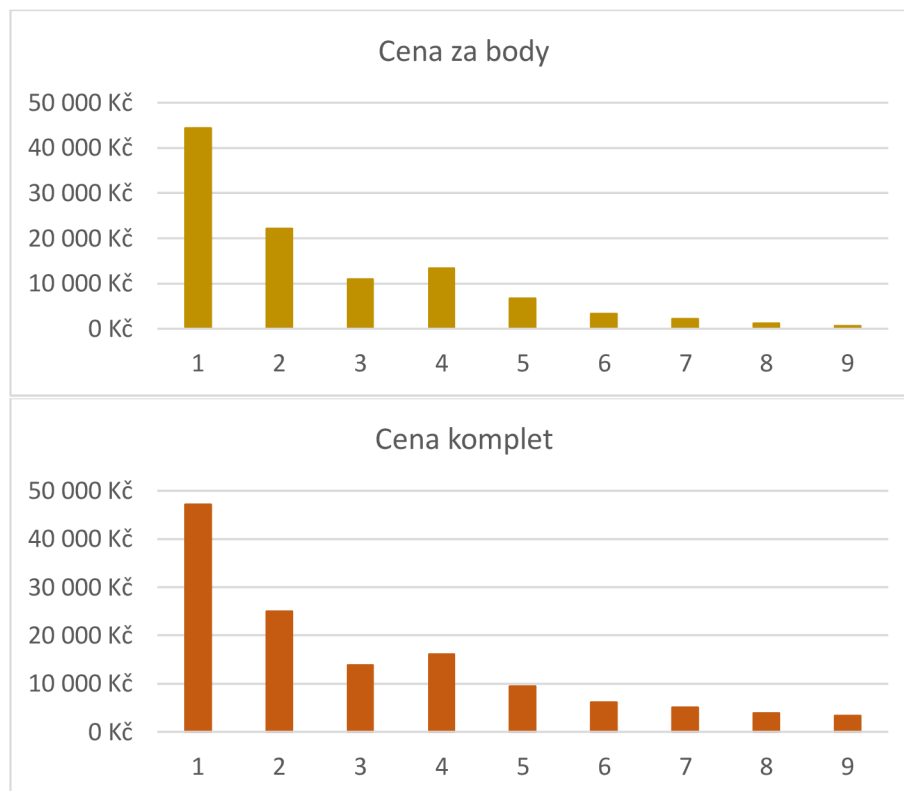
Obr. 5-5 Doba testování světelného zdroje v závislosti na nastavených parametrech

Tab. 5-2 Časová a finanční náročnost testování světelného zdroje

	Max. f (Hz)	Krok (Hz)	Max. iterací (-)	Čas měření (h)	Cena za body (Kč)	Cena komplet (Kč)
1	1000	1	10	55,56	44400	47200
2	1000	2	5	27,78	22200	25000
3	1000	1	1	5,56	11000	13800
4	300	1	10	16,67	13320	16120
5	300	2	5	4,17	6660	9460
6	300	1	1	1,67	3300	6100
7	50	1	10	2,78	2220	5020
8	50	2	5	0,69	1110	3910
9	50	1	1	0,28	550	3350

Ceny v tabulce (Tab. 5-2) vychází z oficiálního ceníku služeb laboratoře PQ a EMC VUT v Brně, jehož vybraná část je uvedena na obrázku (Obr. 5-7). Ceny jsou uvedeny bez DPH.

Z uvedených hodnot času i ceny je zřejmé, že nalezení optimálního způsobu testování je důležitým motivačním prvkem. Pokud bude cena testu příliš vysoká, nebude ze strany výrobců o testování zájem. Zda bude zavedena legislativní povinnost provádění těchto testů, jako je tomu např. u energetických štítků, nelze prozatím odhadnout.



Obr. 5-6 Grafické znázornění ceny testování

1.6.2018		Ceník služeb		
Vysoké učení technické v Brně Technická 3082/12, Brno 616 00 Laboratoř PQ a EMC				
Odpovědný vedoucí: doc. Ing. Jří Drápela, Ph.D.				
Kontakt: tel.: 541 146 211, email: drapela@feec.vutbr.cz				
Testy odezvy na kolísání napětí (IEC TR 61547-10)				
Obj. číslo:	Úkon	Cena bez DPH	DPH	Cena s DPH
2018E001	Přijetí svítidla do měření, manipulace, zjištění všech potřebných údajů	1000	210.00	1210.00
2018E002	Připojení, manipulace, montáž	800	168.00	968.00
2018E003	Měření a zpracování citlivosti v jednom bodu (Tst=10s)	11	2.33	13.44
2018E004	Měření a zpracování citlivosti v jednom bodu (Tst=10min)	505.6	106.17	611.72
2018E005	Měření a zpracování odolnosti v jednom bodu (Tst=10s)	44.4	9.33	53.78
2018E006	Měření a zpracování odolnosti v jednom bodu (Tst=10min)	1355.6	284.67	1640.22
2018E007				
2018E008	Protokol z měření	1000	210.00	1210.00
2018E009				
2018E010				
2018E011				

Obr. 5-7 Vybraná část ceníku služeb laboratoře PQ a EMC VUT v Brně

6. REALIZACE SOUBORU TESTŮ A ANALÝZA DAT

V této kapitole jsou popsány jednotlivé postupy měření a analýzy dat, které mají za cíl získat a porovnat klasifikační indexy pro soubor testovaných světelných zdrojů LED, na základě teoretických předpokladů z předchozích kapitol. Vzhledem k vysoké časové náročnosti měření světelných zdrojů jsem ve své práci, z velké části, použil zdrojové soubory již změřených dat, které byly k dispozici z předchozích měření. Vlastní měření jsem provedl v případě chybějících dat pro některé světelné zdroje nebo typy testování.

Pro nastavení testovacího procesu je potřeba zvolit základní parametry, kterými jsou

- typ měření (citlivost, odolnost),
- typ rušení (IH, RAM),
- rozsah modulační frekvence,
- krok měření,
- výchozí poměrná velikost modulačního signálu.

6.1 Testování citlivosti mezipharmonickou

Přestože by bylo logické začít metodou měření odolnosti, jako výchozí bod jsem zvolil provedení analýzy dat pro měření citlivosti, měřené při modulaci jednou mezipharmonickou. Důvodem je přehlednost testovací metody, která je vhodná pro první přiblížení procesu získávání klasifikačního indexu. To je také zřejmě důvodem, proč pro tento typ měření byla změřena data pro největší počet dostupných světelných zdrojů LED.

Měření většiny zdrojů bylo provedeno s následujícím nastavením:

- hodnota modulace 2 % základní harmonické,
- rozsah mezipharmonické frekvence 1-1000 Hz (pro většinu světelných zdrojů),
- krok měření 1 Hz.

Zpracování je provedeno pro 24 světelných zdrojů LED, uvedených v tabulce (Tab. 6-1). Popis a zkrácené označení je převzato a zachováno pro možnost případného porovnání výsledků s předchozími měřeními.

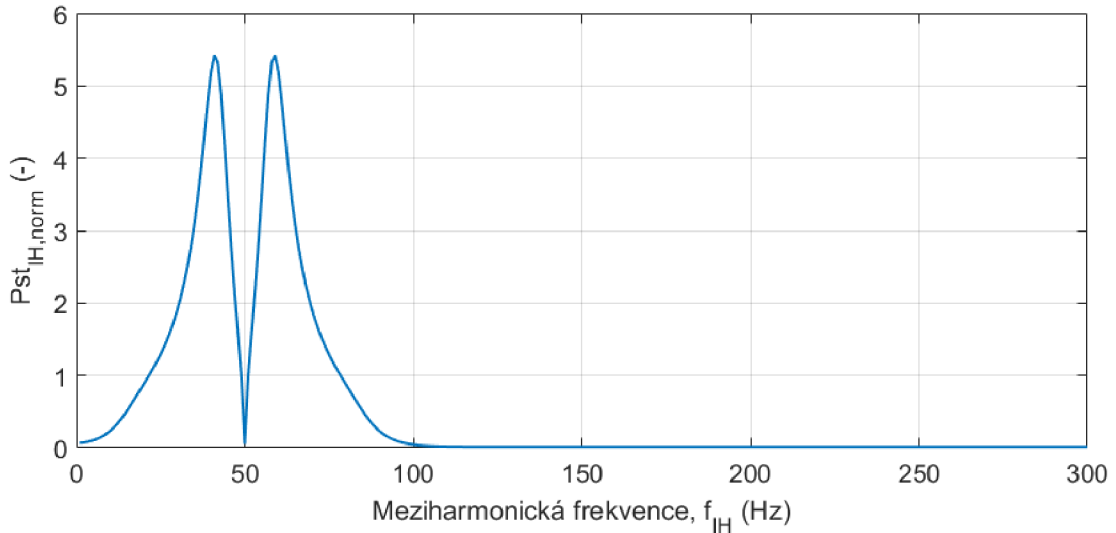
LED pro testování byly vybrány tak, aby každý typ napájecího obvodu byl zastoupen alespoň jedním světelným zdrojem. Číselné označení typu napájecího obvodu je v posledním sloupci tabulky. Jejich podrobný popis bude uveden v kapitole (7).

Tab. 6-1 Seznam testovaných světelných zdrojů LED

ID	Název a parametry LED zdroje	Označení	Typ
1	Neuvedeno	LED 13	I
2	Voltolux, GU10, 4 W, 230 V / 50 Hz, 2700 K	LED F	I
3	Osram 80012 Decospot, GU10, 0.75 W, 230 V / 50 Hz	LED A	I
4	Economic lighting 89503, GU10, 3 W, 220-240 V / 50 Hz, 2700-3200 K	LED G	I
5	Teslux, GU10, 3.5 W, 220-240 V	LED T	I
6	Neuvedeno	LED 18	II
7	Vimpex group, T8, 25 W, 230 V / 50 Hz	LED K	II
8	Panasonic Nostalgic Clear, E27, 10 W, 220-240 V / 50 Hz, 2700 K	LED J	III
9	Reashine, GU10, 6 W, 85-265 V / 50 Hz, 3200-3600 K	LED B	IV
10	Lite XQ 0827, E27, 4.2 W, 230 V / 50 Hz, 2700 K	LED C	IV
11	Solight WZ-E27K27-10W-B, E27, 10 W, 220-240 V / 50 Hz, 2700 K	LED I	IV
12	TR-OWGE-03, E27, 3 W, 85-260 V / 50 Hz, 2800 K	LED E	IV
13	Bulb light LF - A60, E27, 5 W, 220-240 V / 50 Hz, 2700 K	LED D	IV
14	LED Bulb, E27, 7 W, 220 V / 50 Hz, 2700 K	LED D2	IV
15	MW LPC-35-700, 100-240 V 50/60 Hz +11 ks LED Cree, 700 mA, cca 35 V, cca 25 W, THDI 185 %, PF 0.45, P 30 W	LED LPC	IV
16	AURAGLOW, E27, 14 W, 100-240 V / 50 Hz, 3000 K, 1055 lm, dimmable	LED 27	V
17	Philips, 9.5W, 120 V / 60 Hz, 2700K, 100 mA, dimmable	LED 120Ph	V
18	Overdrive LGA19DIM, 6 W, 120 V / 60 Hz, 5000 K	LED 120Ov	V
19	LAMPOUS 822, 15 W, 100-240 AC, CW B22 A70	LED 24	VI
20	EMOS Premium LED Lamp A60, 12 W, E27, 240 V / 50 Hz, 220-3000 K, 1055 lm, 65 mA, 30000 h, non dimmable	LED 11(BUT)	VI
21	Osram LED SuperStar, 10 W	LED S	VI
22	Osram Optotronic OT 35/220-240/700 LTCS + 11 ks LED Cree, 700 mA, cca 35 V, cca 25 W, THDI 15.3 %, PF 0.961	LED OT	VI
23	LongWin	LED LW	VII
24	MW NPF-60D-24, 110-240 V 50 / 60 Hz, PF 0.971, THDI 10.8 % + LED strips 24 V, P cca 47 W	LED NPF	VIII

6.1.1 Stanovení hodnoty LFS pro referenční zdroj

Pro výpočet referenční hodnoty $LFS_{INC,IH}$ jsou použita změřená data vakuové žárovky 60 W, 230 V, jejichž průběh je vyobrazen na následujícím grafu (Obr. 7-2).



Obr. 6-1 Normalizovaná křivka citlivosti pro referenční žárovku 60 W, 230 V

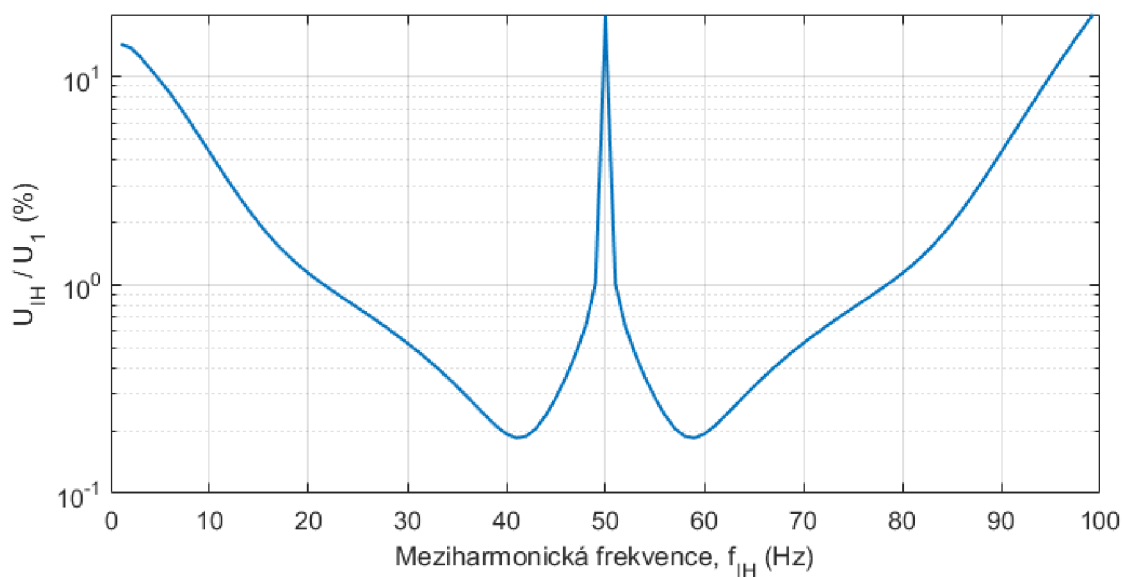
V tomto případě nebylo nutné změřené hodnoty normalizovat použitím vztahu (4.3), jelikož velikost modulačního signálu byla při měření nastavena na hodnotu jedna, což znamená, že hodnoty jsou již přímo změřeny jako normalizované.

Z grafu je také patrné, že hodnoty Pst nad 100 Hz se blíží nule a na hodnotu indexu nemají žádný vliv.

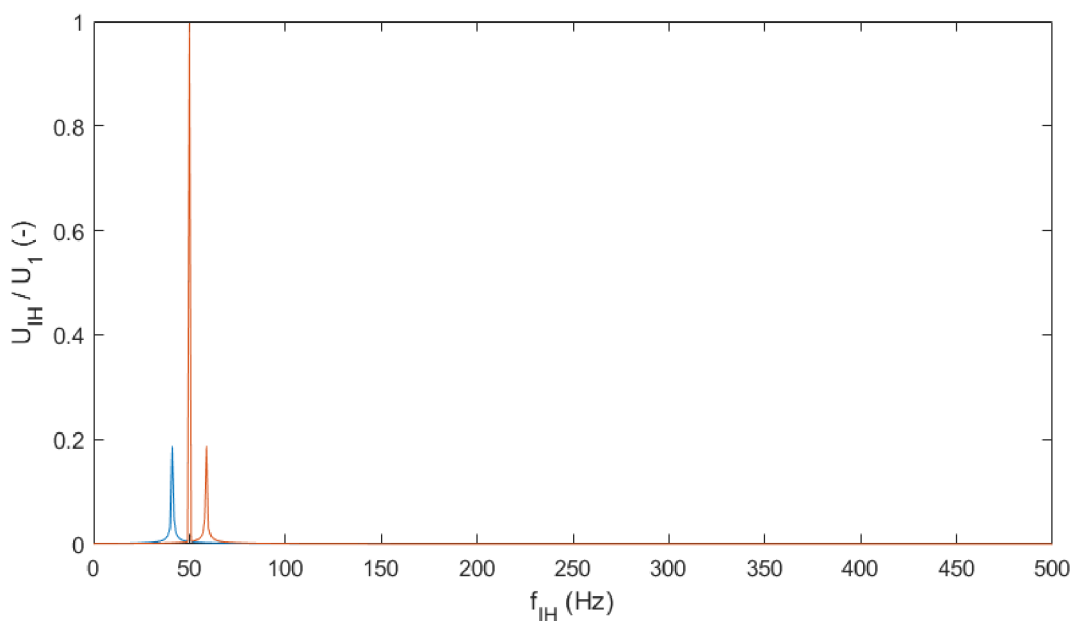
Jestliže si zobrazíme převrácené hodnoty v grafu s rozsahem 1-100 Hz, a pro osu y zvolíme logaritmické měřítko (Obr. 6-2), získáme průběh téměř shodný s křivkou pro kompatibilní úroveň pro meziharmonická napětí, uvedenou v kapitole (2.5) na obrázku (Obr. 2-3), což se dalo předpokládat vzhledem k tomu, že žárovka je světelný zdroj s lineární odezvou. Shoda samozřejmě závisí na konkrétním použitém kusu, avšak rozdíly by neměly být podstatné. Z obou grafů lze vyčíst, že nejvyšší citlivost referenčního zdroje je přibližně při hodnotách meziharmonické frekvence

$$f_{IH} = f_1 \pm 9 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Přesná hodnota podle [2] je 8,8 Hz. Nejvyšší citlivost při modulaci jednou meziharmonickou tedy změříme na frekvencích $f_{IH} = 41,2 \text{ Hz}$ a $58,8 \text{ Hz}$. Stejné schéma se pak kopíruje i do oblastí vyšších frekvencí na intervalech 100-200 Hz, 200-300 Hz atd. pro světelné zdroje LED.

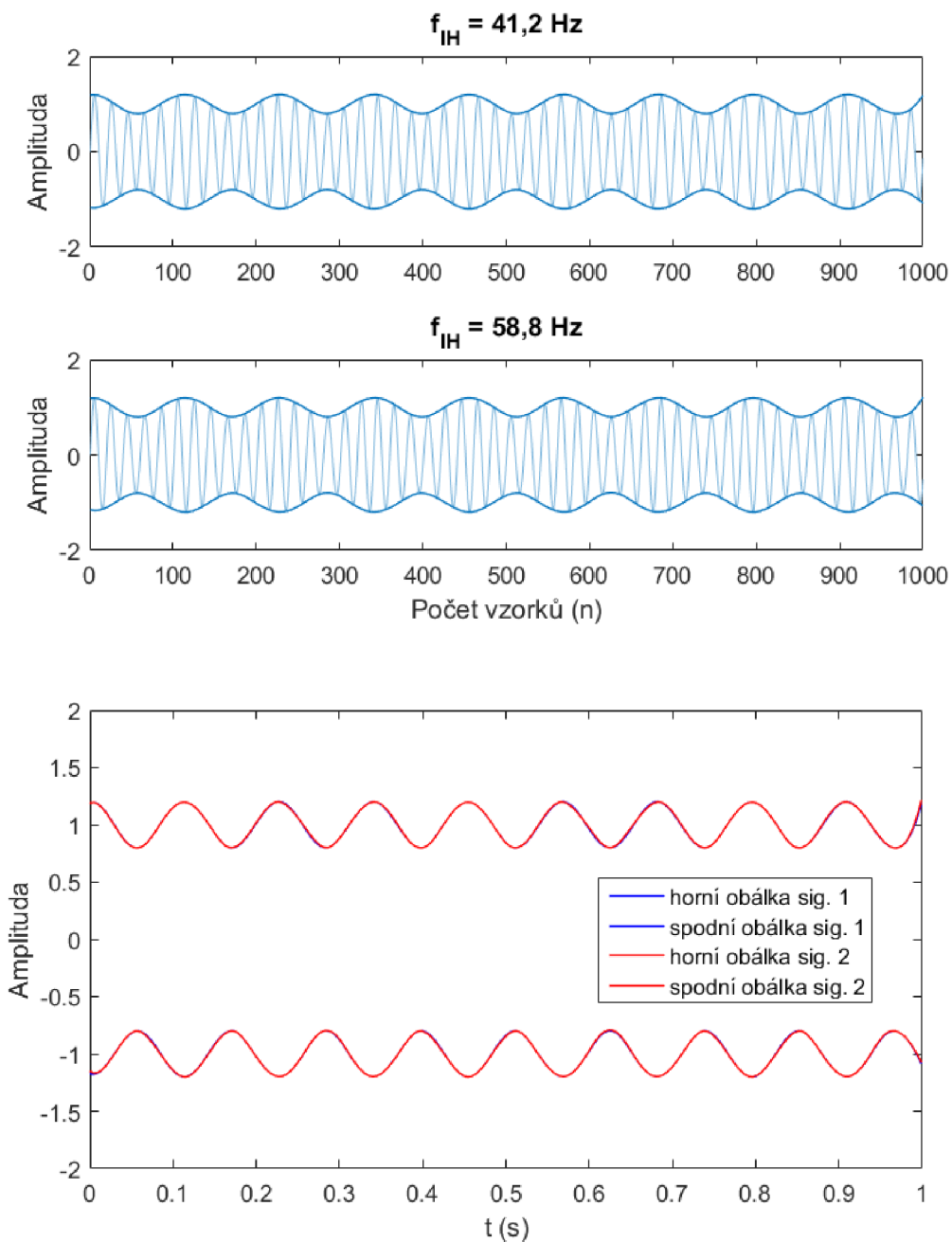


Obr. 6-2 Normalizovaná křivka citlivosti – převrácená hodnota



Obr. 6-3 Amplitudové spektrum meziharmonické $f_{IH} = 41,2$ Hz a $58,8$ Hz s velikostí modulace 20 % superponované na základní harmonickou

Na obrázku (Obr. 6-3) je amplitudové spektrum jedné meziharmonické s modulační frekvencí $f_{IH} = 41,2$ Hz a $58,8$ Hz, postupně injektované do základní harmonické. Spektrum bylo vytvořeno pomocí rychlé Fourierovi transformace (FFT) s délkou signálu 1000 vzorků a vzorkovací frekvencí 1000 Hz. Meziharmonická na obou frekvencích způsobí zcela shodné kolísání napětí s frekvencí amplitudy obálky 8,8 Hz.



Obr. 6-4 Porovnání kolísání obálky napětí pro IH modulaci s $f_{IH} = 41,2 \text{ Hz}$ a $58,8 \text{ Hz}$

Numerickou integrací normalizované křivky lichoběžníkovou metodou v rozsahu 1-1000 Hz tedy získáme hodnotu

$$\int_1^{1000} \hat{P}st_{IH}^2(f_{IH}) df_{IH} = 555,7 \quad (5.1)$$

a po dosazení do vztahu (4.2)

$$LFS_{INC,IH} = \sqrt{\frac{1}{1000} \cdot 555,7} = 0,7455 \quad (5.2)$$

$LFS_{INC,IH}$ (INC-incandescent lamp) je současně referenční hodnota závažnosti blikání $LFS_{ref, IH}$, vůči které se budou porovnávat hodnoty světelných zdrojů LED. Vypočtená hodnota představuje efektivní hodnotu integrované plochy pod křivkou. Pokud bychom nyní získanou hodnotu dosadili do vztahu pro výpočet indexu světelného blikání pro samotný referenční zdroj dle (4.4)

$$LFI_{INC,IH} = \frac{LFS_{INC,IH}}{LFS_{ref,IH}} \cdot 10 = \frac{0,7455}{0,7455} \cdot 10 = 10 \quad (5.3)$$

získáme index, odpovídající spodní hranici klasifikační stupnice, což je zřejmé z výše uvedených vztahů.

6.1.2 Výpočet LFI pro zdroje LED

Výpočet indexu blikání pro světelné zdroje LED je obdobný, jako výpočet indexu referenčního zdroje. Rozdíl je ve zpracování naměřených dat. Jak je uvedeno v předchozí kapitole, jsou data pro žárovku relevantní do frekvence 100 Hz. Nad touto hranicí je již tepelná setrvačnost vlákna žárovky taková, že se blikání při modulaci meziharmonickou na vyšších frekvencích neprojeví. Jak je patrné z obrázku (Obr. 5-2), pro zdroje LED to však neplatí. Ty mohou, v závislosti na své konstrukci (převážně napájecím obvodu), blikat, při modulaci meziharmonickou, i nad hranicí 100 Hz.

Do zpracování dat ze zdrojů LED je tedy potřeba zavést jistou korekci na vyšších frekvencích, a to nejen z důvodu potřeby objektivního porovnání s referenčním zdrojem. Dalším důvodem k použití koeficientů pro úpravu změřených hodnot je předpoklad, že v reálné síti se meziharmonické složky napětí vyskytují převážně do určité velikosti v poměru k základní harmonické.

Nebylo by tedy systematicky správné integrovat normalizovaná data zdrojů LED v plné výši v celém uvažovaném rozsahu, jelikož při testování je nastavena stálá hodnota velikosti modulace pro celý měřený rozsah.

Postup výpočtu pro zdroje LED ve výpočtovém SW Matlab je tedy následující:

- normalizace naměřených dat podle vztahu (4.3)
- výpočet hodnoty závažnosti blikání $LFS_{LED,IH}$ podle upraveného vztahu s použitím korekce (5.4)
- výpočet indexu světelného blikání podle vztahu (4.4)

Upravený vztah pro výpočet $LFS_{LED,IH}$:

$$LFS_{LED,IH} = \sqrt{\frac{1}{1000} \left[\int_1^{100} (W_{1-100} \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{101}^{300} (W_{101-300} \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{301}^{1000} (W_{301-1000} \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} \right]} \quad (5.4)$$

kde W_{1-100} , $W_{101-300}$, $W_{301-1000}$ jsou váhové koeficienty.

Pro první zpracování dat budou váhové koeficienty nastaveny následovně:

$$\begin{aligned} W_{1-100} &= 1 \\ W_{101-300} &= 0,2 \\ W_{301-1000} &= 0,2 \end{aligned}$$

Výpočet pro první zdroj z tabulky (Tab. 6-1) LED 13 je pak následující:

$$\left[\int_1^{100} (1 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{101}^{300} (0,2 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{301}^{1000} (0,2 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} \right] = 581,6 \quad (5.5)$$

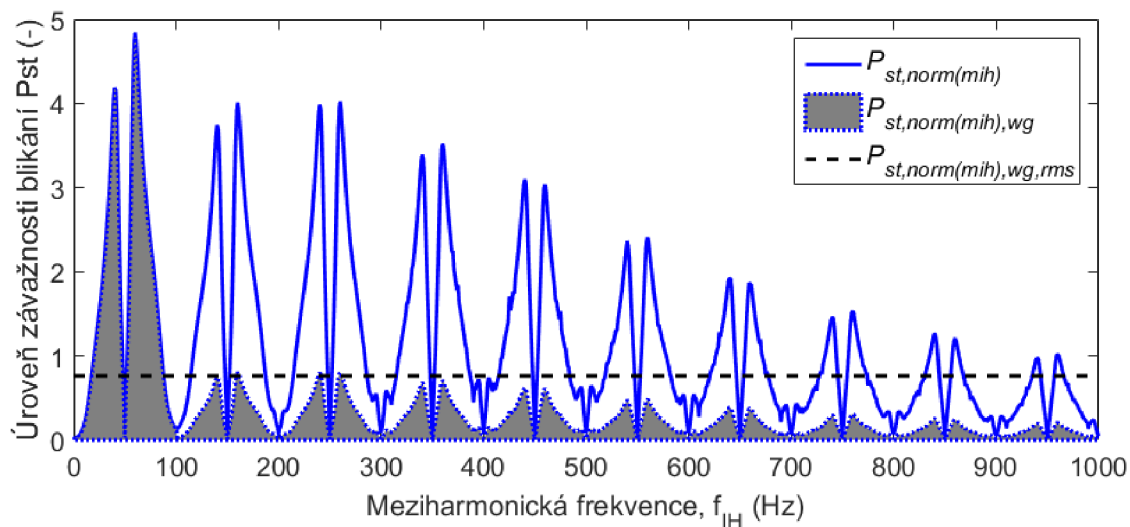
dosazení do vztahu (4.2)

$$LFS_{LED,IH} = \sqrt{\frac{1}{1000} \cdot 581,6} = 0,7626 \quad (5.6)$$

výpočet indexu dle (4.4)

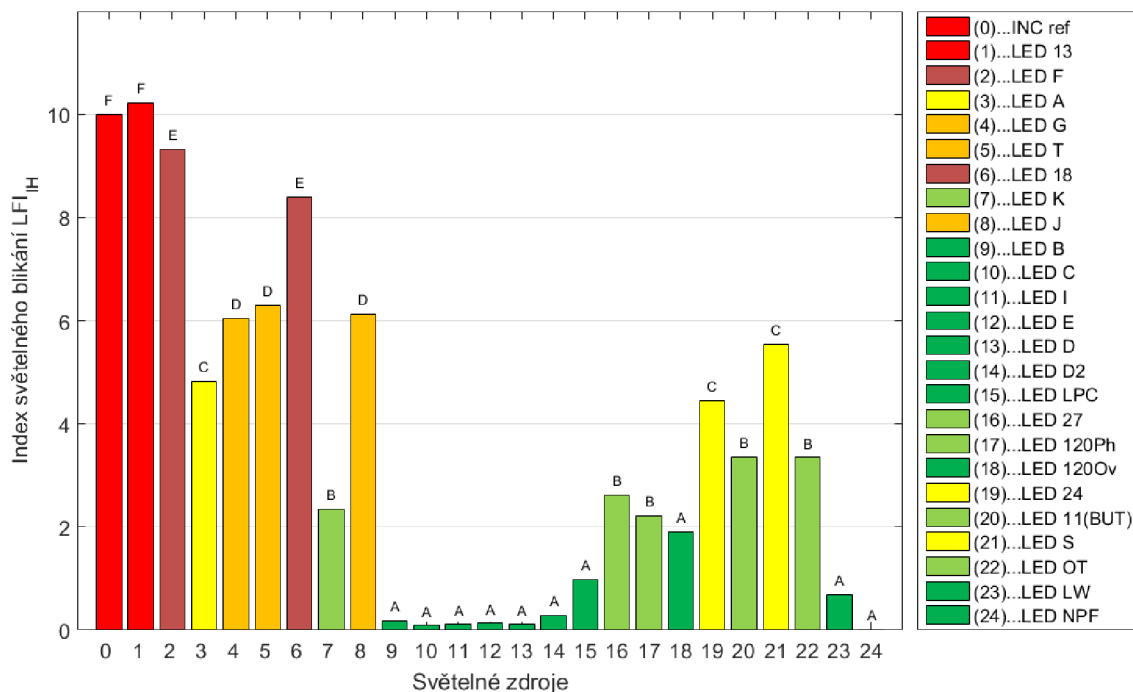
$$LFI_{LED,IH} = \frac{LFS_{LED,IH}}{LFS_{ref,IH}} \cdot 10 = \frac{0,7626}{0,7455} \cdot 10 = 10,23 \quad (5.7)$$

Pro tento světelný zdroj je změřená a vypočtená hodnota indexu vyšší než 10, což značí vyšší citlivost na kolísání napájecího napětí než u referenčního zdroje za daných podmínek.



Obr. 6-5 Grafické zobrazení korekce normalizované křivky P_{st} a hodnoty $LFS_{LED, IH}$

Analogickým postupem byly vypočteny indexy i pro ostatní zdroje. Na obrázku (Obr. 6-6) je grafické zobrazení indexů pro všechny LED a referenční zdroj, zařazené do jednotlivých kategorií stupnice dle tabulky (Tab. 5-1). Referenční zdroj je vždy uveden pro kontrolu metody. Pokud by se index referenčního zdroje při změně parametrů výpočtu lišil od hodnoty 10, znamenalo by to, že postup zřejmě obsahuje chybu.



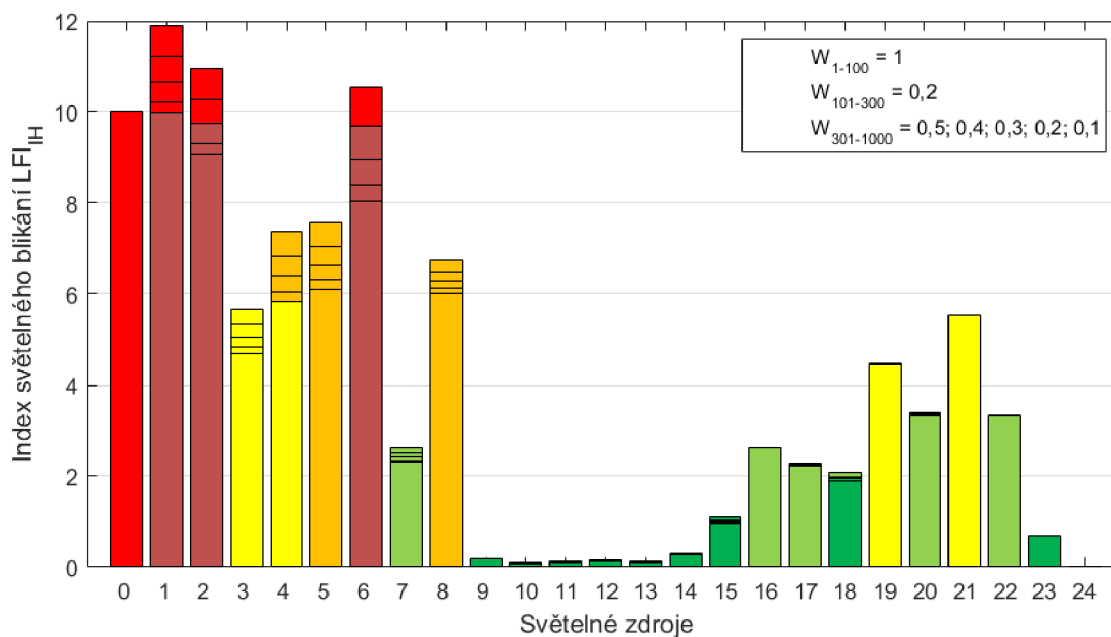
Obr. 6-6 Graf indexů LFI_{IH} pro světelné zdroje LED a ref. žárovku

Grafické zobrazení normalizovaných křivek $P_{st, IH}$ všech zdrojů je uvedeno v příloze 1.

6.1.3 Posouzení vlivu váhových koeficientů

Z principu výpočtu indexu světelného blikání je zřejmé, že výsledek bude závislý nejen na objektivně změřených hodnotách krátkodobé míry vjemu flikru konkrétního zdroje, ale i na velikosti použitých váhových koeficientů. Jejich správné nastavení není triviální problém, jelikož je nutné posoudit mnoho vstupů, které mohou mít vliv na míru korekce. Především se jedná o předpokládaný výskyt meziharmonických v reálné síti, jejich úrovních, rozložení apod. Navíc pro různé oblasti sítě může být napěťové spektrum rozdílné. V této kapitole se tedy jednoduchým způsobem pokusím o porovnání vlivu různých kombinací hodnot váhových koeficientů na výslednou hodnotu indexu blikání, aplikovaných na změřená data.

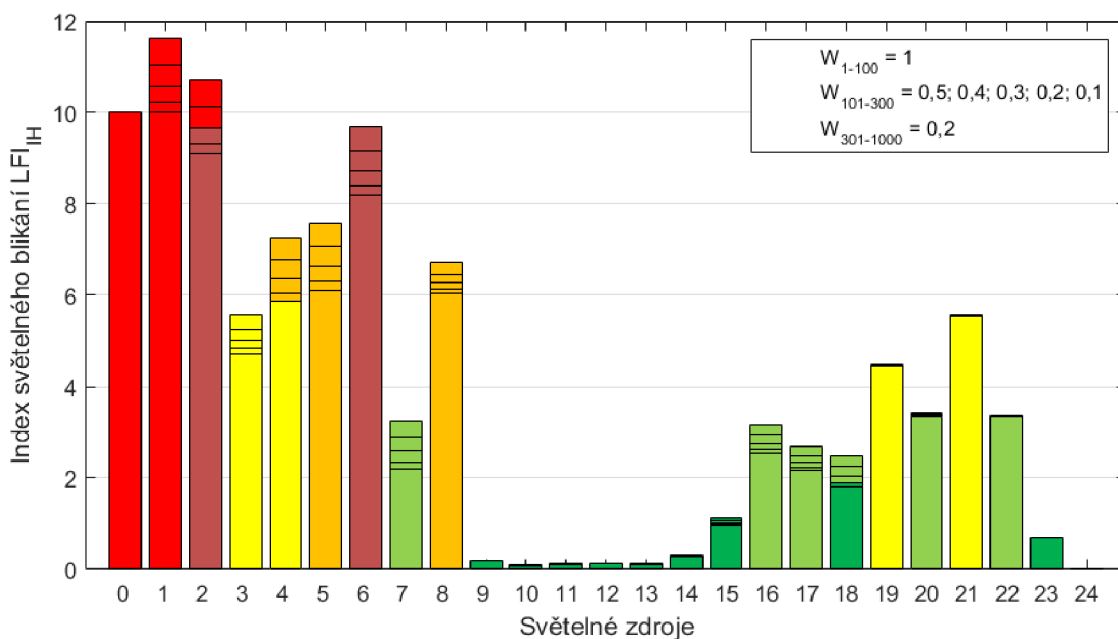
V první části bude měněna hodnota váhového koeficientu $W_{301-1000}$ od hodnoty 0,5 po hodnotu 0,1 s krokem 0,1. Jak již bylo zmíněno, vyšší hodnota nemá opodstatnění. Koeficient W_{1-100} se rovná vždy 1. Koeficient $W_{101-300}$ bude nastaven na konstantní hodnotu 0,2.



Obr. 6-7 Graf indexů LFI_H pro různé hodnoty $W_{301-1000}$

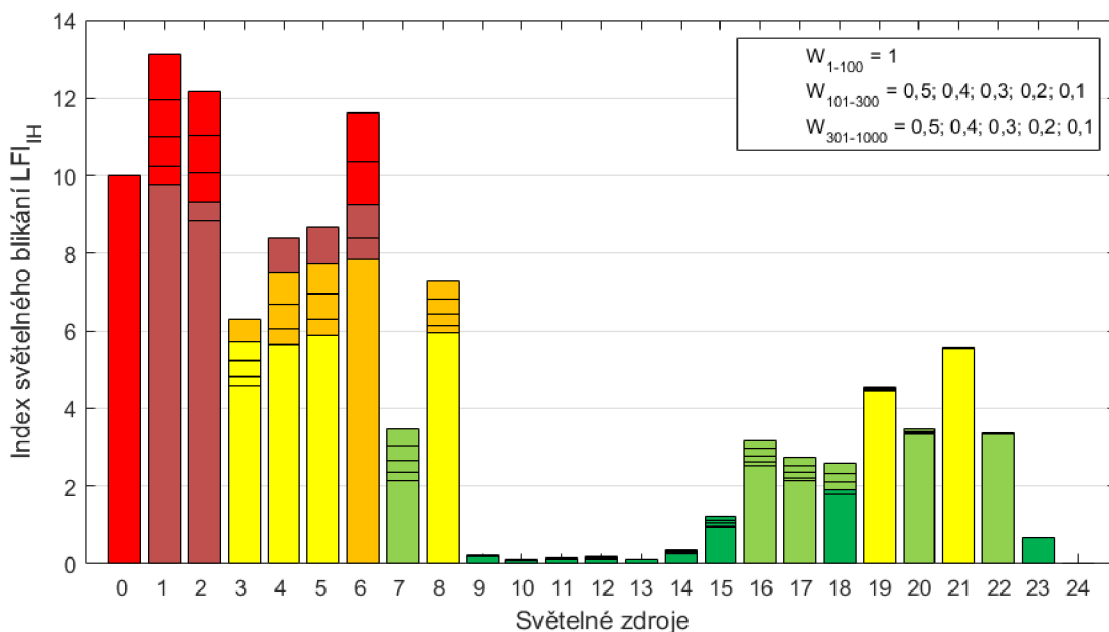
Jak je patrné z grafu (Obr. 6-7), hodnota indexu se významněji mění jen u citlivých zdrojů, což je logické. U odolných zdrojů jsou změřené hodnoty P_{st} na vyšších frekvencích malé, a tedy i změna hodnoty váhového koeficientu se v celkovém výpočtu projeví jen nepatrně.

V druhé části je porovnání podobné, jen s tím rozdílem, že se mění hodnota koeficientu $W_{101-300}$.



Obr. 6-8 Graf indexů LFI_{IH} pro různé hodnoty $W_{101-300}$

Výsledek je podobný jako v předchozím případě. V posledním porovnání budou váhové koeficienty $W_{101-300}$ a $W_{301-1000}$ měněny současně.



Obr. 6-9 Graf indexů LFI_{IH} pro různé hodnoty $W_{101-300}$ a $W_{301-1000}$

Jak se dalo předpokládat, rozdíly mezi hodnotami indexu pro citlivé zdroje jsou již výrazné. Za daných podmínek představuje změna váhových koeficientů, pro některé zdroje, změnu zařazení až o dvě třídy. Pro další postup je tedy potřeba zvolit jejich optimální nastavení.

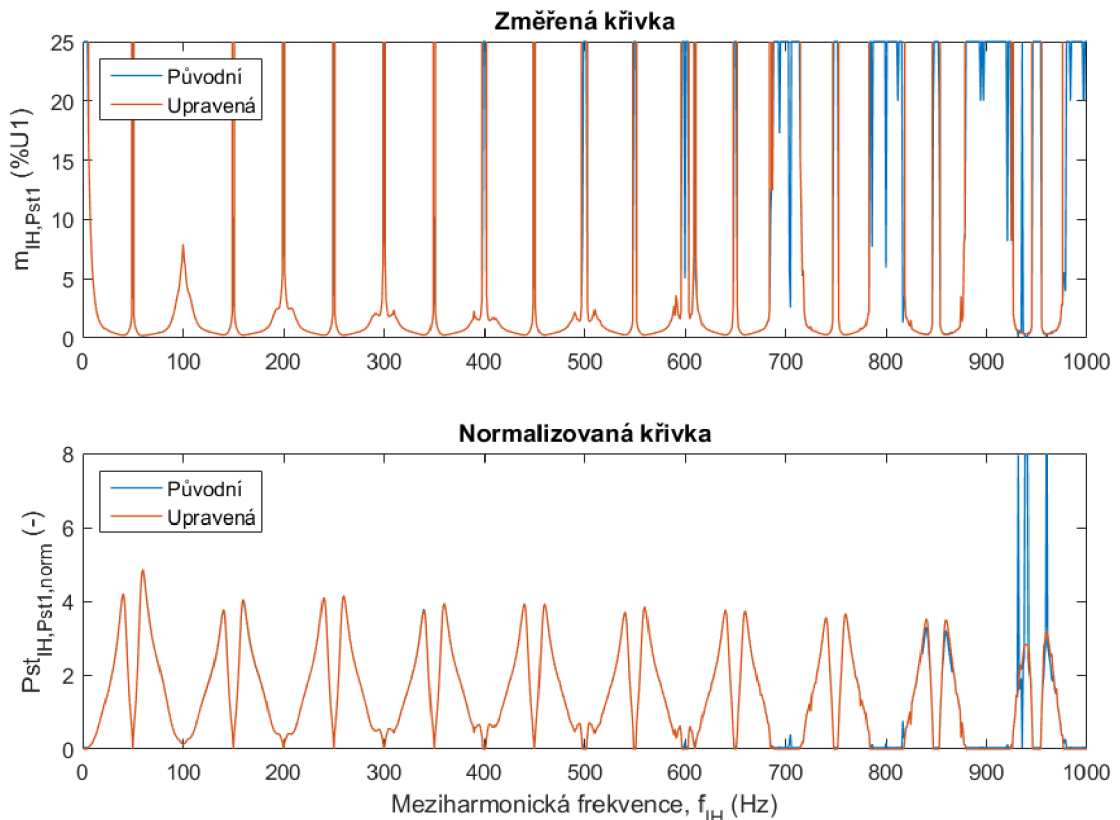
6.2 Testování odolnosti mezharmnickou

Aby bylo možné posoudit vypovídací hodnotu získaných indexů světelného blikání měřené jednou mezharmnickou s pevným nastavením velikosti modulace (měření křivky citlivosti), bude v této kapitole proveden obdobný výpočet s daty získanými měřením křivky odolnosti světelných zdrojů. Pro porovnání jsou zpracovány jen některé vybrané zdroje. Příklad výpočtu je opět proveden pro LED 13.

Nejdříve je třeba data upravit. Testovací systém ukládá kromě změřených hodnot také informaci o výsledku měření. Pokud nabývá příznak „status“ hodnoty nula, pak bylo dosaženo výsledku s požadovanou přesností měření a změřenou hodnotu velikosti modulace lze použít přímo. Pokud je hodnota příznaku jiná (1, 2, 3), potom buď nebylo dosaženo hodnoty $P_{st}=1$ ani po maximálním počtu iterací, nebo by hodnota modulace napětí byla větší než 25 %. Hodnoty, získané v měřících bodech, kde je příznak „status“ různý od nuly, jsou explicitně nahrazeny hodnotou 1×10^6 . Po úpravě je pro každý bod měření vypočítána jeho převrácená hodnota, což vychází ze vztahu

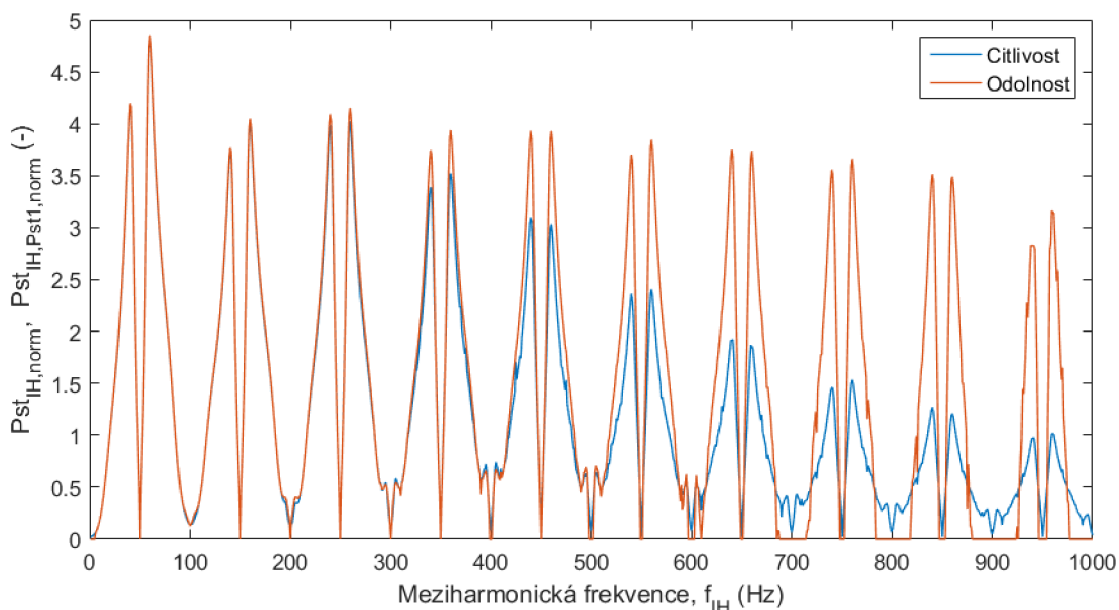
$$P_{st_2} = \frac{1}{m_1} \cdot P_{st_1} \cdot m_2 \quad \text{kde } P_{st_1} = 1 \text{ a } m_2 = 1 \quad (6.1)$$

Výsledná křivka reprezentuje opět krátkodobou míru vjemu flikru. V tomto případě je však zohledněna nelinearita světelného zdroje.



Obr. 6-10 Příklad úpravy dat pro měření křivky odolnosti

Na obrázku (Obr. 6-11) je zobrazeno porovnání křivek pro LED 13, získaných měřením citlivosti a měřením odolnosti.



Obr. 6-11 Porovnání křivky citlivosti a odolnosti pro LED 13

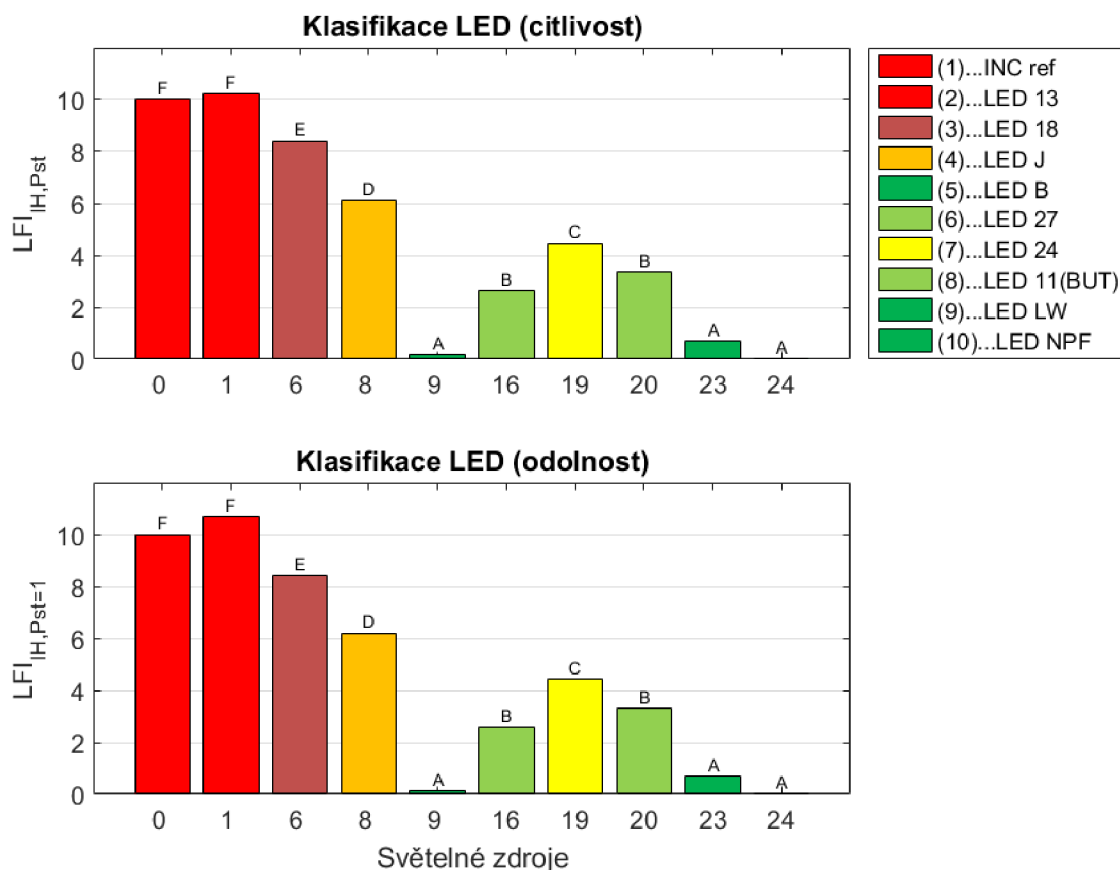
Z grafu je zřejmé, že na rozsahu modulační frekvence 1-300 Hz jsou hodnoty velmi podobné. Na vyšších frekvencích je patrný rozdíl. Tento rozdíl ukazuje vliv testování s konstantní hodnotou velikosti modulačního napětí oproti objektivnímu měření odolnosti světelného zdroje.

Výpočet indexu je proveden obdobně jako u měření citlivosti.

$$\left[\int_1^{100} (1 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{101}^{300} (0,2 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} + \int_{301}^{1000} (0,2 \cdot \hat{P}st_{LED,IH})^2 df_{IH} \right] = 636,2 \quad (5.8)$$

$$LFS_{LED,IH} = \sqrt{\frac{1}{1000} \cdot 636,2} = 0,7976 \quad (5.9)$$

$$LFI_{LED,IH} = \frac{LFS_{LED,IH}}{LFS_{ref,IH}} \cdot 10 = \frac{0,7976}{0,7455} \cdot 10 = 10,69 \quad (5.10)$$



Obr. 6-12 Porovnání indexů světelného blikání LFI_{IH} , získaných měření citlivosti a odolnosti

Z porovnání je patrné, že rozdíly jsou minimální, přestože získané křivky mají odlišný průběh. To je způsobeno použitím váhových koeficientů, které zmírňují rozdíly v hodnotách, změřených na vyšších frekvencích.

Výsledkem porovnání je zjištění, že testování světelných zdrojů LED s pevně nastavenou velikostí modulace napájecího napětí poskytuje obdobné výsledky jako testování s hodnotou modulace odpovídající $Pst=1$. Samozřejmě by bylo vhodné toto tvrzení ověřit na větším počtu vzorků.

6.3 Optimalizace klasifikační metody

Optimalizace klasifikační metody znamená v podstatě zkrácení času testování. Toho lze dosáhnout několika způsoby:

- volbou typu testování,
- změnou rozsahu modulační frekvence,
- změnou kroku měření na daném rozsahu,
- použitím jiného typu modulace než jednou meziharmonickou.

6.3.1 Volba typu testování

Význam této položky byl ukázán v kapitole (5.4). Jestliže měříme odolnost světelného zdroje, může být doba potřebná k testování značná. Nejdéle jsou měřeny zdroje s vysokou odolností, jelikož v každém kroku měření se dosahuje vysokého, většinou maximálního, nastaveného počtu iterací k . I pro méně odolné zdroje je většinou třeba cca 2 až 5 iterací, než je nalezena hodnota $P_{st}=1$ s požadovanou přesností.

Naproti tomu při měření citlivosti je doba měření dána pouze počtem měřených bodů násobeným časem měření jednoho bodu, nezávisle na odolnosti světelného zdroje.

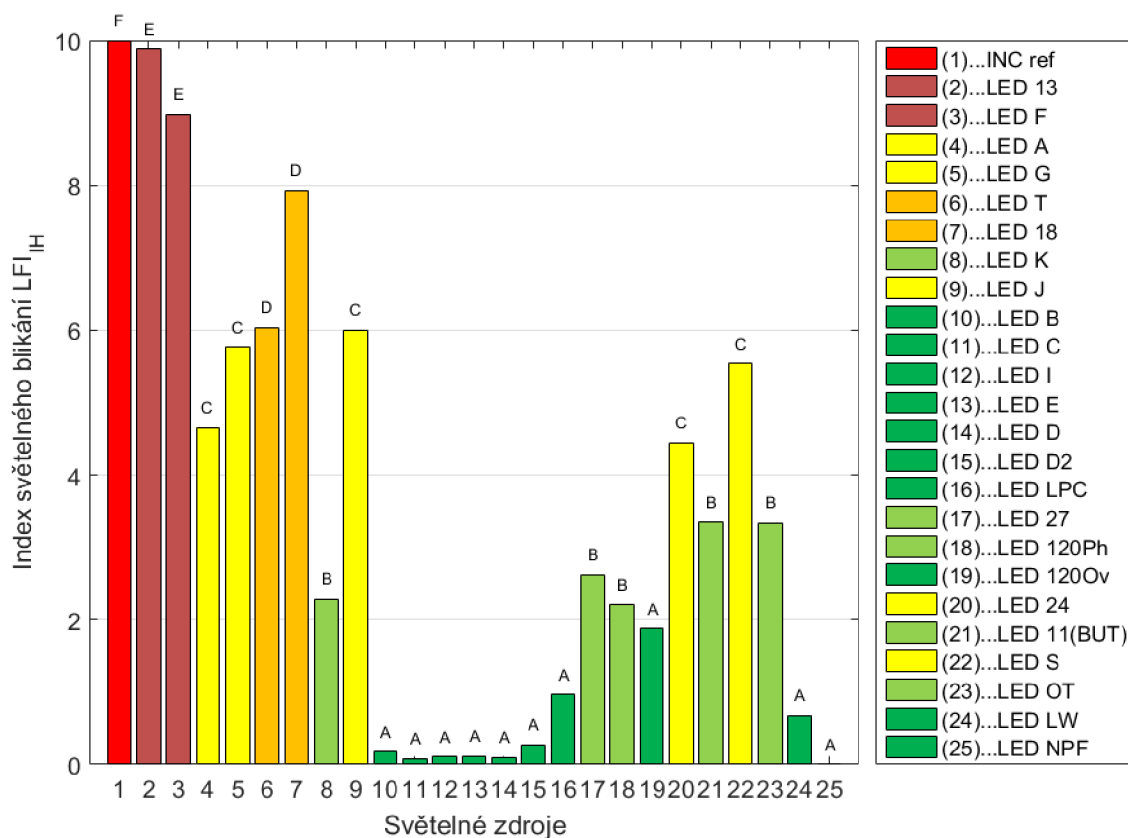
6.3.2 Volba rozsahu modulační frekvence

V reálných energetických sítích se meziharmonické zkreslení napětí soustřeďuje převážně ve frekvenčním rozsahu pod dvojnásobkem základní frekvence (0; 100) Hz, protože nejčastější příčinou tohoto druhu zkreslení je modulace základní harmonické způsobená časově proměnlivým zatížením a obnovitelnými zdroji energie. Jakákoliv jiná typická porucha (aperiodické náhlé změny napětí, obdélníková / trojúhelníková / jakákoliv AM nebo fázová modulace) obsahuje také komponenty, spadající do dalších, po sobě následujících dílčích rozsahů, obvykle však do 300 Hz. Pro kmitočty nad 300 Hz se sice mohou vyskytnout specifické poruchy, jako je např. signál HDO, který je však lokální záležitostí některých zemí včetně České republiky. V obecném měřítku se proto zdá být rozumné použít pro testování světelných zdrojů meziharmonické zkreslení, jako zkušební signál, v rozsahu (0; 6f₁) Hz. [8]

Zmenšíme-li tedy rozsah modulační frekvence na interval 1-300 Hz, získáme výraznou časovou úsporu, při zachování vypovídací schopnosti klasifikační metody.

Tab. 6-2 Rozdíly indexu LFI_{IH} pro různé frekvenční rozsahy měření

LED	$LFI_{IH,1-1000\text{ Hz}}$	$LFI_{IH,1-300\text{ Hz}}$	Rozdíl (%)	LED	$LFI_{IH,1-1000\text{ Hz}}$	$LFI_{IH,1-300\text{ Hz}}$	Rozdíl (%)
1	10,23	9,88	3,4	13	0,11	0,10	2,7
2	9,32	8,98	3,7	14	0,28	0,27	2,5
3	4,83	4,66	3,6	15	0,99	0,96	2,3
4	6,05	5,76	4,7	16	2,62	2,62	0,1
5	6,30	6,03	4,3	17	2,22	2,21	0,6
6	8,40	7,93	5,6	18	1,91	1,87	1,7
7	2,34	2,29	2,4	19	4,45	4,44	0,2
8	6,13	6,00	2,1	20	3,36	3,35	0,3
9	0,18	0,18	1,9	21	5,54	5,54	0,0
10	0,09	0,08	7,2	22	3,34	3,34	0,0
11	0,11	0,11	2,9	23	0,68	0,68	0,0
12	0,13	0,12	8,0	24	0,01	0,01	0,0

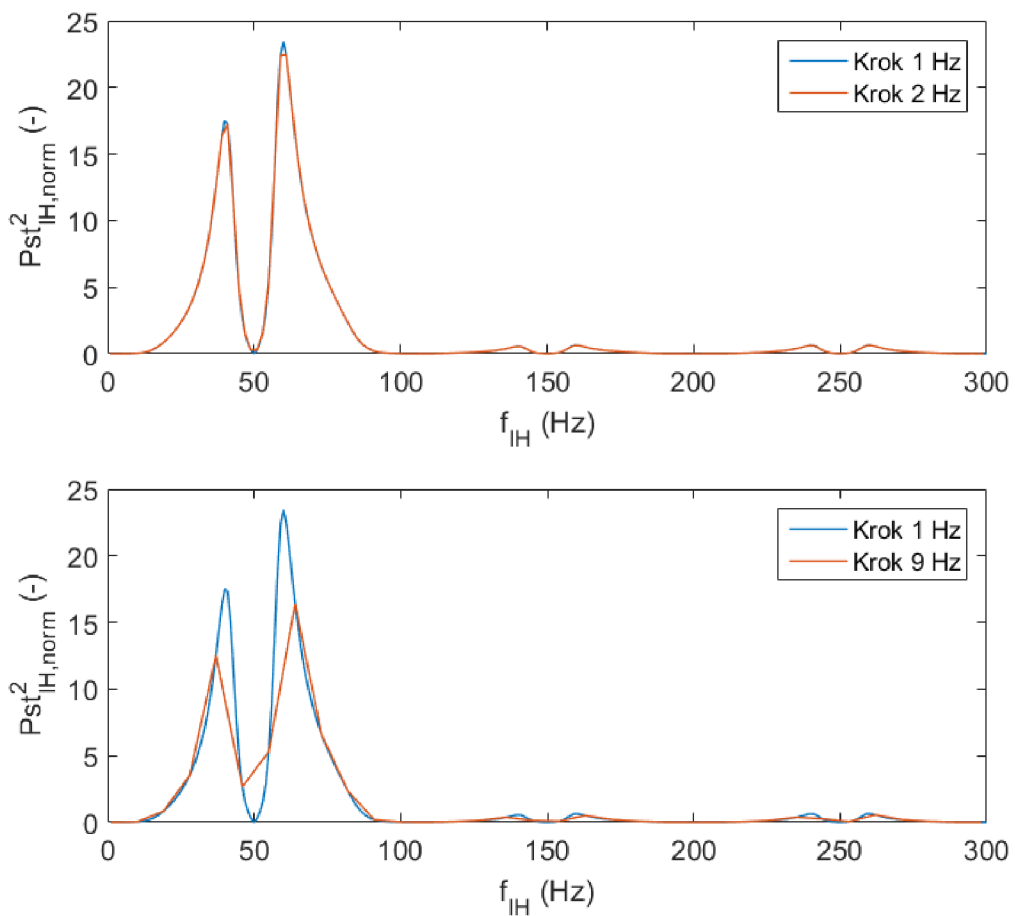


Obr. 6-13 Graf indexů LFI_{IH} s rozsahem měření $f_{IH} = 1-300$ Hz, $W_{1-100} = 1$, $W_{101-300} = 0,2$, krok = 1 Hz

6.3.3 Změna kroku měření

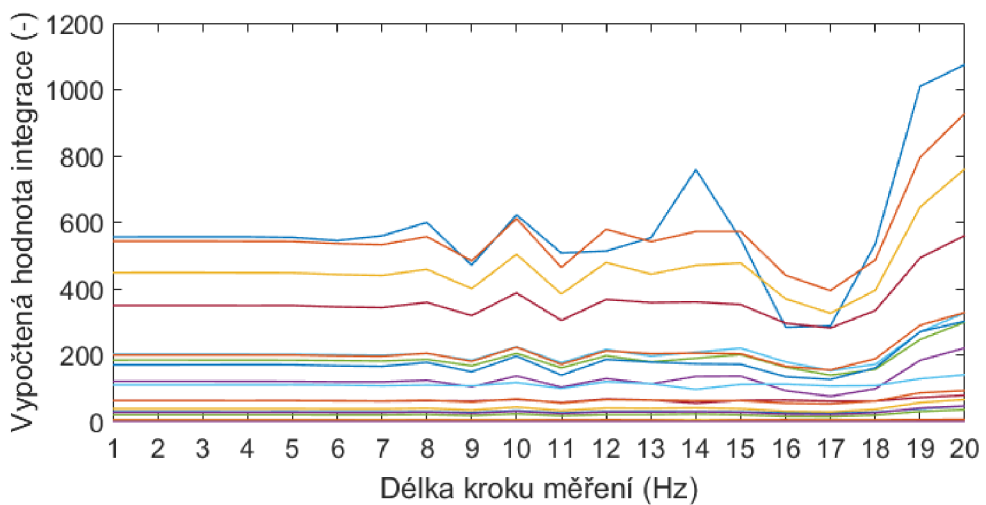
Přesnost numerické integrace obecně závisí na jemnosti rozdělení intervalu, na kterém je integrace prováděna a na tvaru křivky, která ohraničuje integrovanou plochu. Důležité je vhodné rozdělení intervalu v oblasti lokálních extrémů. Na následujících grafech (Obr. 6-14) je zobrazena změřená křivka citlivosti LED 13 s krokem měření 1 Hz a její proložení křivkou s krokem 2 Hz a 9 Hz. Je zřejmé, že zvýšení kroku na 2 Hz, kterým lze zkrátit čas měření křivky citlivosti na polovinu, nemá pro výpočet plochy křivky téměř žádný dopad. Chyba měření pro tuto konkrétní křivku je 0,0166 %. Navíc se jedná o rozdíl nad kvadrátem změřených normalizovaných hodnot Pst . To znamená, že dokončením výpočtu indexu blikání LFI se stane význam tohoto rozdílu zcela zanedbatelný.

Pokud krok zvyšujeme, mění se výsledná hodnota integrace relativně málo až do kroku 9 Hz, kde se již projeví značné „orezáni“ lokálních maxim a minim. V tomto případě je plocha, ohraničená křivkou s krokem 9 Hz o 10,87 % menší, než plocha ohraničená původní křivkou s krokem 1 Hz. Při dalším zvyšování kroku měření se mění hodnota integrace podle toho, jak se rozdělení intervalů „trefí“ do extrémů křivky a jak se vyrovnají kladné a záporné rozdíly mezi křivkami.



Obr. 6-14 Porovnání křivek v závislosti na zvoleném kroku měření

Pro ilustraci je přehled průběhu integrovaných hodnot pro všech 24 zdrojů LED a referenční žárovku v rozsahu kroku 1 až 20 Hz na obrázku (Obr. 6-15).

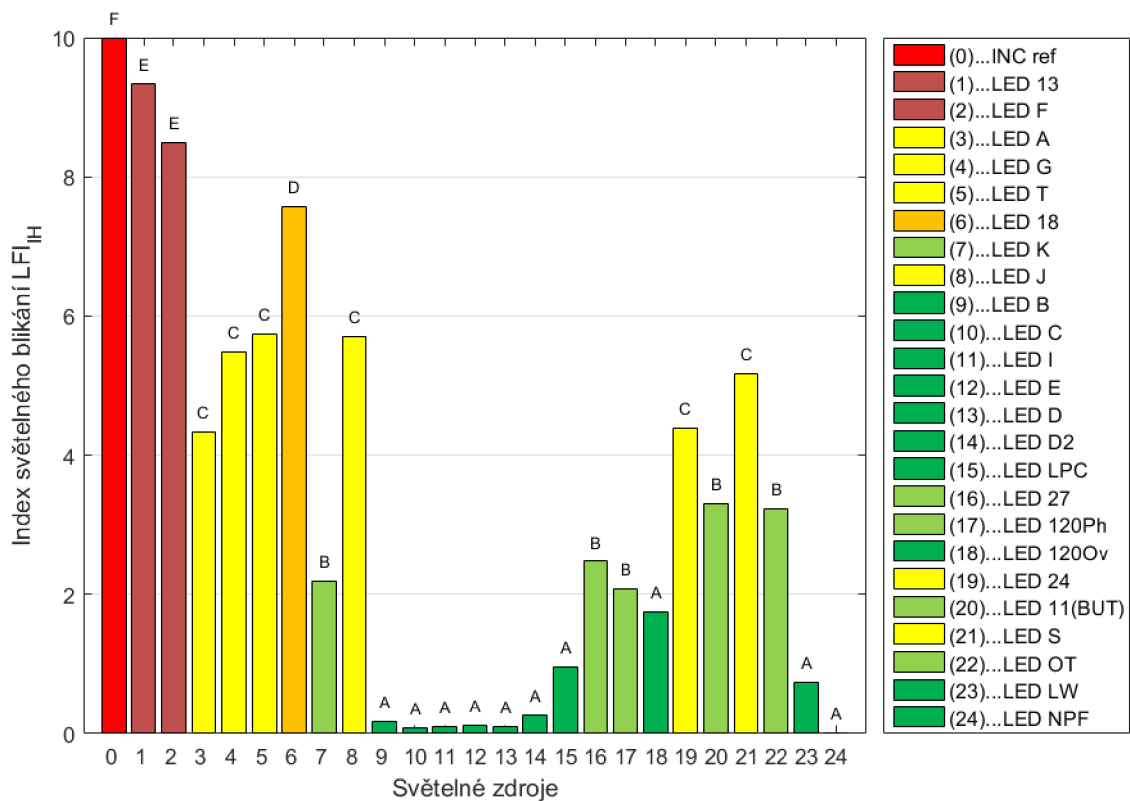


Obr. 6-15 Zobrazení změny hodnot integrace při zvyšování kroku měření

Z výše uvedeného lze soudit, že by teoreticky bylo možné zkrátit potřebný čas měření, např. pro měření křivky citlivosti, až sedmkrát. Platnost výsledků, s dostatečnou přesností, by však byla relevantní jen pro měření za daných podmínek. Pokud bychom však měřili světelné zdroje pro síť se základní frekvencí 60 Hz, nebo jiným typem modulačního signálu než jednou meziharmonickou, změní se charakteristický tvar křivky a rozložení lokálních extrémů a chyby měření budou mít jiný průběh. Testování a jeho výsledky ale nemohou být závislé na nastavených parametrech měření. Proto je doporučeno nezvyšovat krok měření na více jak 2, max. 3 Hz.

Tím sice dosáhneme zkrácení celkové doby měření, ale nikoliv dostatečně, zvláště při měření křivky odolnosti.

Pro úplnost je na obrázku (Obr. 6-16) grafické zobrazení indexů LED získaných z hodnot měřených s nastaveným krokem 9 Hz. Frekvenční rozsah a váhové koeficienty jsou stejné jako v kapitole (6.3.2).



Obr. 6-16 Graf indexů LFI_{IH} s rozsahem měření $f_{IH} = 1-300$ Hz, $W_{1-100} = 1$, $W_{101-300} = 0,2$, krok = 9 Hz

6.4 Další možnosti optimalizace v závislosti na druhu modulace

Dosud uvedené možnosti optimalizace vychází z předpokladu získání dat měřením jednou mezharmónickou. Změnou frekvenčního rozsahu, délky kroku měření a volbou typu měření lze celkovou dobu testování zkrátit relativně výrazně. Pro měření křivky citlivosti s rozsahem modulační frekvence 1-300 Hz a krokem 2 Hz je to

$$t_{\text{měření}} = \frac{300}{2} \cdot 20 = 1500 \text{ s} = 50 \text{ min} \quad (5.11)$$

Další možností, jak zkrátit dobu testování, je použití takové modulace, aby frekvenční spektrum výsledného průběhu napětí obsahovalo více mezharmónických současně. To umožní opět zmenšení rozsahu modulační frekvence, a tedy zkrácení času testování.

Vhodným typem je např. amplitudová modulace obdélníkovým signálem (RAM). Výsledný průběh napětí obsahuje relativně rovnoměrné rozložení několika subharmónických, harmónických a mezharmónických, jak je ukázáno na příkladu (Obr. 3-7) v kapitole (3.1). Pokud bude měření provedeno na rozsahu modulační frekvence 1-50 Hz, lze předpokládat, že obsah mezharmónických, které ovlivní výslednou hodnotu krátkodobé míry vjemu flikru bude dostatečný.

Testování lze, obdobně jako při měření jednou mezharmónickou, realizovat jak s pevně nastavenou velikostí modulace, tak s vyhledáváním hodnoty modulace při $Pst=1$.

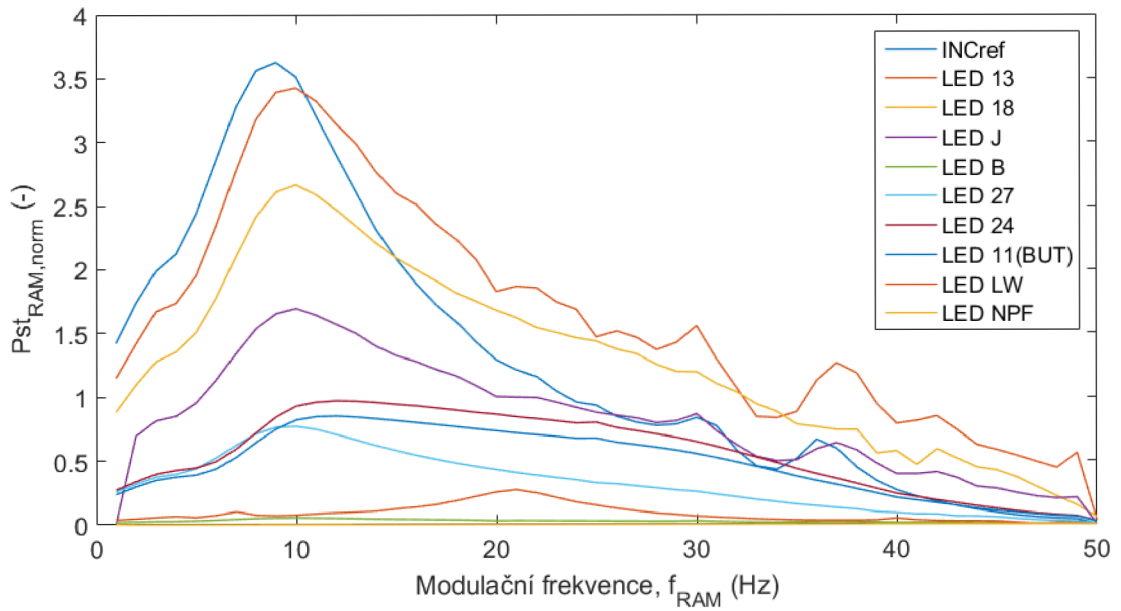
6.4.1 Testování citlivosti modulací RAM

Nastavení parametrů:

- hodnota modulace 2 % základní harmónické,
- střída obdélníkového průběhu 0,5
- rozsah modulační frekvence 1-50 Hz,
- krok měření 1 Hz.

Váhové koeficienty se při následném výpočtu již nepoužívají. Úroveň vlivu jednotlivých mezharmónických je dána samotným průběhem napětí a jeho frekvenčním spektrem.

Data jsou k dispozici pouze k vybraným světelným zdrojům tak, aby byly obsaženy zdroje pro všech osm typů napájecích obvodů. Na obrázku (Obr. 6-17) jsou vyneseny normalizované křivky citlivosti. Opět lze vyzorovat charakteristický tvar křivek s maximální citlivostí při hodnotě modulační frekvence $f_{RAM} = 9 \text{ Hz}$.



Obr. 6-17 Normalizované křivky citlivosti RAM

Výpočet referenční hodnoty $LFS_{ref, RAM}$

$$\int_1^{50} \hat{P}st_{RAM}^2(f_{RAM}) df_{RAM} = 135,3 \quad (5.12)$$

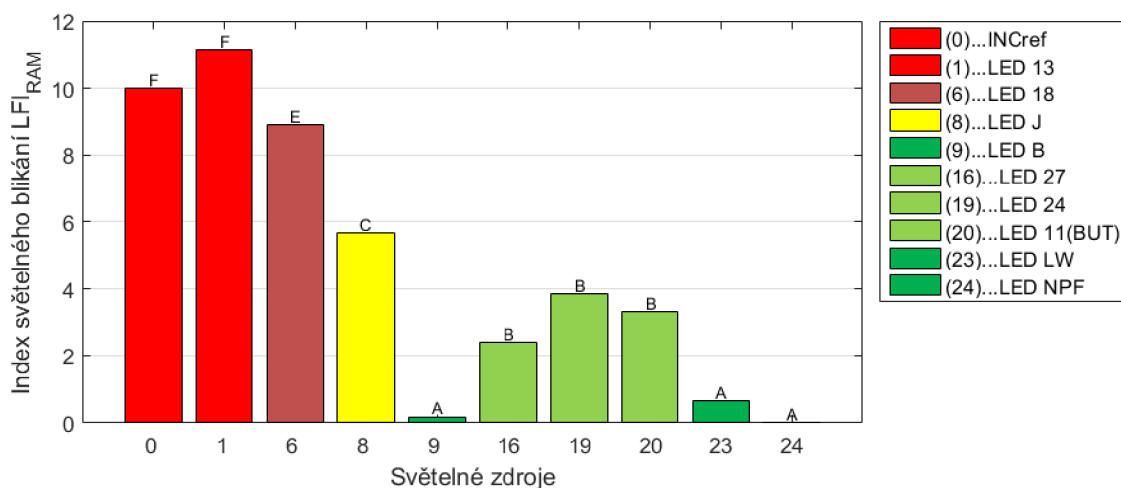
$$LFS_{ref, RAM} = \sqrt{\frac{1}{50} \cdot 135,3} = 1,645 \quad (5.13)$$

Výpočet hodnoty indexu $LFI_{LED, RAM}$ pro LED 13

$$\int_1^{50} \hat{P}st_{LED, RAM}^2(f_{RAM}) df_{RAM} = 167,8 \quad (5.12)$$

$$LFS_{LED, RAM} = \sqrt{\frac{1}{50} \cdot 167,8} = 1,832 \quad (5.13)$$

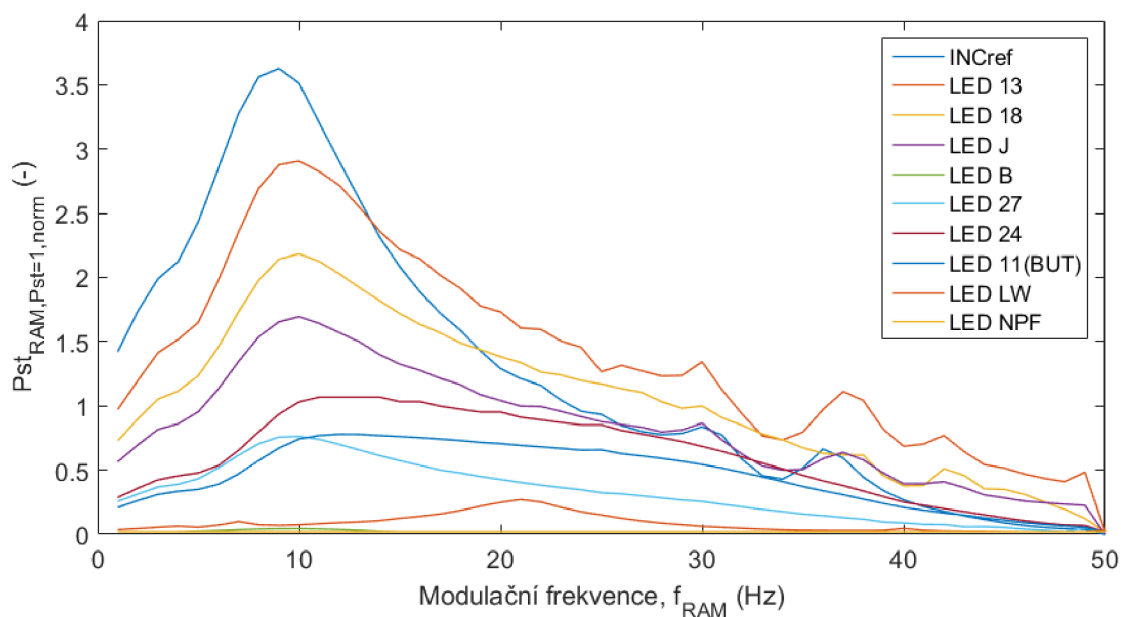
$$LFI_{LED, RAM} = \frac{LFS_{LED, RAM}}{LFS_{ref, RAM}} \cdot 10 = \frac{1,832}{1,645} \cdot 10 = 11,14 \quad (5.7)$$



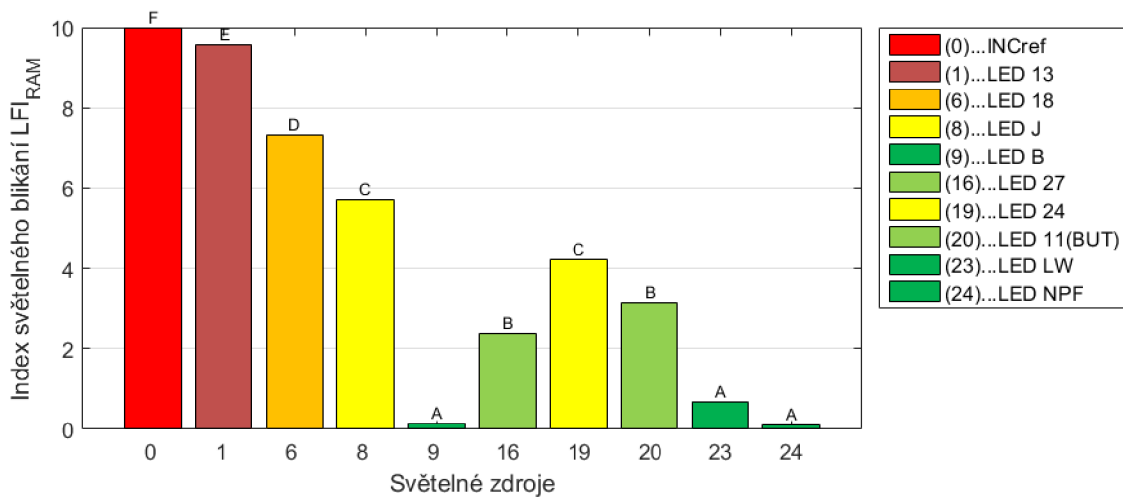
Obr. 6-18 Graf indexů LFI_{RAM} - citlivost

6.4.2 Testování odolnosti modulací RAM

Nastavení parametrů testování je shodné jako při měření citlivosti. Úprava křivky odolnosti pro následný výpočet je jednodušší než v případě IH modulace. Provede se normalizace podle vztahu (4.3) a výpočet převrácené hodnoty.



Obr. 6-19 Normalizované křivky odolnosti RAM



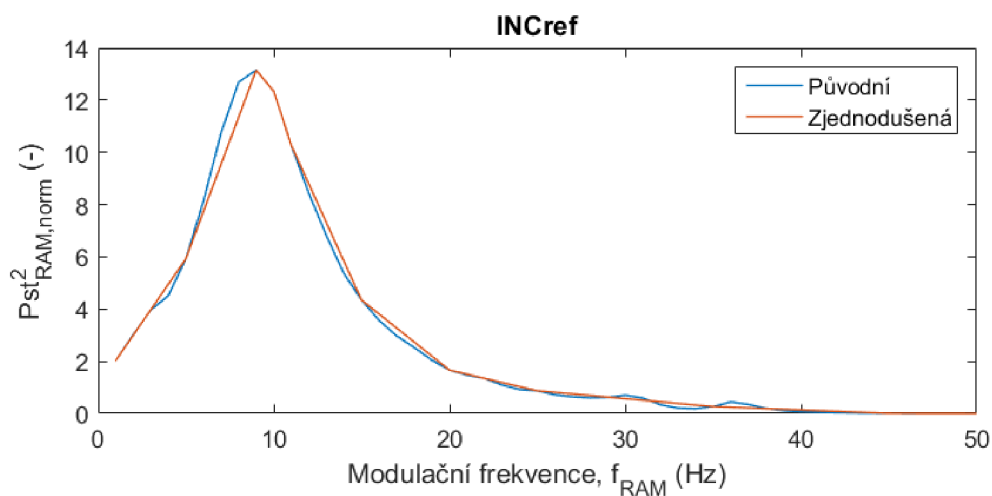
Obr. 6-20 Graf indexů LFI_{RAM} - odolnost

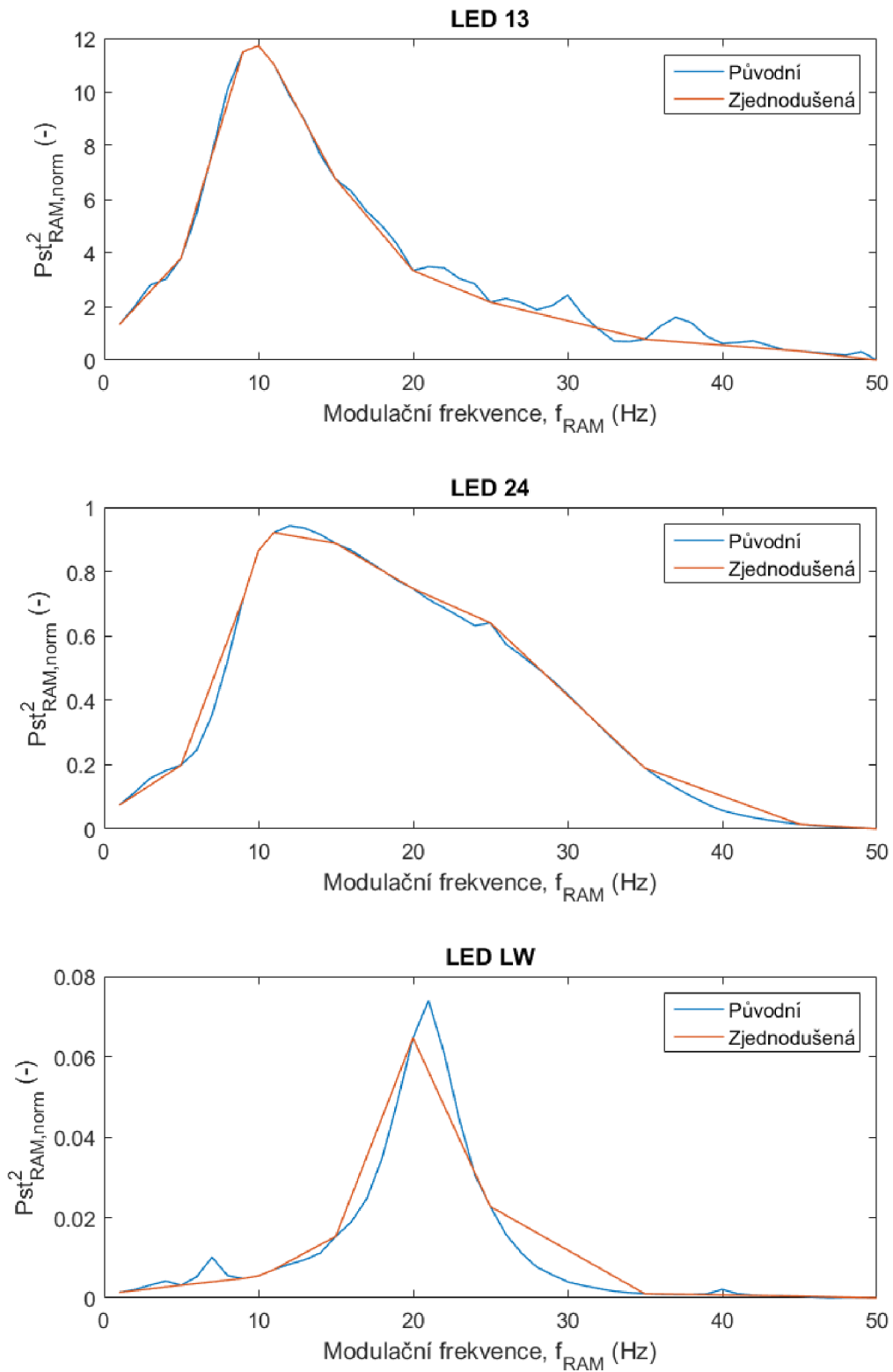
6.4.3 Testování citlivosti RAM s omezeným počtem bodů měření

Pokud bychom chtěli dále zkracovat dobu potřebnou pro otestování zdroje, je možné se pokusit změřit hodnoty jen v některých charakteristických bodech křivky. Vzhledem k tvaru křivek je důležité, aby byla pokryta oblast lokálního extrému a další body měření ležely v ostatních charakteristických ohybech křivky.

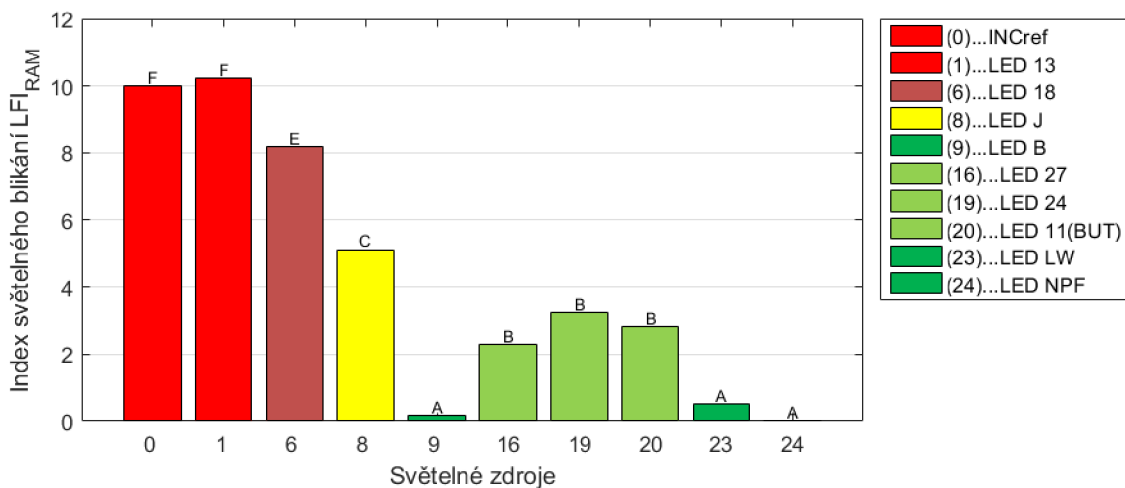
Následující výpočet indexů LFI_{RAM} zjednodušenou metodou je proveden výběrem hodnot z předchozího měření citlivosti.

Pro integraci jsou použity pouze hodnoty měřené na frekvencích 1, 5, 9, 10, 11, 15, 20, 25, 35, 45 a 50 Hz. Na následujících grafech je zobrazeno porovnání původní křivky změřených hodnot a proložení zjednodušenou verzí pro referenční zdroj a vybrané LED.





Obr. 6-21 Porovnání původní a zjednodušené norm. křivky citlivosti RAM



Obr. 6-22 Graf indexů LFI_{RAM} - citlivost, zjednodušená verze

Indexy získané z výběru pouze několika změřených hodnot jsou velmi blízko indexům, získaným při použití všech změřených dat. Přitom čas měření se zkrátil na

$$t_{\text{měření}} = 11 \cdot 20 = 220 \text{ s} = 3,67 \text{ min} \quad (5.11)$$

6.5 Porovnání klasifikačních indexů

V tabulce (Tab. 6-3) jsou srovnány výsledky, získané z jednotlivých způsobů výše uvedených testování. Je patrné, že u jednotlivých světelných zdrojů nedochází k výrazným výkyvům hodnot klasifikačního indexu. Procentuální vyjádření rozdílu mezi minimální a maximální hodnotou indexu jednoho zdroje nemá příliš dobrou vypovídací hodnotu, jelikož závisí na celkové hodnotě indexu. Nevýznamný rozdíl u odolného zdroje vede na velkou hodnotu rozdílu, avšak zařazení do třídy klasifikační stupnice neovlivní. Vhodnějším způsobem porovnání je výpočet korelačního indexu mezi jednotlivými měřeními přes všechny testované světelné zdroje. Variant porovnání lze zvolit mnoho, proto byl výpočet koeficientu proveden jen pro porovnání indexů získaných měřením citlivosti a odolnosti se shodnými parametry měření, a dále srovnání ostatních typů měření s měřením citlivosti v rozsahu meziharmonické frekvence 1-1000 Hz, která byla zvolena jako referenční. Lze však předpokládat, že další srovnání by poskytla podobné výsledky.

Tab. 6-3 Hodnoty klasifikačních indexů pro popsané způsoby testování

Pořadí	Označení	Typ	LFI _{IH}				LFI _{RAM}					
			citlivost		odolnost		citlivost		odolnost			
			1-1000 Hz	1-1000 Hz	1-300 Hz	1-300 Hz	1-50 Hz	1-50 Hz	výběr	výběr		
1	INCref	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
2	LED 13	I	10,23	10,70	9,88	9,93	11,14	9,56	10,22	8,77	8,77	
7	LED18	II	8,40	8,44	7,93	7,95	8,89	7,31	8,18	6,72	6,72	
9	LED J	III	6,13	6,19	6,00	6,02	5,68	5,70	5,12	5,17	5,17	
10	LED B	IV	0,18	0,12	0,18	0,12	0,18	0,15	0,16	0,13	0,13	
17	LED27	V	2,62	2,57	2,62	2,56	2,39	2,37	2,29	2,27	2,27	
20	LED24	VI	4,45	4,44	4,44	4,43	3,84	4,17	3,24	3,55	3,55	
21	LED 11	VI	3,36	3,32	3,35	3,32	3,32	3,13	2,82	2,61	2,61	
24	LED LW	VII	0,68	0,69	0,68	0,69	0,66	0,66	0,50	0,50	0,50	
25	LED NPF	VIII	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,12	0,01	0,09	0,09	
Korelační koeficient												
Citlivost vs. odolnost			0,9995		1,0000		0,9906		0,9907			
První sloupec referenční			ref	0,9995	0,9994	0,9995	0,9956	0,9971	0,9938	0,9906		

6.6 Alternativní možnosti testování

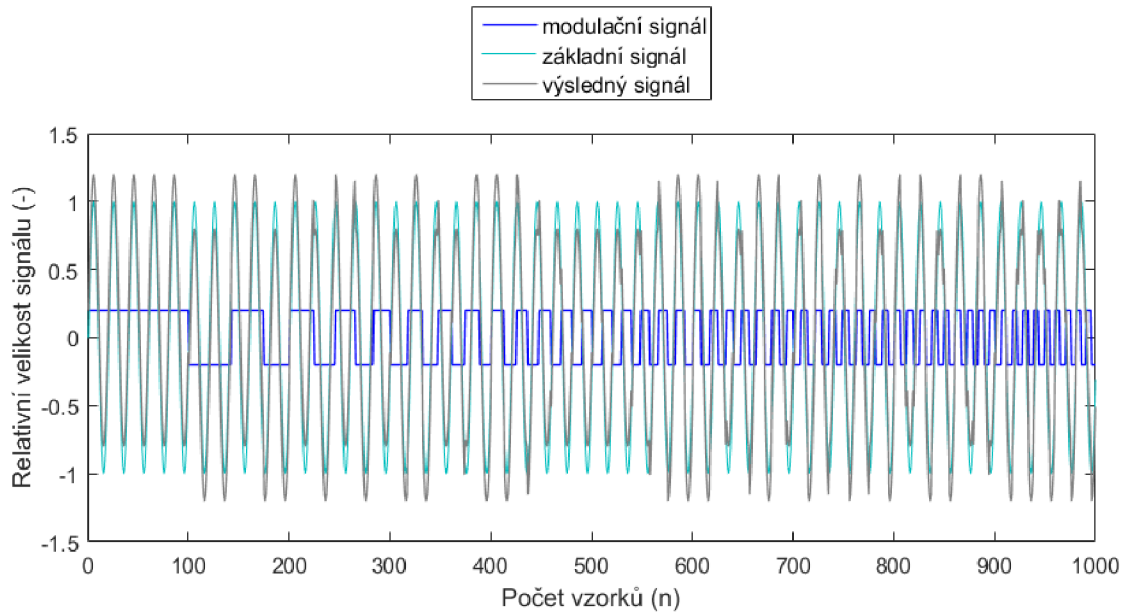
Dosud bylo testování prováděno pomocí modulace napětí s konstantními parametry a změřená data byla dodatečně zpracována výpočtem. To zavádí do procesu jistou nepřesnost, způsobenou statickým charakterem měření krátkodobé míry vjemu flikru pro jednotlivé body měření. Pro experimentální potřeby je měření ustálených hodnot výhodné, aby bylo možné měření interpretovat za přesně definovaných podmínek. V reálné síti je však průběh napětí ovlivňován různými vlivy, přechodnými jevy, kompozicí rušivých signálů a modulace základního napětí má stochastický charakter. To má samozřejmě vliv na výslednou hodnotu měření krátkodobé míry vjemu flikru.

Další možností testování by mohlo být použití kombinovaného testovacího signálu a měření krátkodobé míry vjemu flikru provést po celou dobu jeho trvání. Tím bychom získali výslednou hodnotu P_{st} , odpovídající citlivosti světelného zdroje, kterou by bylo možno použít přímo, případně s malou úpravou, jako klasifikační index.

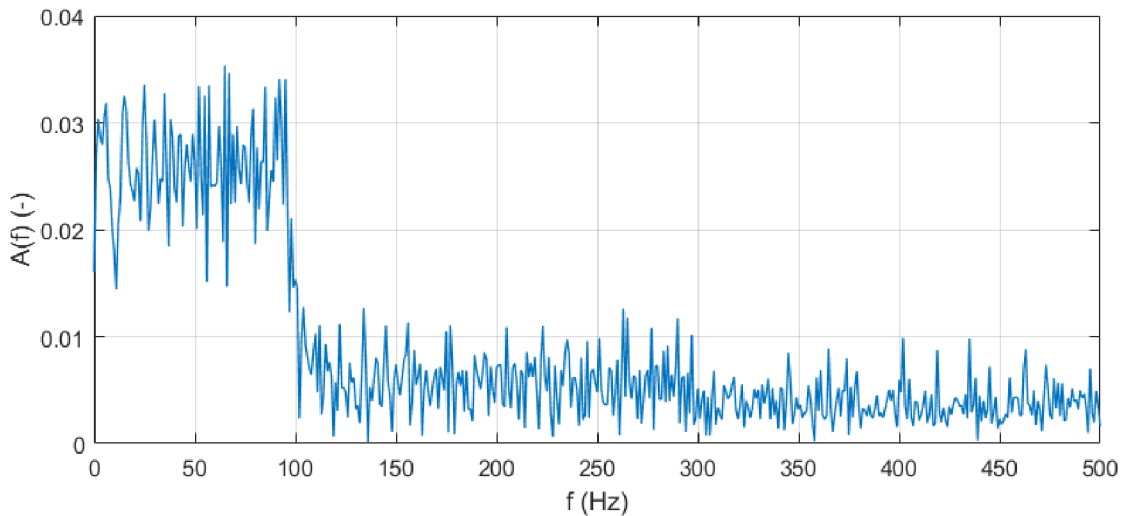
Kombinovaný modulační signál by měl koncentrovat signály různých průběhů a/nebo frekvencí. To lze v zásadě provést dvěma způsoby. Buď jako sekvenci nebo jako kompozici jednotlivých dílčích signálů.

Pro počáteční experiment by bylo možné použít obdélníkový průběh s pevně nastavenou velikostí modulace, ale s kontinuálně proměnnou modulační frekvencí, tzv. frekvenční rampou, s rozsahem např. 1 až 50 Hz, rozloženou do vhodného časového úseku, pravděpodobně v řádu desítek sekund. Na obrázku (Obr. 6-23) je uveden příklad

pro časový úsek 1 s. Jedná se pouze o ilustrativní příklad, jelikož na delším intervalu by průběh nebyl patrný. Pro testování by však tak krátký čas nebyl vhodný.



Obr. 6-23 Příklad modulace s proměnnou modulační frekvencí



Obr. 6-24 Frekvenční amplitudové spektrum výsledného signálu

Také by bylo možné signál poskládat sekvenčně, např. po úsecích stanoveného počtu period pro každou modulační frekvenci nebo pro různé tvary modulačního signálu. Do takového signálu dále zakomponovat např. signál HDO apod.

Možnosti použití kombinovaných signálů jsou široké a ověření výsledků měření s jejich využitím bude předmětem dalšího výzkumu.

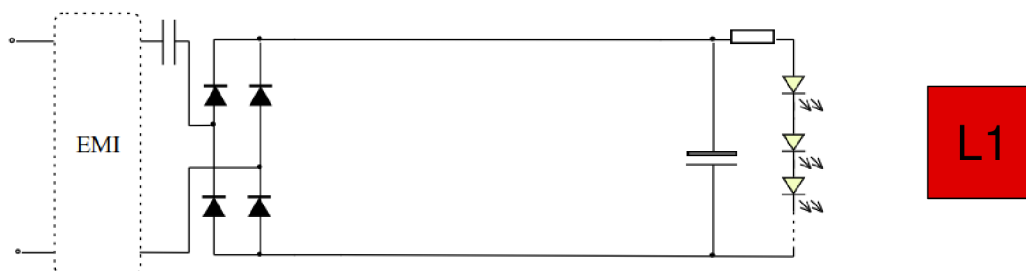
7. KLASIFIKACE LED/LED DRIVERŮ PODLE JEJICH ODOLNOSTI

7.1 Typové rozřídění driverů

Jak již bylo uvedeno, největší vliv na přenos kolísání napájecího napětí do světleného toku svítidel LED má konstrukce jejich napájecího zdroje. Rozdělení napájecích driverů podle topologie zapojení, vhodné pro tento účel, je uvedeno v [7]. Barevné značky vyjadřují odolnost vůči kolísání napájecího napětí. Nejhorší je červená, nejlepší tmavě zelená.

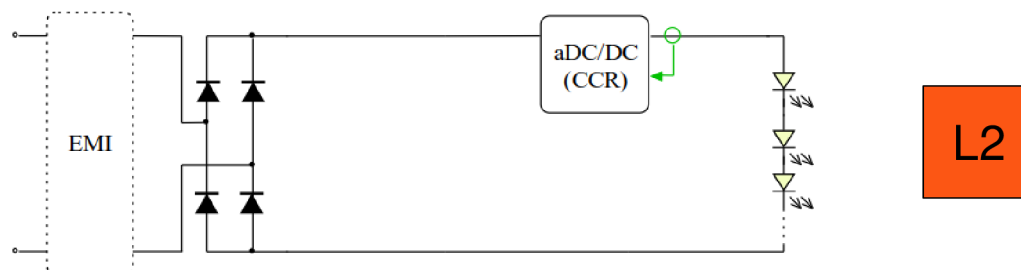
L1

Driver založený na kapacitním děliči napětí. Jedná se o nejjednodušší zapojení, obsahující můstkový usměrňovač síťového napětí, kondenzátor a omezovací rezistor. Tento driver je velmi levný a je určen pro lowend trh. Není použita žádná zpětná vazba pro řízení napájení LED. Tento typ je nejvíce citlivý na kolísání napětí. Může obsahovat vstupní odrušovací filtr EMI.



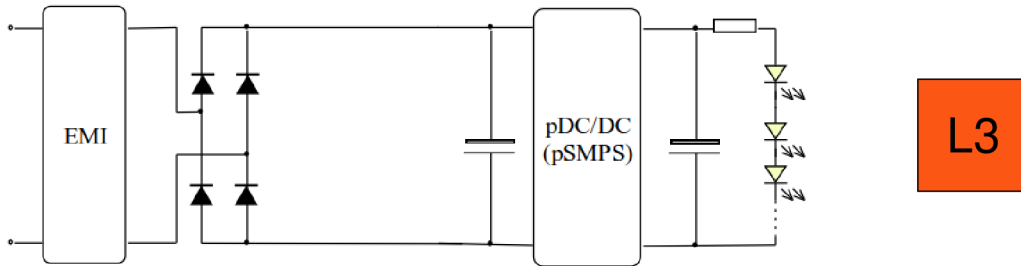
L2

Driver s regulátorem konstantního proudu (CCR – Constant Current Regulator). Na rozdíl od předchozího typu má tento driver zavedenou zpětnou vazbu, která slouží k řízení velikosti napájecího proudu pro LED prostřednictvím aktivního DC/DC měniče. To zlepšuje odolnost proti kolísání vstupního napětí. Záleží však na parametrech rušení, hlavně na jeho frekvenci.



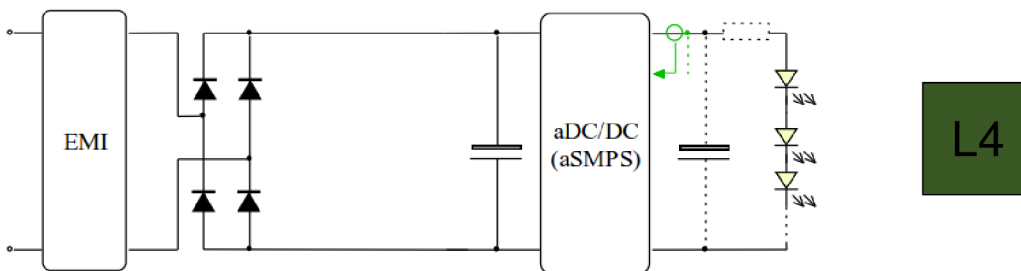
L3

Driver sestávající z pasivního usměrňovače a vyhlazovacího kondenzátoru napájeného "pasivním" DC-DC převodníkem. Pojem „pasivní“ u měniče je v tomto případě myšlen spínaný zdroj bez zpětné vazby (pSMPS – passive Switched-Mode Power Supply).



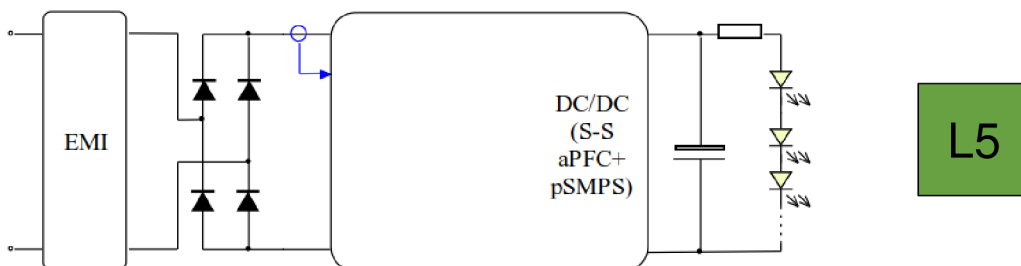
L4

Driver s podobnou topologií jako předchozí, kde převodník DC-DC je řízen zpětnovazební smyčkou (aSMPS – active Switched-Mode Power Supply).



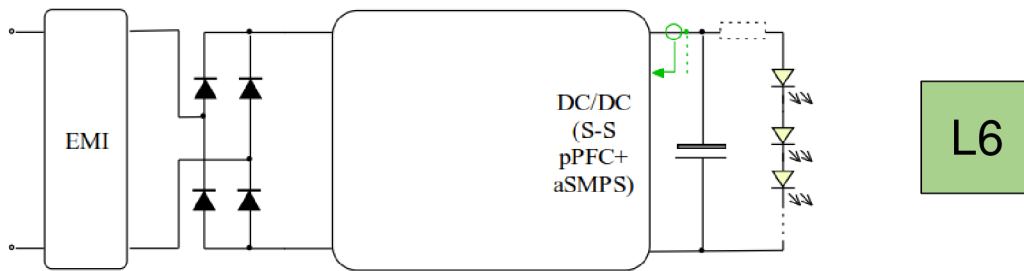
L5

Jednostupňový driver s aktivní PFC (Power Factor Correction) a převodníkem DC-DC s řízením vstupního proudu.



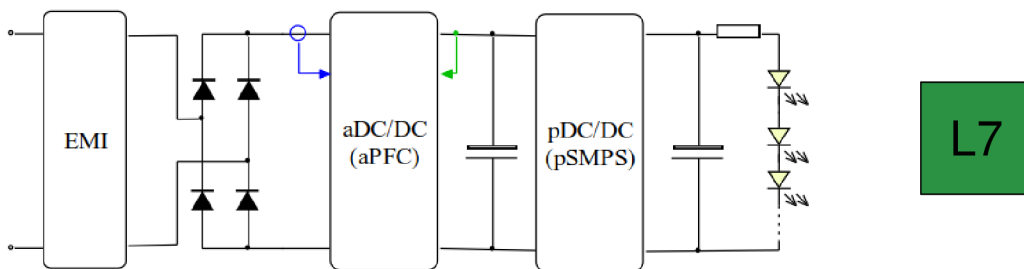
L6

Jednostupňový driver s "pasivním" PFC a DC-DC převodníkem s výstupní zpětnovazební smyčkou.



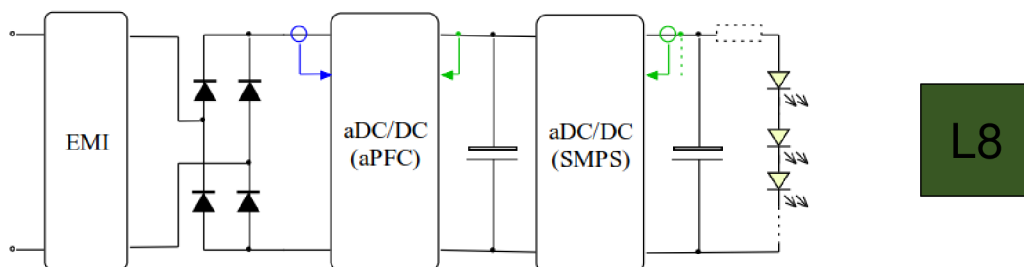
L7

Dvoustupňový driver s plně řízeným ovládním aktivní PFC a "pasivní" topologií DC-DC konvertoru.



L8

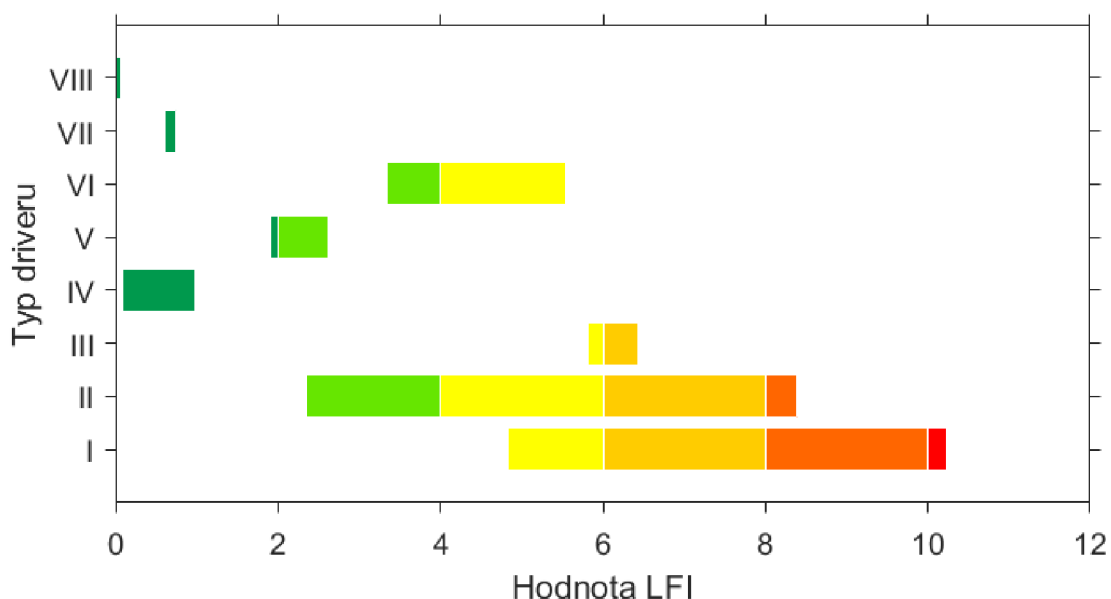
Driver s podobnou topologií jako předchozí, kde převodník DC-DC je řízen zpětnovazební smyčkou.



7.2 Rozložení LED v klasifikační stupnici podle typu driveru

Na obrázku (Obr. 7-1) jsou zobrazeny rozsahy vypočtených hodnot indexů LFI s odpovídajícími barvami tříd pro sadu světelných zdrojů LED, uvedenou v tabulce (Tab. 6-1), odpovídající typu použitého driveru. Je možné poznamenat, že celý rozsah stupnice je poměrně dobře pokryt.

LED zdroje s napájecími obvody topologie IV, V, VII a VIII, zařazené do tříd A a B, vykazují vysokou odolnost ke kolísání napájecího napětí. Naopak, světelné zdroje, vybavené typy driverů I a II, mohou být označeny indexem od B do F, v závislosti na konkrétním provedení driveru, zvoleném daným výrobcem. [8]



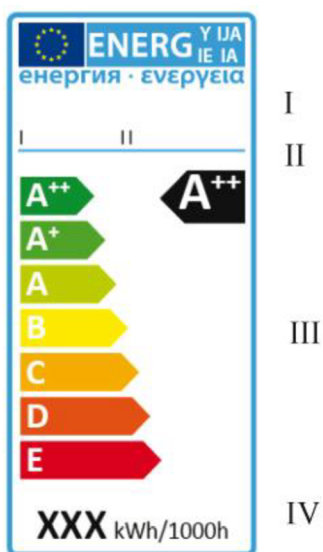
Obr. 7-1 Rozsah indexů LFI_{IH} v závislosti na typu driveru [8]

7.3 Označení světelných zdrojů

Jako vzor pro označování světelných zdrojů z hlediska jejich citlivosti na kolísání napájecího napětí by bylo možné využít obdobný postup, který stanovuje evropská legislativa pro označování světelných zdrojů energetickými štítky. Ty nesou informaci o energetické náročnosti každého výrobku v rámci stanovené klasifikační škály. Na základě označení energetickým štítkem se může zákazník snadno rozhodnout, který typ svítidla nebo světelného zdroje si koupí.

Obecným předpisem pro uvádění spotřeby energie a jiných zdrojů na energetických štítcích výrobků spojených se spotřebou energie a v normalizovaných informacích o výrobku je „Směrnice evropského parlamentu a rady 2010/30/EU“ ze dne 19. května 2010. Upřesnění podmínek a postupů pro uvádění spotřeby energie na energetických štítcích elektrických světelných zdrojů a svítidel a stanovení přesné formy energetických

štítků a jejich obsahu je uvedeno v „Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) č. 874/2012“ ze dne 12. července 2012, kterým se doplňuje výše uvedená směrnice. [9] [10]



Obr. 7-2 Energetický štítek pro elektrické světelné zdroje prezentované v místě prodeje [10]

Označování elektrických spotřebičů (nejen světelných zdrojů) energetickými štítky se již obecně zažilo, čímž byl vytvořen jakýsi standard pro jednoduché a přehledné sdělení relevantních informací o výrobku. Po dokončení a ověření klasifikační metody by mohl být štítek, deklarující odolnost světelných zdrojů proti kolísání napájecího napětí, buď přidán separátně k energetickému štítku, nebo by případně mohlo dojít ke sloučení těchto informací do jednoho celku.

8. ZÁVĚR

V této diplomové práci byla provedena analýza možností, jak co možná nejlépe otestovat světelný zdroj LED ve vztahu ke kolísání napájecího napětí. Práce vychází z již dříve provedených měření, která byla doplněna podle potřeby měřeními novými.

Cílem práce bylo nastavit a otestovat různé možnosti optimalizace klasifikační metody, které by vedly ke zkrácení celkového času testovacího procesu při zachování dostatečné vypovídací schopnosti.

Z výsledků jednotlivých postupů lze usoudit, že simplifikace klasifikační metody nezpůsobuje její zásadní degradaci. Korelace mezi soubory klasifikačních indexů, které byly získány pro testované světelné zdroje s různými parametry nastavení testovacího procesu nebo následného zpracování dat, je vysoká.

Pro testování světelných zdrojů byl použit experimentální měřicí systém, založený na platformě LabView. Jedná se o sofistikovaný automatizovaný nástroj, který velmi usnadňuje získávání potřebných výsledků. V průběhu testování byly, na základě zkušeností, provedeny drobné úpravy, které optimalizují některé typy testovacích procesů, a byla upravena struktura datových souborů.

Do budoucna by bylo vhodné do systému implementovat i možnost zpracování získaných dat a jejich vyhodnocení, které je v současnosti realizováno separátně pomocí výpočtového software Matlab. V souvislosti s předpokládaným rozšířením možností nastavení modulačního signálu je uvažováno o možnosti externího řízení signálového generátoru pomocí parametrizačních souborů. To by umožnilo použití kombinovaných testovacích signálů, které by mohly vést k získání klasifikačního indexu přímo.

Vzhledem k současnému masivnímu rozšiřování světelných zdrojů LED do všech oblastí, kde je užíváno umělé osvětlení, budou na kvalitu jejich provedení kladeny stále vyšší nároky. Z důvodu stále většího rušení v elektrické síti, způsobeného, mimo jiné, moderními spotřebiči, se stává odolnost světelných zdrojů proti kolísání napětí jedním ze stěžejních parametrů.

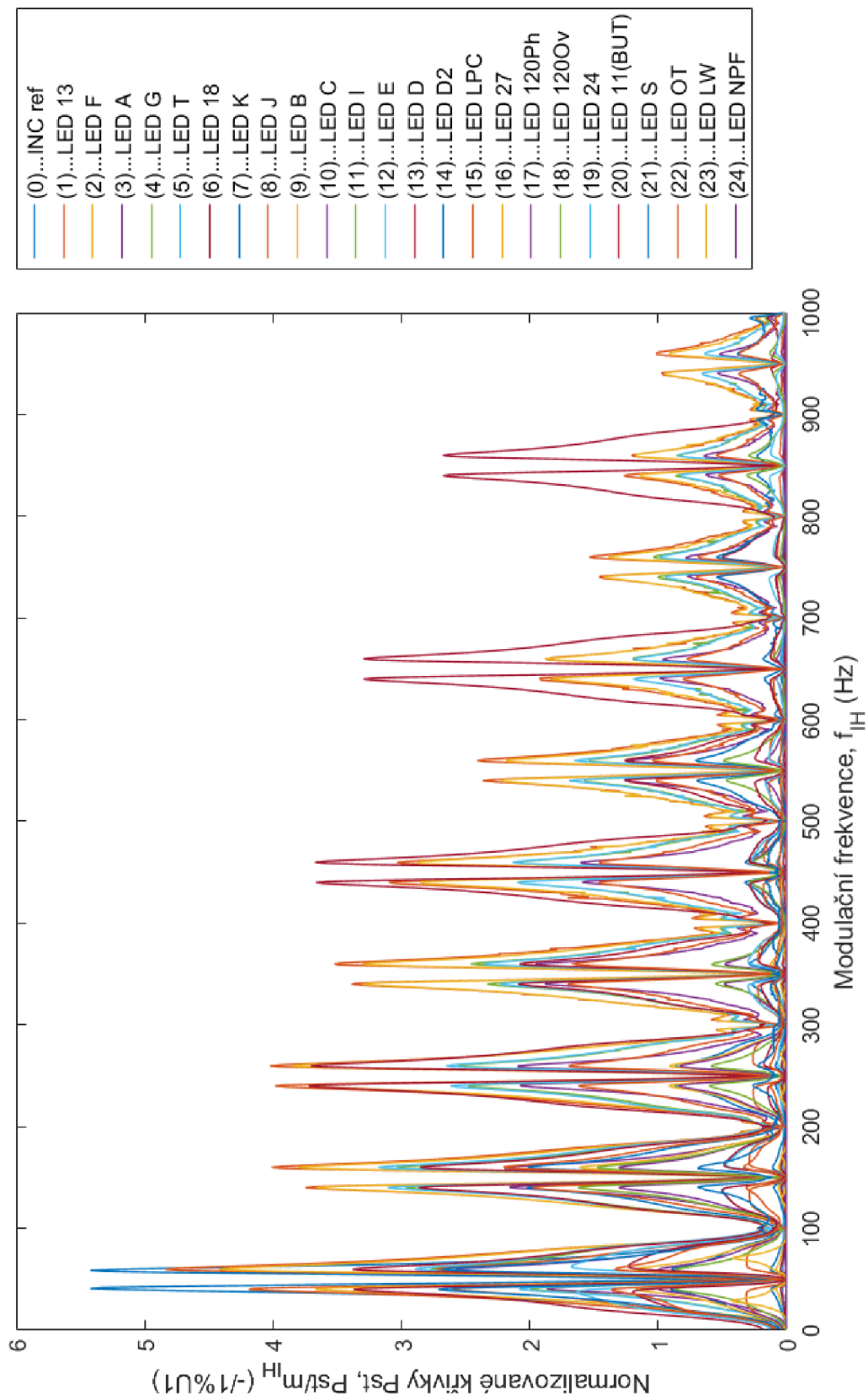
Literatura

- [1] DRÁPELA, Jiří. *Kvalita elektrické energie a EMC*. Brno: VUT v Brně, 2018.
- [2] DRÁPELA, Jiří. *Blikání světelných zdrojů způsobené mezipharmonickými složkami napětí: Light flicker of lamps caused by interharmonic voltages : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTIUM, 2009. ISBN isbn978-80-214-4007-4.
- [3] HANZELKA, Zbigniew a Andrzej BIENÍ. *Poruchy napětí: Flikr*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006.
- [4] LANGELLA, Roberto, Alfredo TESTA a Jiří DRÁPELA. *Voltage Fluctuations and Light Flicker in Modern Electrical Power Systems: New Findings and Challenges: Part 3: Toward New Flickermeters able to take into account lamps different from incandescent*. Ljubljana: ICHQP, 2018.
- [5] DRÁPELA, Jiří, Jan ŠLEZINGR a Jaromír BOK. *Kvalita elektrické energie a EMC. Laboratorní cvičení: 3.1.4 Blikání světelných zdrojů způsobené kolísáním napětí*. Brno: VUT v Brně, 2013.
- [6] SANTARIUS, Pavel. *Elektromagnetická kompatibilita*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [7] DRÁPELA, Jiří, Roberto LANGELLA a Alfredo TESTA. *Voltage Fluctuations and Light Flicker in Modern Electrical Power Systems: New Findings and Challenges: Part 2: Light Flicker effects produced by voltage fluctuations on different Lamp technologies*. Ljubljana: ICHQP, 2018.
- [8] Adam J. Collin, Sasa Z. Djokic, Jiri Drapela, Roberto Langella and Alfredo Testa. Light Flicker and Power Factor Labels for Comparing LED Lamp Performance. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 9pp. (in print)
- [9] Směrnice evropského parlamentu a rady 2010/30/EU: o uvádění spotřeby energie a jiných zdrojů na energetických štítcích výrobků spojených se spotřebou energie a v normalizovaných informacích o výrobku. In: *Úřední věstník Evropské unie*. Štrasburg, 2010.
- [10] Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) č. 874/2012: kterým se doplňuje směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/30/EU, pokud jde o uvádění spotřeby energie na energetických štítcích elektrických světelných zdrojů a svítidel. In: *Úřední věstník Evropské unie*. Brusel, 2012.
- [11] *PNE 33 3430-2: Parametry kvality elektrické energie – Část 2: Kolísání napětí*. 4.vydání. 2015.

Seznam příloh

Příloha 1 - Normalizované křivky citlivosti P_{stIH}	66
Příloha 2 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-7	67
Příloha 3 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-8	68
Příloha 4 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-9	69

Příloha 1 - Normalizované křivky citlivosti Pst_{IH}



Příloha 2 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-7

Zdroj	$W_{301-1000} = 0,5$			$W_{301-1000} = 0,4$			$W_{301-1000} = 0,3$			$W_{301-1000} = 0,2$			$W_{301-1000} = 0,1$		
	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI
0	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00
1	785,86	0,89	11,89	698,33	0,84	11,21	630,25	0,79	10,65	581,63	0,76	10,23	552,45	0,74	9,97
2	666,79	0,82	10,95	588,00	0,77	10,29	526,73	0,73	9,74	482,96	0,69	9,32	456,70	0,68	9,07
3	178,36	0,42	5,67	157,52	0,40	5,32	141,30	0,38	5,04	129,72	0,36	4,83	122,77	0,35	4,70
4	302,33	0,55	7,38	259,96	0,51	6,84	227,01	0,48	6,39	203,47	0,45	6,05	189,35	0,44	5,84
5	318,01	0,56	7,56	276,38	0,53	7,05	244,01	0,49	6,63	220,89	0,47	6,30	207,01	0,45	6,10
6	617,58	0,79	10,54	520,90	0,72	9,68	445,71	0,67	8,96	392,00	0,63	8,40	359,77	0,60	8,05
7	38,25	0,20	2,62	34,93	0,19	2,51	32,35	0,18	2,41	30,51	0,17	2,34	29,40	0,17	2,30
8	254,29	0,50	6,76	234,69	0,48	6,50	219,43	0,47	6,28	208,54	0,46	6,13	202,01	0,45	6,03
9	0,22	0,01	0,20	0,20	0,01	0,19	0,19	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18
10	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,10	0,05	0,01	0,09	0,04	0,01	0,09	0,04	0,01	0,08
11	0,09	0,01	0,12	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11
12	0,16	0,01	0,17	0,13	0,01	0,15	0,11	0,01	0,14	0,09	0,01	0,13	0,08	0,01	0,12
13	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11
14	0,55	0,02	0,32	0,51	0,02	0,30	0,47	0,02	0,29	0,44	0,02	0,28	0,42	0,02	0,28
15	6,67	0,08	1,10	6,12	0,08	1,05	5,70	0,08	1,01	5,40	0,07	0,99	5,22	0,07	0,97
16	38,77	0,20	2,64	38,54	0,20	2,63	38,37	0,20	2,63	38,24	0,20	2,62	38,17	0,20	2,62
17	29,23	0,17	2,29	28,46	0,17	2,26	27,86	0,17	2,24	27,42	0,17	2,22	27,17	0,16	2,21
18	23,74	0,15	2,07	22,23	0,15	2,00	21,05	0,15	1,95	20,20	0,14	1,91	19,70	0,14	1,88
19	112,11	0,33	4,49	111,27	0,33	4,47	110,62	0,33	4,46	110,16	0,33	4,45	109,88	0,33	4,45
20	64,43	0,25	3,41	63,63	0,25	3,38	63,00	0,25	3,37	62,56	0,25	3,36	62,29	0,25	3,35
21	170,79	0,41	5,54	170,64	0,41	5,54	170,53	0,41	5,54	170,44	0,41	5,54	170,39	0,41	5,54
22	62,24	0,25	3,35	62,17	0,25	3,34	62,12	0,25	3,34	62,09	0,25	3,34	62,07	0,25	3,34
23	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68
24	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01

Příloha 3 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-8

Zdroj	$W_{101-300} = 0,5$			$W_{101-300} = 0,4$			$W_{101-300} = 0,3$			$W_{101-300} = 0,2$			$W_{101-300} = 0,1$		
	f Pst ²	LFS	LFI	f Pst ²	LFS	LFI	f Pst ²	LFS	LFI	f Pst ²	LFS	LFI	f Pst ²	LFS	LFI
0	555,72	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,70	0,75	10,00
1	752,83	0,87	11,64	679,46	0,82	11,06	622,39	0,79	10,58	581,63	0,76	10,23	557,17	0,75	10,01
2	638,72	0,80	10,72	571,97	0,76	10,15	520,04	0,72	9,67	482,96	0,69	9,32	460,71	0,68	9,11
3	171,81	0,41	5,56	153,77	0,39	5,26	139,74	0,37	5,01	129,72	0,36	4,83	123,71	0,35	4,72
4	293,12	0,54	7,26	254,70	0,50	6,77	224,81	0,47	6,36	203,47	0,45	6,05	190,66	0,44	5,86
5	319,65	0,57	7,58	277,32	0,53	7,06	244,40	0,49	6,63	220,89	0,47	6,30	206,78	0,45	6,10
6	523,10	0,72	9,70	466,91	0,68	9,17	423,21	0,65	8,73	392,00	0,63	8,40	373,27	0,61	8,20
7	59,15	0,24	3,26	46,87	0,22	2,90	37,33	0,19	2,59	30,51	0,17	2,34	26,42	0,16	2,18
8	249,94	0,50	6,71	232,20	0,48	6,46	218,40	0,47	6,27	208,54	0,46	6,13	202,63	0,45	6,04
9	0,21	0,01	0,20	0,20	0,01	0,19	0,19	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18	0,18	0,01	0,18
10	0,05	0,01	0,10	0,05	0,01	0,09	0,04	0,01	0,09	0,04	0,01	0,09	0,04	0,01	0,08
11	0,09	0,01	0,12	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11
12	0,12	0,01	0,14	0,11	0,01	0,14	0,10	0,01	0,13	0,09	0,01	0,13	0,09	0,01	0,13
13	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11
14	0,55	0,02	0,31	0,50	0,02	0,30	0,47	0,02	0,29	0,44	0,02	0,28	0,43	0,02	0,28
15	6,99	0,08	1,12	6,31	0,08	1,07	5,78	0,08	1,02	5,40	0,07	0,99	5,17	0,07	0,96
16	56,01	0,24	3,17	48,40	0,22	2,95	42,47	0,21	2,76	38,24	0,20	2,62	35,70	0,19	2,53
17	39,91	0,20	2,68	34,56	0,19	2,49	30,40	0,17	2,34	27,42	0,17	2,22	25,64	0,16	2,15
18	34,14	0,18	2,48	28,16	0,17	2,25	23,52	0,15	2,06	20,20	0,14	1,91	18,21	0,13	1,81
19	112,24	0,34	4,49	111,35	0,33	4,48	110,65	0,33	4,46	110,16	0,33	4,45	109,86	0,33	4,45
20	64,92	0,25	3,42	63,91	0,25	3,39	63,12	0,25	3,37	62,56	0,25	3,36	62,22	0,25	3,35
21	173,26	0,42	5,58	172,05	0,41	5,56	171,11	0,41	5,55	170,44	0,41	5,54	170,04	0,41	5,53
22	62,92	0,25	3,36	62,57	0,25	3,36	62,29	0,25	3,35	62,09	0,25	3,34	61,97	0,25	3,34
23	2,60	0,05	0,68	2,60	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68
24	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01

Příloha 4 - Hodnoty grafu indexů z Obr. 6-9

Zdroj	$W_{101-1000} = 0,5$			$W_{101-1000} = 0,4$			$W_{101-1000} = 0,3$			$W_{101-1000} = 0,2$			$W_{101-1000} = 0,1$		
	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI	$\int Pst^2$	LFS	LFI
0	555,72	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,71	0,75	10,00	555,70	0,75	10,00
1	957,07	0,98	13,12	796,16	0,89	11,97	671,02	0,82	10,99	581,63	0,76	10,23	527,99	0,73	9,75
2	822,55	0,91	12,17	677,01	0,82	11,04	563,81	0,75	10,07	482,96	0,69	9,32	434,44	0,66	8,84
3	220,45	0,47	6,30	181,57	0,43	5,72	151,32	0,39	5,22	129,72	0,36	4,83	116,76	0,34	4,58
4	391,98	0,63	8,40	311,19	0,56	7,48	248,35	0,50	6,69	203,47	0,45	6,05	176,54	0,42	5,64
5	416,77	0,65	8,66	332,82	0,58	7,74	267,53	0,52	6,94	220,89	0,47	6,30	192,90	0,44	5,89
6	748,68	0,87	11,61	595,82	0,77	10,35	476,92	0,69	9,26	392,00	0,63	8,40	341,04	0,58	7,83
7	66,89	0,26	3,47	51,30	0,23	3,04	39,17	0,20	2,65	30,51	0,17	2,34	25,31	0,16	2,13
8	295,69	0,54	7,29	258,34	0,51	6,82	229,29	0,48	6,42	208,54	0,46	6,13	196,09	0,44	5,94
9	0,25	0,02	0,21	0,22	0,01	0,20	0,20	0,01	0,19	0,18	0,01	0,18	0,17	0,01	0,18
10	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,05	0,01	0,10	0,04	0,01	0,09	0,04	0,01	0,08
11	0,11	0,01	0,14	0,09	0,01	0,13	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,10
12	0,19	0,01	0,18	0,15	0,01	0,16	0,11	0,01	0,14	0,09	0,01	0,13	0,08	0,01	0,12
13	0,10	0,01	0,13	0,08	0,01	0,12	0,07	0,01	0,11	0,06	0,01	0,11	0,06	0,01	0,10
14	0,66	0,03	0,34	0,57	0,02	0,32	0,49	0,02	0,30	0,44	0,02	0,28	0,41	0,02	0,27
15	8,26	0,09	1,22	7,03	0,08	1,13	6,08	0,08	1,05	5,40	0,07	0,99	4,99	0,07	0,95
16	56,54	0,24	3,19	48,70	0,22	2,96	42,60	0,21	2,77	38,24	0,20	2,62	35,63	0,19	2,53
17	41,72	0,20	2,74	35,59	0,19	2,53	30,83	0,18	2,36	27,42	0,17	2,22	25,38	0,16	2,14
18	37,67	0,19	2,60	30,19	0,17	2,33	24,36	0,16	2,09	20,20	0,14	1,91	17,71	0,13	1,79
19	114,19	0,34	4,53	112,46	0,34	4,50	111,12	0,33	4,47	110,16	0,33	4,45	109,58	0,33	4,44
20	66,80	0,26	3,47	64,98	0,25	3,42	63,57	0,25	3,38	62,56	0,25	3,36	61,95	0,25	3,34
21	173,60	0,42	5,59	172,25	0,42	5,57	171,19	0,41	5,55	170,44	0,41	5,54	169,99	0,41	5,53
22	63,07	0,25	3,37	62,65	0,25	3,36	62,32	0,25	3,35	62,09	0,25	3,34	61,95	0,25	3,34
23	2,61	0,05	0,68	2,60	0,05	0,68	2,60	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68	2,59	0,05	0,68
24	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01