



Diplomová práce

Řídicí program pro experiment na měření prahu viditelnosti flikru na klasických žárovkách

Studijní program:

N0613A140028 Informační technologie

Autor práce:

Bc. Jan Hergesel

Vedoucí práce:

Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Řídicí program pro experiment na měření prahu viditelnosti flikru na klasických žárovkách

Jméno a příjmení:

Bc. Jan Hergesel

Osobní číslo:

M22000021

Studijní program:

N0613A140028 Informační technologie

Zadávající katedra:

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Akademický rok:

2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou měření prahu viditelnosti flikru a se stávajícím měřicím stanovištěm.
2. Řídicí program měřicího stanoviště doplňte o rozhraní pro komunikaci s potřebným HW a vhodné kalibrační metody, proveďte kalibrační měření a vyhodnoťte je.
3. Implementujte proceduru na měření prahu viditelnosti flikru za použití potřebného HW.
4. Na vhodném počtu figurantů demonstруйте funkčnost programu.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 až 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] SHEN, Y., V. M. RICHARDS a W. DAI, 2015. A MATLAB toolbox for the efficient estimation of the psychometric function using the updated maximum-likelihood adaptive procedure. *Behavior research methods* [online]. 47(1), 13–26 [vid. 2021-06-21]. ISSN 1554-351X. Dostupné z: doi:10.3758/s13428-014-0450-6
- [2] WICHMANN, Felix A. a N. Jeremy HILL, 2001. The psychometric function: I. Fitting, sampling, and goodness of fit. *Perception & Psychophysics* [online]. 63(8), 1293–1313 [vid. 2021-06-21]. ISSN 1532-5962. Dostupné z: doi:10.3758/BF03194544
- [3] WATSON, Andrew B. a Denis G. PELLI, 1983. Quest: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics* [online]. 33(2), 113–120 [vid. 2020-10-02]. ISSN 0031-5117, 1532-5962. Dostupné z: doi:10.3758/BF03202828

Vedoucí práce: Ing. Leoš Kukačka, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. RNDr. Pavel Satrapa, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 12. října 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Řídicí program pro experiment na měření prahu viditelnosti flikru na klasických žárovkách

Abstrakt

Práce je součástí projektu, který má za cíl aktualizovat původní napěťový flikrmetr pro moderní elektrické sítě a LED svítidla. Cílem práce bylo připravit program pro experiment, který měří práh viditelnosti flikru na klasických žárovkách. Řídicí program experimentu byl napsán v jazyce C# a připraven ve dvou variantách. V první variantě je průběh řízen modulací světelného toku, v druhé modulací napětí s možností volby mezi střídavým nebo stejnosměrným proudem. Pro první variantu bylo potřeba brát ohled na charakter žárovky, kdy sinusový napěťový průběh nutně nevede na sinusový světelný průběh. Za tímto účelem byly připraveny měřicí programy a skripty pro vyhodnocení. Na základě dat byly zavedeny korekce v podobě korekce faktoru zesílení, korekce efektivní hodnotou a transformace vstupního napětí, která zajišťuje sinusový světelný průběh. Data z první varianty experimentu byla srovnána s totožným experimentem provedeným na LED a s původním světelným flikrmetrem. V obou případech byly u některých frekvencí nalezeny rozdíly. U druhé varianty bylo provedeno srovnání mezi střídavým a stejnosměrným proudem, kde nebyly nalezeny významné rozdíly. Při srovnání s napěťovým flikrmetrem byly rozdíly obdobné jako u první varianty.

Klíčová slova

flikr, žárovka, flikrmetr, C#, Quest, Matlab

Control Program for the Measurements of Flicker Visibility Threshold on Incandescent Lamps

Abstract

This work is part of a project to update the original voltage flickermeter for modern electrical grids and LED luminaires. The aim of the work was to prepare a program for an experiment which measures the flicker visibility threshold on incandescent lamps. The control program of the experiment was written in C# and prepared in two variants. In the first variant the process is controlled by luminous flux modulation, in the second by voltage modulation with the choice between AC or DC. For the first variant it was necessary to consider the nature of the lamp, where a sinusoidal voltage waveform does not necessarily lead to a sinusoidal light waveform. For this purpose, measurement programs and evaluation scripts were prepared. Based on the data, corrections in the form of gain factor correction, RMS correction and input voltage transformation to ensure a sinusoidal light waveform were introduced. The data from the first variant of the experiment were compared with an identical experiment performed on the LED and with the original light flickermeter. In both cases, differences were found for some frequencies. For the second variant, a comparison was made between AC and DC, where no significant differences were found. When compared with a voltage flicker meter, the differences were similar to the first variant.

Keywords

flicker, incandescent lamp, flickermeter, Quest, C#, Matlab

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doktoru Kukačkovi za jeho vedení, konzultace a rady, které mi během práce poskytnul. Dále bych chtěl poděkovat všem figurantům, kteří se měření účastnili, protože bez nich by práce nebyla proveditelná.

Obsah

Úvod.....	15
Teoretická část	17
1 Žárovka	17
2 Flikrmetr	19
2.1 Napěťový flikrmetr	19
2.2 Světelný flikrmetr	20
3 Základní psychofyzické metody	23
3.1 Metoda stálých podnětů	23
3.2 Adaptivní metody a metoda nastavení	23
3.3 Metoda limitů.....	24
3.4 Metoda schodiště	24
3.5 Algoritmus Quest.....	25
3.5.1 Quest v Psychtoolboxu	26
Praktická část	29
4 Návrh experimentu	29
4.1 Použité vybavení.....	29
4.2 Vlastnosti žárovky v rámci experimentu	31
5 Rozhraní pro řízení experimentů	34
5.1 Implementace ovládání Kikusui v režimu zdroje	36
5.2 Implementace zesilování průběhů pomocí Kikusui.....	37
5.2.1 Výpočet délky signálu a jeho dělení na bloky	40
5.2.2 Přivádění signálů přes NI 6351 do Kikusui	43
5.3 Srovnání Kikusui v režimu zdroje a zesilovače.....	44
6 Kalibrace.....	46
6.1 Program pro nalezení závislostí na přiváděném napětí	47
6.1.1 Vyhodnocení dat a implementace závislostí do programu.....	48

6.2	Program pro nalezení faktoru zesílení	49
6.2.1	Výběr vhodných žárovek	50
6.3	Program pro ukládání průběhů napětí a světelných toků.....	51
6.3.1	Analýza průběhů z fotodiod.....	51
7	Příprava tříd pro řízení experimentů.....	58
7.1	Řídicí program varianty řízené modulací světelného toku	59
7.1.1	Uživatelské rozhraní pro experiment	61
7.2	Řídicí program varianty řízené modulací napětí	62
8	Demonstrace funkčnosti na figurantech	64
8.1	Vyhodnocení varianty řízené modulací světelného toku	65
8.2	Vyhodnocení varianty řízené modulací napětí.....	67
8.3	Zhodnocení výsledků.....	69
	Závěr.....	70
	Použitá literatura.....	72

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma napěťového flikrmetru [2].....	19
Obrázek 2: Schéma světelného flikrmetru [3].....	21
Obrázek 3: Světelný box	29
Obrázek 4: Zapojení hardwaru	30
Obrázek 5: Zjednodušený diagram tříd, kde bílé označené třídy byly vytvořeny před touto prací, modré byly v rámci práce rozšířeny, žluté byly kompletně vytvořeny v rámci práce	34
Obrázek 6: Grafické uživatelské rozhraní aplikace.....	35
Obrázek 7: Znázornění problému s délkou signálu.....	40
Obrázek 8: Zapojení pro kalibraci hledající závislosti	47
Obrázek 9: Volba nastavení pro experiment se žárovkami	49
Obrázek 10: Rozhraní pro řízení prvního experimentu.....	62

Seznam grafů

Graf 1.1: Ukázka spektra dle Planckova zákona.....	18
Graf 2.1: Porovnání normalizovaných váhových filtrů.....	21
Graf 4.1: Ukázka faktoru zesílení v závislosti na frekvenci modulace.....	32
Graf 4.2: Srovnání tvarů napěťového průběhu a světelného toku bez transformace	33
Graf 4.3: Statická charakteristika	33
Graf 5.1: Srovnání obou režimů Kikusui	45
Graf 6.1: Spektrum žárovky naměřené na pozorovací plošce.....	47
Graf 6.2: Závislost jasu na napětí z fotodiod	48
Graf 6.3: Ukázka srovnání faktorů zesílení některých žárovek	50
Graf 6.4: THD vypočtené z naměřených dat signálů bez korekcí	52
Graf 6.5: Statické charakteristiky jednotlivých frekvencí bez korekce	53
Graf 6.6: THD z naměřených dat signálů s korekcí faktorem zesílení a transformací	54
Graf 6.7: Statické charakteristiky po korekci transformací a faktorem zesílení	54
Graf 6.8: Střední hodnota signálu z fotodiod po korekci transformací a faktorem zesílení	55
Graf 6.9: Střední hodnota signálu z fotodiod po korekci efektivní hodnoty.....	56

Graf 6.10: Statické charakteristiky po aplikaci všech korekcí	57
Graf 7.1: Měření při střídavém proudu s modulací 0,19 % a modulační frekvencí 5 Hz	63
Graf 8.1: Citlivost na 1% modulaci v závislosti na frekvenci	65
Graf 8.2: Porovnání naměřených dat s tvarem váhového filtru IEC světelného flickrmetru.....	66
Graf 8.3: Srovnání naměřených prahů z experimentů řízených modulací světelného toku.....	66
Graf 8.4: Srovnání prahů při použití žárovky a LED s vysokou teplotou chromatičnosti	67
Graf 8.5: Porovnání naměřených dat s tvarem váhového filtru IEC napěťového flickrmetru...	68
Graf 8.6: Srovnání naměřených prahů z experimentů řízených modulací napětí	68
Graf 8.7: Spektrum LED s vysokou a nízkou teplotou chromatičnosti	69

Seznam tabulek

Tabulka 1: Metody pro řízení Kikusui	37
Tabulka 2: Veřejné metody pro práci s průběhy ve třídě WaveformGenerator	39
Tabulka 3: Veřejné metody pro přivádění bloků signálu do NI 6351 a poté do Kikusui	44
Tabulka 4: Koeficienty X korekce	56
Tabulka 5: Nastavení korekcí podle frekvence a úrovně modulace.....	57
Tabulka 6: Parametry konstruktorů tříd pro řízení experimentu.....	58

Seznam zdrojových kódů

Zdrojový kód 3.1: Zápis možných testovaných hodnot v prostředí Matlab.....	27
Zdrojový kód 5.1: Zahnutí frekvencí s periodickým desetinným rozvojem do periody	42
Zdrojový kód 7.1: Ukázka začátku souboru obsahující hlavičku	60
Zdrojový kód 7.2: Ukázka dat z průběhu experimentu uložených do souboru.....	61
Zdrojový kód 7.3: Ukázka změny v hlavičce souboru u druhého experimentu.....	63

Seznam zkratek

2D	dvojměrná
3D	trojměrná
AC	střídavý proud
CSV	comma-separated values
DC	stejnsměrný proud
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DFT	diskrétní Fourierova transformace
GAČR	Grantová agentura České republiky
GF	faktor zesílení
HW	hardware
IEC	International Electrotechnical Commission
LED	elektroluminiscenční dioda
NI	National Instruments
NSD	největší společný dělitel
NSN	nejmenší společný násobek
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments
THD	celkové harmonické zkreslení (total harmonic distortion)
USB	Universal Serial Bus

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Popis
a_{ih}	%	relativní úroveň modulace meziharmonické složky
a_L	%	relativní úroveň modulace světelného toku
a_m	%	relativní amplituda modulace
a_U	%	relativní úroveň modulace napájecího napětí
c	m/s	rychlost světla
D	—	informace, zda byla odpověď správná nebo nesprávná
f	Hz	frekvence počítaného napěťového průběhu
f_{AC}	Hz	základní frekvence
f_b	Hz	frekvence vypočtená z délky bufferu
f_{ih}	Hz	meziharmonická modulační frekvence
f_m	Hz	modulační frekvence
F_{RL}	—	frekvenční odezva žárovky
f_s	Hz	vzorkovací frekvence
h	J·Hz ⁻¹	Planckova konstanta rovna 6,626 070 15×10 ⁻³⁴ J·Hz ⁻¹
K	—	konstanta odezvy žárovky rovna 3,75
k	—	index frekvence
k_B	J·K ⁻¹	Boltzmannova konstanta odpovídající 1,380 649×10 ⁻²³ J·K ⁻¹
L	cd/m ²	jas
L_0	cd/m ²	střední hodnota jasu
L_1	%	úroveň jasu základní harmonické frekvence
L_n	%	úroveň jasu n-té harmonické frekvence
N	—	délka pole signálu
p	W	okamžitý příkon
$p(x)$	—	pravděpodobnost správné odpovědi
p_{1-6}	—	koeficienty „X“ korekce
P_{inst}	—	okamžitý vjem flikru
P_{lt}	—	dlouhodobá míra vjemu flikru
$p_n(x)$	—	pravděpodobnost nesprávné odpovědi
P_{st}	—	krátkodobá míra vjemu flikru
P_{st}^{LM}	—	krátkodobá míra vjemu flikru u světelného flikrmetru
R	Ω	elektrický odpor
s	—	Laplaceova komplexní proměnná
S	—	škálování integrálu
t	s	čas
T	s	perioda
T_a	K	absolutní teplota
U	V	napětí
u	V	normalizované napětí
U_{ef}	V	efektivní hodnota napětí
V	V	předávaná hodnota nominálního napětí
V_{AC}	V	nominální hodnota střídavého napětí
V_{DC}	V	nominální hodnota stejnosměrného napětí
$v[i]$	V	původní hodnota v poli vypočítaného napěťového průběhu
X	dB	faktor zesílení po aplikaci dodatečné korekce

$x[i]$	V	hodnota napětového průběhu po korekci
$x[n]$	V	n -tý prvek pole dat z fotodiod
β	—	sklon psychometrické funkce
γ	—	pravděpodobnost pozitivní odpovědi při intenzitě rovné 0
δ	—	zlomek pokusů, kdy figurant odpoví naslepo
λ	m	vlnová délka
π	—	poměr obvodu kruhu v eukleidovské rovině k jeho průměru, $\pi \doteq 3.14$
τ	—	korekce funkce směrem vlevo, nebo vpravo
τ_{L1}	ms ²	koefficient přenosové funkce roven 0,02 ms ²
τ_{L2}	ms	koefficient přenosové funkce roven 21,2 ms
χ	%	práh viditelnosti

Úvod

Různé formy umělého osvětlení jsou dnes již neodmyslitelnou součástí našich životů. Kvalita osvětlení může ale velmi ovlivňovat nejen naše pohodlí, ale také soustředění, kvalitu spánku nebo efektivitu během práce. Jedním z nejčastějších rušivých efektů spojených se světelnými zdroji je flickr, krátkodobé rušivé blikání, které můžeme často pozorovat jak na vnitřním, tak venkovním osvětlení. Flicker je nejčastěji způsoben fluktuací napětí v elektrické síti či samotnou realizací světelného zdroje a lidstvo se s ním potýká už od dob realizace prvních elektrických sítí. [1]

Pro měření rušivosti flickru byl proto vyvinut algoritmus nazvaný flickrmetr. Existuje jak napěťový flickrmetr [2], tak světelný flickrmetr [3], který měří blikání přímo ze světelného toku. Z pohledu dnešní doby se však s flickrmetrem pojí několik problémů. Tím nejpálčivějším je fakt, že napěťový flickrmetr byl realizován pro klasické žárovky, které byly v té době typickým zdrojem osvětlení. Dnes tomu již tak není. Klasické žárovky se v mnohých zemích už běžně neprodávají a typickým zdrojem umělého osvětlení jsou v dnešní době svítidla založená na LED [4]. Elektrické sítě jsou také v průběhu let modernizovány a vyvstává tak otázka, zda jiné druhy zkreslení nemohou výsledky algoritmu také ovlivnit. [1, 5]

Tato práce vznikla v návaznosti na projekt GAČR a DFG „Vývoj nových algoritmů na výpočet flickru v podmínkách moderních rozvodných sítí elektrické energie“, který má za cíl aktualizovat původní napěťový flickrmetr právě na LED a moderní elektrické sítě. V rámci toho je potřeba ověřit citlivost křivku vjemu flickru při použití LED. Spektrum LED svítidel se liší od spektra klasické žárovky, a vyvstává tak otázka, zda tento fakt nemá vliv na rozdíl ve vnímání flickru u těchto zdrojů světla. Na Technické univerzitě v Liberci byl v roce 2023 proveden experiment [6], který měřil prahu viditelnosti právě na LED. Naměřené prahy je potřeba srovnat s daty z totožného experimentu, který bude proveden na klasických žárovkách.

Cílem práce je tedy připravit tento experiment. V rámci toho mají být implementována rozhraní pro komunikaci s potřebným hardwarem vhodným pro řízení experimentu. Je nutné provést také kalibraci laboratorního pracoviště pro správný průběh experimentu, což obnáší přípravu kalibračních programů a vyhodnocení výsledků měření. Na základě výsledků kalibrace má být následně připravena a naprogramována procedura pro měření prahu viditelnosti flickru, která bude pomocí hardwaru řídit průběh experimentu. Procedura bude realizována ve dvou variantách, ve variantě řízené modulací světelného toku a ve variantě řízené přímo modulací vstupního napětí. První varianta bude sloužit pro zmíněné srovnání s LED, druhá pro ověření, zda je

vjem flikru odlišný při použití střídavého a stejnosměrného proudu. Funkčnost programu bude demonstrována na základě naměřených výsledků z testování na figurantech. Data z měření budou vyhodnocena a srovnána s prahy z experimentu s LED a s původním flikrmetrem.

Teoretická část

1 Žárovka

Klasická žárovka je tradičním typem elektrického osvětlení a představuje jeden z nejstarších a po dlouhou dobu jeden z nejrozšířenějších typů elektrického osvětlení. To bylo zapříčiněno především díky jednoduché konstrukci spojené s dostatečnou kvalitou světla, které žárovka poskytovala. Princip, na kterém žárovka funguje, spočívá v přeměně elektrické energie na světlo prostřednictvím žhavení vlákna. Vláknem je pevně umístěno uvnitř skleněné baňky, která je naplněna plynem. Když je žárovka v provozu, elektrický proud prochází vláknem. To způsobuje, že se vlákno zahřívá na teplotu, která je dostatečně vysoká na to, aby vlákno začalo žhnout a emitovat světlo. [7]

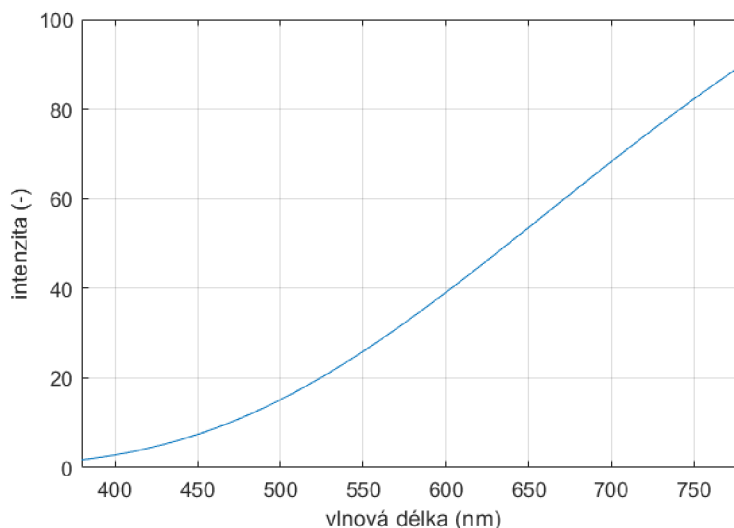
K vyzařování světla je potřeba pevnou látku zahřát alespoň na 850 K. Proto bývá žhavicí vlákno obvykle vyrobeno z wolframu, který má vysokou teplotní odolnost. Žárovky s nízkou teplotou chromatičnosti, tedy v rozmezí mezi 2500 až 2700 K, vyzařují větší množství červené spektrální energie. To má za následek, že jejich světlo působí tepleji. Žárovky nad 2800 K vyzařují oproti nim více modré, takže osvětlené objekty působí studenějším dojmem. Dosáhnout stálé teploty nad 2900 K je však u žárovek velmi obtížné, proto u žárovky nikdy nedosáhneme výrazně studených barev, jako je to možné například při využití LED svítidel. Postupem času vlákna degradují a žárovky tmavnou. Příčinou tohoto jevu je wolfram, který se z povrchu vlákna odpařuje a usazuje se na baňce. [8]

Intenzitu záření ideálně černého tělesa v závislosti na vlnové délce lze vyjádřit pomocí Planckova zákona:

$$B_{\lambda}(\lambda, T_a) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T_a}} - 1}, \quad (1.1)$$

kde λ je vlnová délka, T_a je absolutní teplota, c značí rychlost světla, h zastupuje Planckovu konstantu rovnou $6,626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{Hz}^{-1}$ a k_B je Boltzmannova konstanta odpovídající $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$.

Graf 1.1 ukazuje spektrum vypočtené pomocí Planckova zákona při teplotě 2600 K. Z tohoto příkladu je možné určit zastoupení jednotlivých barevných složek. Například červená barva je viditelná na vlnové délce 625 až 740 nm. V rámci viditelného spektra se tak jedná o barvu s nejvyšší intenzitou. Je také vidět, že závislost na vlnové délce není lineární.



Graf 1.1: Ukázka spektra dle Planckova zákona

Je důležité zmínit také tepelnou setrvačnost vlákna, tedy jeho schopnost udržet teplotu po snížení či přerušení přiváděného napětí. Při pomalé změně napětí určitou dobu trvá, než se vlákno ochladí, což se může projevit například na statické charakteristice žárovky. Tepelná setrvačnost má také vliv na zesílení žárovky. Když dochází k pozvolným změnám napětí přiváděného na žárovku, například ve formě sinusového průběhu, lze pozorovat odlišnou odezvu oproti změnám, které přichází náhle. Při změnách o frekvenci 1 Hz může být rozdíl v zesílení mezi sinusovým a obdélníkovým napěťovým průběhem například dvojnásobný. Při vyšších frekvencích pak tepelná setrvačnost tvarové rozdíly maskuje. [9]

Po mnoho let bylo hlavním cílem osvětlení pouze usnadnit vidění, a nebylo tak věnováno tolik pozornosti negativním vlastnostem, které si s sebou klasické žárovky nesly. Jednou z hlavních nevýhod klasických žárovek je jejich nízká energetická účinnost. Většina elektrické energie dodaná do žárovky se přeměňuje na teplo namísto světla, což znamená, že pouze malý podíl energie skutečně končí jako světelné záření. I díky tomu jsou v dnešní době klasické žárovky na ústupu a jejich místa nahradily například světelné zdroje založené na LED [4], které jsou výrazně efektivnější. [10]

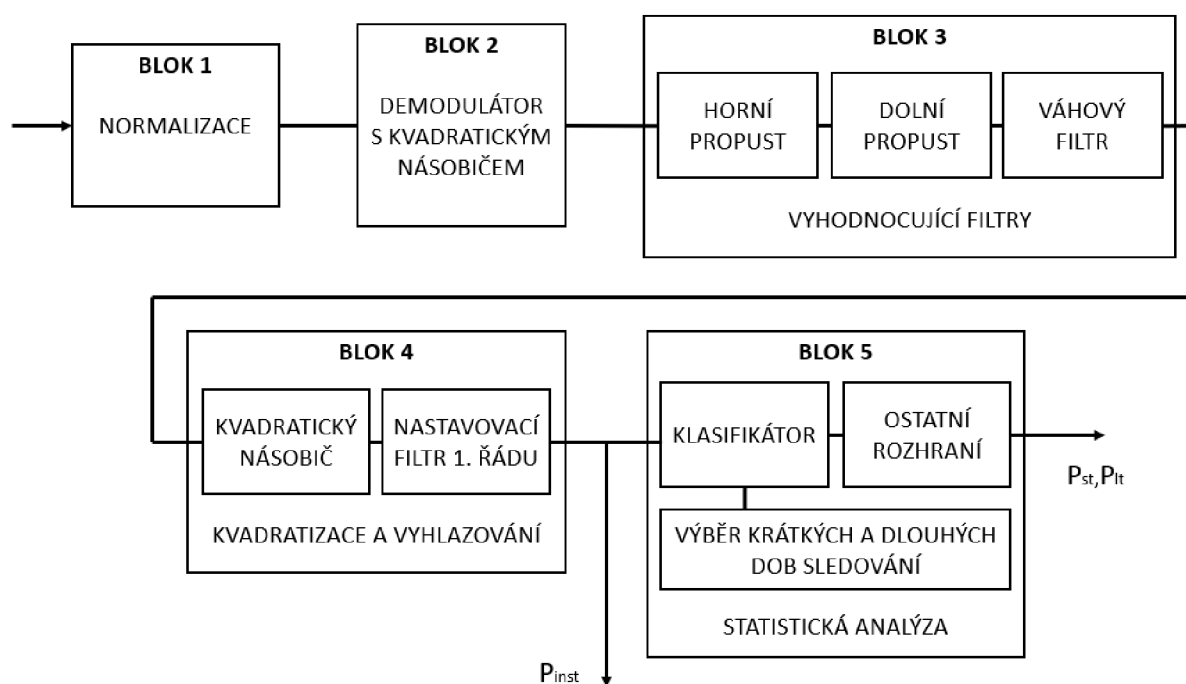
2 Flikrmetr

Jako flikrmetr označujeme algoritmus určený k měření vjemu flikru neboli krátkodobého blikání světelných zdrojů. Jak již bylo nastíněno v úvodu, flikr je nejčastěji způsobován kolísáním síťového napětí, případně konstrukcí světelných zdrojů, a při silné míře může u člověka způsobit například bolest očí či hlavy. Může se také dříve projevit únava. Negativně ale může působit také na naši psychickou stránku. Kvůli flikru mohou lidé rychleji ztrácet pozornost či mít problém se soustředit. [1, 11]

Vzhledem k obtížnosti procedury měření vjemu blikání trvalo mnoho let, než pro ni vznikl standardizovaný postup. První modely pro určení odezvy „oko – mozek“ stavěly na výzkumech prováděných v 60. a 70. letech minulého století. To postupně vedlo k sestavení prvních měřičů flikru. Typickým zdrojem osvětlení byly v té době žárovky. Není proto divu, že tyto měřiče byly realizovány pro měření blikání právě z nich. Standardní flikrmetr byl však vytvořen až na základě výzkumů z 80. let 20. století [12]. [1]

2.1 Napěťový flikrmetr

Algoritmus napěťového flikrmetru měří kolísání napětí a simuluje odezvu 60W 230V žárovky s dvojité vinutým vláknem. Model (Obrázek 1) tedy simuluje odezvu řetězce „napěťová změna – zdroj světla – oko – mozek“. [2]



Obrázek 1: Schéma napěťového flikrmetru [2]

V rámci bloku 1 algoritmu je nejprve (za účelem nezávislosti na velikosti napětí) vstupní napětí normalizováno na referenční úroveň. V druhém bloku je provedena kvadratizace průběhu vstupního napětí, čímž se simuluje chování žárovky.

Okamžitý příkon je zde vypočten jako

$$p = \frac{u^2}{R}, \quad (2.1)$$

kde R je 1Ω a u normalizované napětí.

Blok 3 se skládá z kaskády tří filtrů, které mohou předcházet nebo následovat selektivnímu filtru. K eliminaci stejnosměrné napěťové složky je použit hornopropustný filtr. Druhým filtrem je dolnopropustný filtr, který odstraňuje frekvenční složky nad hranicí viditelnosti. Posledním filtrem je váhový filtr, který simuluje teplotní setrvačnost vlákna žárovky a frekvenční odezvu sítnice lidského oka a dilataci pupily na sinusové kolísání světelného toku.

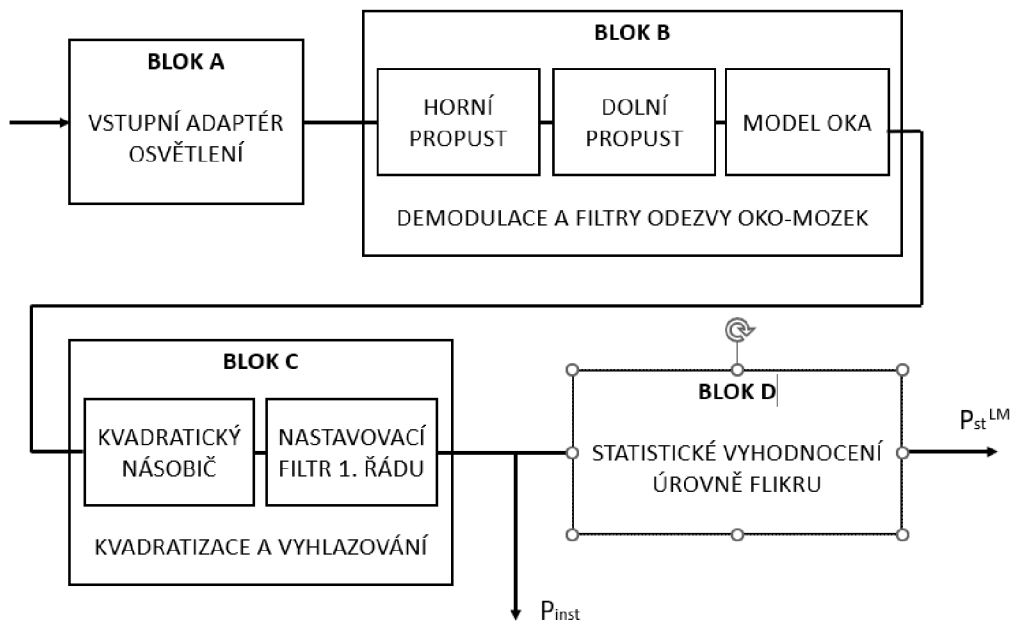
Blok 4 se skládá z kvadratického násobiče a dolnopropustného filtru prvního řádu. Pozorování blikání, které vychází z kombinace pozorovacích vlastností oka a následného zpracování vjemů mozkiem, je pak simulováno kombinovanou odezvou bloků 2, 3 a 4. Výstup bloku 4 tak představuje okamžitý vjem blikání P_{inst} .

V bloku 5 je prováděna analýza úrovně blikání, která probíhá online. Rozhraní využívající analogové signály nebo digitální přenos dat slouží k záznamu a zobrazení dat. Pomocí statistické analýzy, prováděné pomocí vzorkování úrovně signálu blikání a rozdělování vzorků do tříd, lze odvodit závažnost blikání. P_{st} pak reprezentuje krátkodobou míru vjemu flikru a P_{lt} dlouhodobou míru vjemu flikru. [2]

2.2 Světelný flikrmetr

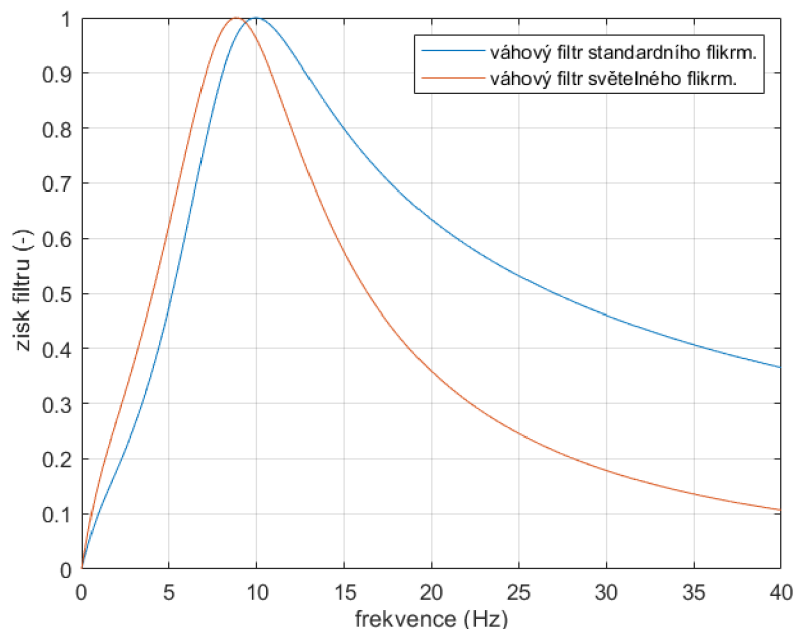
Alternativou k měření flikru je světelný flikrmetr. Vznikl z původního napěťového flikrmetru tak, že byl z původního algoritmu odebrán model žárovky. Při pohledu na Obrázek 1 se jedná o změnu v rámci bloku 1, odstranění bloku 2 a částečnou úpravu blok 3.

Obrázek 2 ukazuje výsledné schéma světelného flikrmetru. Blok A se skládá z obvodu pro přizpůsobení intenzity osvětlení. Škáluje tak hodnotu vstupního napětí naměřenou ze světelného toku a převádí ji na stejnosměrnou hodnotu (tu lze získat pomocí dolní propusti 1. řádu). Normalizací je zajištěna nezávislost vjemu flikru na úrovni osvětlení.



Obrázek 2: Schéma světelného flickrometru [3]

První část bloku B odpovídá bloku 3 napěťového flickrometru, tedy skládá se z hornopropustného a dolnopropustného filtru. Druhá část pak obsahuje váhový filtr zastupující model vnímání lidského oka. To je v praxi provedeno tak, že je charakteristika váhového filtru napěťového flickrometru vydělena odezvou světelného zdroje.



Graf 2.1: Porovnání normalizovaných váhových filtrů

Při použití 60W žárovky lze odezvu F_{RL} aproximovat jako:

$$F_{RL} = \frac{K}{\tau_{L1} \cdot s^2 + \tau_{L2} \cdot s + 1} \quad (2.2)$$

kde $K = 3,57$, $\tau_{L1} = 0,02 \text{ ms}^2$ a $\tau_{L2} = 21,2 \text{ ms}$. Symbol s zastupuje Laplaceovu komplexní proměnnou.

Graf 2.1 ukazuje srovnání váhového filtru původního napět'ového flickrometru a výsledného filtru světelného flickrometru po vydělení odezvou žárovky.

Výstup algoritmu, tedy krátkodobá míra vjemu flickru, se pak označuje P_{st}^{LM} , kde LM zastupuje právě světelný flickrometr. [3]

Výhoda světelného flickrometru spočívá v tom, že se rušivost flickru měří přímo ze světelného toku. Díky tomu je eliminována závislost na druhu světelného zdroje, který způsobuje blikání. Nevýhodou je na druhou stranu fakt, že algoritmus značně zjednodušuje to, jak lidský zrak funguje. V lidském oku jsou totiž tyčinky a čípky, z nichž tyčinky jsou responsivní na světlo a umožňují vidět v temnotě, zatímco čípky umožňují ostré vidění a rozlišování barev. Čípky se dělí do tří typů, konkrétně krátké, středně dlouhé a dlouhé, každý typ s jinou citlivostí. [13] Dalším problematickým bodem je práce s předdefinovaným pozorovatelem, a i díky tomu lze model použít převážně pro srovnávací účely. [14] Úprava, která vedla ke vzniku světelného flickrometru, navíc nebyla nikdy verifikována na experimentech s lidskými pozorovateli [5].

3 Základní psychofyzické metody

Psychofyzické metody jsou techniky, které slouží primárně pro měření vnímání smyslových a percepčních systémů. Lze je však aplikovat na mnohé další problémy, od vyhodnocování stresu a úzkosti, až po detekci nádorů pomocí rentgenu. [15] Psychofyzické metody jsou proto vhodným nástrojem také v rámci experimentů zkoumajících vjem flikru. V rámci následujících podkapitol budou proto rozebrány některé z metod, a to včetně výhod a nevýhod, které s sebou dané psychofyzické metody nesou.

3.1 Metoda stálých podnětů

Jednou z nejpřesnějších metod pro psychofyzické experimenty je metoda stálých podnětů (anglicky „method of constant stimuli“). V rámci této metody jsou figurantovi prezentovány podněty o různé intenzitě v náhodném pořadí. Problém této metody spočívá v její délce. Pro spolehlivé nalezení prahu vjemu podnětu je potřeba provést alespoň 300 pokusů. Pokud by jeden pokus trval například 5 sekund, bude celý experiment trvat 25 minut. [15] Pokud bychom během testování vjemu flikru pak chtěli testovat více frekvencí blikání, narostl by tento čas na několik hodin. Takto dlouhý experiment by byl pro figuranta velmi náročný a výsledky měření by nepochybně byly zatíženy únavou figuranta.

3.2 Adaptivní metody a metoda nastavení

Existují tedy různé způsoby, jak výše popsaný proces urychlit. Jedním způsobem je využití odpovědi figuranta pro návrh dalších testovaných hodnot. Metody založené na této myšlence se souhrnně nazývají jako adaptivní metody.

Jedním z extrémních případů může být metoda nastavení („method of adjustment“), kde figurant získává plnou kontrolu nad intenzitou podnětu a může ji dle svého uvážení zvyšovat či snižovat, typicky pomocí dvou tlačítek. Figurant může být instruován buď, aby hledal úroveň, kdy je podnět ještě viditelný, nebo úroveň, kdy už podnět viditelný není. Průběh experimentu může být několikrát opakován a počáteční hodnota podnětu se může střídát mezi intenzitou daleko pod viditelnou úrovní a vysoko nad viditelnou úrovní. Výsledný práh pak lze spočítat jako průměr ze všech výsledků.

Výhodou této metody je její rychlost a jednoduchost. Na druhou stranu tu vyvstává problém z toho, že každý figurant může používat trochu jiná kritéria. Zatímco jeden tak může za výsledek považovat úroveň intenzity podnětu, která je zřetelně viditelná, druhý jako výsledek uzná

intenzitu o jednu úroveň pod hodnotou, kterou ještě částečně vnímal. Neexistuje přitom žádný způsob, jak strategii figuranta zahrnout do vyhodnocení výsledků. [15]

3.3 Metoda limitů

Formálnější metodou, avšak stále do jisté míry podobnou metodě nastavení, je metoda limitů („method of limits“). Tato metoda je znatelně rychlejší než metoda stálých podnětů, avšak pomalejší než metoda nastavení. Podnět je na začátku nastaven vysoko nad práh viditelnosti a po krocích je následně snižován až na úroveň, kdy figurant podnět přestal vnímat. Tato úroveň je zaznamenána a intenzita je následně nastavena hluboko pod viditelný práh. Intenzita je následně po krocích zvyšována, dokud figurant podnět nezačne vnímat. Tato hodnota je opět zaznamenána. Sestupné a vzestupné průběhy mohou být následně opakovány v závislosti na potřebném množství dat. Výsledný práh vjemu podnětu je pak vypočten jako průměr ze všech měření.

Přestože je metoda limitů jednou z nejpoužívanějších, potýká se také s některými problémy. Jedním z nich může být rozdíl v přístupu figuranta při sestupném a vzestupném průběhu, kdy z experimentu se vzestupným průběhem můžeme získat výrazně vyšší hodnoty prahů. Dalším problémem je předvídatelnost experimentu a s tím spojené odhadování očekávané odpovědi ze strany figuranta, které je způsobené návykem na prováděný proces. [15]

3.4 Metoda schodiště

Metoda schodiště („staircase method“) je efektivním kompromisem mezi rychlostí a přesností výsledků. Testovaná intenzita se zde více pohybuje okolo reálného prahu vjemu podnětu. Do jisté míry se metoda schodiště podobá metodě limitů. I zde průběh začíná vysoko nad úrovní viditelného prahu a v jednotlivých krocích se intenzita snižuje až do té doby, kdy figurant přestane podnět vnímat. Na rozdíl od metody limitů však nezačíná další průběh hluboko pod reálným prahem, ale právě na intenzitě, kde se předchozí průběh zastavil. Po krocích se pak intenzita opět zvyšuje až do doby, kdy figurant podnět opět začne vnímat. Nově nalezená intenzita je pak opět počáteční hodnotou, od které bude intenzita při dalším průběhu snižována. Toto lze opakovat libovolně dlouhou dobu. Typickou volbou bývá však tak dlouho, dokud není desetkrát změněn směr průběhu, což může dohromady obnášet 40 až 70 pokusů v závislosti na velikosti kroku. Úrovně, při kterých je měněn směr, jsou zaznamenávány a výsledný práh je nakonec vypočten jako jejich průměr. [15]

Metoda schodiště je používána velmi často, díky čemuž vzniklo v průběhu let mnoho různých variant. Stejně jako u některých jiných metod může i zde nastat problém, že figurant začne časem odhadovat, jaká odpověď je od něj očekávána. Příčinou toho může pak u výsledků dojít ke zkreslení. Tento problém řeší modifikace této metody, se kterou v roce 1962 přišel Tom N. Cornsweet [16]. V rámci této variace se pracuje se dvěma schodišti, která se střídají. První pokus začíná na prvním schodišti, druhý na druhém, třetí pokus opět na prvním, čtvrtý pak znovu na druhém, a tak dále. Figurant díky tomu ztratí pojem o tom, kde naposledy skončil, a nebude tak odhadovat, kdy je od něj očekávána jaká odpověď. Vhodné je také schodiště střídat náhodně. Přidání více schodišť má také pozitivní efekt. Je možné také na každém schodišti testovat trochu odlišný podnět za předpokladu, že figurant nebude s jistotou vědět, jaký podnět bude testován příště. [15, 16]

3.5 Algoritmus Quest

Existují také komplexnější způsoby, jak provádět psychofyzické experimenty. Jedním z komplexních algoritmů vhodných pro testování a také jedním z nejmodernějších [15] je algoritmus Quest. Algoritmus Quest pracuje s psychometrickou funkcí a byl vyvinut Watsonem a Pellim na Cambridgeské univerzitě [17].

Psychometrická funkce popisuje vztah mezi mírou podnětu a pravděpodobností určité psychofyzické reakce. Měřena je většinou intenzita podnětu, kterou je v případě měření vjemu flikru úroveň blikání. Odpověď pak závisí na typu experimentu. Může jí tedy být „ano“ a „ne“, pokud je například figurant testován, zda daný podnět vnímá, nebo „správně“ a „nesprávně“, pokud je testováno, zda daný podnět správně rozpoznal. [17]

Pro správnou efektivitu experimentů je nutné, aby byly jednotlivé pokusy vhodně rozmístěny. Zde už přichází výhoda Questu v tom, že se jedná o adaptivní metodu pracující s hustotou pravděpodobnosti, kde je možné volit míru podnětů na základě výsledků předchozích pokusů. Algoritmu je vždy předána testovaná intenzita spolu s informací o správnosti odpovědi. Na základě odpovědi je pak hustota pravděpodobnosti po každém pokusu aktualizována. [17, 18]

Aktualizace probíhá na základě Bayesovy věty:

$$f_{\chi|D=a}(x | d) = \frac{f_{\chi}(x)f_{D|\chi=x}(d | x)}{f_D(d)}, \quad (3.1)$$

kde χ zastupuje práh viditelnosti a D informaci, zda byla odpověď správná či nikoli. [17]

Pomocí hustoty pravděpodobnosti lze následně jednoduše získat doporučenou úroveň pro testování při dalším pokusu. Konkrétně je volena hodnota odpovídající modu aktualizované hustoty pravděpodobnosti. Tento postup lze opakovat libovolně dlouho. Se správně zvolenými počátečními podmínkami včetně prvotního odhadu intenzity je tak s dostatečným množstvím provedených pokusů algoritmus Quest velmi efektivní procedurou, kterou lze pro měření vjemu flikru použít. Výsledkem algoritmu je pak celá hustota pravděpodobnosti. [17, 18]

3.5.1 Quest v Psychtoolboxu

Jedním ze způsobů, jak lze algoritmus Quest jednoduše používat, je Psychophysics Toolbox, neboli Psychtoolbox. Jedná se o sadu funkcí pro výzkum v oboru zraku a neurověd implementovaný pro Matlab a GNU Octave. Ten obsahuje například metody pro práci s 2D i 3D grafikou s důrazem na správné zobrazování jasu a barev nebo záznam a přehrávání videa i audia s nízkou odezvou. [19] Jeho součástí je ale hlavně implementace algoritmu Quest, který lze díky tomu ovládat jednoduše voláním několika základních funkcí. Těch je v základu šest.

První z nich je metoda *QuestCreate*, která má vstupní parametry *tGuess*, *tGuessSd*, *pThreshold*, β , δ , γ , *grain* a *range*. Tato funkce slouží pro vrácení vytvořené instance Questu. Správné nastavení parametrů je klíčové pro efektivní fungování algoritmu. Parametr *tGuess* zastupuje počáteční odhad intenzity měřeného podnětu a *tGuessSd* odpovídající směrodatnou odchylku. Parametr *pThreshold* pak vychází z pravděpodobnosti pozitivní odpovědi při intenzitě podnětu odpovídající prahu rozpoznatelnosti (viditelnosti), tedy že odpověď bude „ano“ nebo „správně“ v závislosti na typu experimentu.

Další tři parametry vycházejí z pravděpodobnosti správné odpovědi určené pomocí Weibullové psychometrické funkce:

$$p(x) = 1 - \delta - (1 - \gamma - \delta) \exp(-10^{\beta(x-\tau)}), \quad (3.2)$$

kde x je testovaná úroveň a τ je korekce funkce na základě požadované hodnoty parametru *pThreshold* směrem vlevo, nebo vpravo. Pokud bude *pThreshold* roven 0,8, pak τ odpovídá hodnotě 0. Parametr δ pak zastupuje zlomek pokusů, kdy figurant odpoví naslepo. Parametr γ odpovídá pravděpodobnosti pozitivní odpovědi při intenzitě rovné 0. Určení parametru β může být komplikovanější. Můžeme jej popsat jako sklon nebo strmost psychometrické funkce. Například při nucené volbě ze dvou odlišných možností lze použít hodnotu 3,5, případně jako

alternativu pro určení využít funkci *QuestBetaAnalysis*, která je také součástí Psychtoolboxu a umožňuje výpočet β pro podmínky konkrétního experimentu.

Ze vztahu lze pak jednoduše odvodit výpočet pravděpodobnosti nesprávné odpovědi:

$$p_n(x) = 1 - p(x), \quad (3.3)$$

Parametr *grain* zjednodušeně reprezentuje velikost kroku v rámci vnitřní tabulky algoritmu a *range* maximální a minimální testovanou hodnotou. Samotné minimum a maximum je pak odvozeno od počátečního odhadu. [17, 20]

Kdybychom chtěli pro lepší představu znázornit interval testovaných hodnot například syntaxí v prostředí Matlab, vypadalo by to následovně:

```
interval = tGuess-range/2 : grain : tGuess+range/2
```

Zdrojový kód 3.1: Zápis možných testovaných hodnot v prostředí Matlab

Dalšími dvěma funkcemi pro řízení Questu jsou v rámci Psychtoolboxu *QuestUpdate* a *QuestQuantile*. Funkce *QuestUpdate* má vstupní parametry *q*, *intensity* a *response*. Parametr *q* předává funkci instanci Questu, se kterou se pracuje, a *intensity* testovanou úroveň podnětu. Parametr *response* může obsahovat hodnotu 1 nebo 0 (případně *true* nebo *false*) a předává funkci informaci o tom, zda figurant podnět o dané intenzitě rozpoznal. Funkce dle toho aktualizuje hustotu pravděpodobnosti u dané instance *q*. Pomocí funkce *QuestQuantile*, která má jako vstupní parametr pouze *q*, může algoritmus následně doporučit vhodnou úroveň intenzity pro další pokus. [18]

Hustota pravděpodobnosti se využívá při práci se spojitou veličinou. Pravděpodobnost jevu je zde znázorněna jako plocha pod křivkou. Právě tuto křivku nazýváme hustotou pravděpodobnosti. Anglicky probability density function, označováno často zkratkou PDF, jak bychom mohli vidět, kdybychom šli například hlouběji do implementace algoritmu Quest. Plochu pod touto křivkou můžeme vyjádřit pomocí distribuční funkce, obdobně zkratkou označováno jako CDF. Celá plocha pod křivkou a nad osou *x* je rovna jedné. [21]

Poslední tři funkce algoritmu Quest slouží pro získání prahu vjemu daného podnětu z provedených pokusů. První z nich je *QuestMode*, která vychází z původního algoritmu Watsona a Pelliho z roku 1983 [17]. Finální odhad je v tomto případě počítán jako modus. Druhou funkcí je *QuestMean*. Ta vychází z vylepšení původního algoritmu, které publikoval King-Smith

v roce 1994 [22]. Při použití této funkce se pak finální odhad prahu počítá jako průměr. Třetí a poslední funkcí je pak *QuestSd*, která slouží pro výpočet směrodatné odchylky. [18]

Psychtoolbox obsahuje ještě několik dalších funkcí pro řízení algoritmu Quest, které je možné využít při speciálních požadavcích, kdy základní funkce nejsou dostačující, u experimentů s odlišným průběhem nebo během testování.

Praktická část

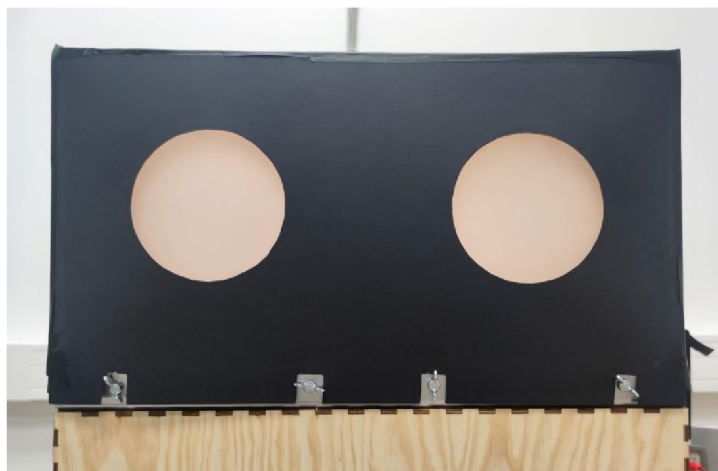
4 Návrh experimentu

Hlavním cílem práce bylo naprogramovat řídicí program pro experiment měřící prahy viditelnosti flikru u figuranta při použití klasických žárovek a laboratorního vybavení. Byl navržen tak, aby bylo možné naměřená data porovnat s dříve provedeným experimentem na Technické univerzitě v Liberci, který měřil prahy viditelnosti flikru při použití LED [23].

V průběhu experimentu má figurant sedět v zatemněné místnosti. Před ním jsou dva světelné terčíky. Na jeden je přivedeno stálé světlo, na druhý modulovaný sinusový světelný průběh. Úkolem figuranta je pomocí levé a pravé kurzorové klávesy vybírat, který z terčíků vidí problíkávat. Dle správnosti odpovědi má být nastavena nová úroveň modulace. Opakováním postupu je pak nalezen práh viditelnosti flikru figuranta pro danou frekvenci blikání. Experiment měl být realizován ve dvou variantách. První varianta měla být řízena úrovní modulace světelného toku, druhá modulací napětí přiváděného na žárovky, které generují světelné průběhy.

4.1 Použité vybavení

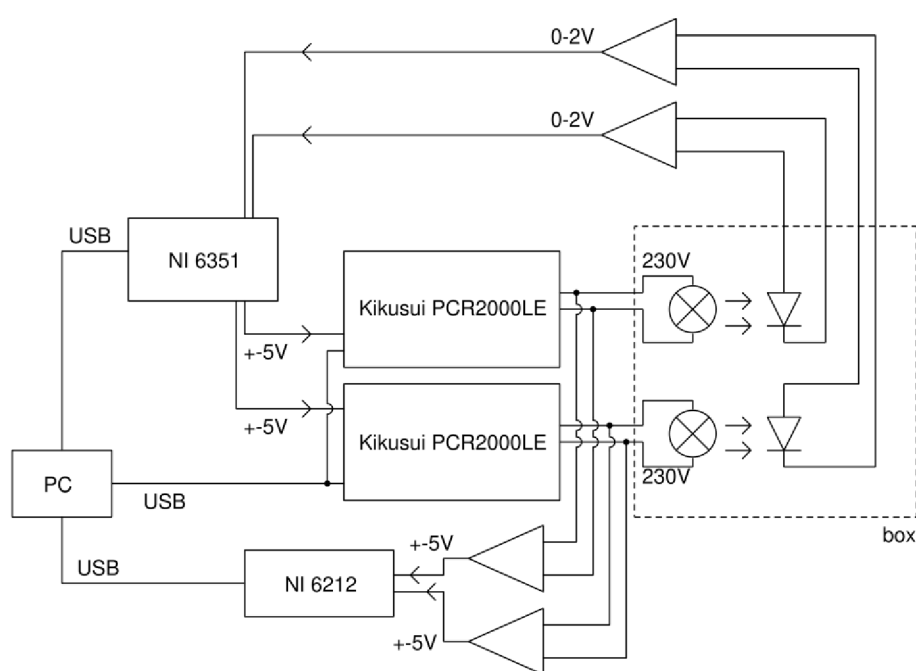
Experiment byl realizován pro speciálně vytvořený světelný box (Obrázek 3). Box se skládá ze dvou segmentů, kde rozměr každé hrany segmentu je 25 cm. V každém ze segmentů je umístěna 60W 230V žárovka s dvojitě vinutým vláknem, na kterou má být přiváděn specifický napěťový průběh. Tímto způsobem je možné řídit blikání žárovky. Z přední strany je box překryt černou maskou s kruhovým výřezem o průměru 12 cm na každém ze segmentů. Masko takto tvoří pozorovací terčíky.



Obrázek 3: Světelný box

Segmenty také obsahují fotodiody pro měření průběhů světelného toku. Průběhy z fotodiody lze načítat pomocí multifunkčního zařízení National Instruments USB-6351 (dále jen NI 6351). Box obsahuje také chlazení vzduchem, aby v průběhu experimentu nedocházelo k přehřívání.

Pro přivádění signálů na žárovky měly být využity dva zdroje Kikusui PCR2000LE (dále jen Kikusui). Oba Kikusui umožňují také zesilovat napěťové průběhy, které jsou na ně přiváděny. Nabízely se tak dvě možnosti. Využít Kikusui přímo jako zdroje, nebo zesilovat průběhy z NI 6351. Bylo tedy potřeba ověřit, která varianta dokáže zajistit jemnější úroveň modulace, a je tak vhodnější pro chod experimentu. Před vybráním vhodné varianty bylo tak nejprve nutné zajistit komunikaci mezi hardwarem a vyhodnotit, která z variant je lepší.



Obrázek 4: Zapojení hardwaru

Obrázek 4 znázorňuje zapojení hardwaru a světelného boxu. Oba Kikusui jsou zde zapojeny jak pro práci v režimu zdroje, tak v zesilovacím režimu, aby bylo možné využívat obě varianty.

Pro přední stranu boxu bylo potřeba vybrat materiál takový, aby byl jas homogenně rozložen po celé ploše. Právě tu totiž bude figurant sledovat v rámci experimentu. Materiál měl také při nominálním napětí 230 V snížit jas na 85 cd/m^2 , tedy na úroveň, která byla použita v předchozích experimentech v rámci projektu [6]. Zároveň ale pozorovací ploška musí co nejméně ovlivnit spektrum a teplotu chromatičnosti. To mělo být ověřováno pomocí spectroradiometru SpectraScan PhotoResearch PR-740 (dále jen SpectraScan), přenosného zařízení

designovaného pro přesné měření zdrojů světla. Bylo tedy potřeba připravit kalibrační programy také pro tyto účely.

4.2 Vlastnosti žárovky v rámci experimentu

Realizace blikání s využitím žárovky s sebou nesla určité komplikace. Hlavní problém spočívá v tom, že úroveň modulace výstupního napětí ze zdroje je odlišná od úrovně modulace samotného světelného toku. Vzhledem k nelineárnímu charakteru žárovky navíc sinusová modulace napětí nutně nevede k sinusové modulaci jasu. Pro první variantu experimentu je však stěžejní, aby modulace světla co nejvíce odpovídala sinusovému průběhu o odpovídající úrovni modulace. V této kapitole budou popsány jednotlivé problémy, které bylo potřeba řešit. Ukázka dat a konkrétní realizace bude následovat v kapitolách 6.2.1 a 6.3.1.

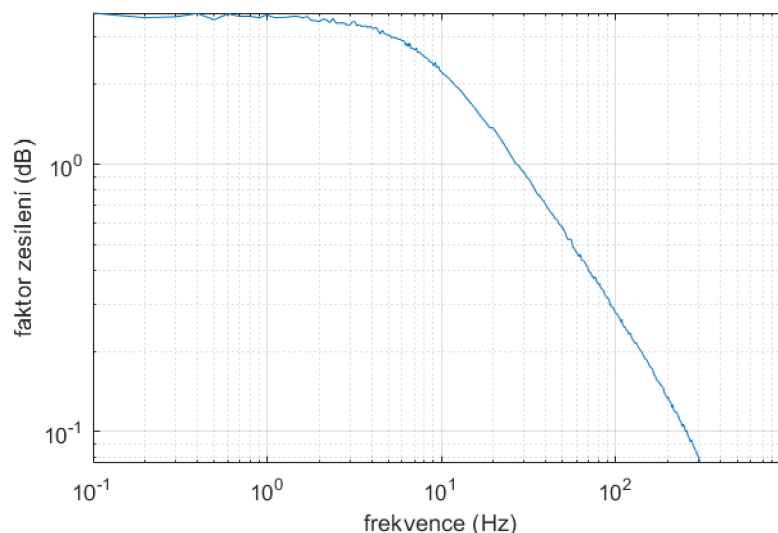
V rámci práce bylo nutné využít několik metod, jak zmíněné komplikace řešit. Žárovka se chová odlišně v závislosti na úrovni modulace a frekvenci přiváděného sinusového napětíového průběhu. Pokud jsou na žárovku přiváděny průběhy s nízkou úrovní modulace, nastává situace, kdy mají průběhy světelného toku sice sinusový tvar, avšak reálná úroveň modulace se od požadované liší. Tento problém byl řešen pomocí tzv. faktoru zesílení (anglicky gain factor).

Faktor zesílení lze vypočítat podle následujícího vzorce:

$$GF = \frac{a_L}{a_U}, \quad (4.1)$$

kde a_U je úroveň modulace napájecího napětí a a_L je úroveň modulace světelného toku.

Faktor zesílení je mírně odlišný u každé žárovky. Jeho hodnota se liší také dle frekvence modulace. Bylo proto nutné jednotlivé faktory naměřit a zajistit přepočty v závislosti právě na frekvenci. Graf 4.1 je ukázkou závislosti faktoru zesílení na frekvenci modulace u jedné ze žárovek při 2% úrovni modulace napětí. U vyšších úrovní modulace při vyšších frekvencích nemusí pak naměřené hodnoty úplně odpovídat, a je tak potřeba dodatečná forma korekce.



Graf 4.1: Ukázka faktoru zesílení v závislosti na frekvenci modulace

Dalším faktorem, který je potřeba hlídat, je efektivní hodnota.

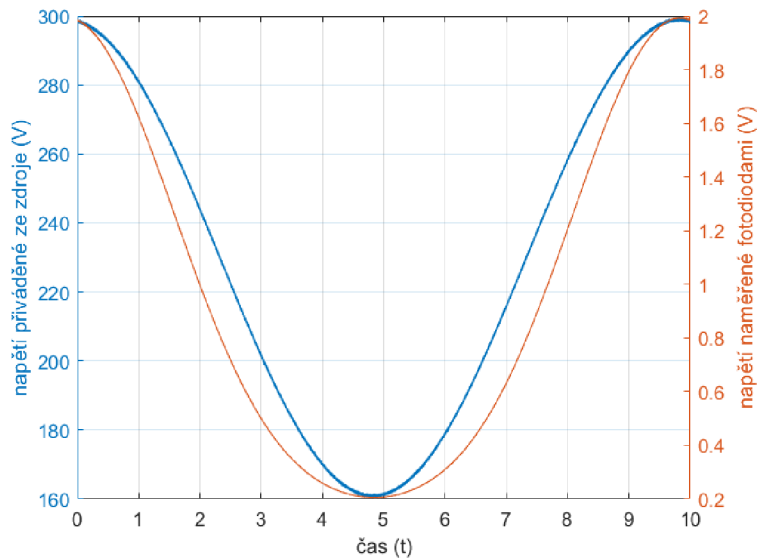
Efektivní hodnotu lze definovat pomocí vztahu

$$U_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{\int_0^T u^2(t) dt}{T}}, \quad (4.2)$$

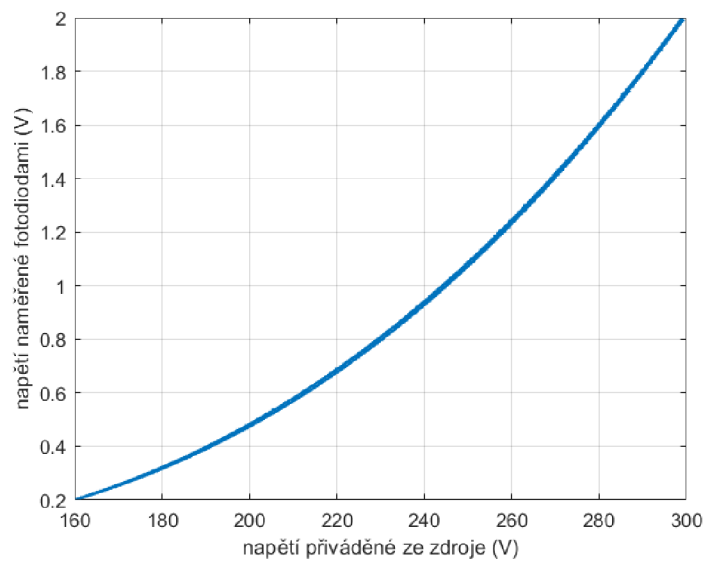
kde T je perioda, u je napětí a t je čas.

Při vyšších úrovních modulace a frekvencích totiž může nastat problém, kdy se efektivní hodnota průběhu liší od požadovaných 230 V, tedy nominální hodnoty napětí. Tento jev pak může vést k odlišné střední úrovni jasu pozorovaného segmentu. Rozdíl v jasu by pak mohl napovědět figurantovi, který segment bliká. Proto musí efektivní hodnota celého průběhu odpovídat nominální hodnotě napětí. Je tak potřeba zavést další formu korekce, která rozdíl mezi hodnotami bude kompenzovat.

Naopak u průběhů o nižších frekvencích s vyššími úrovněmi modulace dochází k jevu, kdy změna teploty vlákna stíhá kopírovat změnu napájecího napětí, avšak ne lineárním způsobem. Výsledný průběh světelného toku tak neodpovídá svým tvarem sinusovému průběhu. Ukázka takového případu je zobrazena v Grafu 4.2. Je zde vidět, že výsledný světelný tok je ve svých konkávních částech zřetelně špičatější, než tomu je u korektní sinusové křivky. Reálně dosažená úroveň modulace navíc několikanásobně přesahuje požadovanou úroveň. Graf 4.3 pak zobrazuje statickou charakteristiku vytvořenou ze stejného průběhu.



Graf 4.2: Srovnání tvarů napěťového průběhu a světelného toku bez transformace



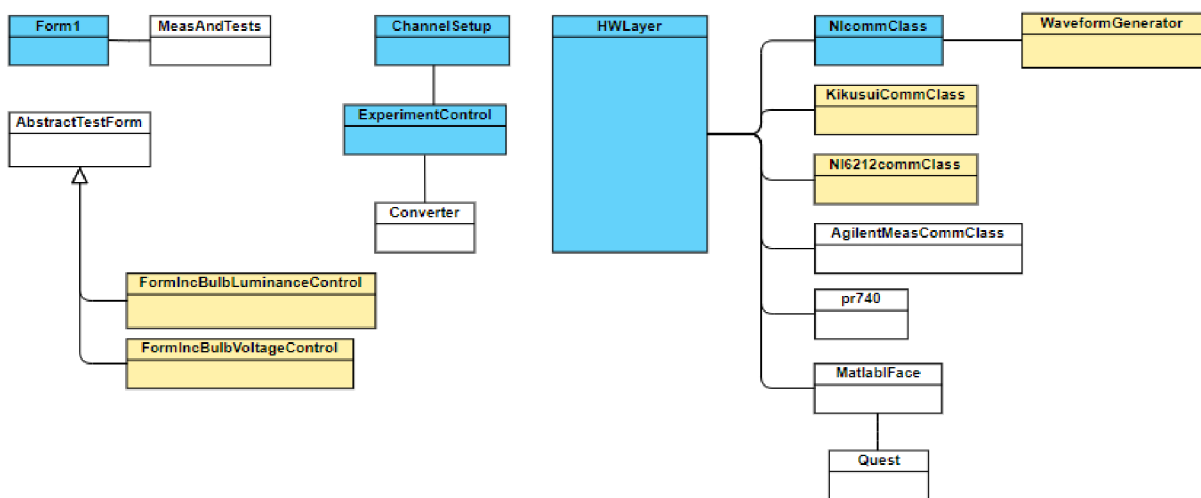
Graf 4.3: Statická charakteristika

Tento problém lze vyřešit pomocí transformace, která napěťový průběh bude v podstatě deformovat do podoby, kdy po přivedení průběhu na žárovky bude vznikat sinusový světelný průběh o odpovídající úrovni modulace.

V rámci práce bylo tedy nutné připravit měřicí programy a s jejich využitím naměřit potřebná data, na základě kterých bylo možné tyto problémy detekovat a minimalizovat.

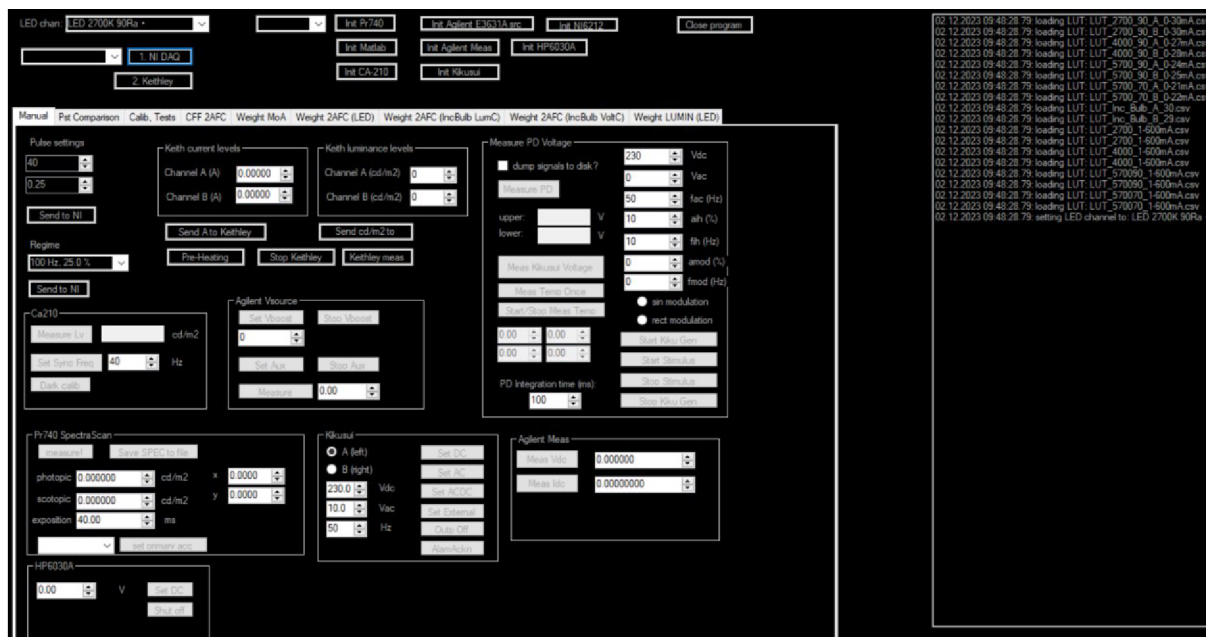
5 Rozhraní pro řízení experimentů

Programová část práce byla realizována pomocí jazyka C# v prostředí Microsoft Visual Studia. Jak již bylo zmíněno, práce je součástí většího projektu. Řízení předchozích experimentů bylo realizováno pomocí obsáhlého programu právě ve Visual Studiu, na který bylo v rámci práce navázáno. Tento projekt v základu obsahoval několik tříd, které slouží pro řízení experimentů. Obrázek 5 zobrazuje zjednodušený diagram tříd projektu. Projekt obsahuje ještě mnoho dalších tříd, které však nejsou pro tuto práci relevantní, a tak byly pro lepší přehlednost ze schématu vynechány.



Obrázek 5: Zjednodušený diagram tříd, kde bíle označené třídy byly vytvořeny před touto prací, modré byly v rámci práce rozšířeny, žluté byly kompletně vytvořeny v rámci práce

Nyní bude následovat shrnutí jednotlivých tříd. Třída **Form1** dědí ze třídy **Form** a slouží pro ovládání jednotlivých měření a experimentů. Obsahuje tak metody pro řízení akcí prováděných po stisku tlačítek či interakci s jinými prvky uživatelského rozhraní aplikace, které ukazuje Obrázek 6. Jedná se o klasickou formulářovou aplikaci. Opticky je aplikace rozdělena do tří částí. Horní část slouží pro inicializaci tříd odpovědných za komunikaci s HW komponentami. Na pravé straně jsou pak zobrazovány výpisy o provedených akcích a průběžích experimentu. Nejobsáhlejší je spodní část, která obsahuje právě veškeré ovládací prvky pro experimenty a měřicí či kalibrační programy. Pro realizaci samotných měření slouží třída **MeasAndTest**. Ovládací prvky aplikace jsou rozděleny do několika karet, mezi kterými lze přepínat. Každá karta pak obsahuje ovládací prvky pro konkrétní experiment, případně pro měřicí programy, které se s ním pojí.



Obrázek 6: Grafické uživatelské rozhraní aplikace

Experimenty jsou typicky prováděny v zatemněné místnosti, kde jsou figurantům zobrazovány různé světelné podněty. Ve stejné místnosti je také osoba sedící u laboratorního počítače, která má experiment na starost. Aby monitor počítače místnost neosvětloval a nenarušoval tak experiment, je pozadí rozhraní nastaveno na černou barvu. Během experimentu je také jas monitoru snižován na minimum a monitor je zakrýván černou fólií.

Další třídou je třída `AbstractTestForm`. Jak z názvu vyplývá, jedná se o abstraktní třídu, která implementuje společné části pro jednotlivé experimenty. Mimo jiné tak třída zajišťuje, že je při spuštění programu vyvoláno nové okno, ve kterém jsou zobrazovány informace o průběhu experimentu. Při dědění je pak některé metody nutné doimplementovat, případně, pokud se připravovaný experiment v některých částech průběhu liší, přepsat ty metody, které neodpovídají požadavkům. Dědění této třídy pak využívají třídy `FormIncBublLuminanceControl` a `FormIncBublVoltageControl`, tedy třídy obsahující realizaci samotných experimentů připravených v rámci této práce.

Dalšími třídami, které spolu navíc úzce souvisí, jsou třídy `ChannelSetup` a `Converter`. V rámci experimentů je často potřeba mezi sebou přepočítávat jednotlivé hodnoty. Příkladem může být výpočet jasu na výstupu LED nebo žárovek v závislosti na napětí na zdroji. Tyto dvě třídy zajišťují, aby nebylo potřeba pro jednotlivé experimenty vytvářet nové přepočtové funkce. V levém horním rohu uživatelského rozhraní je zvolena jedna z možností, která odpovídá nastavení konkrétního experimentu uloženého ve třídě `ChannelSetup`. Toto nastavení

obsahuje předvolby na základě příslušného hardwaru a také vyhledávací tabulku, která obsahuje závislosti mezi jednotlivými hodnotami. Informace o aktuálním kanálu je pak uložena ve třídě `ExperimentControl`. Při potřebě přepočtu odsud třída `Converter` získá informaci o aktuálním nastavení a pomocí příslušné vyhledávací tabulky provede přepočet. Samotná třída `ExperimentControl` obsahuje metody, které se využívají ve většině experimentech. Tyto metody se netýkají hardwaru, spíše zjednodušují přípravu a ovládání experimentů.

Pro volání metod sloužících k řízení hardwaru slouží naopak třída `HWLayer`. Ta v sobě obsahuje definice tříd pro ovládání jednotlivých zařízení, které představuje Obrázek 5, a také instanci třídy `MatlabIFace` pro ovládání prostředí Matlab. Samotné třídy vycházejí z návrhového vzoru singleton, česky „jedináček“. Třída podle tohoto vzoru pak zajišťuje, aby její instance existovala pouze jednou. `HWLayer` pak obsahuje všechny metody pro ovládání veškerého hardwaru a sama je vytvořena na základě stejného návrhového vzoru. V rámci měření a experimentů jsou pak namísto metod z jednotlivých tříd volány metody z `HWLayer`. Jednotlivé třídy pro ovládání HW budou v práci popisovány průběžně v moment, kdy bude představena jejich implementace nebo využití.

Další třídou je pak třída `Quest`, která s využitím třídy `MatlabIFace` implementuje ovládání tohoto algoritmu v běžícím Matlabu na pozadí programu řídicího experiment. Instance této třídy jsou pak hojně využívány například v jednotlivých potomcích třídy `AbstractTestForm`, kde slouží pro doporučování následujících úrovní podnětů a vyhodnocování jejich výsledných prahů.

5.1 Implementace ovládání Kikusui v režimu zdroje

Za účelem efektivního ovládání Kikusui přímo za běhu programu byla v rámci práce vytvořena třída `KikusuiCommClass`. Kikusui lze z počítače ovládat pomocí posílání příkazů. Aby toho šlo docílit z prostředí Visual Studia, bylo potřeba pro tuto funkcionalitu využít knihovnu `Ivi.Visa.Interop`. Tu lze nainstalovat pomocí programu NI Package Manager [24]. Tato knihovna umožňuje posílání SCPI příkazů pomocí USB do Kikusui. Zkratka SCPI definuje standardní syntaxi a zahrnuje v sobě jednotlivé příkazy pro ovládání měřicích zařízení.

Třída dědí z rozhraní `IDisposable` a je vytvořena pomocí návrhového vzoru singleton. Při vytváření instance je do Kikusui poslána série příkazů zajišťující inicializaci zařízení a nastavení ovládání na vzdálené. Dědění naopak zajišťuje uvolnění třídou využívaných zdrojů

v případě, že Kikusui přestanou být potřeba. Tabulka 1 dále ukazuje připravené metody pro řízení Kikusui během chodu programu.

Tabulka 1: Metody pro řízení Kikusui

Metoda	Popis
SetACVoltage	Generování střídavého napětí o zvolené úrovni a frekvenci na výstupu daného zařízení.
SetDCVoltage	Generování stejnosměrného napětí o zvolené úrovni na výstupu daného zařízení.
SetACDCVoltage	Generování stejnosměrného napětí modulovaného střídavým průběhem.
SetExternalInput	Přepnutí zařízení do režimu zesilovače, kdy na vstup přichází průběhy z jiného zdroje.
StopOperation	Vypnutí přivádění napětí na výstup.
ErrAckn	Potvrzení o přijetí informace o chybě, díky čemuž je zařízení možné dále používat.

S využitím těchto metod by bylo možné přivádět napěťové průběhy na žárovky přímo pomocí Kikusui, kde by zařízení fungovalo jako zdroj. Nabízela se však ještě zmíněná druhá možnost, konkrétně využít Kikusui jako zesilovač signálu. Průběhy by pak byly na vstup zařízení přiváděny z NI 6351. Hlavním cílem zde bylo dosáhnout možnosti co nejjemnější modulace a bylo předpokládáno, že využití Kikusui v roli zesilovače by pro tento účel mohlo být efektivnější. Pro potvrzení bylo však nutno připravit obě možnosti a následně je srovnat.

5.2 Implementace zesilování průběhů pomocí Kikusui

Pro druhou variantu byla vytvořena třída `WaveformGenerator`. Ta zajišťuje několik funkcionalit. První z nich je výpočet modulovaného napěťového průběhu na základě zadaných parametrů, druhou dělení vypočteného signálu do několika bloků, aby do NI 6351 mohl být po částech posílán libovolně dlouhý signál bez ohledu na velikost vyrovnávací paměti zařízení, a třetí pak aplikace korekcí dle zadaných požadavků.

Průběh se v základu odvíjel od rovnice sinusové modulace jasu, tedy

$$L(t) = L_0(1 + a_m \sin(2\pi f_m t)) , \quad (5.1)$$

kde L_0 je střední hodnota jasu (cd/m^2), a_m relativní amplituda modulace (%), f_m frekvence modulace (Hz) a t čas (s).

Požadavkem však bylo připravit třídu co nejvíce univerzálně, aby byla znovupoužitelná u případných dalších experimentů. Výše představený předpis byl tak rozšířen a byla do něj zahrnuta možnost práce se střídavým i stejnosměrným napětím a také meziharmonická složka. Umožněn byl také výpočet signálu pro obdélníkový průběh. Vzorec byl tedy rozšířen a upraven na výpočet napětí, které bude přiváděno na žárovky.

Jeho podoba pro sinusový průběh tedy vypadá následovně:

$$V(t) = \left(V_{DC} + \sqrt{2}V_{AC} \sin(2\pi f_{AC}t) + \sqrt{2}V_{AC} \frac{a_{ih}}{100} \sin(2\pi f_{ih}t) \right) \cdot \left(1 + \frac{a_m}{100} \sin(2\pi f_m t) \right), \quad (5.2)$$

kde nová proměnná V reprezentuje napětí. V případě dolního indexu AC značí střídavé, v případě DC stejnosměrné. V_{AC} i V_{DC} jsou metodě zadávány ve V. Obdobně f_{AC} zastupuje základní frekvenci (Hz) střídavého napětí. Meziharmonická složka je počítána na základě hodnot a_{ih} a f_{ih} . Vzorec v této podobě zajišťuje, aby bylo možné modulaci, tedy a_{ih} a a_m , zadávat metodě v procentech nominální hodnoty napětí.

Pro výpočet obdélníkové modulace byla upravena část v závorce, kterou je první část vzorce násobena. Tato úprava vypadala následovně:

$$\left(1 + \frac{a_m}{100} \operatorname{sgn}(\sin(2\pi f_m t)) \right), \quad (5.3)$$

kde proměnné odpovídají předchozím dvěma vzorcům.

S využitím představeného vzorce jsou pak ve třídě na základě zadaných parametrů vypočítávány průběhy jednotlivých pokusů. Tabulka 2 představuje seznam veřejných metod pro práci s průběhy.

Tabulka 2: Veřejné metody pro práci s průběhy ve třídě WaveformGenerator

Metoda	Popis
CalculateStimulusWaveform	Spočítá průběh signálu na základě zadaných parametrů, aplikuje na něj příslušnou korekci a uloží jej do pole v rámci třídy.
GetNextBuffer	Vrátí následný blok signálu. Pokud běží pokus, jedná se o část spočítaného průběhu. Pokud pokus neběží, vrací výchozí střídavé nebo stejnosměrné napětíové průběhy.
GetNextStartBlock	Vrací následný blok průběhu zajišťujícího pozvolné rozsvícení žárovek.
ChangeFundamentalAmplitude	Změní nominální hodnotu střídavého i stejnosměrného napětí a přepočítá výchozí průběhy.
ChangeFundamentalFrequency	Změní základní frekvenci střídavého proudu a přepočítá výchozí průběh.
RecalculateDefaultSignals	Přepočítá výchozí průběhy.
StartStimulus	Nastaví, že třída bude vracet bloky vypočítaného signálu pro pokus.
StopStimulus	Nastaví, že třída bude vracet výchozí průběhy.

Při generování průběhů je zde také možnost volby korekce. Za tímto účelem byl vytvořen nový výčtový typ s názvem `WaveformCorrectionType`.

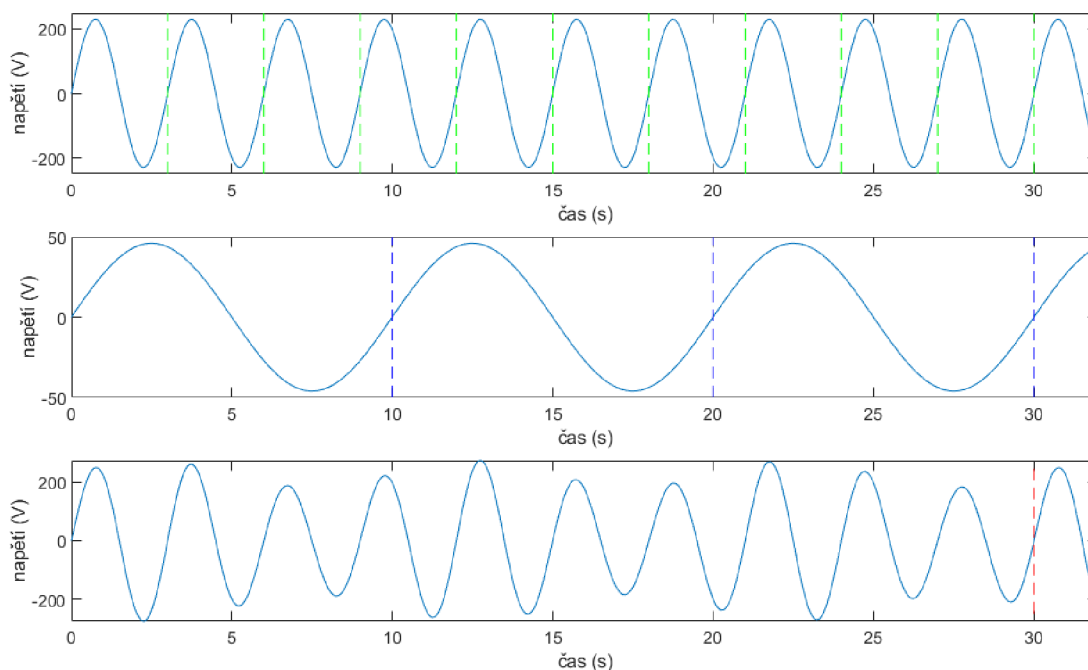
Tento typ obsahuje následující možnosti:

- `none`
- `gainfactor`
- `gainfactorX`
- `gainfactorRMS`
- `gainfactorXRMS`
- `transform`

Jednotlivé možnosti odpovídají způsobům korekce popsaným v kapitole 4.2. Symbol „X“ zde zastupuje dodatečnou korekci u vyšších hodnot modulace při vyšších frekvencích. Zkratka RMS označuje variantu zajišťující, aby efektivní hodnota průběhu odpovídala nominální hodnotě napětí. Podle zvoleného typu korekce je pak při generování napětíového průběhu zavolána jedna nebo více metod, které danou korekci zajistí. Tyto metody byly připraveny během kalibrace na základě provedených měření a konkrétní korekce budou popsány později v práci.

5.2.1 Výpočet délky signálu a jeho dělení na bloky

Jak již bylo zmíněno, v rámci třídy bylo potřeba vypočtený signál vhodně dělit na bloky. Součástí toho bylo také určit, jak má být celý průběh dlouhý. Bylo totiž potřeba zvolit délku tak, aby na sebe jednotlivé sinusovky plynule navazovaly a nedocházelo tak při cyklickém opakování průběhu k napěťovým skokům, které by v první řadě byly na žárovkách vidět, čímž by figurantovi vyzradili, na který segment je přiváděno modulované napětí, v druhé řadě pak snížily životnost žárovek. Správnou délku bylo potřeba navíc zajistit i pro neceločíselné frekvence jako $33\frac{1}{3}$ Hz nebo 8,8 Hz, které je také vhodné testovat. Další úskalí se pak pojilo se střídavým napětím, kde se pracuje se dvěma frekvencemi, tedy s frekvencí základní a modulační. I v tomto případě na sebe musí sinusové průběhy vhodně navazovat. Celý signál tedy musí být tak dlouhý, aby ve stejnou dobu skončily průběhy o obou frekvencích. Hodnota, ve které oba průběhy končí, musí být zároveň poslední hodnotou napočítaného signálu, který je následně poslán do vyrovnávací paměti NI 6351.



Obrázek 7: Znázornění problému s délkou signálu

Obrázek 7 popsanou problematiku demonstruje. Oba dva průběhy reprezentují sinusové průběhy o odlišných frekvencích. V rámci přehlednosti ukázky byly použity frekvence $\frac{1}{3}$ Hz a 0,1 Hz. Barevné svislé čáry pak ukazují body v čase, kdy se signál již začíná opakovat. Jedná se tak o kandidáty, podle kterých by teoreticky bylo možné nastavit délku předpočítaného

průběhu. Kdybychom však vybrali jakýkoliv moment před 30. sekundou, skončila by v této hodnotě pouze jedna z frekvencí. Poslední průběh je totiž složený z obou frekvencí a právě čas 30 s, který je označen červeně, je v tomto rozmezí jediným vhodným momentem, podle kterého je délku signálu možné určit. Délka průběhu musí navíc odpovídat také velikosti bufferu. Velikost bufferu je proto převedena na hypotetickou frekvenci a také zahrnuta do algoritmu.

Převod je proveden výpočtem

$$f_b = \frac{1}{\text{velikost bloku} / f_s}, \quad (5.4)$$

kde f_s zastupuje vzorkovací frekvenci.

V rámci třídy bylo tedy připraveno několik metod, které společně tento úkol řeší. Hlavní metoda, která vrací výslednou délku signálu využitou při výpočtu signálu, nese název **StimulusTiming**. V prvním kroku je potřeba určit minimální společnou periodu. Pokud má metoda nalézt délku signálu pouze pro celočíselné frekvence, je výstupem tohoto kroku převrácená hodnota největšího společného dělitele všech frekvencí, a tedy odpovídá jejich společné periodě. Vyskytne-li se mezi zadanými frekvencemi frekvence s nenulovým konečným desetinným rozvojem, je potřeba ji převést na celočíselnou. Pokud si tuto frekvenci představíme ve formě zlomku, jedná se o prosté rozšíření zlomku mocninou deseti, aby číselník i jmenovatel byl celočíselný. Zároveň je uchovávána informace o tom, kolikátou mocninou čísla 10 byl zlomek rozšířen. Stejnou hodnotou je pak nutné rozšířit všechny ostatní frekvence. Výpočet největšího společného dělitele je prováděn z číselníků rozšířených frekvencí.

Potřebnou délku signálu lze pak spočítat pomocí vztahu

$$T = \frac{10^n}{\text{NSD}}, \quad (5.5)$$

kde NSD je největší společný dělitel všech zadaných frekvencí a n je počet posunutí desetinné čárky.

Následně jsou do výpočtu periody zahrnuty případné frekvence s nekonečným periodickým desetinným rozvojem. Ty jsou metodě zadávány faktorem, který odpovídá děliteli při racionálním zápisu dané frekvence. Tedy např. u frekvence $33 \frac{1}{3}$ Hz je faktor roven 3. Z faktorů je následně vypočten nejmenší společný dělitel, který je dále použit k zahrnutí frekvencí s periodickým desetinným rozvojem do minimální společné periody. Označíme-li tento násobek jako NSN

a původní periodu získanou v přechodím kroku jako T , pak následující pseudokód (Zdrojový kód 5.1) tento krok demonstruje:

```
puvodni_perioda := T
while T mod NSN > 0
  T := T + puvodni_perioda
end
```

Zdrojový kód 5.1: Zahnutí frekvencí s periodickým desetinným rozvojem do periody

Takto získaná minimální společná perioda je využita pro určení délky signálu a počtu dílčích bloků, na které má být signál rozdělen. Pro lepší pochopení bude nyní výpočet demonstrován na dvou příkladech.

V prvním příkladu je základní frekvence nastavena na 50 Hz a modulační na 8,8 Hz. Dále vzorkovací frekvence odpovídá reálné frekvenci při experimentu, tedy 36000 Hz, velikost bufferu je 14400 vzorků.

V prvním kroku tedy převedeme velikost bufferu na velikost bloku v čase, a následně vypočteme novou hypotetickou frekvenci:

$$f_b = \frac{1}{14400 / 36000} = 2,5 \quad (5.6)$$

Nyní máme tedy tři frekvence, ze kterých je potřeba vypočítat největšího společného dělitele. Vzhledem k tomu, že dvě z frekvencí mají za desetinnou čárkou jednu cifru, je potřeba čitatele i jmenovatele rozšířit první mocninou čísla 10.

$$\frac{50}{1} \cdot \frac{10}{10} = \frac{500}{10} \quad (5.7)$$

$$\frac{8,8}{1} \cdot \frac{10}{10} = \frac{88}{10} \quad (5.8)$$

$$\frac{2,5}{1} \cdot \frac{10}{10} = \frac{25}{10} \quad (5.9)$$

Z číteleů rozšířených zlomků vypočteme NSD, který je v tomto případě roven 1. Nakonec je proveden výpočet periody.

$$T = \frac{10}{1} = 10 \quad (5.10)$$

Vzhledem k tomu, že zde nebyla zahrnuta žádná frekvence s nekonečným desetinným rozvojem, můžeme z periody jednoduše vypočítat počet dílčích bloků a potřebnou délku signálu.

$$\text{počet bloků} = \frac{10}{14400 / 36000} = 25 \quad (5.11)$$

$$\text{délka signálu} = 25 \cdot 14400 = 360000 \quad (5.12)$$

V druhém příkladu bude modulační frekvence $33\frac{1}{3}$ Hz, programu zadávána ve formě desetinného čísla jako 33,3 Hz, ostatní hodnoty jsou stejné jako u prvního příkladu. NSD je tentokrát vypočítán z frekvencí 500 a 25 Hz. Frekvence 33,3 Hz se kvůli periodickému rozvoji do výpočtu nezahrnuje. Ta je řešena později pomocí pole faktorů. NSD je tentokrát roven 2,5, tedy $T = 0,4$.

Následně musíme zahrnout poslední frekvenci, její faktor je v tomto případě 3. Z faktorů je vypočítáván NSN. V tomto případě však máme pouze jeden faktor, takže NSN odpovídá jeho hodnotě, tedy $NSN = 3$. Nakonec aplikujeme postup znázorněný ve Zdrojovém kódu 5.1, tedy přičítáme k T její původní hodnotu, dokud T není dělitelná NSN. Výsledná $T = 6$, protože se jedná o nejbližší celé číslo dělitelné 3. Z výsledné periody je pak vypočten počet bloků a délka signálu obdobně jako u prvního příkladu.

Informace o délce signálu a počtu bloků jsou přepočteny při každém výpočtu průběhu signálu voláním metody `CalculateStimulusWaveform`. Pokud je pak po třídě požadováno, aby vrátila následující blok signálu, vrátí úsek vypočteného signálu o délce odpovídající vypočtené délce dílčího bloku. Ve třídě je uchovávána informace, kolikátý dílčí blok má být vrácen při příštím požadavku. Tato informace tedy slouží jako ukazatel na část signálu.

5.2.2 Přivádění signálů přes NI 6351 do Kikusui

Následně bylo potřeba připravit metody, které budou napočtený a do bloků dělený signál načítat postupně do NI 6351, odkud bude zesílený signál pomocí jednoho z Kikusui přiváděn do konkrétního segmentu světelného boxu. Za tímto účelem byla rozšířena třída `NICommClass`

o několik metod, které toto zajišťují. Tabulka 3 obsahuje popis veřejných metod, pomocí kterých lze proces řídit.

Tabulka 3: Veřejné metody pro přivádění bloků signálu do NI 6351 a poté do Kikusui

Metoda	Popis
<code>KikusuiContInit</code>	Inicializace procesu postupného přivádění průběhů z NI 6351 do Kikusui. V rámci metody jsou vytvořena a nastavena potřebná vlákna a je vytvořena instance třídy <code>WaveformGenerator</code> .
<code>KikusuiContStartThread</code>	Spuštění procesu, který po blocích postupně do NI 6351 načítá jednotlivé bloky signálu, které následně přivádí zesílené pomocí Kikusui do žárovek.
<code>KikusuiContStopSthread</code>	Ukončení procesu načítajícího bloky signálu.
<code>KikusuiContStartStimulus</code>	Spuštění pokusu se zadaným nastavením. Na žárovky je přiváděno modulované napětí dle vstupních parametrů funkce.
<code>KikusuiContStopStimulus</code>	Ukončení pokusu. Na žárovky je přiváděn výchozí signál.

Na pozadí během celého procesu běží komponenta typu `BackgroundWorker`. Ta je vhodná pro provádění časově náročných operací na pozadí programu. V rámci komponenty je cyklicky využívána úloha typu `Task` pro asynchronní zápis dat do NI 6351. Během každého cyklu je z instance třídy `WaveformGenerator` zavolána metoda pro získání následujícího bloku signálu, který je vždy posílán do NI 6351. Tento proces se opakuje až do doby, kdy je úloha ukončena.

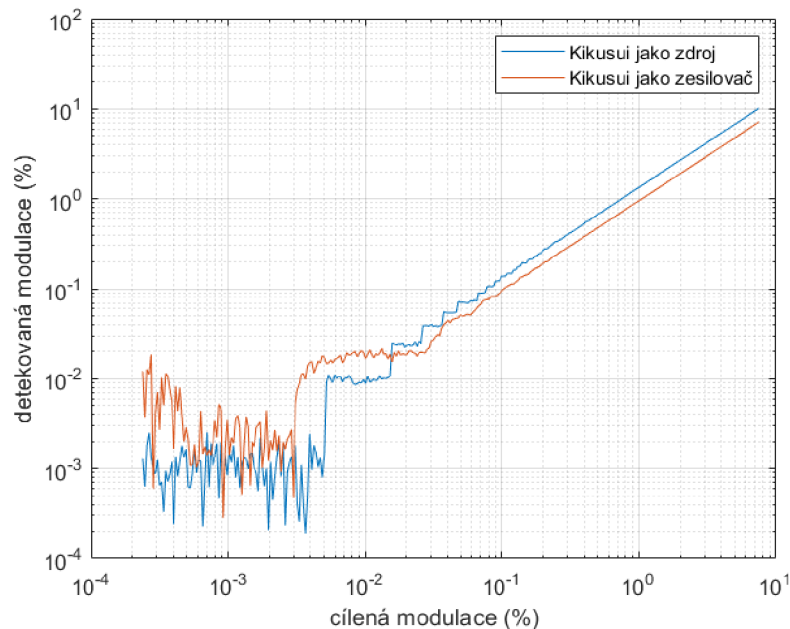
Pro všechny veřejné metody byly vytvořeny odpovídající metody ve třídě `HWLayer`. V tomto stavu bylo připraveno posílání průběhů do žárovek jak přímo pomocí Kikusui v režimu zdroje, tak v zesilovacím režimu průběhů z NI 6351.

5.3 Srovnání Kikusui v režimu zdroje a zesilovače

Následně byla srovnána varianta generování průběhů přímo pomocí Kikusui s variantou, kdy Kikusui zesiluje průběhy z NI 6351. Za tímto účelem byly vytvořeny dva kalibrační programy, jeden pro každý režim Kikusui. Cílem bylo zjistit, jak nízkou modulaci bude který režim schopný poskytnout. Algoritmus obou variant byl podobný.

Nejprve bylo do žárovek přivedeno na 1 hodinu stejnosměrného napětí 230 V. Během této doby se žárovka ustálila a Kikusui se dostalo do provozní teploty. Následně byly na žárovku postupně přiváděny s logaritmickým krokem jednotlivé úrovně modulace v rozsahu přibližně od 10 do

0,01 %. Nominální hodnota napětí byla po celou dobu nastavena na 230 V a frekvence fixně na 10 Hz. S využitím NI 6351 byly fotodiodami zaznamenávány průběhy světelných toků. Výsledky pro každou testovanou úroveň amplitudy byly zaznamenávány do souboru, a to jak ve formě dat z fotodiod, tak ve formě hodnot přepočítaných na jas.



Graf 5.1: Srovnání obou režimů Kikusui

K vyhodnocení dat byl připraven skript v prostředí Matlab, kde byly pomocí DFT ze zaznamenaných průběhů vypočteny reálně dosažené úrovně modulace jasu.

Máme-li pole dat z fotodiod o velikosti N prvků, kde n -tý prvek označíme jako $x[n]$, lze DFT pro k -tou frekvenční složku ($0 \leq k < N$) definovat pomocí následujícího vztahu:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \quad (5.13)$$

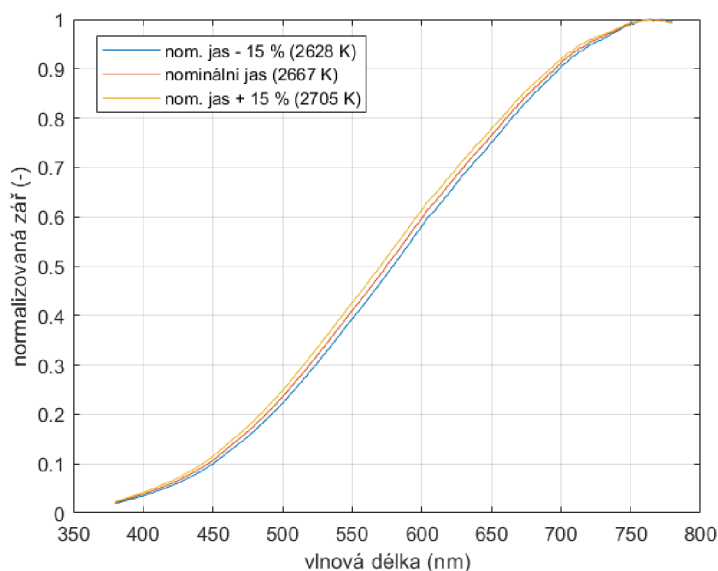
Graf 5.1 ukazuje srovnání mezi cílenými a reálně dosaženými modulacemi pro oba režimy Kikusui. Při pohledu směrem od nejvyšší měřené úrovně modulace lze pozorovat, že křivka reprezentující zesilovací režim je ve větším úseku blíže k lineární funkci, zatímco na křivce reprezentující režim zdroje se začínají dříve objevovat odchylné skoky. Při využití Kikusui v režimu zdroje se proto od modulace 0,1 % níže objevují zvětšující se schodovité skoky, které jsou způsobeny tím, že Kikusui už nezvládá generovat napěťové průběhy s takto malými rozdíly v modulaci. Z grafu tak jasně vyplývá, že zesilovací režim dokáže poskytnout jemnější úrovně modulace, a byl proto zvolen pro připravovaný experiment.

6 Kalibrace

Pro správnou funkčnost experimentu bylo v rámci práce potřeba provést dodatečná měření, pro která musely být zhotoveny programy pro řízení měřicí aparatury. V první fázi bylo ale potřeba vybrat vhodné materiály pro zhotovení pozorovací plošky. Jak již bylo nastíněno, vhodná ploška musela splňovat několik kritérií. Prvním z nich bylo snížit jas na 85 cd/m^2 při nominálním napětí 230 V. Dále musela být pozorovací plocha co nejvíce homogenní, aby více svítivá místa či textura materiálu neovlivňovala vjem blikání či nerušila figuranty. A samozřejmě ploška měla v ideálním případě co nejméně ovlivňovat teplotu chromatičnosti a spektrum žárovky.

Za tímto účelem bylo testováno množství materiálů. Ty byly vždy umístěny do jednoho ze segmentů boxu, kde bylo na žárovku přivedeno stálé napětí 230 V. Pomocí SpectraScanu bylo pak vždy naměřeno spektrum, ze kterého mohla být zpětně spočtena teplota chromatičnosti a jas. K tomu byla využita třída **pr740** v projektu, která slouží k ovládání SpectraScanu přes sériový port. Naměřená spektra byla ukládána do CSV souborů pro pozdější vyhodnocení. Vyhodnocení bylo prováděno v prostředí Matlab. Ze spekter byla dopočtena teplota chromatičnosti, která byla porovnána s teplotou žárovky. Bylo také zkoumáno, jak výrazně testované materiály snižují jas. Samotná spektra pak byla porovnáována také s křivkou vypočtenou pomocí Planckova zákona.

Na základě poznatků pak bylo vybráno několik materiálů, které odpovídaly žadaným kritériím. Mezi materiály patřila drátěná mřížka, bílá netkaná textilie a pískované sklo. Ukázalo se, že drátěná mřížka velmi dobře snižovala jas. Netkaná textilie jas snižovala méně, avšak měla velmi pozitivní efekt na homogenní osvětlení plošky. Přidáním nebo odebráním různého počtu slabých vrstev šlo také vhodně korigovat teplotu, aby byla u obou segmentů stejná. Jednotlivé žárovky se totiž i přes stejné parametry od výrobce mohou více či méně lišit, což bude ještě nastíněno později v rámci práce. Problém obou materiálů byl však ve viditelné textuře. Právě tento nedostatek však vyřešily tři vrstvy pískovaného skla v popředí. Tato kombinace byla tedy umístěna na oba segmenty boxu, kam bylo přidáno ještě stínítko, jenž zabraňovalo přímému osvětlení plošky žárovkou.

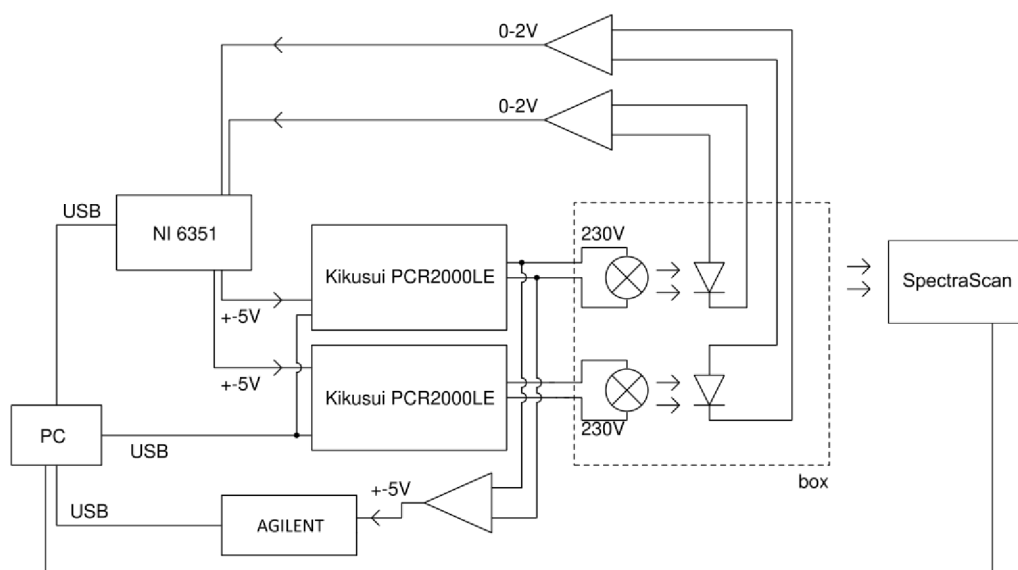


Graf 6.1: Spektrum žárovky naměřené na pozorovací plošce

Graf 6.1 ukazuje naměřené spektrum na výsledné pozorovací plošce. Je zde vidět také srovnání, jak se spektrum mění při zvýšení a snížení jasu o 15 %. Mění se také teplota chromatičnosti, a to až o několik desítek K.

6.1 Program pro nalezení závislosti na přiváděném napětí

S připravenou pozorovací ploškou bylo potřeba nelézt závislost mezi vstupním napětím přiváděným na žárovky, výstupem z fotodiody a reálným jasnem. Obrázek 8 ukazuje, jak bylo zapojení stanoviště pozměněno pro toto měření.



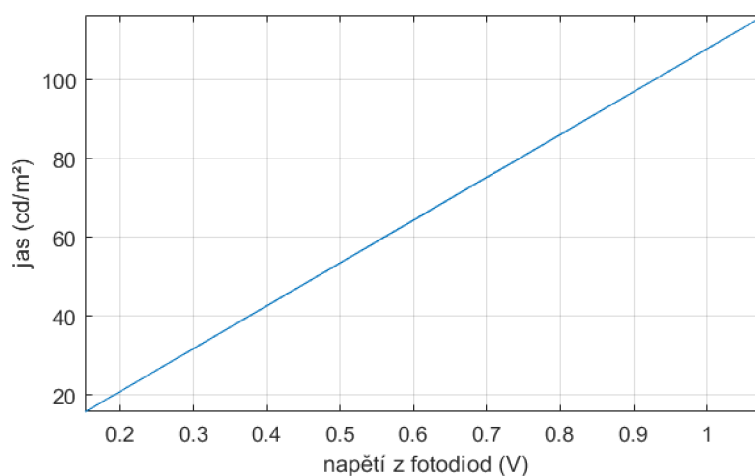
Obrázek 8: Zapojení pro kalibraci hledající závislosti

Závislost musela být hledána pro každý segment zvlášť, jak kvůli rozdílnosti v žárovkách, tak z důvodu nepatrných rozdílů v umístění fotodiód či materiálů tvořících pozorovací plošku. Za tímto účelem byl připraven měřicí program. Program musel být spouštěn zvlášť pro každý segment, protože k měření využíval SpectraScan, který byl k dispozici pouze jeden.

Po hodinovém předeřívání bylo na jednu ze žárovek postupně přiváděno pomocí Kikusui napětí od 150 do 250 V s krokem 5 V. Při změně hodnoty napětí program vždy čekal ještě 15 minut na případné ustálení žárovky. Následně byla spočtena průměrná hodnota ze sekundy signálu naměřeného s využitím NI 6351 pomocí fotodiód při vzorkovací frekvenci 800 Hz. Pomocí SpectraScanu bylo naměřené spektrum a jas. Pro kontrolu byla také ukládána data o napětí a proudu na výstupu. Zde byl využit multimetr 34411A od firmy Agilent a třída `AgilentMeasCommClass`, která zajišťuje ovládání zařízení pomocí SCPI příkazů obdobně, jako tomu je u Kikusui. Tento postup se opakoval až do hodnoty 250 V. Měření bylo následně provedeno ještě jednou v opačném pořadí, tedy od 250 do 150 V.

Po skončení měření jsou data ukládána do dvou souborů. Každý řádek prvního souboru odpovídá jednomu měření a hodnoty jsou v něm odděleny středníkem. První hodnota reprezentuje příslušnou časovou značku, druhá vstupní napětí, třetí zprůměrovaná data z fotodiód do jedné hodnoty, čtvrtá jas naměřený SpectraScanem, pátá naměřená napětí na výstupu a poslední naměřený proud. Druhý soubor pak obsahuje časové značky a k nim příslušná naměřená spektra, hodnoty jsou opět odděleny středníkem. Pomocí totožných značek v obou souborech lze pak jednoduše přiřadit spektra k ostatním naměřeným hodnotám.

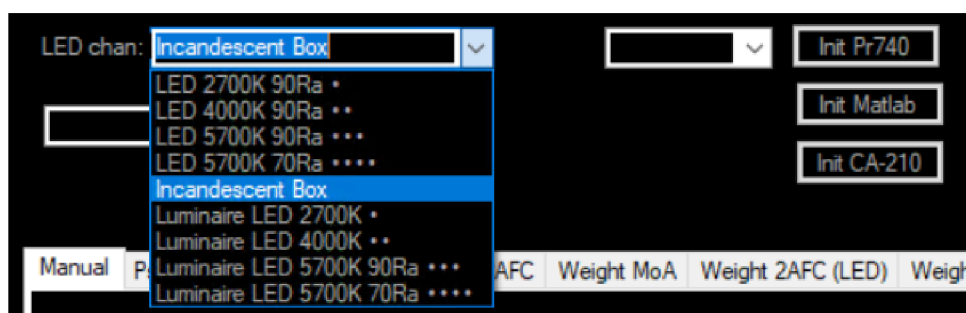
6.1.1 Vyhodnocení dat a implementace závislostí do programu



Graf 6.2: Závislost jasu na napětí z fotodiód

Data byla následně načtena s využitím prostředí Matlab, kde bylo zkontrolováno, zda neobsahují viditelné výkyvy. Bylo zjištěno, že mezi hodnotami z fotodiody a jasu ze SpectraScanu existuje lineární závislost, jak ukazuje Graf 6.2. Tento poznatek byl užitečný později v práci.

Následně byla z dat připravena vyhledávací tabulka pro přepočítání mezi hodnotami. V rámci třídy `ChannelSetup` bylo vytvořeno nové nastavení sloužící pro přepnutí přepočtu pro experimenty se žárovkami, na které lze díky tomu přepnout v levém horním rohu uživatelského rozhraní (Obrázek 9). Do tohoto nastavení pak byly přidány odkazy na tabulky pro oba segmenty boxu. Závislosti byly přeměřeny pokaždé, když bylo manipulováno s fotodiody nebo měněny žárovky.



Obrázek 9: Volba nastavení pro experiment se žárovkami

6.2 Program pro nalezení faktoru zesílení

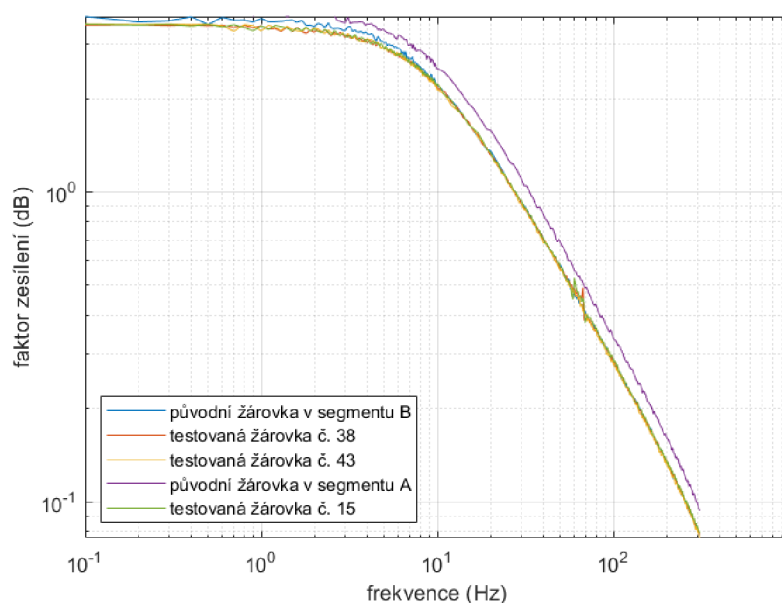
Dále bylo potřeba provést měření pro přípravu korekcí popsanych v kapitole 4.2. První byl v rámci práce řešen faktor zesílení. Za tímto účelem byl tedy vytvořen kalibrační program, který měl ukládat data o reálně dosažených úrovních modulace. Program byl spuštěn opět dvakrát, jednou pro každý segment.

Na jeden ze segmentů byly postupně cyklicky přiváděny napěťové průběhy s fixní úrovní modulace nastavenou na 2 %. Průběhů bylo celkem 299, kdy každý odpovídal jiné frekvenci modulace. Jednalo se o frekvence od 0,1 Hz do 10 Hz s krokem 0,1 Hz, dále od 11 Hz až do 110 Hz s krokem 1 Hz, a nakonec od 112 Hz až do 308 Hz s krokem 2 Hz. Průběhy byly zaznamenávány fotodiody pomocí NI 6351. Naměřené průběhy a jejich přepočty na hodnoty jasu byly ukládány do jednotlivých souborů. Z průběhů byla vždy vypočtena pomocí DFT (Rovnice 5.13) reálně dosažená procentuální úroveň modulace. Úrovně ze všech průběhů pak byly uloženy do jednoho společného souboru.

Pro kontrolu byly také ukládány napěťové průběhy vycházející přímo z Kikusui. K záznamu průběhů bylo využito zařízení National Instruments USB-6212 (dále jen NI 6212). Pro jeho ovládání byla vytvořena nová třída s názvem `NI6212CommClass`. Při implementaci třídy byly využity knihovny `NationalInstruments` a `NationalInstruments.DAQmx`. Knihovny dohromady přináší struktury a metody pro načítání a posílání dat do zařízení National Instruments. Stejně knihovny jsou využity ve třídě `NICommClass`. Obdobně jako ostatní třídy pro ovládání hardwaru dědí i tato třída z rozhraní `IDisposable` a je vytvořena pomocí návrhového vzoru singleton. Měření dat z Kikusui je pak realizováno voláním vytvořené metody `ReadKikusuiVoltage`, která je v rámci třídy kromě metod souvisejících s instancí třídy jedinou veřejnou metodou. Jako vstupní parametr metody se zadává požadovaný počet vzorků pro naměření. Vzorkovací frekvence je v základu nastavena na 10000 Hz, lze ji případně změnit pomocí setteru.

6.2.1 Výběr vhodných žárovek

Pro druhou variantu experimentu řízenou modulací napětí bylo stěžejní, aby byly zvoleny žárovky se stejnými vlastnostmi. Tedy kromě výkonu a teploty chromatičnosti musely mít také v základu stejný faktor zesílení. Přestože bylo testováno několik parametrově totožných žárovek od stejného výrobce, jejich výkony i teploty chromatičnosti se při přeměření lišily. Bylo tedy zřejmé, že to bude platit i pro faktor zesílení. Bylo vytipováno několik žárovek s vhodnými parametry, u kterých bylo navíc zkontrolováno, že netrpí spontánními fluktuacemi.



Graf 6.3: Ukázka srovnání faktorů zesílení některých žárovek

Data byla tedy naměřena pro každou z vybraných žárovek. Následně byla zpracovávána v prostředí Matlab. Byla provedena kontrola naměřených průběhů z fotodiod i napěťových průběhů z Kikusui, zda se neobjevily nežádoucí anomálie. Z naměřených úrovní modulace byly následně vypočteny faktory zesílení pro jednotlivé frekvence z obou segmentů světelného boxu. Faktory zesílení byly následně zobrazeny do grafu (Graf 6.3) a srovnány mezi sebou. Následně byly vybrány dvě žárovky, kde byly rozdíly hodnot faktorů u všech frekvencí co nejmenší.

Pro každý segment pak byla vytvořena vyhledávací tabulka, kde první sloupec obsahoval frekvenci a druhý příslušný faktor zesílení. Odkazy na vyhledávací tabulky byly přidány do třídy `WaveformGenerator`. Třída si oba soubory při vytvoření instance načte. Byla přidána metoda, která vrací faktor na základě zvoleného segmentu a frekvence, a výpočet signálu byl upraven tak, aby při zvolení korekce faktorem zesílení tuto korekci aplikoval. V kapitole 5.2 se jedná o volbu `gainfactor`.

6.3 Program pro ukládání průběhů napětí a světelných toků

Další měřicí program měl za úkol ukládat napěťové průběhy z obou Kikusui a k nim příslušné průběhy naměřené pomocí fotodiod.

Celkem program měří 12 frekvencí odpovídajících frekvencím používaných v experimentech: 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 8,8; 10; 15; 20; 25; $33\frac{1}{3}$ a 40 Hz

Pro každou frekvenci je postupně nastaveno 16 úrovní modulace:

0,01; 0,05; 0,1; 0,5; 1; 2; 4; 5; 6; 8; 10; 12; 15; 20; 25 a 30 %

Po předehrání jsou postupně na obě žárovky přiváděny z NI 6351 pomocí Kikusui zesílené průběhy o daných frekvencích a úrovních modulace. U každého průběhu je pomocí NI 6351 naměřen průběh z fotodiod a pomocí NI 6212 průběhy z Kikusui. Průběh naměřený pomocí fotodiod je také přepočten na hodnoty světelného průběhu. Všech šest průběhů, tedy tři průběhy pro každý segment, jsou uloženy do samostatného souboru. Postup se opakuje, dokud není proveden pro všechny frekvence a úrovně modulace.

6.3.1 Analýza průběhů z fotodiod

Díky naměřeným datům bylo možné analyzovat rozdíly mezi napěťovými a jasovými průběhy. V první fázi byly na žárovky přiváděny průběhy bez jakýchkoliv korekcí. Jedním z měřítek problémů, které byly z dat určeny, je THD (z anglické zkratky total harmonic distortion,

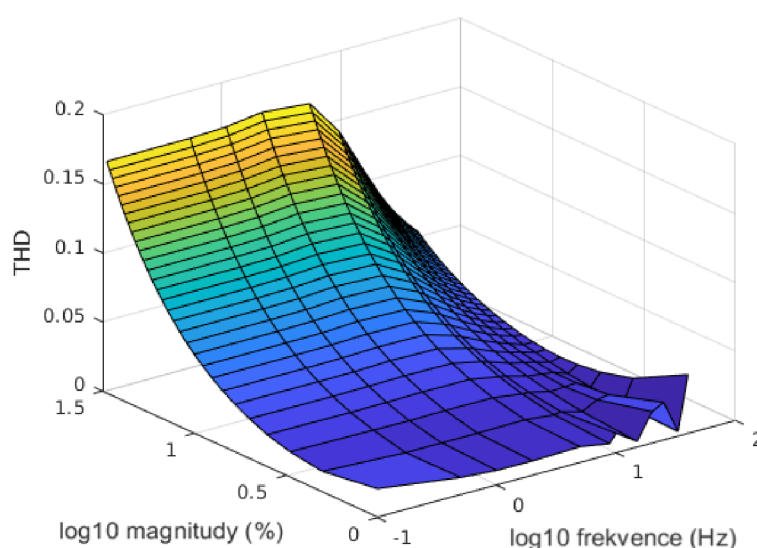
celkové harmonické zkreslení). THD reprezentuje míru, do jaké je výstupní signál z fotodiody zkreslen v porovnání s ideálním sinusovým signálem, a měří se jako poměr celkového výkonu harmonických složek zkreslení vůči základnímu kmitočtu.

THD jasu pak lze popsat pomocí vztahu

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} L_n^2}{L_1^2}}, \quad (6.1)$$

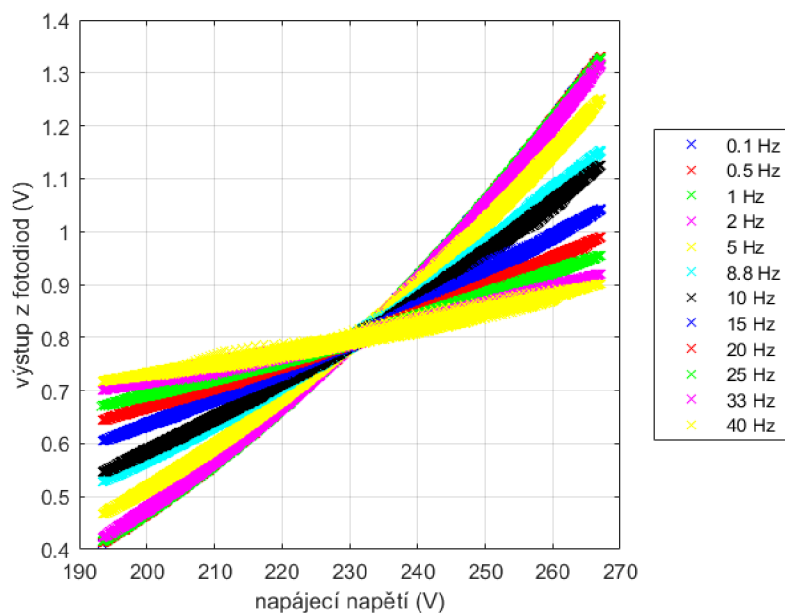
kde L_1 je úroveň jasu základní harmonické frekvence a L_n je úroveň n-té harmonické.

Graf 6.4 zobrazuje THD vypočtené z dat prvního měření, tedy případu, kdy nebyly aplikovány žádné korekce.



Graf 6.4: THD vypočtené z naměřených dat signálů bez korekcí

Graf 6.5 pak zobrazuje statickou charakteristiku u frekvencí, které měly být využívány při experimentu. Je z něj patrných hned několik úkazů. Stejně jako z naměřených faktorů zesílení je i zde vidět, že rozdíl mezi cílenou a reálnou úrovní modulace je mnohonásobně větší u nižších frekvencí. Právě faktor zesílení tento problém řeší. Dále je z grafu patrné, že závislost napětí z fotodiody na napájecím napětí není lineární. Tento jev je způsobený dříve zmíněným chováním žárovky, kdy sinusový napěťový průběh nutně nevede na sinusový průběh světla. Data naměřená pro nízké frekvence proto byla proložena regresní křivkou.



V grafu je vidět rozdíl zesílení mezi frekvencemi. Dále je vidět nelineární závislost mezi napětím přiváděným na žárovky a napětím z fotodiody. Kvůli tomu sinusový napěťový průběh nevede na sinusový průběh jasu.

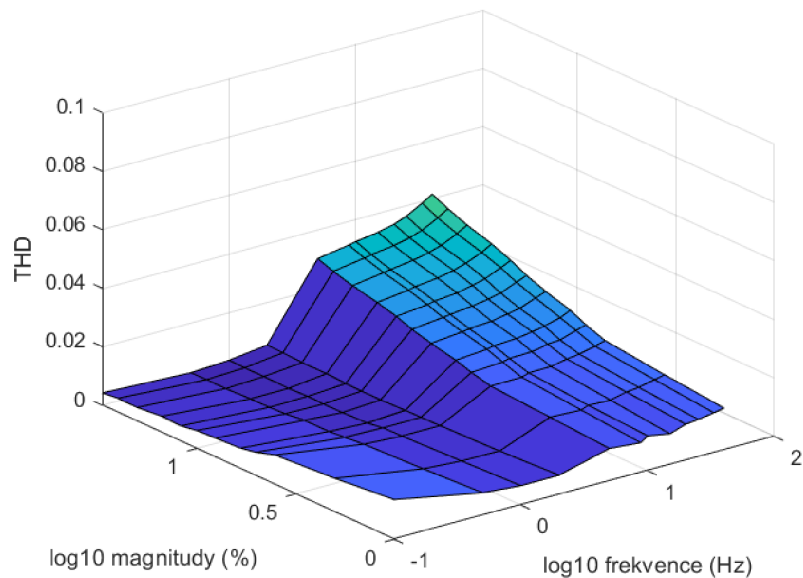
Graf 6.5: Statické charakteristiky jednotlivých frekvencí bez korekce

Na základě tohoto proložení byla získána následující transformace:

$$x[i] = 189,0838 + 45,39594 v[i] + 28,68184 \ln v[i] - 4,76996 v^2[i], \quad (6.2)$$

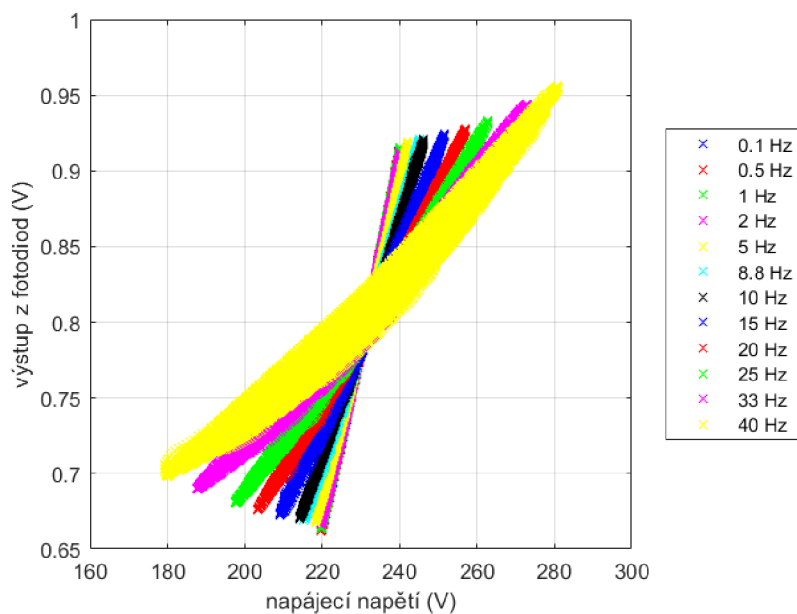
kde v je původní hodnota v v poli předpočítaného signálu na pozici i a x je nová hodnota.

Třída `WaveformGenerator` byla rozšířena o metodu aplikující tuto transformaci na předpočítaný signál, pokud je zvolen typ korekce `transform`, tedy v případě vyšších frekvencí a úrovní modulace. Aplikace této korekce pak napájecí napětí upravuje tak, že průběh světelného toku odpovídá sinusovému průběhu. Výše ukázaná statická charakteristika pak bude lineární. Měření bylo provedeno znovu s aplikováním korekce pomocí připravené transformace a faktoru zesílení. Na Grafu 6.6 je vidět efekt, který měl faktor zesílení a transformace na THD. Dále Graf 6.7 ukazuje, jak se jednotlivé statické charakteristiky změnily.



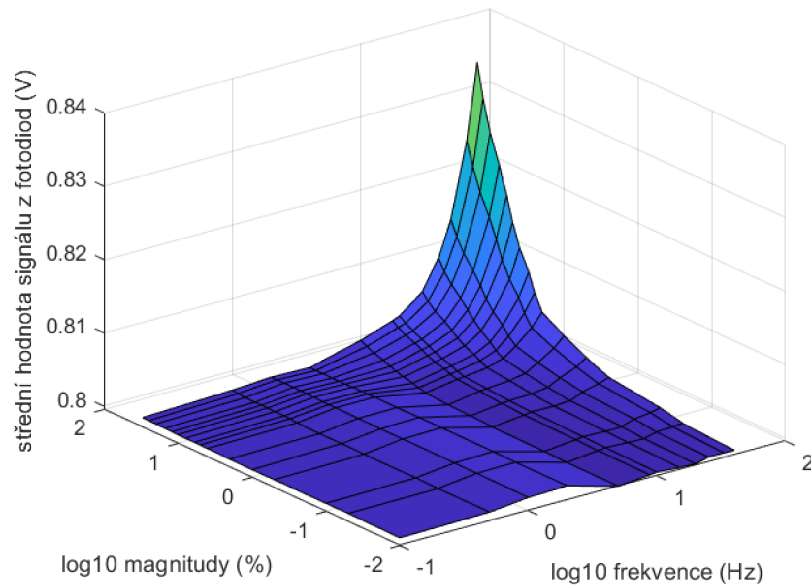
Graf ukazuje pozitivní efekt, který měly na výsledné průběhy korekce faktorem zesílení a připravenou transformací. Skokový rozdíl v hodnotách THD u vyšších úrovní modulace je způsoben mezníkem, kde je použita transformace, a kde již nikoli. Lze dále pozorovat, že korekce faktorem zesílení u průběhů s vyššími frekvencemi a úrovněmi modulace není dostatečující.

Graf 6.6: THD z naměřených dat signálů s korekcí faktorem zesílení a transformací



Oproti předchozí statické charakteristice ukazuje graf srovnání zesílení u jednotlivých frekvencí. U vysokých frekvencí je však vidět, že se naměřené hodnoty neblíží jednomu lineárnímu průběhu. Mezi charakteristikami vytvořenými z průběhů o rozdílných modulacích je vidět rozdíl v posunutí, který ve výsledném grafu tvoří iluzi plochy ve tvaru luku.

Graf 6.7: Statické charakteristiky po korekci transformací a faktorem zesílení



Graf ukazuje výrazný rozdíl ve střední hodnotě u průběhů s vyššími frekvencemi a úrovněmi modulace, který by měl vliv na intenzitu světla vycházejícího ze segmentu. Z grafu je tak vidět potřeba další korekce v této oblasti.

Graf 6.8: Střední hodnota signálu z fotodiód po korekci transformací a faktorem zesílení

Díky novým grafům lze vidět, že pomocí faktoru zesílení byly sníženy rozdíly v zesílení úrovně modulace mezi jednotlivými frekvencemi. U nízkých frekvencí byla dále pomocí transformace odstraněna nelinearita mezi napětím a výstupem z fotodiód. Díky tomu se však projevil problém, který z prvních grafů nebyl patrný. Tento problém je nejlépe vidět v Grafu 6.8. Střední hodnota průběhů s vyššími frekvencemi a vyššími úrovněmi modulace se zde od ostatních liší až o necelých 5 %. V Grafu 6.7 se tento jev projevuje posunutím celé křivky směrem nahoru. Nejlépe lze jev pozorovat u frekvence 40 Hz, která je v grafu znázorněna žlutě. Tento problém se týká lišící se efektivní hodnoty od cíleného nominálního napětí a byl zmíněn již v kapitole 4.2. Na základě tohoto objevu byla vytvořena nová korekce pro vyšší frekvence a úrovně modulace odvozená ze vzorce pro výpočet efektivní hodnoty. V podstatě se jedná o podíl nominální hodnoty napětí a reálné efektivní hodnoty průběhu.

Korekci lze popsat vztahem

$$x[i] = Vv[i] \left(\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{v^2[j]}{N} \right)} \right)^{-1}, \quad (6.3)$$

kde v je původní hodnota na pozici i pole s předpočítaným signálem o velikosti N . Jako V je označena nominální hodnota střídavého nebo stejnosměrného napětí. Korekce je opět aplikována pouze v případě, že je tak zvoleno, tedy nastaven typ jako `gainfactorRMS`.

Dodatečně byla pro vyšší frekvence a úrovně modulace přidána úprava faktoru zesílení:

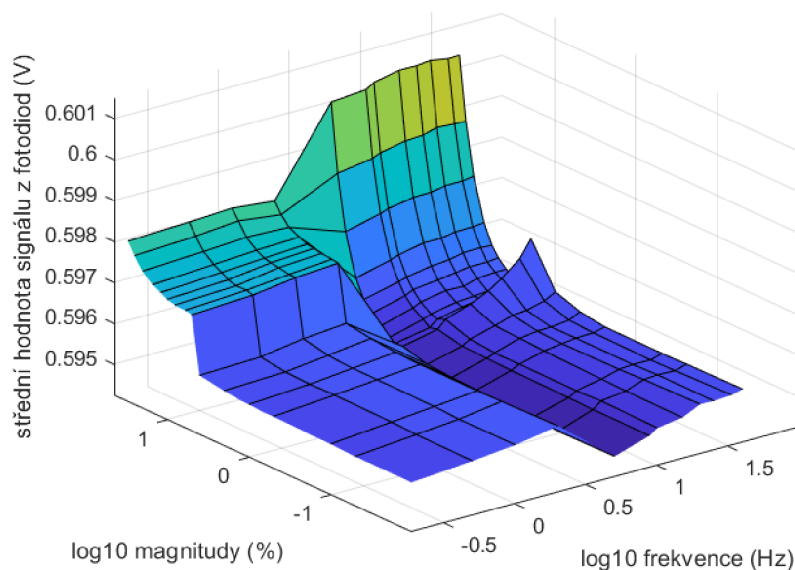
$$X = GF \cdot (1 + (p_1 + p_2a + p_3a^2) \cdot (p_4 + p_5f + p_6f^2) \cdot 0,01), \quad (6.4)$$

kde zkratka GF reprezentuje faktor zesílení, a zesilovanou úroveň modulace a f frekvenci průběhu. Tabulka 4 pak obsahuje hodnoty jednotlivých koeficientů p .

Tabulka 4: Koeficienty X korekce

Koeficient	Hodnota	Koeficient	Hodnota
p_1	0,09390998	p_4	-2,04293744
p_2	0,00275682	p_5	-0,02251192
p_3	0,00091487	p_6	-0,00410182

Obdobně jako výše byl program rozšířen o korekce `gainfactorX` a `gainfactorXRMS`. Tím byly pokryty všechny varianty korekcí představené v kapitole 5.2.

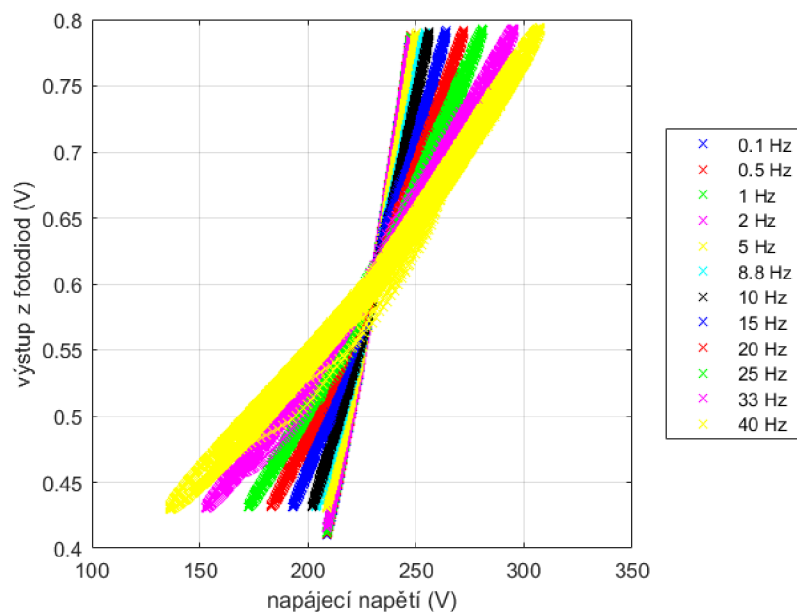


Graf ukazuje výrazné snížení rozdílů ve střední hodnotě po aplikaci korekce efektivní hodnotou a X korekce. Maximální rozdíl mezi dvěma hodnotami je nyní přibližně 1 %. Skokové změny u 5 Hz a 5% úrovně modulace jsou způsobeny přechody mezi aplikací jednotlivých typů korekce, kdy některé jsou efektivnější než jiné.

Graf 6.9: Střední hodnota signálu z fotodiód po korekci efektivní hodnoty

Graf 6.9 pak ukazuje změnu ve střední hodnotě po aplikaci původních korekcí rozšířených o korekci efektivní hodnotou a o dodatečnou korekci u vyšších frekvencí a úrovní modulace. Díky korekci efektivní hodnotou se rozdíl ve střední hodnotě mezi minimem a maximem

výrazně snížil. Rozdíly v rozsahu střední hodnoty jsou způsobené manipulací s fotodiodami uvnitř boxu, která byla mezi měřeními provedena a na výsledky nemá vliv, dokud ke změnám nedochází v průběhu měření nebo experimentu. Graf 6.10 dále ukazuje změny ve statické charakteristice po aplikaci všech korekcí.



Statická charakteristika ukazuje pozitivní efekt nových korekcí na průběhy s vyššími frekvencemi. Naměřená data se nyní více blíží k lineárnímu průběhu.

Graf 6.10: Statické charakteristiky po aplikaci všech korekcí

Na základě provedené analýzy a připravených korekcí byly následně určeny podmínky, kdy se jaký typ korekce bude aplikovat. Tabulka 5 tyto předvolby zobrazuje. Tyto podmínky byly použity v rámci tříd, které obsahují řídicí programy pro experimenty.

Tabulka 5: Nastavení korekcí podle frekvence a úrovně modulace

Frekvence	Amplituda	Typ korekce
< 5 Hz	$\geq 5\%$	transform
< 5 Hz	< 5 %	gainfactor
≥ 5 Hz	$\geq 5\%$	gainfactorXRMS
≥ 5 Hz	< 5 %	gainfactor

7 Příprava tříd pro řízení experimentů

V poslední fázi byly připraveny třídy zajišťující chod obou variant experimentu. Základní nastavení experimentu je v obou případech předáváno pomocí konstrukturu, jehož parametry zobrazuje Tabulka 6.

Tabulka 6: Parametry konstrukturu tříd pro řízení experimentu

Parametr	Datový typ	Popis
<code>figurantName</code>	<code>String</code>	Označení figuranta, které se zapisuje do souboru.
<code>fundamentalFrequency</code>	<code>decimal</code>	Základní frekvence (Hz) v případě střídavého proudu.
<code>fundamentalAmplitude</code>	<code>double</code>	Nominální hodnota napětí (V).
<code>modulationFrequencies</code>	<code>decimal[]</code>	Frekvence (Hz) testované během experimentu.
<code>initialModulationAplitudes</code>	<code>double[]</code>	Výchozí úroveň modulace (%) pro jednotlivé frekvence.
<code>rectangular</code>	<code>bool</code>	Přepnutí na obdélníkový průběh místo sinusového.
<code>pauses</code>	<code>int[]</code>	Nastavení délky pauzy a po kolika pokusech se má spouštět.
<code>stimulusPerFrequency</code>	<code>int</code>	Počet pokusů na frekvenci.
<code>qThresholdEstimateSD</code>	<code>double</code>	Směrodatná odchylka prahů pro algoritmus Quest.
<code>randomizeFrequenceOrder</code>	<code>bool</code>	Přepnutí na náhodné střídání frekvencí.
<code>isAC</code>	<code>bool</code>	Přepnutí na střídavý proud.
<code>savePD</code>	<code>bool</code>	Ukládání dat z fotodiod do souborů.

V obou variantách dědí třídy ze třídy `AbstractTestForm`. K vyhodnocení výsledných prahů viditelnosti flikru u jednotlivých frekvencí a volení následujících úrovní modulace je využíván algoritmus Quest.

Parametry algoritmu Quest vychází z mé bakalářské práce [23], v rámci které byl připraven totožný experiment pracující s LED, a jsou nastaveny následovně:

- `tGuess` je převzat z parametru `initialModulationAplitudes` z konstrukturu. Jednotlivé pozice v poli odpovídají příslušným pozicím v poli s frekvencemi.
- `tGuessSd` je převzat z parametru `qThresholdEstimateSD`.
- `pThreshold` je nastaven na 0,75, tedy že přibližná pravděpodobnost správné odpovědi je 75 %. Tento odhad vycházel z dat naměřených při mé bakalářské práci [23].

- Parametry Weibullový psychometrické funkce byly nastaveny tak, že β je 2,282, γ je 0,5 a δ je 0,01. Parametr β byl vypočten z měření provedeném opět v mé bakalářské práci, kde bylo vytipováno několik hodnot úrovní modulace okolo odhadovaného prahu. V experimentu s LED bylo tehdy pro každou hodnotu provedeno 100 pokusů. Při předávání informací algoritmu Quest bylo s β pracováno jako s volným parametrem a samotná β byla na základě dat předaných instancí Questu dopočtena jednou z funkcí Psychtoolboxu. Nastavení parametru γ vychází z toho, že při nulové intenzitě, kdy figurant nemá šanci blikání vidět, a volbě mezi dvěma možnostmi má 50% šanci, že vybere správný segment. Nastavení parametru δ vychází z předpokladu, že figuranti budou naslepo odpovídat při minimu pokusů.
- Parametr *grain* byl nastaven na 0,001 a *range* na 4, aby měl algoritmus dostatečnou volnost.

7.1 Řídicí program varianty řízené modulací světelného toku

Pro první variantu experimentu byla vytvořena třída `FormIncBulbLuminanceControl`. Řízení modulací světelného toku znamená, že se zde soustředíme na průběh světla generovaného žárovkou. Ten musí být sinusový a jeho reálná úroveň modulace musí odpovídat té cílené. Právě pro tuto variantu tedy byly připravovány korekce.

V prvním kroku je v rámci programu připravena hlavička souboru, do kterého budou ukládána data. Ta obsahuje informace o experimentu a o zvoleném nastavení. Dále obsahuje nastavení jednotlivých instancí třídy `Quest`. Instancí je vytvářeno tolik, kolik je v experimentu testováno frekvencí. Každá instance pak slouží pro jednu frekvenci. V poslední řadě jsou zde popisky pro jednotlivé sloupce tabulky, do které jsou ukládána data z experimentu. Každý řádek bude obsahovat jeden pokus, kde na první pozici bude časová značka, na druhé frekvence a na třetí úroveň modulace. Dále následuje informace, který segment blikal, a který segment figurant určil jako blikající. Na předposlední pozici je pak instance třídy `Quest`, se kterou se v pokusu pracovalo. Na poslední pozici je ukládána reálně dosažená úroveň modulace.

Výsledná hlavička vypadá následovně:

```
PstWeight measurement for incandescent bulb
14.07.2023 08:48:26.21
figurant1
fundamentalFrequency=DC; fundamentalAmplitude=230; Fs = 36000; rectangular=False
Quest0 (2 HZ) parameters: xThresh=log(3.3), xThreshSD=2, pThresh=0.75,
    beta=2.282, delta=0.01, gamma=0.5, grain=0.001, range=4
...
time stamp; fset; aset; pulsing; answer; Quest instance; atrue
```

Zdrojový kód 7.1: Ukázka začátku souboru obsahující hlavičku

Jakmile je připravena hlavička, spouští se samotný experiment. V prvním kroku je zvolena frekvence a úroveň modulace pro tento pokus. Pokud je vybrána možnost náhodného střídání frekvencí, je náhodně vybrána jedna frekvence z pole. Program zkontroluje, zda pro příslušnou frekvenci již nebyl proveden cílený počet pokusů. Pokud by tomu tak bylo, je náhodně zvolena jiná frekvence. V případě, že není zvoleno náhodné střídání, změna frekvence nastává až ve chvíli, kdy bylo dosaženo požadovaného počtu pokusů na frekvenci, a frekvence jsou vybírány v pořadí, v jakém jsou uloženy v poli. Úroveň modulace je získávána pomocí algoritmu Quest. Poté je náhodně zvolen jeden ze dvou segmentů, na který má být přiváděno modulované napětí.

Dále je ošetřeno, aby úrovně modulace u frekvencí menších než 1 Hz nemohly přesáhnout 95 % nominální hodnoty napětí a úrovně modulace u frekvencí od 1 Hz výše nepřesahovaly 50 %. Toto ošetření má zajistit prodloužení živostnosti žárovek, meze jsou ale zároveň dostatečně benevolentní, aby neomezovaly algoritmus Quest při hledání reálného prahu.

V případě, že je testována frekvence s periodickým desetinným rozvojem, je určen její faktor. Následně je zvolen typ korekce. Na základě všech zvolených parametrů je pak na jeden segment světelného boxu přiveden odpovídající napěťový průběh, na druhý stálé napětí. Poté je pomocí fotodiod v segmentu s modulovaným napětím zaznamenán průběh světelného toku a z naměřených dat je pomocí DFT vypočtena reálně dosažená úroveň modulace. Díky lineární závislosti mezi hodnotami jasu a napětím z fotodiod je tento výpočet možné provádět přímo z naměřených dat bez nutnosti převodu na hodnoty jasu. V případě, že je nastavena volba ukládání průběhu, jsou naměřená data uložena do souboru.

Následně je z počítače vydán tón, který signalizuje, že byl výpočet dokončen. Až v tuto chvíli program začíná reagovat na stisk levé či pravé kurzorové šipky, pomocí nichž figurant určuje, jaký segment vidí blikat. Nutnost vyčkávání byla do programu zavedena, protože je pomocí

fotodiod potřeba naměřit celou periodu sinusového průběhu, a přechod na další pokus je tak do té doby nežádoucí.

V rámci třídy byla připravena také metoda, která pomocí NI 6212 ukládala průběhy na výstupu z Kikusui do souboru. Tato metoda však sloužila pouze pro testovací účely a během samotných experimentů již nebyla používána.

Jakmile program obdrží figurantovu volbu, je vytvořen textový řetězec, kde jsou od sebe středníkem odděleny informace o provedeném pokusu v pořadí, které reprezentuje popisky sloupců v hlavičce. Tento řetězec je uložen do seznamu a připraven tak pro výpis do souboru po skončení experimentu. Dále je aktualizována příslušná instance třídy `Quest`, které je předána reálně dosažená úroveň modulace a pravdivostní hodnota, zda figurant zvolil správný segment.

Po dokončení pokusu program přechází na další. Před tím je však nejprve zkontrolováno, zda již nebyl proveden počet pokusů, po kterém má proběhnout pauza. Případně se pauza spustí. Během ní jsou žárovky zhasnuty, aby si odpočinuly figurantovy oči. Po skončení přestávky jsou žárovky stejně jako na začátku experimentu rozsvěcovány pozvolně, aby se šetřila jejich životnost. V případě, že pauza prováděna není, jsou za účelem vizuálního oddělení mezi pokusy žárovky na krátkou dobu nastaveny na ambientní úroveň. Následně se celý proces opakuje, dokud pro každou frekvenci není proveden nastavený počet pokusů.

Po provedení všech pokusů je vyvoláno okno, pomocí kterého může osoba ovládající experiment vybrat, kam se data uloží. Do zvoleného souboru jsou krom řádků reprezentující jednotlivé pokusy uloženy také vyhodnocené výsledky z jednotlivých instancí třídy `Quest`, tedy nalezené prahy viditelnosti flikru, příslušné směrodatné odchylky a intervaly spolehlivosti.

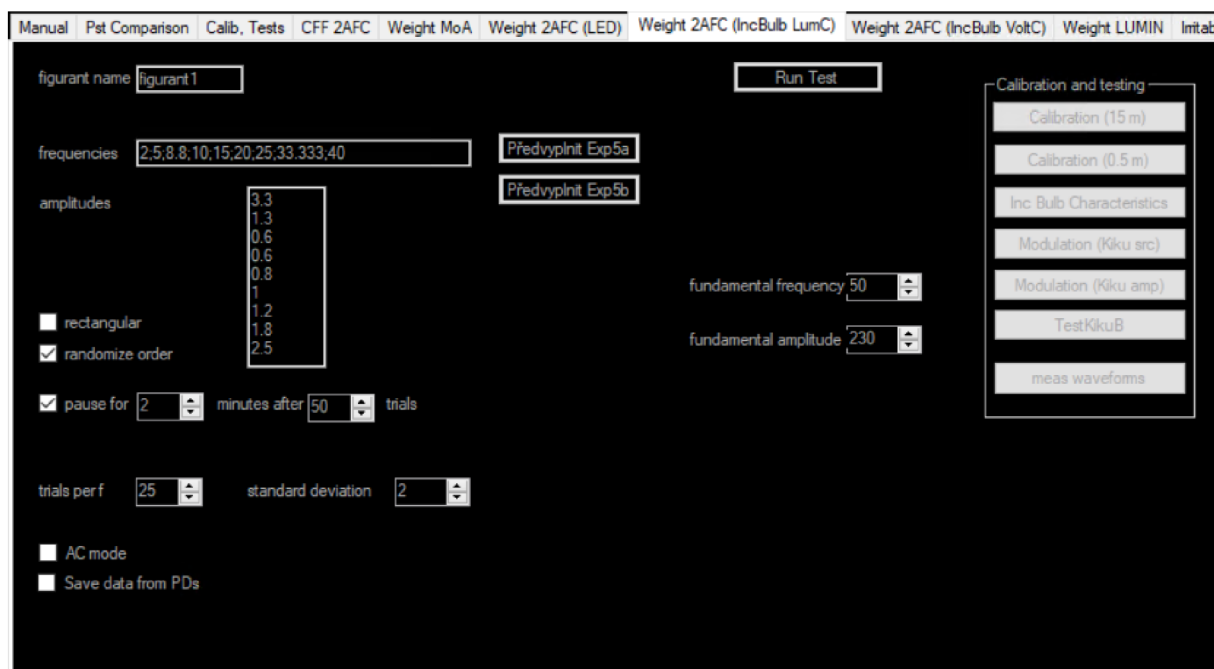
```
1689158087856; 2; 6.70815296250271; R; R; q0; 6.64089719546227;
1689158135542; 5; 2.64260571250107; L; L; q1; 2.64864416347651;
1689158183182; 2; 2.65183791758856; L; L; q0; 2.65077066513886;
...
Quest result for q0: 0.3655+-0.2819, CI95: [0.2135; 1.3302]
Quest result for q1: -0.0621+-0.2875, CI95: [-0.2107; 0.9374]
```

Zdrojový kód 7.2: Ukázka dat z průběhu experimentu uložených do souboru

7.1.1 Uživatelské rozhraní pro experiment

Pro připravenou třídu bylo následně potřeba vytvořit jednoduché grafické rozhraní pro nastavení a řízení experimentu. Za tímto účelem byla vytvořena nová záložka v ovládacím rozhraní

projektu. Obrázek 10 připravené rozhraní ukazuje. Pomocí textových vstupů, ovládacích prvků pro nastavování číselných hodnot a zaškrťovacích políček lze experiment jednoduše nastavit. Do této sekce byla také přesunuta tlačítka pro spuštění kalibračních programů, která lze vidět v pravé části obrázku.



Obrázek 10: Rozhraní pro řízení prvního experimentu

Byla přidána také dvě tlačítka pro předvyplnění hodnot pro dvě varianty experimentu. První varianta je pro testování nízkých frekvencí, tedy od 1 Hz níže, druhá pro testování vyšších až do 40 Hz. Stisknutím tlačítka se pak předvyplní nejen frekvence, ale také počáteční prahy v poli pod nimi. Počáteční prahy byly pro jednotlivé frekvence napočítány pomocí světelného flickrometru skriptem v prostředí Matlab poskytnutým vedoucím práce.

7.2 Řídicí program varianty řízené modulací napětí

Nyní se dostáváme k druhému variantě, kde měl být průběh experimentu řízen výstupním napětím z Kikusui. To v podstatě znamená, že zde nebude potřeba aplikovat korekce. V ostatních ohledech se však v rámci programové části jedná o velmi podobný experiment a v rámci této kapitoly budou proto popsány pouze části programu, které jsou odlišné.

Jelikož se jedná o řízení napětím, není potřeba uchovávat ani vypočítávat hodnotu reálně dosažené úrovně modulace světelného toku. První změna se tak objevuje v hlavičce, kde je z popisů sloupců odstraněna položka `attrue`.

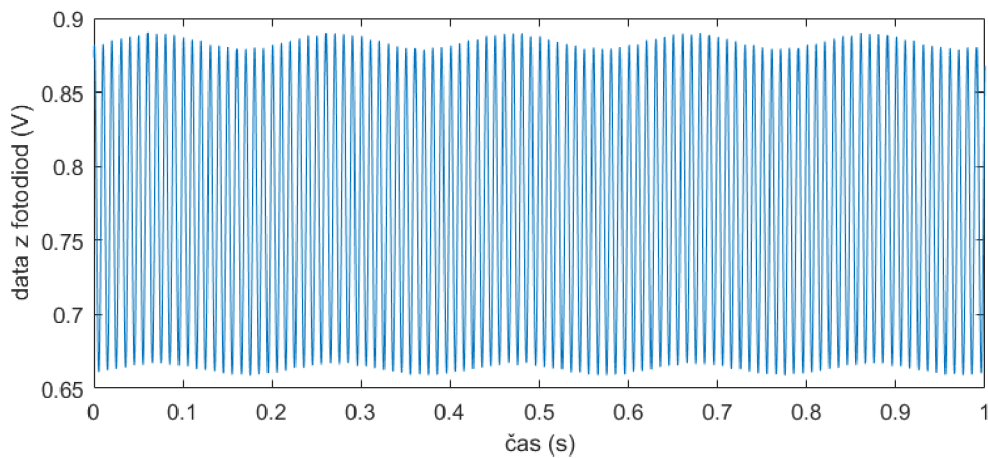
```
...  
time stamp; fset; aset; pulsing; answer; Quest instance
```

Zdrojový kód 7.3: Ukázka změny v hlavičce souboru u druhého experimentu

S tím se pojí také rozdíl v aktualizaci instance třídy **Quest** příslušící testované frekvenci, které je v této variantě algoritmu předávána cílená úroveň modulace, tedy úroveň modulace napětí.

Dále je v této variantě korekce ve všech případech nastavena na **none**, což zajistí, že na vypočítaný průběh nebude žádná korekce aplikována. Vzhledem k tomu, že zde není potřeba zaznamenávat průběhy pro výpočet reálné úrovně modulace, je v této variantě také odstraněn zvukový signál a figurant může šipkami volit blikající segment hned, jakmile začne být průběh přiváděn na žárovky. Jedinou výjimkou je případ, kdy je zvolena volba ukládání průběhů do souboru.

Graf 7.1 obsahuje ukázkou jednoho takto naměřeného průběhu. Jedná se o případ, kdy na žárovku bylo přiváděno střídavé napětí o 230 V s frekvencí 50 Hz, modulační frekvencí 5 Hz a úrovní modulace 0,19 %.



Graf 7.1: Měření při střídavém proudu s modulací 0,19 % a modulační frekvencí 5 Hz

8 Demonstrace funkčnosti na figurantech

Funkčnost výsledného řídicího programu byla nakonec demonstrována na 34 figurantech ve věku od 23 do 65 s rovnoměrným zastoupením mužů a žen. Byly testovány frekvence 0,1; 0,5; 1; 2; 5; 8,8; 10; 15; 20; 25; $33\frac{1}{3}$ a 40 Hz. Tyto frekvence byly vybrány tak, aby odpovídaly testovaným frekvencím z experimentu, který měřil prahy viditelnosti flikru při použití LED. Každý experiment (řízený modulací světelného toku a řízený vstupním napětím) byl rozdělen na 2 měření. První měření obsahovalo frekvence od 1 Hz níže, druhé od 2 Hz výše. Toto rozdělení bylo provedeno z důvodu, aby figuranti tušili, jak rychlé blikání mají na pozorovacích terčích hledat. Už dříve se totiž ukázalo, že je to pro figuranty nápomocné [5]. Frekvence se během experimentu náhodně střídaly a pauza byla nastavena na 2 minuty po každých 50 pokusech. Experiment řízený modulací vstupního napětí byl proveden v obou variantách, tedy s využitím střídavého napětí i stejnosměrného napětí.

Data z experimentu byla zpracována pomocí sady skriptů napsaných v prostředí Matlab, které byly připraveny již pro starší experimenty vedoucím práce. Tyto skripty byly původně připraveny pro srovnávání se světelným flikrmetrem. V rámci práce byly kvůli druhé variantě experimentu skripty upraveny tak, aby byly schopny data srovnávat i s napěťovým flikrmetrem. V rámci úpravy je dle hlavičky souboru automaticky rozpoznáno, o kterou variantu se jedná, a dle této informace je spočítán příslušný váhový filtr.

Hlavní skript zpracovává data ze zvoleného experimentu. Postupně načte data s výsledky od jednotlivých figurantů, u kterých spojí variantu s nižšími a vyššími frekvencemi. Následně jsou spojena data figurantů. Ze spojených dat je opětovnou rekonstrukcí postupu algoritmu Quest nalezen společný práh viditelnosti všech figurantů. To je provedeno opakovanou aktualizací hustoty pravděpodobnosti.

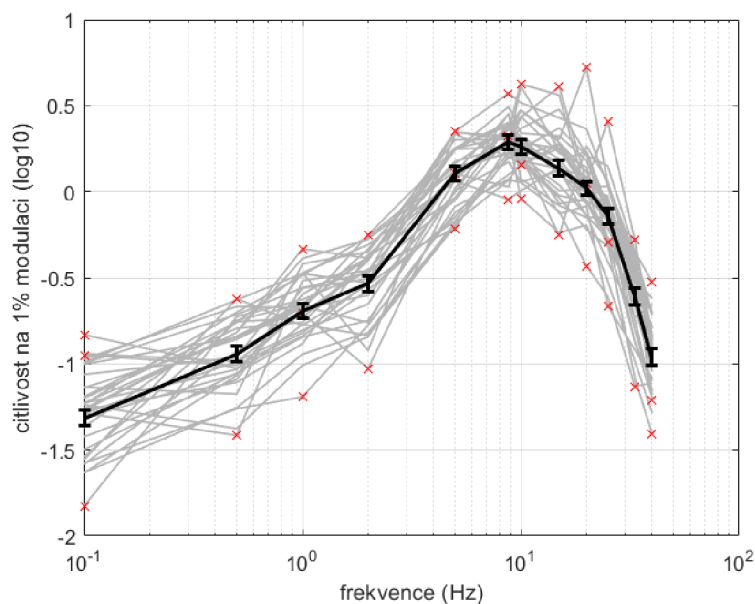
Tento krok vychází z iterace Bayesovy věty:

$$f_{\chi|v\text{sechna } D}(x | d_{N \times 1}) = \frac{f_x(x)}{S} \prod_{i=1}^N f_{D_i|\chi=x}(d_i | x), \quad (8.1)$$

kde S reprezentuje škálování zajišťující, že integrál hustoty pravděpodobnosti bude roven 1, a N je počet iterací vycházející z počtu figurantů. Zbylé symboly vychází z rovnice 3.1.

Pro každou frekvenci jsou nalezeni figuranti s nejmenším a největším naměřeným prahem, jejichž váha je nastavena na 0. To samé je pak provedeno pro figuranty s největší směrodatnou odchylkou. To zajišťuje jejich vyloučení z vyhodnocení, a tím snížení rozptylu výsledků.

Ukázku takto vyloučených hodnot při zpracování dat z experimentu řízeného modulací světelného toku lze vidět v Grafu 8.1.



Šedá barva znázorňuje citlivost jednotlivých figurantů, černá spojená data pomocí rovnice 8.1. Křížky znázorňují data, jejichž váha byla nastavena na 0.

Graf 8.1: Citlivost na 1% modulaci v závislosti na frekvenci

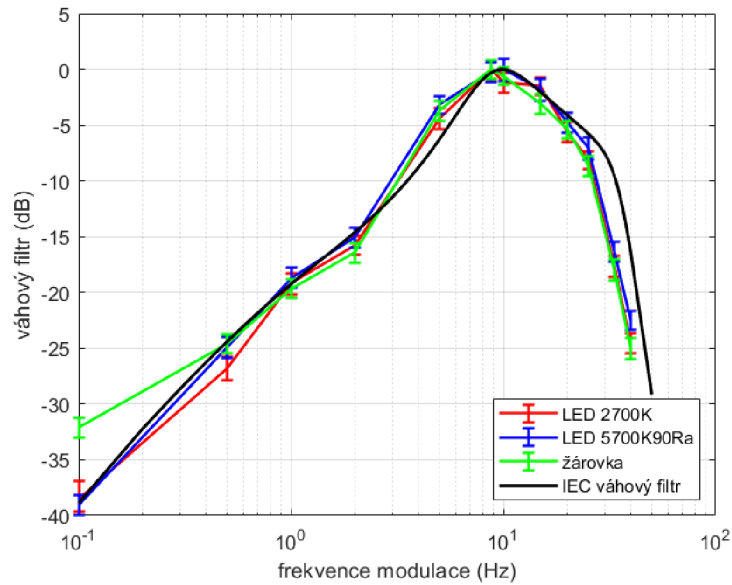
8.1 Vyhodnocení varianty řízené modulací světelného toku

Pro vyhodnocení dat byl pak použit odlišný skript, který pomocí grafů srovnal data s původním světelným flikrmetrem. Graf 8.2 ukazuje, že křivka vytvořená z nově naměřených dat se ve většině případech shoduje s původním váhovým flikrmetrem.

Výjimkou jsou však tři oblasti:

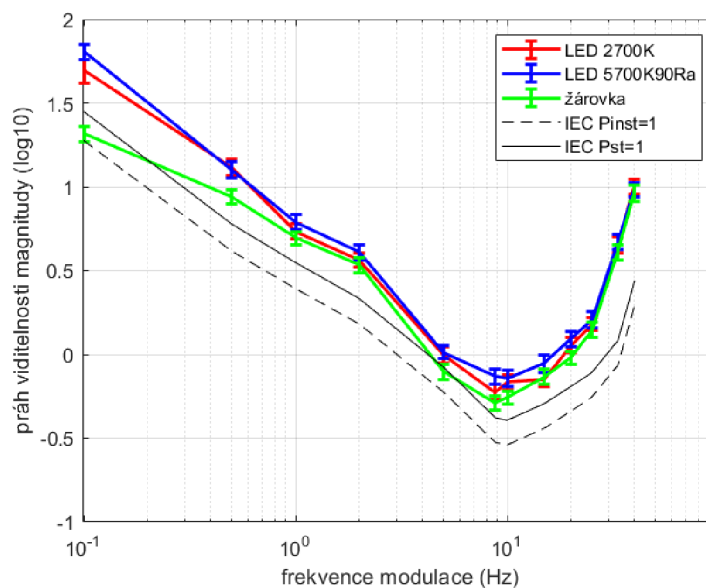
- Frekvence pod 0,5 Hz, kde lze největší rozdíl pozorovat u 0,1 Hz.
- Frekvence okolo 5 Hz.
- Frekvence nad 20 Hz.

Graf dále ukazuje, že tvar křivky se u žárovky liší také od straších dat získaných z experimentu s LED. Největší rozdíl lze opět pozorovat při 0,1 Hz, kde se na rozdíl od žárovek data naměřená při experimentu s LED s původním váhovým filtrem nerozcházejí. Váhový filtr ve výsledku nejvíce odpovídá datům z experimentu s LED s vysokou teplotou chromatičnosti, avšak u vysokých frekvencí se všechna data s filtrem rozcházejí.



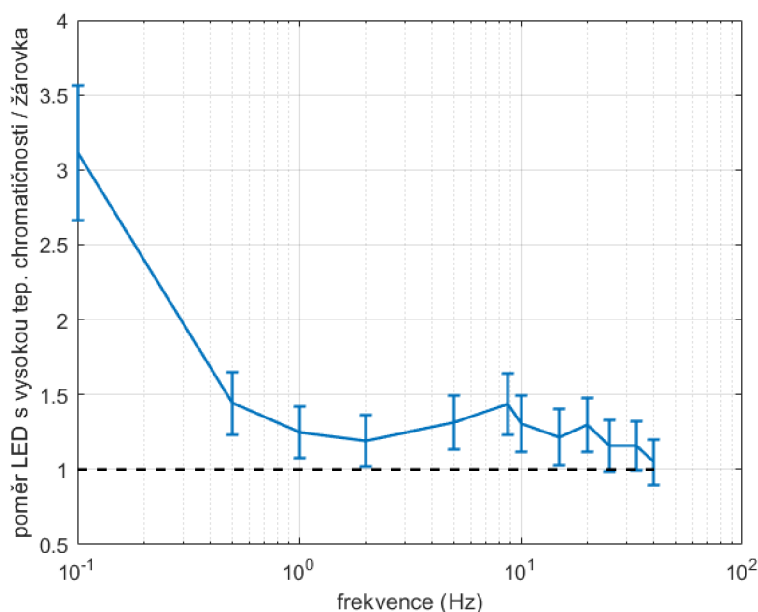
Graf 8.2: Porovnání naměřených dat s tvarem váhového filtru IEC světelného flikrmetru

Graf 8.3 pak ukazuje rozdíly v samotných hodnotách naměřených prahů. Na první pohled je patrné, že prahy u nízkých frekvencí u žárovek se zřetelně liší od prahů u LED. Figuranti zde u žárovek vnímali blikání už u nižších úrovní modulace. Je zde vidět také rozdíl mezi očekávanými daty na základě původního světelného flikrmetru. Tento rozdíl může být u některých frekvencí způsoben faktem, že provedený experiment pracoval pouze se světelnými terčíky a nebral tak v potaz všechny aspekty prostorového vidění oka. Pro přesnější porovnání prahů viditelnosti flikru s flikrmetrem je tak potřeba provést další experimenty.



Graf 8.3: Srovnání naměřených prahů z experimentů řízených modulací světelného toku

Graf 8.4 pak blíže srovnává výsledky z experimentu s LED s vysokou teplotou chromatičnosti s výsledky z experimentu se žárovkou. Konkrétně se jedná o podíl naměřených prahů u jednotlivých frekvencí. Je zde vidět, že naměřené výsledky se lišily i u dalších frekvencí, a výše zmíněný rozdíl se tak nevztahuje jen na nízké frekvence. Podobné srovnání bylo provedeno i s výsledky z experimentu s LED s nižší teplotou chromatičnosti, avšak tam nebyl nalezen významný rozdíl.

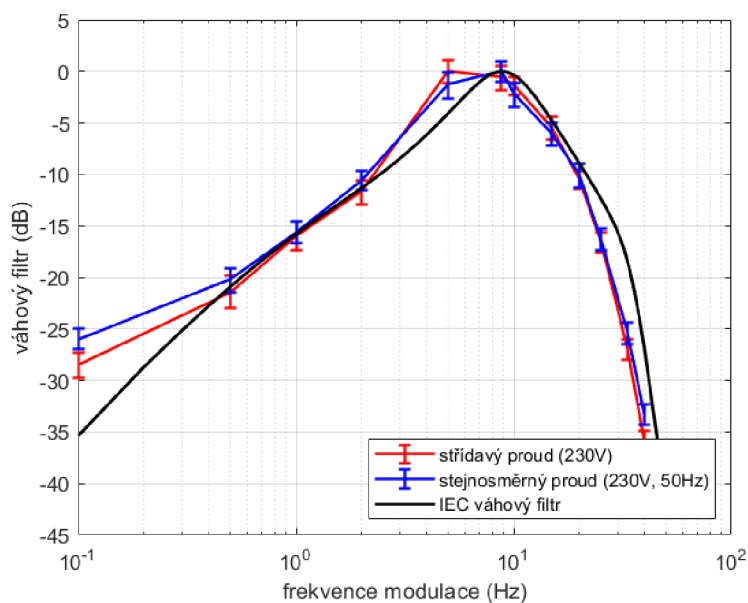


Graf 8.4: Srovnání prahů při použití žárovky a LED s vysokou teplotou chromatičnosti

8.2 Vyhodnocení varianty řízení modulací napětí

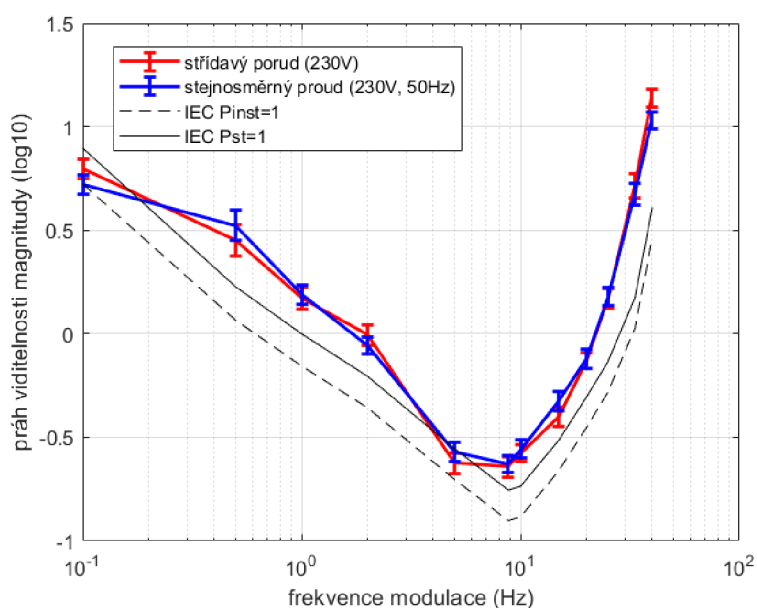
Pro vyhodnocení dat z druhého experimentu, který byl řízen modulací vstupního napětí, byl použit obdobný skript. Tento experiment figuranti podstoupili dvakrát, jednou byly měřeny prahy při využití střídavého napětí, podruhé při využití stejnosměrného napětí. Data pak byla srovnávána mezi sebou namísto se starším experimentem, tedy výsledky při střídavém napětí s výsledky při stejnosměrném napětí.

Graf 8.5 pak ukazuje srovnání křivek vytvořených z naměřených prahů z obou variant druhého experimentu s tvarem váhového filtru původního napěťového flickrmetru. Stejně jako u verze experimentu řízené modulací světelného toku je i zde vidět, že tvary se obdobně liší. Největší rozdíl lze vidět opět u frekvence 0,1 Hz.



Graf 8.5: Porovnání naměřených dat s tvarem váhového filtru IEC napět'ového flickmetru

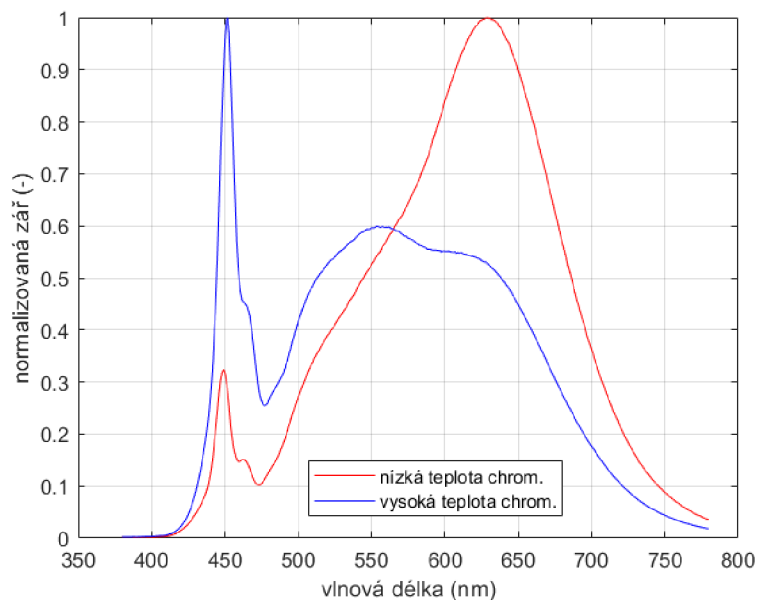
Při srovnání samotných naměřených prahů (Graf 8.6) pak nebyl nalezen významný rozdíl mezi daty z experimentu se střídavým a stejnosměrným napětím. Na lidské oko tak pravděpodobně nemá z tohoto pohledu vliv, jakým druhem proudu je žárovka napájena. I zde byly nalezeny rozdíly při srovnání s hodnotami z původního flickmetru. Důvod může být podobný jako u prvního experimentu.



Graf 8.6: Srovnání naměřených prahů z experimentů řízených modulací napětí

8.3 Zhodnocení výsledků

Na naměřených datech lze pozorovat rozdíly ve výsledcích při dvou totožných experimentech, kde v první variantě byly jako zdroj světla využity LED, v druhé žárovky. Lze usuzovat, že rozdíl ve viditelnosti flikru je způsoben spektry světelných zdrojů.



Graf 8.7: Spektrum LED s vysokou a nízkou teplotou chromatičnosti

Graf 8.7 ukazuje spektra LED z předchozího experimentu. Na první pohled je zde vidět rozdíl oproti spektru žárovky představeném v kapitole 6. Dalším rozdílem jsou pak změny ve spektrách při snížení či zvýšení jasu. Zatímco u žárovek byly změny v grafu jasně pozorovatelné, u LED jsou tyto změny pouze nepatrné. To platí také pro teplotu chromatičnosti, která se u LED mění maximálně o několik jednotek K.

Právě u pokusů provedených s nižšími frekvencemi je flikr viditelný až při úrovni modulace vyšší než 10 %. Při takové změně jasu už dochází ke zřetelné změně spektra a teploty chromatičnosti. Z experimentů tak vyplývá, že právě spektrální změny pozorovateli mohou výrazně pomoci při určování blikajícího segmentu. Podobný rozdíl mezi prahy by tak byl očekáván také u frekvence 40 Hz, kde viditelná úroveň modulace rovněž překračuje 10 %. Avšak dle naměřených dat je při této frekvenci rozdíl zanedbatelný.

Závěr

Tato práce je součástí projektu, který má za cíl aktualizovat původní napěťový flickrmetr na LED a moderní elektrické sítě. Flickr, nebo také míhání či blikání, je častým a velmi rušivým problémem světelných zdrojů. Jev lze měřit pomocí algoritmu zvaným flickrmetr. Problémem flickrmetru je, že byl vytvořen pro klasické žárovky, které byly v době vývoje typickým zdrojem osvětlení, což již dnes neplatí. V průběhu let byly také modernizovány elektrické sítě. Existuje také světelný flickrmetr, který by vydělením charakteristiky váhového filtru frekvenční odezvou žárovky měl eliminovat závislost na druhu světelného zdroje. Světelný flickrmetr však nebyl nikdy verifikován na experimentech s lidskými pozorovateli.

V rámci diplomové práce byl vytvořen řídicí program pro experiment, který u figurantů měří práh viditelnosti flickru na klasických žárovkách. Experiment je prováděn na světelném boxu, který se skládá ze dvou segmentů. V každém z nich je umístěna žárovka, na kterou je přiváděno napětí. Pro tento účel byly napsány třídy zajišťující ovládání příslušného hardwaru. V počítači jsou nejprve napočítávány jednotlivé hodnoty napěťových průběhů, které jsou následně posílány do multifunkčního zařízení National Instruments USB-6351. Průběhy jsou následně zesíleny pomocí Kikusui PCR2000LE a odtamtud přiváděny na žárovky. Tímto způsobem je na jeden segment přiveden sinusový napěťový průběh a na druhý stále napětí. Byla testována také varianta, kde byly Kikusui PCR2000LE použity přímo jako zdroje napětí, avšak varianta využívající zesilovací režim se ukázala jako vhodnější díky dosažení jemnějších úrovní modulace. Figurant následně vybírá, který segment vidí blikat. Dle správnosti jeho odpovědi je pomocí algoritmu Quest zvolena úroveň modulace pro další pokus. Opakováním tohoto postupu je nalezen práh viditelnosti flickru pro danou frekvenci. Před zahájením experimentů byla pro přední stranu boxu připravena vhodná pozorovací ploška, která je osvětlována žárovkou. Cílem bylo vytvořit plošku, která při 230 V na žárovkách sníží jas na 85 cd/m^2 a ovlivňuje co nejméně spektrum a teplotu chromatičnosti. Měření byla prováděna pomocí SpectraScanu PR-740 a vyhodnocení probíhala v prostředí Matlab. Výsledná ploška je tvořena kombinací drátěné mřížky, bílé netkané textilie a pískovaného skla.

Program byl napsán ve dvou variantách. V první variantě je chod řízen úrovní modulace světelného průběhu. Výsledky jsou srovnávány s totožným experimentem, který využíval LED jako zdroj blikání. V druhé variantě je chod řízen úrovní modulace napětí a jsou mezi sebou srovnávány výsledky při střídavém a stejnosměrném proudu. Pro správnou funkčnost programu bylo potřeba provést několik kalibrací. První zahrnovala nalezení závislosti mezi vstupním

napětím, jasem a napětím z fotodiód umístěných ve světelném boxu. Druhá kalibrace řešila rozdíl mezi úrovní modulace světelného toku a napětí. Zbylé kalibrace korigovaly nelineární charakter žárovky. Všechny kalibrace obnášely vytvoření měřicího programu a skriptu pro následné vyhodnocení. Na základě kalibrací byly do řídicího programu přidány korekce. Bylo také zajištěno, aby na sebe generované průběhy při cyklickém posílání do žárovek plynule navazovaly.

Funkčnost programu byla demonstrována na 34 figurantech, kteří experiment podstoupili. Při srovnání s váhovými filtry původních flikrmetrů se tvary křivek vytvořených z naměřených dat rozcházejí v oblastech pod 0,5 Hz, okolo 5 Hz a nad 20 Hz. Při srovnání s experimentem využívajícím LED byl také pozorován rozdíl ve tvaru váhového filtru, specificky u nízkých frekvencí. Dle srovnání naměřených prahů dále figuranti vnímali flikr u nízkých frekvencí lépe u žárovek než u LED. Při bližším srovnání s LED s vysokou teplotou chromatičnosti se pak tento rozdíl projevil i u všech frekvencí menších než 40 Hz. Z výsledků tak vyplývá, že rozdíly ve spektrech u žárovek a LED napomáhají figurantům při určování blikajícího segmentu. Naopak při srovnání výsledků při využití střídavého a stejnosměrného proudu nebyl nalezen žádný výrazný rozdíl. Při srovnání s očekávanými prahy z norem byly také nalezeny rozdíly. Ty však byly pravděpodobně způsobeny faktem, že program realizoval pouze blikání v rámci kruhových terčů, a nebylo tak bráno v potaz prostorové vnímání lidského oka.

Připravený program a pomocí něj získané výsledky podporují důvody, proč je potřeba algoritmus flikrmetru aktualizovat. Logickým krokem, jak na tuto práci navázat, je příprava a provedení experimentu, který zohlední prostorové vnímání figurantů a ověří tak, zda se naměřené výsledky budou více blížit prahům vycházejícím z norem.

Použitá literatura

- [1] DRÁPELA, Jiří. *Blikání světelných zdrojů způsobené mezharmónickými složkami napětí* [online]. 2009. ISBN 978-80-214-4007-4. Dostupné z: https://www.vut.cz/vutium/spisy?action=ukazka&id=1314&publikace_id=14208
- [2] *Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-15, Testing and measurement techniques--flickermeter--functional and design specifications = Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-15, Techniques d'essai et de mesure--flickermètre--spécifications fonctionnelles et de conception*. Ed. 2.0. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2010. ISBN 978-2-88912-076-5.
- [3] *Equipment for general lighting purposes--EMC immunity requirements. Part 1, An objective voltage fluctuation immunity test method*. Edition 1.0. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2015. ISBN 978-2-8322-2649-0.
- [4] *K.Lane et al., Lighting, International Energy Association, Paris, 2022*
<https://www.iea.org/reports/lighting>, License: CC BY 4.0
- [5] KUKAČKA, Leoš, Jan HERGESEL, Jakub NEČÁSEK, Petr BÍLEK, Michal VIK, Jan MEYER, Robert STIEGLER a Jiří DRÁPELA. Comparison of Procedures for Measuring the Temporal Contrast Sensitivity Function. In: *2023 IEEE Sustainable Smart Lighting World Conference & Expo (LS18)* [online]. 2023, s. 1–6 [vid. 2023-08-21]. ISBN 979-8-3503-4699-2. Dostupné z: doi:10.1109/LS1858153.2023.10170649
- [6] KUKAČKA, Leoš, Jan HERGESEL, Jakub NEČÁSEK, Petr BÍLEK, Michal VIK, Jan MEYER, Robert STIEGLER, Morteza POURARAB a Jiří DRÁPELA. Flicker Visibility with Different Spectra of White Light. In: *2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS): 2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)* [online]. 2023, s. 1–6 [vid. 2024-03-11]. ISSN 2576-702X. Dostupné z: doi:10.1109/IAS54024.2023.10406563
- [7] EMETERE, M.E., L.P. BOLOGI, S.E. SANI, O.R. CHIDI, D. FEMI-PIDAN a E.E. OKORO. A review on electrical bulbs and its improvement over time: Saving energy or life? *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, **1107**(1), 012144. ISSN 1757-8981, 1757-899X. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1107/1/012144

- [8] MACISAAC, Dan, Gary KANNER a Graydon ANDERSON. Basic physics of the incandescent lamp (lightbulb). *The Physics Teacher* [online]. 1999, **37**(9), 520–525. ISSN 0031-921X, 1943-4928. Dostupné z: doi:10.1119/1.880392
- [9] HALPIN, S.M., R. BERGERON, T.M. BLOOMING, R.F. BURCH, L.E. CONRAD a T.S. KEY. Voltage and lamp flicker issues: should the IEEE adopt the IEC approach? *IEEE Transactions on Power Delivery* [online]. 2003, **18**(3), 1088–1097. ISSN 1937-4208. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRD.2003.814261
- [10] MONTOYA, Francisco G., Antonio PEÑA-GARCÍA, Adel JUAIDI a Francisco MANZANO-AGUGLIARO. Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. *Energy and Buildings* [online]. 2017, **140**, 50–60. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2017.01.028
- [11] YOSHIMOTO, Sanae, Fang JIANG, Tatsuto TAKEUCHI, Arnold J. WILKINS a Michael A. WEBSTER. Visual discomfort from flicker: Effects of mean light level and contrast. *Vision Research* [online]. 2020, **173**, 50–60. ISSN 0042-6989. Dostupné z: doi:10.1016/j.visres.2020.05.002
- [12] *International Union for Electroheat, „Flickermeter – Functional and Design Specifications“, 1983*
- [13] Photoreceptors. *Kenhub* [online]. [vid. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.kenhub.com/en/library/anatomy/photoreceptors>
- [14] DRAPELA, Jiri a Jan SLEZINGR. A Light-flickermeter–Part I: Design. In: *Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010, EPE 2010*. 2010.
- [15] BREAKWELL, Glynis M., Sean HAMMOND a Chris FIFE-SCHAW. *Research Methods in Psychology*. B.m.: SAGE Publications Ltd, 2000. ISBN 978-0-7619-6591-6.
- [16] CORNSWEET, Tom N. The Staircase-Method in Psychophysics. *The American Journal of Psychology* [online]. 1962, **75**(3), 485. ISSN 00029556. Dostupné z: doi:10.2307/1419876
- [17] WATSON, Andrew B. a Denis G. PELLI. Quest: A Bayesian adaptive psychometric method. *Perception & Psychophysics* [online]. 1983, **33**(2), 113–120. ISSN 0031-5117, 1532-5962. Dostupné z: doi:10.3758/BF03202828

- [18] QuestDemo. *Psychtoolbox-3* [online]. [vid. 2023-09-05]. Dostupné z: <http://psychtoolbox.org/docs/QuestDemo>
- [19] *Psychtoolbox-3 - Overview* [online]. [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://psychtoolbox.org/>
- [20] *Psychtoolbox-3 - QuestCreate* [online]. [vid. 2023-11-13]. Dostupné z: <https://psychtoolbox.org/docs/QuestCreate>
- [21] ILLOWSKY, Barbara a Susan DEAN. *Introductory Statistics* [online]. 2013. Dostupné z: <https://openstax.org/details/books/introductory-statistics>
- [22] KING-SMITH, P. Ewen, Scott S. GRIGSBY, Algis J. VINGRYS, Susan C. BENES a Aaron SUPOWIT. Efficient and unbiased modifications of the QUEST threshold method: Theory, simulations, experimental evaluation and practical implementation. *Vision Research* [online]. 1994, **34**(7), 885–912. ISSN 0042-6989. Dostupné z: doi:10.1016/0042-6989(94)90039-6
- [23] HERGESEL, Jan. *Tvorba experimentu pro určení citlivostní funkce vjemu flikru*. Liberec, 2022. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [24] *Package Manager Download* [online]. [vid. 2024-01-03]. Dostupné z: <https://www.ni.com/en/support/downloads/software-products/download.package-manager.html>