



Zdravotní aspekty umělého osvětlení a využití světla pro udržení pozornosti

Bakalářská práce

Studijní program: B3944 – Biomedicínská technika

Studijní obor: 3901R032 – Biomedicínská technika

Autor práce: **Bc. Jana Emilie Veselovská**

Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.





Health aspects of artificial lighting and the use of light to maintain attention

Bachelor thesis

Study programme: B3944 – Biomedical Technology

Study branch: 3901R032 – Biomedical Technology

Author: **Bc. Jana Emilie Veselovská**

Supervisor: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana Emilie Veselovská**
Osobní číslo: **Z12000022**
Studijní program: **B3944 Biomedicínská technika**
Studijní obor: **Biomedicínská technika**
Název tématu: **Zdravotní aspekty umělého osvětlení a využití světla pro udržení pozornosti**
Zadávací katedra: **Ústav zdravotnických studií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíle práce:

Shromáždit základní poznatky o LED osvětlení.

Vypracovat rešerši shrnující světelné jevy spojené s LED osvětlením s vybranými předřadníky.

Studovat vliv LED zdrojů umělého osvětlení na člověka.

Zpracování a vyhodnocování dat z realizovaných měření.

Teoretická východiska (včetně výstupu z BP):

LED osvětlení je nová a dynamicky se rozvíjející oblast, která má oproti jiným technologiím svá specifika. Tato specifika mohou mít vliv na lidskou fyziologii, ať už pozitivní, nebo negativní. Výstupem práce bude též formulace specifických vlastností LED osvětlení a studium vlivu LED zdrojů umělého osvětlení na člověka.

Výzkumné otázky:

Práce má odhalit možné výhody i rizika spojená s běžným i terapeutickým využitím LED osvětlení. Návrh matematických filtrů pro bližší analýzu flicker index.

Metoda:

Kvalitativní.

Technika práce, vyhodnocení dat:

Vypracování teoretické rešerše shrnující dosavadní poznatky týkající se jevů spojených s LED osvětlením (blue light hazard, temporální a spektrální flicker, korelovaná teplota spektra v daném prostředí).

Místo a čas realizace výzkumu:

Laboratoře Technické univerzity v Liberci, akademický rok 2015/2016

Laboratoř měření fyzikálních veličin, Heydukova 1, 46117 Liberec.

Vzorek:

Předmětem výzkumu jsou zdravotní aspekty umělého osvětlení. Práce je zaměřena především na moderní LED zdroje umělého osvětlení.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: 50 - 70 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- BERMAN, S., D. GREENHOUSE, I. BAILEY, R. CLEAR, T. RAASCH. Human Electroretinogram Responses to Video Displays, Fluorescent Lighting and Other High-Frequency Sources. Optometry and vision science, 68(8), 1991, pp. 645662.
- BRTNÍK, B., D. MATOUŠEK. Algoritmy číslicového zpracování signálů. Praha, BEN, 2011.
- HABEL, J., P. ŽÁK. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- JELÍNEK, J. Měření fyzikálních veličin. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2015. Dostupné z WWW: <<https://elearning.tul.cz>>.
- KOLÁŘ, M. Analogová elektronika. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2015. Dostupné z WWW: <<https://elearning.tul.cz>>.
- MARTINSONS, C., G. ZISSIS. Solid State Lighting Annex: Potential Health Issues of Solid State Lighting. Final Report. International Energy Agency 4E Solid State Lighting Annex, 2014.
- MÁLEK, J., M. BOHÁČ. Počítačové zpracování signálů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2015. Dostupné z WWW: <<https://elearning.tul.cz>>.
- PLÍVA, Z., J. DRÁBKOVÁ, J. KOPRNICKÝ a L. PETRŽÍLKA. Metodika zpracování bakalářských a diplomových prací. 2. upravené vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, FM, 2014. ISBN 978-80-7494-049-1. Dostupné z: doi:10.15.240/tul/002/2014-11-002.
- ROZMAN, J. Elektronické přístroje v lékařství. Praha, Academia, 2006, s. 29, 229, 238 - 243, ISBN: 80-200-1308-3.
- WILKINS, A., J. VEITCH, B. LEHMAN. LED lighting flicker and potential health concerns: IEEE standard PAR1789 update. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2010, pp. 171178.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant bakalářské práce:

prof. Ing. Aleš Richter, CSc.

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Ostatní konzultanti:

Ing. Leoš Kukačka

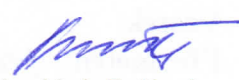
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání bakalářské práce: **29. května 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **30. dubna 2016**

prof. Dr. Ing. Zdeněk Kůs
rektor




Mgr. Marie Froňková

pověřena vedením ústavu

V Liberci dne 31. ledna 2016

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 28.4.2016

Podpis:



Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu své práce, panu Ing. Jiřímu Jelínkovi, Ph.D. a též panu Ing. Leoši Kukačkovi za trpělivost, ochotu, cenné připomínky, rady a poskytnuté materiály pro zpracování práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jiřímu Málkovi, Ph.D. a Ing. Davidu Krčmaříkovi, Ph.D. za pomoc s návrhem filtrů v Matlabu.

Abstrakt

Autor: Jana Emilie Veselovská

Instituce: ÚZS - Biomedicínská technika

Název práce: Zdravotní aspekty umělého osvětlení a využití světla pro udržení pozornosti

Vedoucí práce: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Počet stran: 69

Rok obhajoby: 2016

Anotace: Práce se zaměřuje na problematiku LED osvětlení a jevy s ním spojenými. Shrnuje dosavadní poznatky a rozebírá možné vlivy LED osvětlení na člověka, jak negativní, tak pozitivní v rámci terapie. Praktická část se zabývá měřením, výpočtem a bližší analýzou flickeru za použití navržených matematických filtrů.

Klíčová slova: světlo, LED, flicker, předřadné zařízení, měření osvětlení

Abstract

Author: Jana Emilie Veselovská

Institution: ÚZS - Biomedical technology

Title: Health aspects of artificial lighting and the use of light to maintain attention

Supervisor: Ing. Jiří Jelínek, Ph.D.

Pages: 69

Year: 2016

Annotation: The bachelor thesis is focused on LED lighting and phenomena associated with it. It summarizes current knowledge and discusses possible effects of LED lightning on humans, both negative and positive within therapy. The practical part deals with a measurement, calculation and detailed analysis of flicker using proposed mathematical filters.

Keywords: light, LED, flicker, ballast, lighting measurement

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam zkratek	13
Úvod	14
1 Světlo a základní veličiny	16
2 LED osvětlení	18
2.1 Konstrukce	18
2.2 Barva světla	19
2.3 Barevná teplota světla	20
2.4 Terapeutické využití LED	21
3 Předřadná zařízení pro světelné zdroje	23
3.1 Elektromagnetická předřadná zařízení	23
3.1.1 Předřadná zařízení pro nízkotlaké výbojky	23
3.1.2 Předřadná zařízení pro vysokotlaké výbojky	24
3.2 Elektronická předřadná zařízení	24
3.2.1 Předřadná zařízení pro teplotní světelné zdroje	24
3.2.2 Předřadná zařízení pro výbojové zdroje	25
3.2.3 Předřadná zařízení pro světelné diody	25
3.2.4 Obecné blokové schéma elektronických předřadných zařízení	28
4 Měření osvětlení	29
4.1 Detektory světla	29

4.1.1	Fotorezistor	29
4.1.2	Fotodioda	29
4.1.3	Fototranzistor	30
4.2	Obvody s operačními zesilovači	30
4.3	Obvody s tranzistory	31
4.4	Zpracování signálu snímačů osvětlení	33
5	Optické jevy související s umělým osvětlením	34
5.1	Flicker	34
5.1.1	Index flickeru, Procentuální flicker	35
5.1.2	Fotosenzitivní epilepsie	37
5.2	Stroboskopický jev	38
5.3	Riziko modrého světla	39
5.4	Phantom array effect	41
5.5	Duhový efekt	42
5.6	Broca-Sulzer a Talbot-Plateau efekt	44
6	Světlo a jeho vliv na pozornost	46
7	Praktická část	48
7.1	Použitá měřicí technika	48
7.2	Vybrané zdroje umělého osvětlení	50
7.3	Zpracování naměřených dat, návrh a aplikace filtrů	52
7.4	Výsledné hodnoty FP a FI	53
7.5	Analýza výsledných dat	62
7.6	Diskuze	62
7.7	Návrh doporučení pro praxi	63
	Závěr	64
	Literatura	65

Seznam obrázků

1.1	Schematicky znázorněný vztah fotometrických veličin [1].	17
2.1	Popis LED [5].	19
2.2	Ukázka odstínů bílého světla s uvedenou barevnou teplotou. Možná označení od nejchladnější po nejteplejší: teplá bílá, bílá, denní bílá, studená bílá [13].	20
3.1	Lineární LED modul v sériově paralelním zapojení.	25
3.2	Dvoucestný usměrňovač připojený k lineárnímu modulu LED.	26
3.3	Dva přímo napájené paralelně orientované lineární moduly LED s navzájem opačnou orientací anody a katody.	27
3.4	Napájení s/bez PFC [14].	27
3.5	Obecné blokové schéma elektronického předřadníku [2].	28
4.1	Charakteristika fotodiody [15].	30
4.2	Invertující zesilovač [34].	31
4.3	Neinvertující zesilovač [34].	31
4.4	Logaritmický zesilovač [34].	32
4.5	Proudové zrcadlo [17].	32
4.6	Obvod s přepínáním rozsahů [36].	33
4.7	Obvod s logaritmickým zesilovačem [36].	33
5.1	Znázornění veličin FP a FI [7].	35
5.2	Graf znázorňující doporučenou provozní oblast [6].	36
5.3	Demonstrace phantom array effect u koncových světel automobilu [24].	41

5.4	Demonstrace duhového efektu u staršího modelu DLP projektoru [28].	42
7.1	Schéma zapojení.	48
7.2	Logaritmický zesilovač [35].	49
7.3	Zapojení.	50
7.4	Předpokládané vnitřní schéma Osram 2W.	51
7.5	Předpokládané vnitřní schéma RoHS 3W.	51
7.6	LED žárovky: RoHS a Osram.	51
7.7	Kód pro Butterworth filter.	52
7.8	Tabulka s výslednými hodnotami FP a FI.	53
7.9	Osram: Jednostranné frekvenční spektrum.	54
7.10	RoHS: Jednostranné frekvenční spektrum.	54
7.11	Osram: „Nulovací“ filtr, DP 70 Hz.	55
7.12	RoHS: „Nulovací“ filtr, DP 70 Hz.	55
7.13	Osram: „Nulovací“ filtr, DP 200 Hz.	56
7.14	RoHS: „Nulovací“ filtr, DP 200 Hz.	56
7.15	Osram: Butterworth filtr, DP 70 Hz.	57
7.16	RoHS: Butterworth filtr, DP 70 Hz.	57
7.17	Osram: Butterworth filtr, DP 200 Hz.	58
7.18	RoHS: Butterworth filtr, DP 200 Hz.	58
7.19	Osram: Equiripple filtr, DP 70 Hz.	59
7.20	RoHS: Equiripple filtr, DP 70 Hz.	59
7.21	Osram: Equiripple filtr, DP 200 Hz.	60
7.22	RoHS: Equiripple filtr, DP 200 Hz.	60
7.23	Osram: Koeficienty dle normy.	61
7.24	RoHS: Koeficienty dle normy.	61
7.25	Návrh luxmetru.	63

Seznam zkratek

AC	alternating current ... střídavý proud
A/D	analogově digitální převodník
CFF	Critical Flicker Fusion Frequency ... kritická frekvence flickeru
DC	direct current ... stejnosměrný proud
DLP	Digital Light Processing ... technologie v digitálních projektorech
DMD	Digital Micromirror Device ... čip u DLP projektorů obsahující mikroskopická zrcátka
DP	dolní propust
EMI	Electro Magnetic Interference ... elektromagnetické rušení
FFT	Fast Fourier Transform ... rychlá Fourierova transformace
FI	index flickeru
FIR	finite impulse response ... konečná impulzní odezva
FP	procentuální flicker
IIR	infinite impulse response ... nekonečná impulzní odezva
LCD	Liquid Crystal Display ... displej z tekutých krystalů
LED	Light Emitting Diode ... dioda emitující světlo
NTC	Negative Temperature Coefficient ... záporný teplotní koeficient
OZ	operační zesilovač
PFC	Power Factor Corrector ... komrektor účinníku
PWM	Pulse Width Modulation ... pulsně šířková modulace
RFI	Radio Frequency Interference ... radiofrekvenční rušení

Úvod

Světlo hraje v našem životě významnou roli. V návaznosti na biologický rytmus údajně ovlivňuje až stovku tělesných funkcí. Každodenně na nás působí různé druhy umělého osvětlení a aniž bychom si to uvědomovali, mají vliv na náš psychický i fyzický stav. Z umělého osvětlení se dostává do popředí hlavně LED osvětlení, které v posledních letech prochází významným dynamickým rozvojem. Tento typ osvětlení má svá určitá specifika a samozřejmě i své klady a zápory.

Teoretická část této práce obsahuje uvedení do problematiky LED osvětlení, popisuje konstrukci LED společně s předřadnými zařízeními potřebnými ke korigování jejich funkce. V rámci pojednání o kladech LED je též součástí práce kapitola o terapeutickém využití. Další částí je výčet a popis optických jevů souvisejících nejen s LED ale i s umělým osvětlením obecně. Následují kapitoly měření osvětlení, které mají za úkol uvedení do této problematiky a popis důležitých součástí, jež jsou k měření potřeba. Praktická část je zaměřena na jeden z optických jevů popsaných v teoretické části, tzv. flicker. Je zde vylíčen průběh měření, ke kterému jsou použity vybrané LED žárovky s odlišnými předřadníky. Následuje samotné zpracování dat v Matlabu, výpočet veličin charakterizujících flicker a návrh jiného přístupu výpočtu se zanesením frekvenční charakteristiky, která vychází z předchozích poznatků o flickeru v teoretické části.

Motivace

Zákaz prodeje běžných žárovek a jejich nahrazení jinými zdroji světla, mezi nimiž jsou i LED zdroje, je stále relativně aktuálním problémem. Lze zaznamenat čím dál větší poptávku po LED zdrojích a využití v různých oblastech, z nichž některé mohou znít i lehce absurdně. Není výjimkou setkat se s články, jejichž titulky hlásají další možnosti používání LED zdrojů - od ochrany mořských želv zelenými LED, přes látková zvířátka, ve kterých jsou zabudovány barevné LED svítící v závislosti na teplotě dítěte, k němuž je zvířátko přiloženo, LED uniformy až po výstřelky ve stylu LED disco vest pro psy. Stále se rozšiřující použití LED mě tak přivedlo k myšlence podívat se hlouběji na to, jak moc nás tento zdroj světla může ovlivnit. Dále jsem chtěla vytvořit ucelený přehled optických jevů souvisejících s umělým osvětlením a zapátrat i po těch méně známějších, kdy názvy některých ani nemají v češtině ekvivalent.

Cíle

Cílem bakalářské práce je zejména seznámení se s principy LED a s méně známými optickými jevy, mezi nimiž je i flicker. Jelikož se metodika na zpracování flickeru stále vyvíjí, mým cílem je snaha o jiný přístup výpočtu, jehož součástí je návrh filtrů v Matlabu.

1 Světlo a základní veličiny

Světlo má charakter elektromagnetického záření, jeho viditelná část se pohybuje v rozsahu vlnových délek o hodnotách přibližně od 390 do 790 nm, tedy mezi ultrafialovým a infračerveným zářením. Základní veličiny charakterizující světlo jsou **vlnová délka** λ a **frekvence** f . Mezi nimi platí následující vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde c je rychlost šíření světla ve vakuu rovna hodnotě přibližně $3 \cdot 10^8$ m/s. [2]

Následující veličiny slouží pro popis světelného zdroje a řadíme je mezi tzv. fotometrické veličiny, určují velikost působení světla na zrakový orgán, jsou tedy přepočítány na citlivost lidského oka [1]:

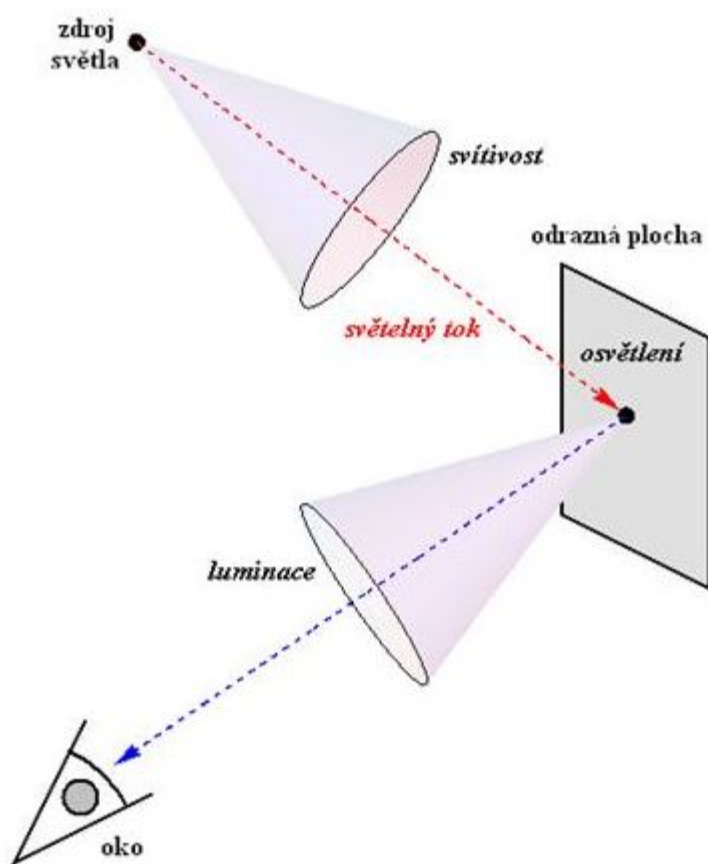
Světelný tok Φ charakterizuje světelný výkon, vyjadřuje množství světelné energie zdroje za časovou jednotku procházející určitou plochou. Jednotkou je lumen, zn. lm.

Svítivost I se udává pro bodový zdroj a vyjadřuje prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. Jednotkou je kandela, zn. cd.

(Intenzita) osvětlení E je podílem světelného toku a plochy, na kterou dopadá. Jednotkou je lux, zn. lx.

Jas/luminance L je měrná veličina svítivosti. Jedná se o „sílu“ světla odraženého od plochého difúzního předmětu (např. papír) či vyzářeného plochým zdrojem světla (např. televize). Jednotkou je cd/m^2 .

Naproti tomu existují ještě historicky mladší radiometrické veličiny popisující všechny druhy elektromagnetického záření, nejsou tedy omezeny jen na viditelné záření. Každá fotometrická veličina tak má svoji odpovídající radiometrickou veličinu. Pro světelný tok je to **zářivý tok** Φ_e s jednotkou W (watt), u svítivosti se jedná o **zářivost** I_e s jednotkou $W \cdot sr^{-1}$, pro (intenzitu) osvětlení je to **intenzita ozáření** E_e a jednotkou je $W \cdot m^{-2}$ a u jasu/luminance se zavedla veličina **zář** L_e a jednotka $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$. [2]



Obrázek 1.1: Schematicky znázorněný vztah fotometrických veličin [1].

2 LED osvětlení

LED osvětlení (název z anglického Light Emitting Diode) patří do skupiny tzv. elektroluminiscenčních světelných zdrojů. Jedná se o polovodičové součástky se dvěma elektrodami (anoda, katoda) obsahující PN přechod, který při průchodu elektrického proudu emituje optické záření. Vlastním světelným zdrojem je tedy polovodičový čip. Princip LED byl objeven již ve 20. letech 20. stol., prakticky se ale používají až od roku 1962. V posledních letech prošly významným dynamickým rozvojem. [2]

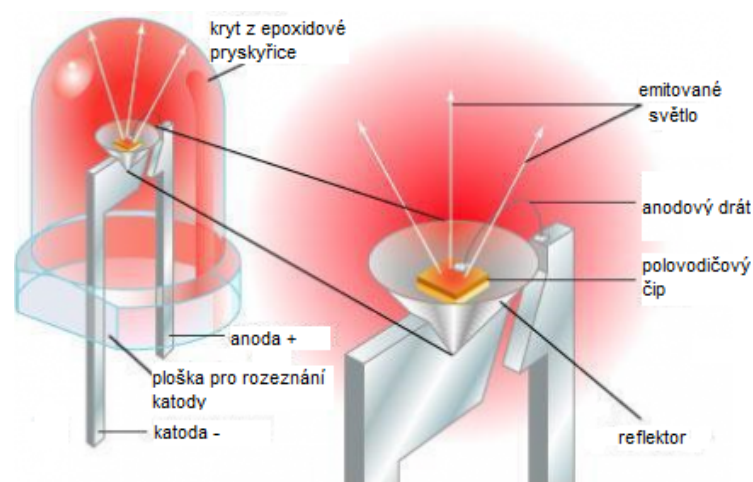
V roce 2014 získali objevitelé modrých LED, Japonci Isamu Akasaki, Hiroshi Amano a Shuji Nakamura, Nobelovu cenu za fyziku, konkrétně za přípravu prakticky použitelných polovodičů na bázi nitridu galia. Ten byl sice v krystalickém stavu známý již od 70. let 20. stol., ale až Shuji Nakamura z něj vyrobil natolik kvalitní vrstvu, která umožnila, aby modré LED měly adekvátní svítivost a účinnost. Ve své práci vycházel z výsledků předchozího výzkumu Akasakiho a Amana. Roku 1993 prezentoval svůj výsledek ve formě jasně modré diody, pro niž použil nitrid galia obohacený o stopové množství india a hliníku. Zajímavostí je, že Nakamura za svůj výtvar dostal pouhých 180 dolarů. V roce 2005 se však dočkal odpovídající odměny a od bývalého zaměstnavatele k němu putovalo téměř 10 milionů dolarů. [3] [4]

2.1 Konstrukce

Pro polovodičové PN přechody se využívají hlavně polovodiče typu $A^{III}B^V$ vysoké čistoty, legované malým množstvím vhodných příměsí, které vytvářejí buď přebytek elektronů (materiály typu N), nebo jejich nedostatek a tedy přebytek děr (materiály typu P). PN přechod pak vznikne v místě, kde se oba polovodiče stýkají.

Průchod stejnosměrného napětí v propustném směru pak způsobí rekombinaci elektronů a děr. Každý pár elektron-díra následně vyloučí kvantum energie, takže dojde k přeměně elektrické energie na světelnou - na nekoherentní světlo, které je usměrněno pomocí vhodných optických prvků a krytu z epoxidové pryskyřice (zpravidla má shodnou barvu s vyzařovaným světlem), úhel světelného svazku se určuje tzv. reflektorem a pohybuje se v rozmezí od 8° do 120° . [2]

Rozlišujeme diody o velmi malém výkonu s proudem 1 až 2 mA, standardní diody s proudem větším než 20 mA a výkonné (speciální, též označovány jako high power) s proudem větším než 350 mA. [2]



Obrázek 2.1: Popis LED [5].

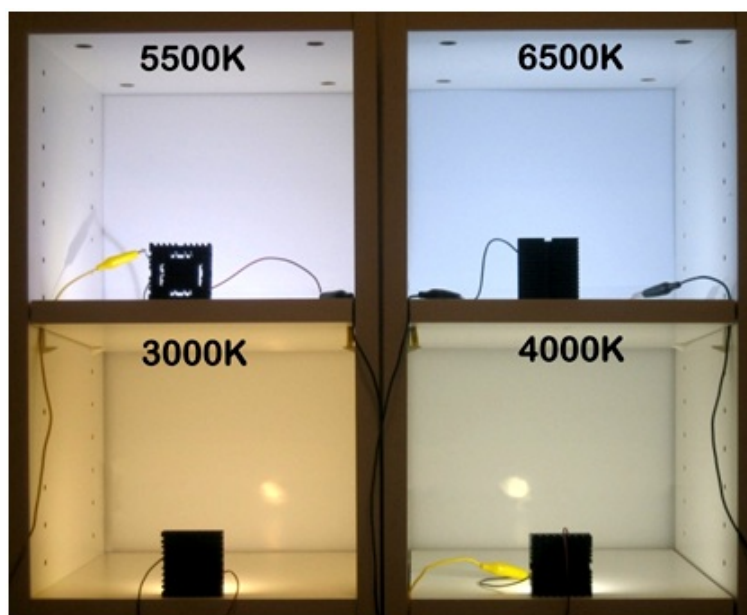
2.2 Barva světla

Vyrábějí se diody zářící přes různé barvy viditelného spektra, dále ultrafialové i infračervené. Pro červené, oranžové a žluté diody se používají materiály na bázi arzenidů a fosfidů india, galia a hliníku, pro zelené, modré a fialové na bázi nitridů a selenidů zinku, india a galia. Existují dva způsoby pro získání bílého světla. Prvním způsobem je přímé mísení světla červené, modré a zelené LED. Nevýhodou je dosažení nižšího jasů, navíc jednotlivé čipy časem podléhají nerovnoměrné degradaci a nežádoucím následkem může být posun barvy vyzařovaného světla. Druhý,

novější způsob využívá existenci tzv. luminoforů (látek schopných pohlcovat energii a následně ji vyzařovat ve formě světla, jejich složení ovlivňuje výslednou barvu světla) v kombinaci s modrou nebo ultrafialovou diodou. V případě modré diody je luminofor buzen modrým světlem, to se smísí se spojitým spektrem luminoforu za vzniku spektra modro-žlutého. Pro ultrafialovou diodu je využit třípásmový luminofor, dosažený index podání barev R_a pak dosahuje hodnot vyšších než 80. [2]

2.3 Barevná teplota světla

V předchozí kapitole byly popsány způsoby, jakými lze dosáhnout bílé LED. Nejpoužívanější metodou je ta s využitím modrého čipu a luminoforu. Ale právě množství či složení použitého luminoforu ovlivňuje, jaké bude výsledné zabarvení bílého světla - rozlišujeme škálu od teplé po studenou bílou. Mluvíme tak o tzv. barevné teplotě světla, která spektrum bílého světla charakterizuje. Z definice vyplývá, že barva světla odpovídá barvě záření, které by vydávalo černé těleso při zahřátí na danou teplotu. [13]



Obrázek 2.2: Ukázka odstínů bílého světla s uvedenou barevnou teplotou. Možná označení od nejchladnější po nejteplejší: teplá bílá, bílá, denní bílá, studená bílá [13].

Můžeme si všimnout, že výrobci na obalech od světelných zdrojů uvádějí pro danou barvu světla různá označení. Typicky se setkáme s označením „natural white“, „daily white“ nebo „pure white“. Obvyklým problémem bývá překlad těchto termínů - na obalu si pak můžeme přečíst, že barva světla je jednoduše „bílá“, případně s přívlastky „denní“, „přirozená“ nebo „přírodní“, aj. Z toho vyplývá, že užitečnější je údaj o skutečné barevné teplotě, která se udává v Kelvinech. [13]

Pro různý typ prostředí a prováděnou činnost se tak hodí jiný typ barvy světla, navíc se jedná o subjektivní záležitost. Obecně lze říci, že pro odpočinkové místnosti se lépe hodí teplejší odstíny o barevné teplotě kolem 3 000 K. Pokud provádíme nějakou práci či jednoduše potřebujeme být bdělí, hodí se spíše studené odstíny kolem 5 500 K. Podporují soustředění a pozornost a neměli bychom se cítit tak unavení. [13]

2.4 Terapeutické využití LED

LED světlo má kromě jiných oblastí své využití i ve zdravotnictví. Jedná se zejména o terapii kožních a vnitřních nemocí, dezinfekci vzduchu pomocí UV záření či vytvrzování hmot používaných v zubařské technice [2]. Výzkumy zaměřené na využití LED světla prokázaly pozitivní účinky v případech těžkých popálenin, ran, těžko se hojících diabetických kožních vředů a očních poranění. Studie dále ukazují, že LED světlo lze využít pro úlevu od bolesti a též k omlazení pokožky či redukcii vrásek. [19]

LED světlem je možné léčit ústní vředy vznikající jako vedlejší účinek chemoterapie či ozáření. Některé studie se zaměřily na hojení ran a použily k léčbě tři barvy LED - infračervenou, červenou a zelenou. Prokázaly, že takovýto druh světla proces hojení opravdu urychlil, nejlepšího účinku bylo dosaženo zelenou LED. Obecně došly ke zjištění, že LED světlo zvyšuje rychlost růstu buněk. [19]

Výzkumný tým Dr. Whelana se zaměřil na jinou oblast - obtížně léčitelné oční problémy. Provedl pokus, ve kterém vstříkl krysám vysokou dávku metanolu. Ten se v těle přeměnil na kyselinu mravenčí, která následně inhibovala aktivitu mitochon-

drií. Během několika hodin začaly odumírat energeticky náročné sítnicové buňky a zrakové nervy. Pokusná zvířata tak během jednoho až dvou dnů úplně oslepla. Whelan dále zkoušel, jak se změní reakce v těle krysy, pokud je po podání metanolu vystaví LED světlu o vlnové délce 670 nm po dobu 105 s. Toto aplikoval po 5, 25 a 50 h po metanolové injekci. Docílil z 95 % navrácení jejich zraku. Sítnice těchto zotavených krysy byla k nerozeznání od sítnice těch zdravých. Whelan zaznamenal regeneraci tkání a obnovu spojů mezi neurony. Tyto poznatky měly za následek použití LED světla pro neinvazivní léčbu onemocnění sítnice, makulární degenerace, glaukomu či prevenci slepoty. Tento inovativní přístup využívající červené až infračervené LED je označován jako fotobiomodulace. [19]

V dalších studiích se můžeme setkat s popisem vlivu LED na omlazení kůže. Výzkumy ukazují, že tento typ světla podporuje nárůst fibroblastů, ty následně tvoří kolagen a ten zase pomáhá udržovat zdravý stav pokožky a napomáhá k redukci vrásek. [19]

Při aplikaci LED světla si ještě můžeme položit otázku, do jaké hloubky je schopné skrze kůži proniknout. Pokud budeme uvažovat vlnové délky od 630 do 800 nm, tedy již zmíněné červené a blízké infračervené světlo, dostaneme se jím do hloubky cca 23 cm. [19]

Vědci z Boston Health Care System se rozhodli, že se pokusí o revoluční využití LED a prozkoumají jejich vliv na mozek válečných veteránů z Perského zálivu. Uvažovali poškození mozku způsobené explozí, neurotoxiny, pesticidy, apod., což má za následek poškození mitochondrií v mozku. Navrhli a zkonstruovali tak speciální helmu s infračervenými LED. Léčba má zvýšit výskyt oxidu dusnatého v tkáních, na které se osvětlením působí. Důsledkem je i lepší průtok krve tkání, tedy v tomto případě průtok krve mozem. Dr. Naeser došel též k závěru, že LED světlo působí na nemocné buňky mozku tak, že podporuje opětovnou tvorbu mitochondrií vedoucí k jasnějšímu a ostřejšímu myšlení. Aplikace této léčby na dobrovolníky vyústila v pozitivní dopady - zlepšení spánku či úbytek posttraumatických příznaků. Dr. Naeser též doufá v další potenciální léčebné vlivy LED jako např. léčbu depresí, demence, mrtvic či autismu. [20]

3 Předřadná zařízení pro světelné zdroje

V publikaci [2] se můžeme podrobněji dočíst o nezbytné součásti světelných zdrojů, kterými jsou tzv. předřadná zařízení nacházející se mezi napájením a samotným světelným zdrojem. Jedná se tedy o elektrická zařízení zajišťující správnou funkci osvětlovacího zařízení, dále ovlivňují jeho parametry a usměrňují napájecí proud. Obecně dle charakteru použité součástky omezujícího proud rozlišujeme elektromagnetická a elektronická předřadná zařízení. Elektromagnetické předřadníky, např. tlumivka (cívka) či startér (skleněná baňka se dvěma elektrodami (jedna z bimetalu) naplněná argonem a neonem) pro výbojové zdroje ještě donedávna patřily k jediným zástupcům takovýchto zařízení. V současné době jsou spíše na ústupu a prosazují se místo nich modernější elektronické předřadníky určené i pro ostatní světelné zdroje - kromě výbojových zdrojů i pro tepelné a elektroluminiscenční. Je s nimi spojena vyšší kvalita osvětlení, nižší ztráty, vyšší účinnost zdrojů, menší rozměry a hmotnost, atd. Mají významný vliv na přítomnost určitých optických jevů (stroboskopický efekt, flicker, apod.). Mohou se nacházet buď samostatně mimo svítidlo či mohou být vestavěné do svítidla anebo jsou přímo jeho součástí jako integrovaný předřadník.

3.1 Elektromagnetická předřadná zařízení

3.1.1 Předřadná zařízení pro nízkotlaké výbojky

V praxi se pro lineární zářivky nejvíce používají následující typy předřadníků:

Předřadníky s přídavným žhavením elektrod: Dojde-li k zapálení výboje ve startéru v důsledku připojení k síťovému napětí, elektrody se ohřívají (bimeta-

lová elektroda se deformuje), přiblíží k sobě a sepne se obvod. Výboj tak zhasne a elektrodami zářivky prochází zkratový proud tlumivky, elektrody se tak rozžhají na vhodnou teplotu pro emitování elektronů. Zároveň dochází ke zpětnému ochlazení elektrod startéru, rozpojení obvodu a následně vzniká mezi elektrodami zářivky napěťový impuls vlivem magnetické indukce tlumivky a dojde již k výboji na samotné zářivce. Následné napětí při provozu je nižší než napětí pro vznik doutnavého výboje, přídavné žhavení (startér) se proto už znovu nezapálí. [2]

Předřadníky s rychlým startem: Na rozdíl od předchozího případu je toto zapojení bez startéru. Místo něj může být použitý např. žhavicí transformátor. Ten nažhává elektrody na určitou teplotu, pro kterou je zápalné napětí zářivky nižší než napětí ze sítě. [2]

Předřadníky s okamžitým startem: K zapálení výboje se používá podstatně vyšší napětí naprázdno, protože elektrody zářivek nejsou před zapálením výboje žhaveny. [2]

3.1.2 Předřadná zařízení pro vysokotlaké výbojky

Předřadník je tvořen tlumivkou nastavenou na určitý příkon výbojky. Do hořáku výbojky jsou zataveny pomocné zapalovací elektrody, ty sníží zápalné napětí pod minimálně přípustné napětí sítě. [2]

3.2 Elektronická předřadná zařízení

3.2.1 Předřadná zařízení pro teplotní světelné zdroje

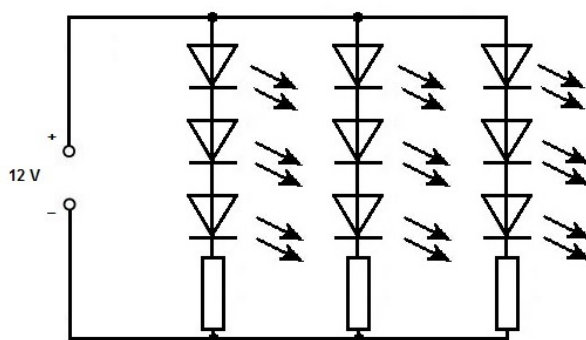
Jejich úkolem je transformovat napětí napájecí sítě (230 V) na napětí malé (12 V, 24 V) při galvanickém oddělení obvodů. Jedná se o elektromagnetické transformátory ve spojení s dalšími elektronickými prvky. Nepoužívá se kondenzátor z důvodu světelné setrvačnosti rozžhaveného vlákna žárovky. Teplotní zdroje lze stmívat pomocí fázového řízení úpravou efektivní hodnoty napájecího napětí, to se pak na transformátor přivádí pouze v určitých úsecích (půlperioda sinusového průběhu). [2]

3.2.2 Předřadná zařízení pro výbojové zdroje

Účel je samý jako u elektromagnetických předřadníků - způsobit výboj a omezit proud jím procházející. Při zapnutí prochází obvodem náběhový proud, jehož velikost je závislá na impedanci napájecího zdroje, odporu napájecích vodičů, impedanci světelného zdroje a rovněž ji ovlivňuje okamžik připojení k sinusovému průběhu napájecího napětí (největší hodnoty tak dosahuje při maximu napětí). Při každé změně polaroty napětí mezi elektrodami se stále střídá zapálení výboje a zánik výboje. Čím vyšší bude frekvence, tím bude kratší doba zániku výboje. V daném prostoru tak zůstane i větší množství ionizovaných částic a napětí potřebné k opětovnému zapálení bude nižší. V tomto případě je tedy stěžejní frekvence střídače. [2]

3.2.3 Předřadná zařízení pro světelné diody

LED mohou být napájeny buďto z napěťového či proudového zdroje. Uvažujeme-li standardní LED s napájením z napěťového zdroje, předřadníkem bude rezistor. Na každé LED vzniká úbytek napětí, a jelikož se liší v závislosti na konkrétní barvě LED, musí být pro danou barvu použitý rezistor o příslušném odporu. Odporů použitých rezistorů dále závisí i na velikosti napájecího napětí. Nevýhodou tohoto zapojení jsou energetické ztráty na rezistoru a také kolísání napětí, které se následně projevuje kolísáním světelného toku. Nejčastěji se s tímto zapojením setkáme u lineárních modulů LED v sériově paralelním zapojení. [2]



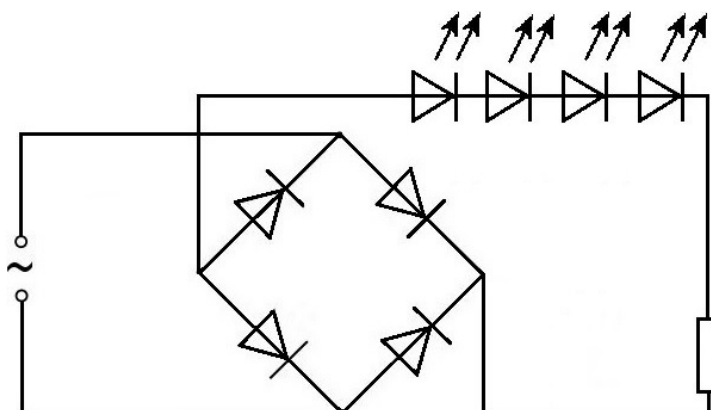
Obrázek 3.1: Lineární LED modul v sériově paralelním zapojení.

Výhodnější variantou je napájení LED proudovým zdrojem. Dodávaný proud pak není závislý ani úbytku napětí na LED ani na velikosti napájecího napětí. V tomto případě má zdroj definovaný výstupní proud a maximální výstupní napětí. Pokud je z takového zdroje napájeno více LED, zapojují se do série a jejich nejvyšší možný počet je dán maximálním napětím zdroje a úbytkem napětí na jedné diodě. [2]

Existuje několik typických zapojení předřadníků pro LED. Následující výčet některé z nich popisuje:

Dvoucestný usměrňovač připojený k lineárnímu modulu LED

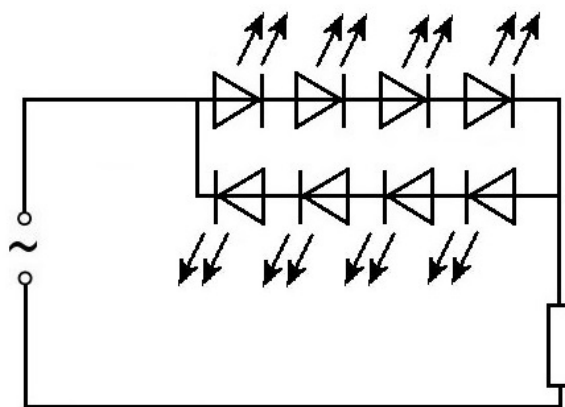
Střídavý proud ze sítě je veden ke Graetzově můstku, který převádí střídavý proud na stejnosměrný. Jako nadproudová ochrana je v obvodu často přítomen ještě rezistor zapojený sériově k LED. Pro lepší vyhlazení průběhu proudu, resp. napětí se obvykle do obvodu zapojuje kondenzátor. [6]



Obrázek 3.2: Dvoucestný usměrňovač připojený k lineárnímu modulu LED.

Dva přímo napájené paralelně orientované lineární moduly LED s navzájem opačnou orientací anody a katody.

Dva lineární moduly LED jsou zapojeny paralelně, každý modul obsahuje diody orientované stejným směrem, vzájemná orientace modulů je opačná. V závislosti na směru střídavého napětí je vždy napájena jedna z větví obvodu. [6]

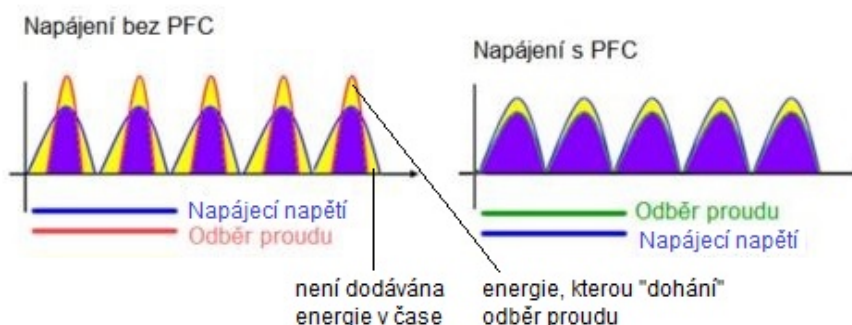


Obrázek 3.3: Dva přímo napájené paralelně orientované lineární moduly LED s navzájem opačnou orientací anody a katody.

Pro oba předchozí případy (usměrňovač s lineárním modulem a paralelně orientované moduly) platí, že proud procházející LED modulují s dvojnásobkem síťové frekvence. Jelikož je světelný tok LED přímo úměrný proudu, přítomný flicker u LED bude mít stejnou frekvenci, tj. 100 Hz.

Obvody s korektorem účinníku

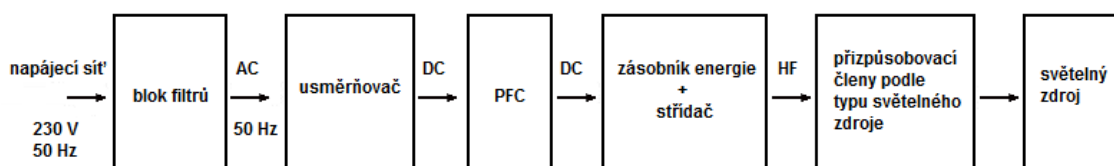
Korektor účinníku (PFC) může být zařazen mezi usměrňovač a zásobník energie (viz obr. 3.5). Má za účel upravovat průběh proudu tak, aby byl rovnoměrný, stejný jako napětí a co nejméně deformován. Tedy aby hodnota účinníku (poměru činného a zdánlivého výkonu) byla co největší. Nabíjí kondenzátor po celou dobu periody. Jeho zavedení do obvodu zlepšuje stabilitu světelného zdroje. PFC dělíme na aktivní a pasivní. Pasivní limitují výkon LED, aktivní aktivně hlídají výkon a příkon. [14]



Obrázek 3.4: Napájení s/bez PFC [14].

3.2.4 Obecné blokové schéma elektronických předřadných zařízení

Obecně elektronický předřadník zahrnuje několik funkčních bloků, ty se liší dle konkrétního zapojení. Z napájecí sítě se dostáváme do vstupní části, ta je tvořena blokem filtrů, které mají za účel omezit harmonické zkreslení, zapínací proud, zpětný proud na napájecí síť, zabránit přepětí (tzv. EMI filtr) a eliminovat vysokofrekvenční rádiové rušení (RFI filtr). Dalším blokem je dvoucestný diodový usměrňovač, který střídavé napájecí napětí převádí na stejnosměrné pulsní napětí. Následuje zásobník energie (elektrolytický kondenzátor nabíjený pulsním napětím) spolu se střídačem. Nabíjecí proud kondenzátoru může být u novějších předřadníků udržován tzv. korektorem účinníku (PFC) ve fázi s napájecím napětím. Střídač upravuje stejnosměrné napětí na střídavé o frekvenci od 30 do 100 kHz. Posledním blokem jsou přizpůsobovací členy. Ty se liší v závislosti na konkrétním světelném zdroji a přizpůsobují mu napájecí podmínky. Např. tlumivka a startér u výbojek, transformátor u teplotních zdrojů, apod. [2]



Obrázek 3.5: Obecné blokové schéma elektronického předřadníku [2].

4 Měření osvětlení

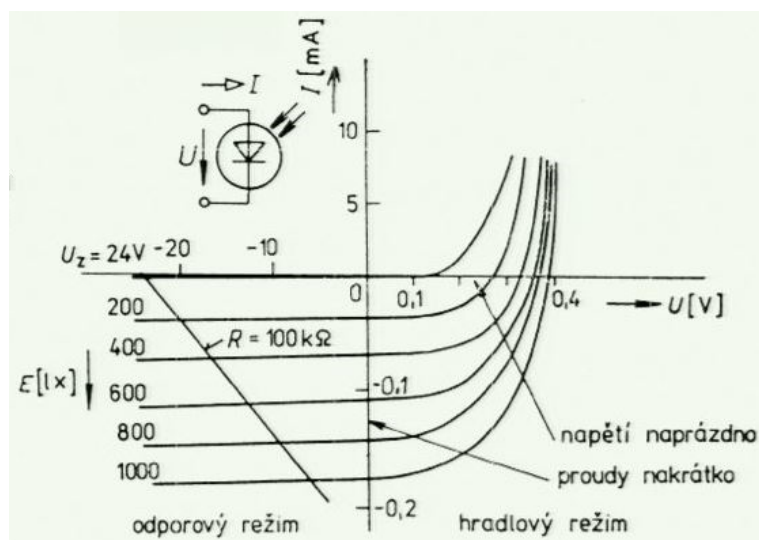
4.1 Detektory světla

4.1.1 Fotorezistor

Fotorezistor je elektronická součástka bez PN přechodu, jejíž odpor se mění v závislosti na světle, které na ni dopadá. Využívá princip vnitřního fotoelektrického jevu. Součástí je fotovodivý krystal, vodivý pás a elektrody. Dojde-li k osvětlení krystalu, absorbují se fotony a to způsobí přesun valenčních elektronů do vodivého pásu. Ve valenční vrstvě vznikou díry, volné elektrony následně způsobují zvýšení elektrické vodivosti a tedy i snížení elektrického odporu. Platí tedy, že čím vyšší je ozáření, tím je nižší odpor fotorezistoru. Časová odezva fotorezistoru je obvyklé pomalá, proto se využívá tam, kde není nutná rychlá odezva, např. pro světelné vypínače - jejich automatické rozsvěcení či zhasnutí podle úrovně okolního světla. [33]

4.1.2 Fotodioda

Fotodioda je polovodičová součástka s PN přechodem upravená tak, aby na PN přechod dopadalo světlo. Pokud na něj žádné světlo nedopadá, charakteristika fotodiody je totožná s charakteristikou běžné diody. Je-li fotodioda zapojena v závěrném směru, můžeme na ni pozorovat vliv osvětlení a v závislosti na něm i lineární průběh procházejícího proudu. Na změny osvětlení reaguje velice rychle, řádově v mikro- až nanosekundách. Používají se k měření osvětlení. [33]



Obrázek 4.1: Charakteristika fotodiody [15].

4.1.3 Fototranzistor

Fototranzistor je polovodičová součástka s PN přechodem. Pokud na kolektorový PN přechod dopadá světlo, otevře se přechod mezi bází a emitorem. Dojde k otevření tranzistoru a průchodu proudu z připojeného zdroje. Průběh proudu závisí na osvětlení. [33]

4.2 Obvody s operačními zesilovači

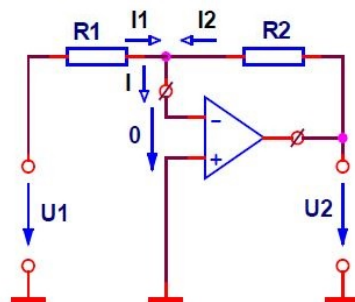
Operační zesilovač je polovodičová součástka se dvěma vstupy (invertujícím (+) a neinvertujícím (-)) vyrobená ve formě integrovaného obvodu. Zesiluje rozdíl napětí přiváděný na vstupy. Hodnota napěťového zesílení je následně omezena zpětnovazebným rezistorem umístěným mezi výstupem a invertujícím vstupem. Pokud přivedeme vstupní elektrický signál na invertující vstup OZ, výstupní zesílený elektrický signál bude mít opačnou fázi. Připojíme-li ho na neinvertující vstup, výstupní i vstupní elektrický signál bude mít stejnou fázi. Podle typu připojení zesilovaného signálu rozlišujeme dva základní případy zapojení - viz obr. 4.2 a 4.3. [34]

Vztah pro zesílení invertujícího zesilovače,

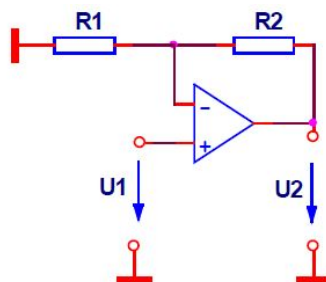
$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

a vztah pro zesílení neinvertujícího zesilovače,

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.2)$$



Obrázek 4.2: Invertující zesilovač [34].



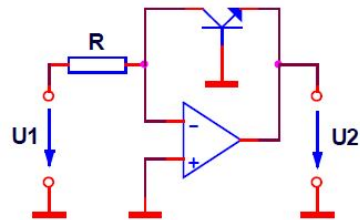
Obrázek 4.3: Neinvertující zesilovač [34].

4.3 Obvody s tranzistory

Kromě dvou již zmíněných základních typů OZ existují další. V souvislosti s praktickou částí si uvedeme ještě **logaritmický zesilovač**, jehož výstupní napětí je úměrné logaritmu vstupního napětí. [34] Logaritmickou charakteristiku lze získat nejen pomocí tranzistoru, jak demonstruje schéma na obr. 4.4, ale též pomocí polovodičové diody.

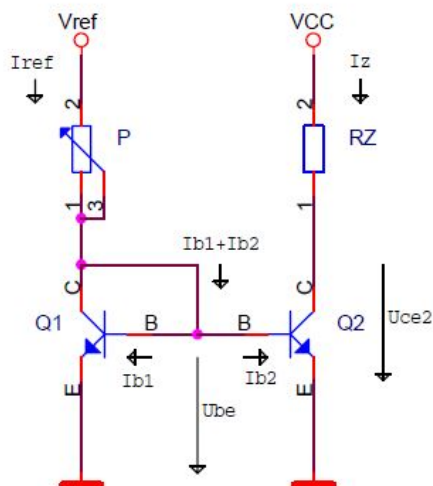
Vztah pro výstupní napětí má tento tvar:

$$U_2 = \ln(U_1) \quad (4.3)$$



Obrázek 4.4: Logaritmický zesilovač [34].

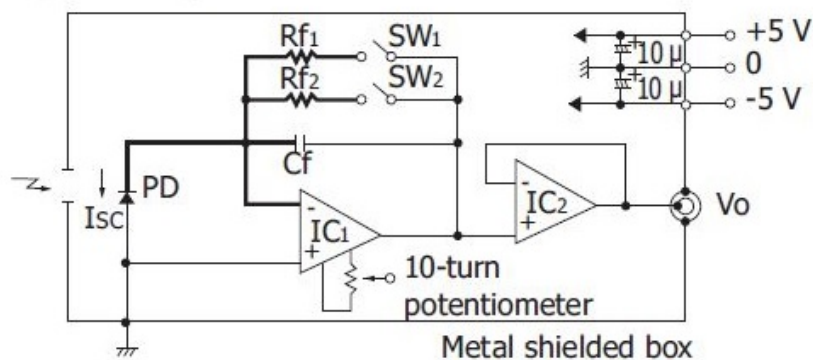
V integrovaných obvodech se mj. můžeme setkat s tzv. **proudovým zrcadlem** (obr. 4.5): Na vstupu je nastavený proud I_{ref} , který určuje velikost proudu zátěží I_z . V případě, že oba tranzistory v obvodu budou stejné a budou mít též shodnout teplotu, budou se oba proudy rovnat. Také do báze druhého tranzistoru poteče stejný proud (I_{b2}) jako do prvního tranzistoru (I_{b1}). Zjednodušeně můžeme říci, že proud z jednoho tranzistoru se tak přenáší na druhý tranzistor v poměru 1:1. [17]



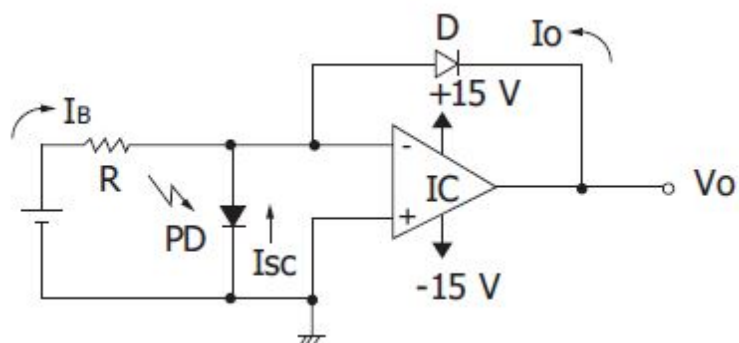
Obrázek 4.5: Proudové zrcadlo [17].

4.4 Zpracování signálu snímačů osvětlení

Za pomoci detektoru světla, operačního zesilovače a dalších obvodových prvků lze sestavit obvod pro měření světla. Uvedeme si dvě varianty takového obvodu. První je obvod (obr. 4.6) s přepínáním rozsahů v závislosti na intenzitě měřeného osvětlení. Druhý obvod (obr. 4.7) je bez přepínání rozsahů a se zanesením logaritmické charakteristiky.



Obrázek 4.6: Obvod s přepínáním rozsahů [36].



Obrázek 4.7: Obvod s logaritmickým zesilovačem [36].

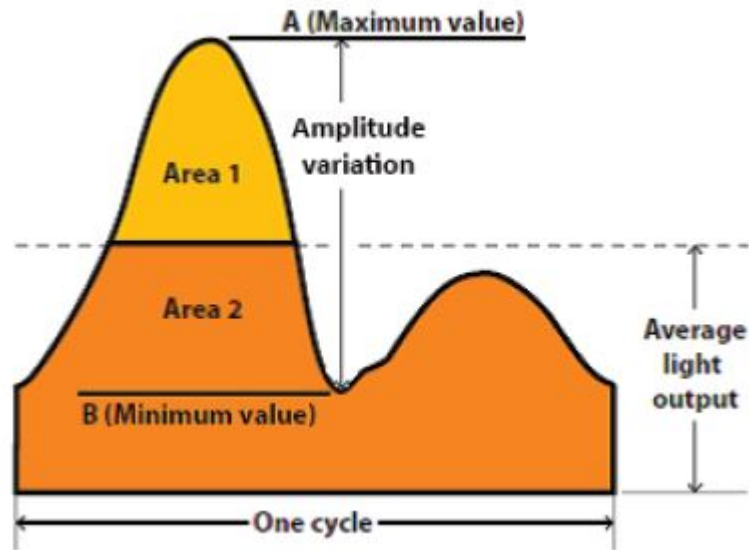
5 Optické jevy související s umělým osvětlením

5.1 Flicker

Flicker¹ lze definovat jako kolísání světelného toku umělého osvětlení v čase. Přesněji řečeno se jedná o temporální flicker. (Pro úplnost lze dodat, že dále existuje ještě chromatický a prostorový flicker.) Dle způsobu vzniku rozlišujeme dva typy flickeru - fotometrický a elektrický. Elektrický je způsoben kolísáním napětí v síti. Závisí tedy na způsobu, jakým je střídavý proud ze sítě přeměněn na světelnou energii, je výsledkem různých rušení či přechodných jevů v elektrických rozvodech. Pro jeho výpočet se používá model klasické 60W žárovky, lidského oka a model zpracování flickeru mozkiem. Fotometrický je způsoben charakteristikou samotného světelného zdroje, např. tloušťkou vlákna žárovky anebo, což je v případě LED osvětlení zásadní, použitým předřadníkem. [7]

Tento jev se stal předmětem zájmu zejména kvůli svým potenciálním dopadům na člověka. Fyziologické projevy mohou být různé, od mírného rozrušení až po vážnější neurologické problémy. Závisí na charakteristikách modulace daného světelného zdroje, okolních světelných podmínkách, citlivosti daného jedince a na prováděné činnosti. [7]

¹V literatuře se většinou termín flicker nijak nepřekládá. Nicméně je možné setkat se i s jeho počestěnou podobou - tedy flickr či s různými variantami překladu, např. poblikávání, blikání, mrkání anebo míhání.



Obrázek 5.1: Znáznornění veličin FP a FI [7].

5.1.1 Index flickeru, Procentuální flicker

Fotometrický flicker je u elektrických světelných zdrojů obvykle periodický, křivka světelného toku je mj. charakteristická změnami v amplitudě, střední hodnotou časové změny světelného toku, periodickou frekvencí a tvarem. Pro výpočet byly stanoveny následující veličiny: Index flickeru a Procentuální flicker. Procentuální flicker je známější a používá se pro něj snadnější výpočet, naproti tomu Index flickeru je výhodnější z důvodu zohlednění rozdílů ve tvarech křivek.

$$\text{Procentuální flicker (FP)} = 100 \% \frac{A - B}{A + B}, \quad (5.1)$$

kde A je maximální a B minimální hodnota světelného toku.

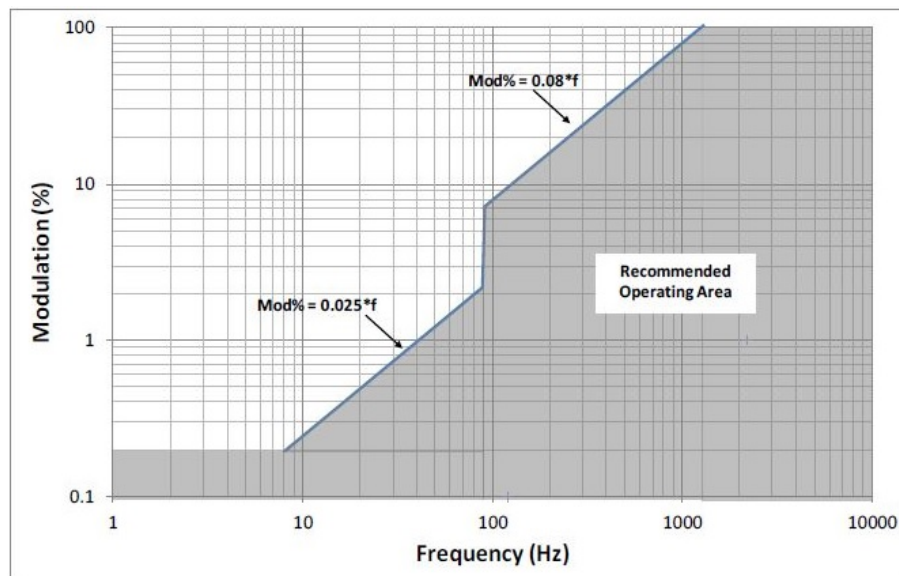
$$\text{Index flickeru (FI)} = \frac{\text{Area1}}{\text{Area1} + \text{Area2}}, \quad (5.2)$$

kde Area1(2) je plocha omezená křivkou průběhu světelného toku nad (pod) střední hodnotou. [7] [9]

Potenciální účinky flickeru se liší v závislosti na době, jakou je člověk tomuto jevu vystaven. Např. expozice v řádu několika sekund může způsobit epileptické

záchvaty, zatímco dlouhodobější vystavení může vyústit v nevolnost, bolesti hlavy či zhoršené vidění. V prvním případě mluvíme o viditelném flickeru, který je obvykle v rozmezí od 3 do 70 Hz. Druhý případ je spojen s neviditelným flickerem, jehož frekvence jsou vyšší než u viditelného, tj. v hodnotách nad 70 Hz. Měření z elektroretinogramu prokázala, že modulace světla o frekvencích v rozmezí od 100 do 160 Hz či dokonce až do 200 Hz je detekována lidskou sítnicí, i když už je samotný flicker pro oko prakticky neviditelný. S vnímáním flickeru souvisí i tzv. kritická frekvence flickeru (CFF), která určuje hraniční hodnotu frekvence mezi viditelným a neviditelným flickerem. Jelikož je vnímání flickeru v závislosti na konkrétním jedinci individuální, určuje se CFF v rozsahu od 60 do 100 Hz. Od této hodnoty už oko vnímá světlo, jako kdyby mělo spojitý průběh bez flickeru. [6]

Norma [6] uvádí graf (obr. 5.2), ve kterém stanovuje hraniční limity pro to, jak hluboká musí být na dané frekvenci modulace, aby byl flicker už rušivý. Šedá oblast pod hraniční křivkou představuje plochu, ve které je minimalizován vizuální diskomfort a flicker naopak rušivě nepůsobí.



Obrázek 5.2: Graf znázorňující doporučenou provozní oblast [6].

5.1.2 Fotosenzitivní epilepsie

V publikaci [6] se můžeme dočíst o spojitosti výskytu epilepsie a určitých světelných jevů. U nízkého procenta populace byl zjištěn výskyt tzv. fotosenzitivní epilepsie. U těchto jedinců tak mohou být vyvolány záchvaty v důsledku rychle blikajících světél nebo statických opakujících se geometrických vzorů. Záchvaty jsou odrazem přechodné abnormální synchronizované činnosti mozkových buněk, ovlivňují tak vědomí, pohyby těla a/nebo vnímání. Počátky fotosenzitivní epilepsie se zpravidla objevují kolem puberty, ve věkové skupině od 7 do 20 let je výskyt až 5x častější než v běžné populaci. U 3/4 populace přetrvává fotosenzitivita až do dospělosti. Pravděpodobnost záchvatů je ovlivněna hned několika faktory a jejich kombinací:

- frekvence blikání: Každá opakující se změna ve zrakovém podnětu o frekvenci od 3 do 70 Hz představuje potenciální riziko, ale největší pravděpodobnost záchvatů je pro frekvenci od 15 do 20 Hz. Samotné blikání nemusí být rytmické.
- jas: Stimulace ve skotopickém (= tyčinkové noční vidění oka adaptovaného na tmu) nebo nízkém mezopickém (= smíšené vidění oběma receptory sítnice, tj. tyčinkami i čípkami, v šeru či za soumraku, též tzv. soumračné vidění) rozmezí o hodnotě jasu méně než 1 cd/m^2 představuje nižší riziko než v rozmezí vyšším mezopickém až fotopickém (= čípkové denní vidění oka adaptovaného na světlo).
- kontrast se světlem v pozadí: Potenciálním rizikem jsou kontrasty vyšší než 10 %.
- vzdálenost mezi pozorovatelem a světelným zdrojem a jeho umístěním: závisí jednak na celkové ploše sítnice přijímající stimuly a jednak na tom, zda podněty dopadají do centrální oblasti sítnice či do okrajových částí a zasahují periferní vidění. I přesto, že se pozorovateli může zdát flicker v periferním vidění výraznější, větší riziko představuje jeho dopad v centrálním vidění.
- vlnová délka světla: Riziko představuje zejména sytě červený flicker či střídavě červené a modré záblesky.

- otevřené či zavřené oči: Flicker o vysokém jasu může mít na jedince nepříznivější dopad v případě zavřených očí, protože pak je stimulována celá sítnice. Zdrojem světla se totiž pak stává celé oční víčko z důvodu difúzního šíření světla.

5.2 Stroboskopický jev

Pokud dojde ke kombinaci světelného flickeru a rotačního pohybu, mluvíme o tzv. stroboskopickém jevu. Pozorovaný objekt se pak jeví jako zdánlivě nehybný, s opačnou rotací či u něj lze pozorovat změnu rychlosti. Zejména případy, kdy je frekvence rotace objektů a světelného flickeru shodná a objekty se tak jeví jako nehybné, představují potenciálně nebezpečné podmínky pro zvýšení výskytu nehod. Týká se to hlavně různých rotujících částí strojů a zařízení v hlučných prostředích továren. Nicméně o problematice úrazů spojených se stroboskopickým jevem existuje zatím jen málo výzkumů. Byla provedena studie J. D. Bulloughem, která zkoumala stroboskopický jev u LED pomocí užití různých časových průběhů světelného toku a frekvencí. Účastníci následně hodnotili, zda jev zaznamenali, jaký byl jejich vizuální komfort a též i jaká byla tzv. míra přijatelnosti, kde Bullough zavedl stupnici od 0 do +2, která rozlišovala stav neutrální, poněkud přijatelný a velmi přijatelný. [6] [21]

Tento jev má však i svá využití. Setkáme se s ním mj. u některých kytarových ladiček. U kytary každá struna kmitá s určitou stálou frekvencí a pokud bychom ji chtěli naladit, mohli bychom si k tomu zvolit stroboskopickou ladičku, která využívá LED. Její nejjednodušší variantou je LED blikající s frekvencí shodnou s frekvencí kmitání struny. Pokud si s blikající LED posvítíme na rozkmitanou strunu a jejich frekvence se budou shodovat, struna se nám bude jevit jako nehybná. V opačném případě je potřeba strunu utáhnout či povolit, abychom dosáhli žádaného jevu a tím i správného naladění kytary. [22]

5.3 Riziko modrého světla

Riziko modrého světla² se vztahuje ke všem typům LED s výjimkou ultrafialových. Souvisí s fotochemickým poškozením způsobeným vlivem modrého a fialového světla na sítnici. Klíčovými prvky, které přilákaly pozornost specialistů na osvětlení, oftalmologů a fotobiologů jsou tyto dva: Většina LED je zdrojem světla o vysokém jasů; drtivá většina komerčních bílých LED má emisní spektrum se špičkou pro modrou barvu. O této problematice se můžeme dočíst zejména v [8], odtud též pocházejí následující informace.

Úrovně ozáření jsou pro LED relativně vysoké, obecně ale poškození závisí na nahromaděné dávce světla, kterému je jedinec vystaven, což může být výsledkem krátké expozice o vysoké intenzitě či opakovaných expozicích o nízké intenzitě. Modré světlo je pro sítnici škodlivé v důsledku buněčného oxidačního stresu (nerovnováha mezi tvorbou reaktivního kyslíku a schopností rychle odbourávat a detoxikovat reaktivní meziprodukty). Dále je podezření, že je též rizikovým faktorem pro věkem podmíněnou makulární degeneraci (postižení tzv. žluté skvrny sítnice - místa nejostřejšího vidění).

Úrovně expozice sítnice modrému a studenému bílému světlu LED ze vzdálenosti 200 mm často překračují limit pro časový úsek mezi několika sekundami (pro modré světlo) a několika desítkami sekund (pro studené bílé světlo). Důsledkem je, že pro krátké vzdálenosti nelze možnou toxicitu zanedbat. Pokud je pozorovací vzdálenost prodloužena na více než jeden metr, maximální expoziční doba se významně zvýší na několik tisíc až desítek tisíc sekund. Lze tedy tvrdit, že pokud je pozorovací vzdálenost dostatečně dlouhá, poškození sítnice modrým světlem nehrozí. Rizika poškození jsou však přítomna v případech, kdy jsou modré LED použity např. u hraček pro děti, protože ty představují citlivou populaci na modré světlo či u LED lamp prodávaných pro domácí použití, u nichž se může velmi snadno stát, že bude běžný uživatel vystaven jejímu delšímu působení či bude příliš blízko zdroje tohoto světla.

²Spíše se s tímto termínem setkáme v jeho anglické podobě jako tzv. „blue light hazard“.

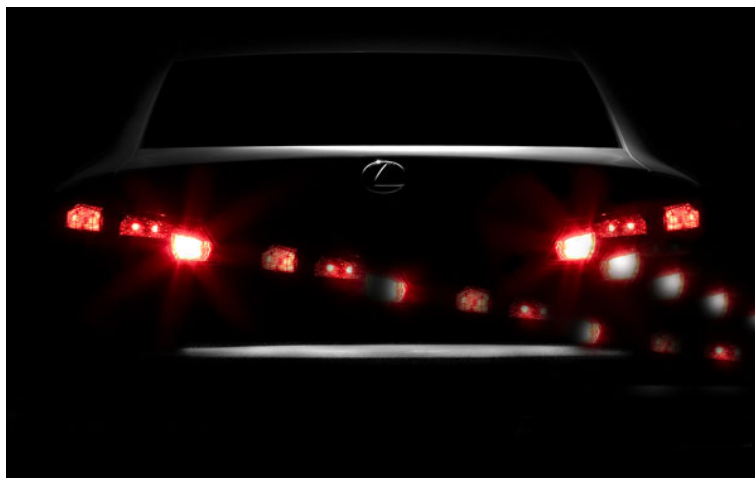
Pro veškeré druhy LED zařízení musí být proveden dle normy IEC 62471 odhad rizika modrého světla. Norma klasifikuje světelné zdroje do několika rizikových skupin (od 0 pro žádné riziko do 3 pro vysoké riziko) v závislosti na maximální přípustné délce vystavení jedince světlu v dané pozorovací vzdálenosti. LED produkty patří většinou do rizikové skupiny 2, což značí střední riziko a měly by mít označení, které by informovalo uživatele o potenciální škodlivosti pro oči v případě přímého pohledu do zdroje světla (označení „not to stare“). LED produkty ve spotřební elektronice (např. moderní LED lampy) je doporučováno řadit do rizikové skupiny 1 a je pro ně stanovena vzdálenost 200 mm jako nejkratší pozorovací vzdálenost, která je v domácím prostředí ještě bezpečná. Výše zmíněná norma však nebere v úvahu citlivost některých specifických skupin obyvatelstva (např. děti; lidé s již existujícím očním či kožním onemocněním, které vystavení danému světlu může jejich stav zhoršit; starší lidé, jejichž kůže a oči jsou citlivější na optické záření, atd.).

Určité kategorie pracovníků (dělníci ve výrobě LED zdrojů; technici, kteří instalují světla apod.) jsou vystaveny vysokým dávkám umělého světla při každodenních činnostech. Vzhledem k tomu, že mechanismy poškození způsobeného světlem nejsou dosud dostatečně popsány a známy, měla by tato skupina pracovníků používat jako preventivní opatření vhodné ochranné pracovní prostředky (např. brýle pro odfiltrování modrého světla). V současné době není žádný takový ochranný prostředek, který by snižoval riziko modrého světla z umělých osvětlení. Existuje ale např. druh laserových brýlí, které jsou navrženy k filtraci modrých a zelených laserových paprsků, ty mohou být k těmto účelům použity.

5.4 Phantom array effect

U stroboskopického jevu jsou oči pozorovatele nehybné a osvětlený objekt rotuje. Pokud ale vezmeme v úvahu nehybný zdroj světla a pozorovatele, jehož oči budou vykonávat rychlé pohyby, světlo se mu bude jevit jako série několika prostorově za sebou rozprostřených světel. Dochází tak k tzv. phantom array effect³. [23]

Typicky si tohoto jevu lze všimnout v noci při jízdě automobilem, kdy vidíme koncová LED světla automobilu před námi. Obecně objekty zrakově vnímáme skrze sumaci jejich obrazů na sítnici a mimosítnicovým okulomotorickým signálům, které zaznamenávají pozici oka. Spojení pohybu očí a světelného flickeru způsobí, že mimosítnicový signál sice bude odpovídat momentálnímu pohybu oka, ale bude se tak dít s určitým zpožděním. V současné době existují pouze omezené znalosti o podmínkách, za kterých je phantom array effect viditelný. V roce 2012 vyplynulo z výzkumů Robertse a Wilkinse, že maximální frekvence, při které je možné pozorovat phantom array effect je přibližně 2 000 Hz. [23]

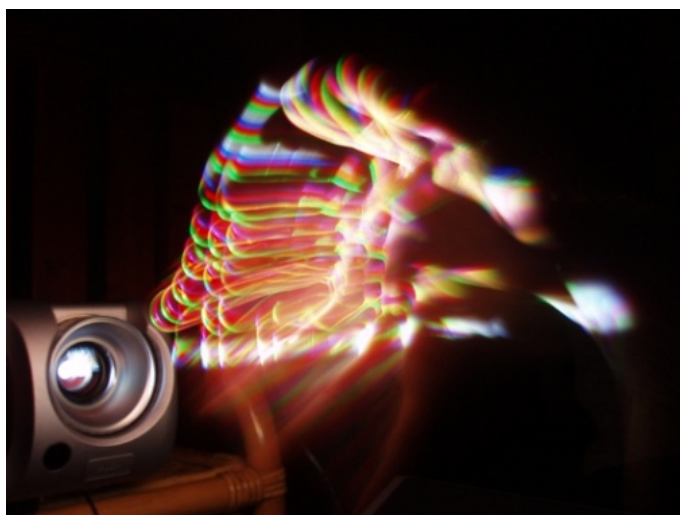


Obrázek 5.3: Demonstrace phantom array effect u koncových světel automobilu [24].

³S českým ekvivalentem jsem se v literatuře nesetkala.

5.5 Duhový efekt

S tímto jevem se setkáme zejména u jednočipových DLP (Digital Light Processing) projektorů využívajících filtr ve formě rychle se otáčející barevného kolečka či u projektorů využívajících LED. U jednočipových DLP projektorů světlo z lampy prochází barevným filtrem až na DMD čip, který reguluje jas a provádí synchronizaci (pro příslušnou barvu se na čipu nastaví odpovídající pixely), od něj se odráží a díky danému časování prochází správná barva čočkou až na projekční plochu. Ve většině případech filtr obsahuje tři základní barvy, které se vedle sebe střídají - červenou, zelenou a modrou a někdy též průhlednou část pro zvýšení jasů. U některých výrobců se můžeme setkat i se žlutou barvou. Samotný filtr se otáčí s velmi vysokou frekvencí a lidské oko tak není schopné zaznamenat, jak se barvy mění a jak pixel bliká. [25]



Obrázek 5.4: Demonstrace duhového efektu u staršího modelu DLP projektoru [28].

Tento princip je spojen s tzv. duhovým efektem⁴. Jedná se v podstatě o druh stroboskopického efektu, jenž vykazuje krátké záblesky červené, zelené a modré barvy a nastává, pokud jsou zobrazovány rychle se pohybující bílé či světlé objekty na tmavém či černém pozadí. Kontury takového objektu pak střídavě vykazují výše zmíněné barvy. Patrné to může být například při zobrazení bílých titulek na černém pozadí na konci filmu. [25]

⁴V angličtině jako tzv. „rainbow effect“ či RBE.

Tomuto efektu se lze vyhnout využitím tříčipových DLP projektorů, kde se všechny tři barvy generují současně a neprobíhá mezi nimi žádné přepínání či využitím LCD projektorů, kde vstupní světlo dopadá na hranol, který rozloží barevné spektrum opět na tři barvy a každou pošle do příslušného LCD panelu - barvy jsou tak opět generovány současně. [26] U jednočipových DLP projektorů můžeme daný efekt alespoň částečně eliminovat regulací frekvence otáčení barevného filtru. První generace těchto projektorů se otáčely s frekvencí 60 Hz, takže každá barva se objevila 60x za 1 s (ozn. „1x“), další generace projektorů byly vyráběny s dvojnásobnou frekvencí 120 Hz (ozn. „2x“), což napomohlo tomu, že efekt byl méně patrný než u 60 Hz projektorů. V další etapě se ve snaze o vyloučení jevu začaly vyrábět šestisegmentové filtry, kde byla každá ze tří barev zdvojená, i když byla frekvence otáčení stále 120 Hz, kvůli zdvojení se tyto projektory začaly označovat jako „4x“, následovala výroba dalších projektorů s ještě vyššími frekvencemi. Tyto snahy jev značně potlačily, ne však zcela vyloučily. [27] Další možností potlačení je využití tříbarevných LED jako vstupního zdroje místo klasické lampy. LED jsou schopné okamžitého zapnutí či vypnutí a jednoduché změny barevného spektra. [29]

Citlivost na tento jev může být různá, nicméně většina populace tento jev buďto ani nezaznamená anebo pokud ano, děje se tak bez jakýchkoliv fyziologických projevů. U některých jedinců se ale může objevit únava očí, bolesti hlavy či v extrémnějších případech i epileptický záchvat (zejména u lidí s fotosenzitivní epilepsií). Stalo se tak např. v souvislosti s oficiálním spotem k Letním olympijským hrám v Londýně v roce 2012. Spot obsahoval animované části, které byly příčinou epileptického záchvatu u nejméně 30 lidí. [29]

5.6 Broca-Sulzer a Talbot-Plateau efekt

Následující jevy souvisejí s tzv. pulzně šířkovou modulací (PWM). Ta se využívá pro stmívání LED, kdy dochází k úmyslné pulzaci procházejícího proudu. Střídají se tak úseky, kdy LED svítí a kdy ne. Ty jsou ale velmi malé, obvykle do 10 ms a využívá se tak setrvačnost lidského oka, které není schopno tyto rychlé změny zaregistrovat. Tímto způsobem lze stmívat LED napájené jak napětovým, tak i proudovým zdrojem. [2] Dále se můžeme setkat s pojmem střída (či v angličtině „duty ratio“), což je poměr času, ve kterém je světlo zapnuto a celkové periody světelného toku, udává se v procentech.

Zrakový systém člověka má charakteristickou křivku časové odezvy na světlo. Broca a Sulzer ve svých výzkumech zjistili, že pokud na lidské oko působí krátký záblesk světla o určitém jasu, jeví se několikrát intenzivnějším, než jaký ve skutečnosti je. Krátké pulsy světla se tedy lidskému oku jeví jasnější než delší pulsy světla. Tento efekt byl podle svých objevitelů nazván jako Broca-Sulzer efekt a byl jimi objeven již v roce 1902. [30]

Talbot-Plateauův zákon říká, že intenzita světla, jehož průběh světelného toku se periodicky mění, se lidskému oku jeví totožně jako intenzita světla o konstantním průběhu světelného toku rovna střední hodnotě intenzity světla s periodickým průběhem. Platí pro případy, kdy je hodnota frekvence zdroje světla větší než CFF. Tento zákon byl vysloven na základě experimentů v 19. a v počátcích 20 stol., kdy byly generovány světelné pulzy. V té době ale ještě nebyly prostředky pro to, aby byla generovaná střída dostatečně nízká a tedy i časový úsek mezi vypnutím a zapnutím světelného zdroje dostatečně krátký. Toho se docílilo až v posledních nejnovějších výzkumech. [30] [32]

S výše uvedenými jevy souvisí ještě tzv. Brücke-Bartleyův efekt. Pokud je frekvence pulzů světla nižší než CFF a dále se postupně snižuje, efektivní jas se zvyšuje. Nejen, že jas dosáhne stejného jasu jaký by měl nepřerušovaný světelný tok, ale dokonce ho přesahuje a maxima dosáhne při frekvenci od 8 do 10 Hz. [32]

Na základě těchto poznatků vyplynula myšlenka, že pokud by byl zdroj světla řízen pulzní modulací, zvýšila by se jak efektivní svítivost, tak i efektivní účinnost zdroje. V nejnovějších výzkumech byly použity modré, zelené a červené LED v pulzním režimu a potvrdily přítomnost Broca-Sulzer efektu, nikoliv však Talbot-Plateova efektu a to z důvodu, že na rozdíl od raných pokusů bylo v tomto případě pracováno s průběhem světelného toku s ideální čtvercovou vlnou. Výsledkem je zjištění, že pro 5% střidu při 60 Hz je účinnost světelného zdroje vyšší než pro stejnosměrný režim. Tento efekt byl následně podle svých objevitelů nazván Jinno-Motomura efekt. Totožný tým ve svém dalším experimentu došel k závěru, že pulzní režim LED má za výsledek též i menší spotřebu energie. [30] [31]

6 Světlo a jeho vliv na pozornost

V otázce vlivu světla na udržení pozornosti mají významnou roli modré LED a obecně modrá složka světelného spektra. Kromě zmíněných vlivů v kap. 5.3 má modré světlo z LED nezanedbatelný význam pro usínání a kvalitu spánku, což se týká hlavně večerního svícení. Může dojít k narušení tzv. cirkadiánního rytmu, což je přibližně dvacetičtyřhodinový cyklus, ve kterém se střídá ve dne aktivní fáze a v noci klidová fáze. S tímto cyklem je spojen mj. hormon melatonin, jehož produkce je ovlivňována světlem, k jeho vylučování nejvíce dochází za tmy, je tedy důležitý pro spánek. Paprsky světla, jež dopadají na sítnici, jsou indikovány fotoreceptory. Těmi jsou kromě známých tyčinek a čípků ještě tzv. čidla cirkadiánního systému, tj. třetí druh fotoreceptorů, který je soustředěn do modré oblasti viditelného spektra. Pokud se tedy vystavíme nepřiměřenému množství světla z LED zdroje, dojde k potlačení tvorby melatoninu a následným problémům se spánkem. Kromě toho modrá složka světla LED podporuje uvolňování serotoninu (důsledkem může být i zmírnění deprese a úzkostných stavů) a u člověka tak nastartuje aktivitu, bdělost a soustředěnost. Vystavení se modrému světlu tedy není na škodu spíše po ránu, kdy je takovýto druh nabuzení žádoucí. [10] [11]

Oproti ostatním barvám světla se modré světlo v atmosféře rozptyluje nejvíce. Právě toto rozptýlení světla může pro člověka představovat určitý druh rušení. Již víme, jakým způsobem lze získat bílé LED světlo, tedy např. kombinací modrého čipu a luminoforu. Modré světlo je tak zčásti přeměněno luminoforem na různé odstíny žluté, ale zčásti je jím propouštěno. Rušení se tak může týkat např. veřejného osvětlení na bázi LED. U něj je tedy doporučována spíše nízká teplota chromatičnosti, cca okolo 2 600 K. [18] O barevné teplotě světla více v kap. 2.3.

Jedním z obecných faktů o melatoninu bylo tvrzení, že jeho hladina se v organismu nemění v reakci na světlo o intenzitě menší než 1 500 až 2 000 lx. Australský badatel Iain McIntyre však zjistil, že pokud je člověk vystaven více jak hodinu i malému množství světla, 200 až 600 lx, hladina melatoninu se sníží. Melatonin také v těle vylučují rakovinné buňky, proto je i z tohoto důvodu jeho funkce důležitá. [12]

Pokud bychom vzali v úvahu úzkopásmová záření o dominantních vlnových délkách 460 a 555 nm (vlnová délka pro modrou barvu a vlnová délka, na kterou je lidské oko nejcitlivější, odpovídá zelené barvě), zjistili bychom, že jejich účinek na snížení hladiny melatoninu je zpočátku přibližně stejný. Po cca 1,5 h účinek zeleného světla zcela vymizí, zatímco u modrého světla přetrvá. [18]

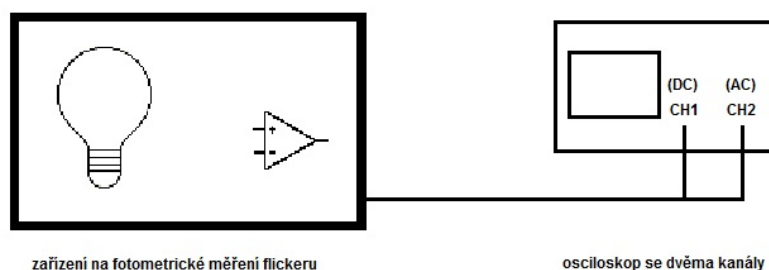
Existují též zařízení na měření správné dávky světla. Jedná se o tzv. cirkadiánní dozimetry, které lze nosit podobně jako brýle. Jejich součástí jsou dvě fotodiody, které slouží jako detektory. V rámci terapie světlem byly zkonstruovány sluneční simulátory, které slouží pro osvětlování očí a tváře. Mezi ně patří tzv. *light visory*, čepice se štítkem, ve kterém je zabudována LED a osvětluje oči. Jejich účelem je zejména rychlejší navození pocitu bdělosti po ránu. [18]

7 Praktická část

Cílem výzkumné části je pomocí měřicího zařízení naměřit v určitém krátkém časovém úseku průběh napětí ve vybraných LED žárovkách, následně provést zpracování získaných dat v Matlabu, navrhnout filtry a spočítat FI a FP. Záměrem návrhu filtrů je docílení bližší analýzy flickeru díky zahrnutí frekvenční závislosti do výpočtu. Opírá se o získané údaje o rozsahu frekvencí viditelného a neviditelného flickeru. Jelikož z kap. 5.1.1 vyplývá, že viditelný flicker, který má významnější fyziologický dopad, dosahuje až do frekvence 70 Hz a neviditelný přibližně do frekvence 200 Hz, účelem filtrů tak bude ze získaného signálu ponechat pouze frekvence menší než jsou uvedené hraniční hodnoty.

7.1 Použitá měřicí technika

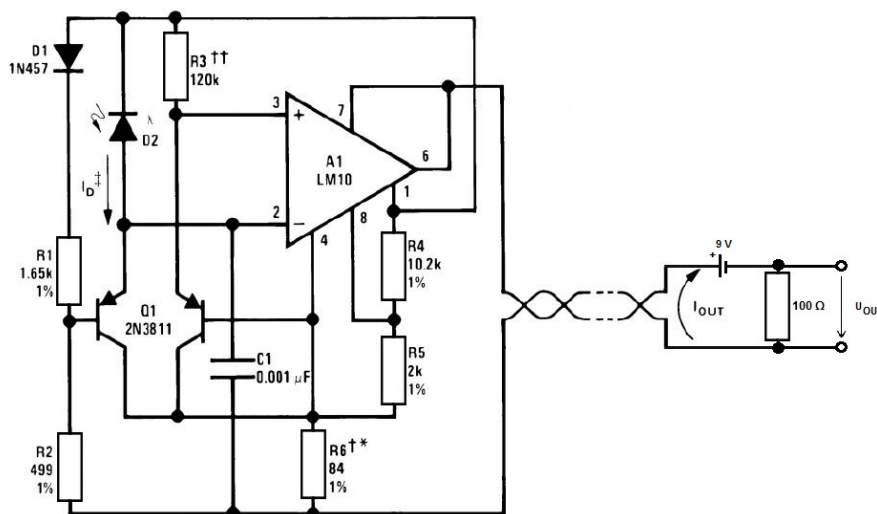
K měření vybraných typů LED žárovek bylo použito zařízení pro fotometrické měření flickeru a osciloskop. Uspořádání je znázorněno na následujícím schématu:



Obrázek 7.1: Schéma zapojení.

Měřicím zařízením je uzavíratelný box, do kterého se zapojí vybraný typ žárovky, jenž je napájen ze sítě se střídavým napětím 230 V. V blízkosti žárovky

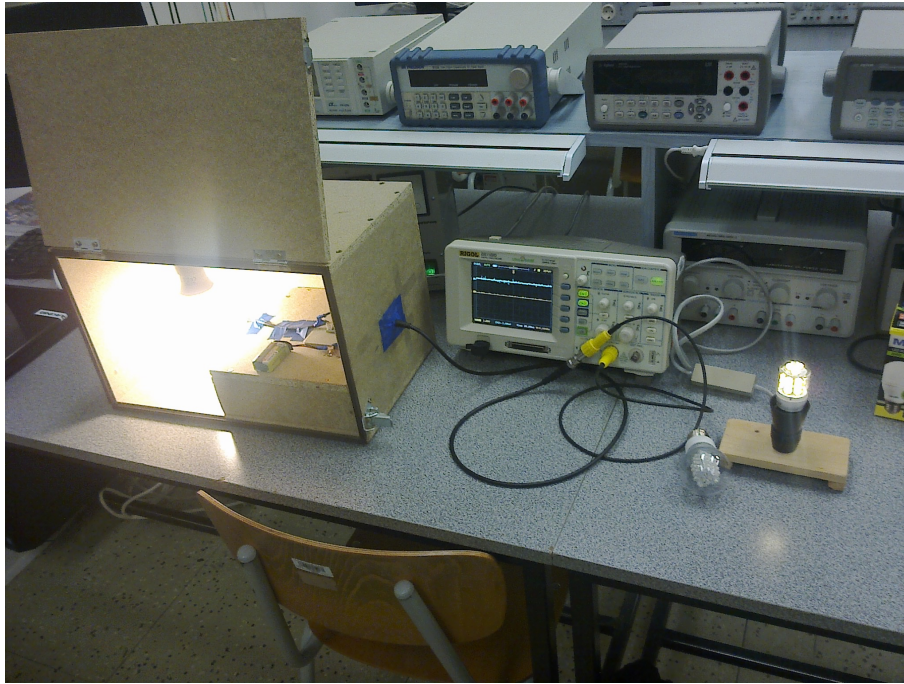
se nachází fotodioda (princip viz kap. 4.1.2), ta reaguje na osvětlení ze žárovky změnou své voltampérové charakteristiky. Další důležitou součástí je logaritmický zesilovač (více o zesilovačích viz kap. 4.2). Jeho obvod byl vyroben na zakázku ve čtyřech exemplářích, jeden z nich se nachází v tomto měřicím zařízení. V příložené dokumentaci je uvedena přenosová funkce zesilovače, teoreticky a prakticky. Obvod je napájen 9V zdrojem připojeným na výstupních pinech. V sérii s ním je zapojen 100Ω rezistor, který výstupní proud přemění na výstupní napětí.



Obrázek 7.2: Logaritmický zesilovač [35].

Výstupní napětí je následně zaznamenáváno osciloskopem. Ten má dva 8-bitové vstupy - první kanál pro signál s DC složkou a druhý kanál pro signál s AC složkou. Signál s DC složkou má hrubé rozlišení, pro AC složku je rozlišení vyšší, avšak s nulovou střední hodnotou. Pro zvýšení přesnosti a získání původního signálu lze k signálu AC přičíst střední hodnotu DC signálu.

K tomu, abychom získali proud z fotodiody (který potřebujeme pro další výpočty), musíme použít inverzní funkci. Jelikož funkci nelze získat analyticky, byla pro její výpočet použita Newtonova iterační metoda. Z kalibračních měření byly získány příslušné koeficienty. Samotná funkce mi byla pro aplikaci na naměřená data poskytnuta ve formě skriptu v Matlabu společně s dokumentací.



Obrázek 7.3: Zapojení.

7.2 Vybrané zdroje umělého osvětlení

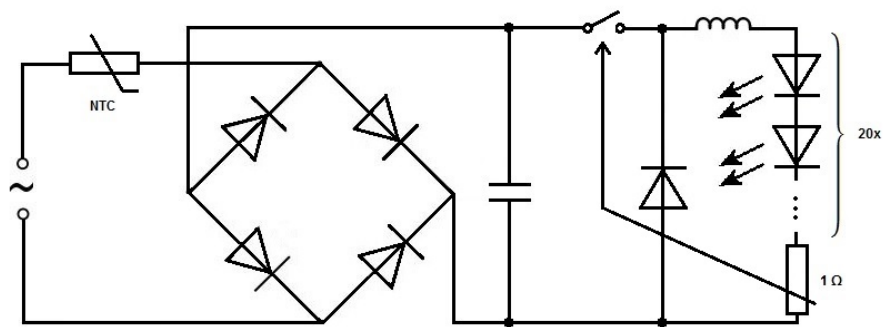
Pro měření byly vybrány tyto typy LED osvětlení:

OSRAM 2W

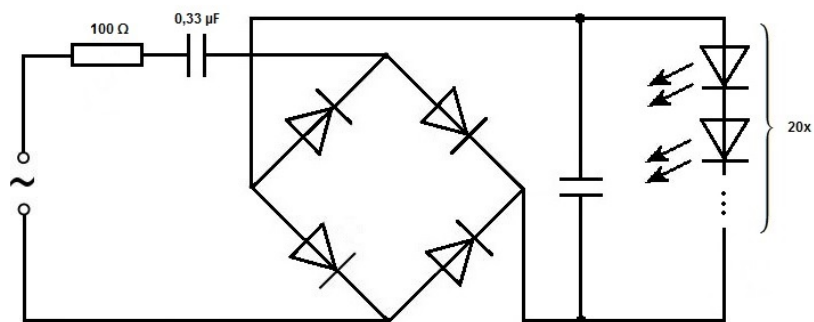
V předpokládaném vnitřním schématu lze vidět, že v obvodu se mj. nachází NTC termistor, který slouží k omezení zapínacího proudu. NTC termistor se nejprve zahřeje, postupně se na něm snižuje odpor a pokud dosáhne cca 1Ω , vyřadí se z obvodu a zmenší tak energetické ztráty v obvodu. Dalším prvkem obvodu je spínací rezistor. Kvalita jeho zpětné vazby ovlivňuje výsledný flicker. Na rezistoru se měří napětí napájecí sítě a následuje odezva ve formě stabilizace proudu. Důsledkem je, že světelný tok LED by měl být stále stejný a flicker by měl být neviditelný.

RoHS 3W

Dle kapitoly 3.2.3 by měl být přítomen flicker o frekvenci 100 Hz jako odezva na napětí v síti.



Obrázek 7.4: Předpokládané vnitřní schéma Osram 2W.



Obrázek 7.5: Předpokládané vnitřní schéma RoHS 3W.



Obrázek 7.6: LED žárovky: RoHS a Osram.

7.3 Zpracování naměřených dat, návrh a aplikace filtrů

Prvním krokem zpracování dat bylo jejich načtení do Matlabu, následný výpočet napětí z dat získaných z osciloskopu a rekonstrukce původního signálu - proudu z fotodiody, jenž je stěžejním pro další kroky. Následoval výpočet hodnot FP a FI, který vycházel ze vztahů 5.1 a 5.2. Tyto vztahy počítají se světelným tokem zkoumaného světelného zdroje. Vycházíme však z faktu o fotodiodě, pro kterou platí, že její výstupní proud je lineárně úměrný měřenému osvětlení, resp. světelnému toku. Původní světelný tok by tak byl roven proudu z fotodiody násobenému konstantou. Po dosazení do vztahů pro flicker by se však tato konstanta vykrátila (hodnoty jsou vždy v poměru), můžeme proto FP a FI počítat z výstupního proudu fotodiody. Jelikož není nikde explicitně uvedeno, jak dlouhý interval se má uvažovat pro výpočet flickeru, použila jsem časové rozmezí od 0 do 200 ms, též i kvůli následnému frekvenčnímu rozlišení.

Dalším krokem byl návrh tří dolnoproputných filtrů s mezní frekvencí 70 Hz, resp. 200 Hz a jednoho filtru vycházejícího z obr. 5.2:

„Nulovací“ filtr: Pro tento filtr jsem nejprve použila rychlou Fourierovu transformaci (FFT). Tím jsem získala frekvenční spektrum signálu (proudu z diody). Následně jsem dosadila nuly za frekvence ve spektru, které jsem chtěla vyfiltrout, tzn. větší než 70 Hz, resp. 200 Hz. Posledním krokem bylo provedení zpětné Fourierovy transformace a získání tak nového vyfiltrovaného signálu.

Butterworth filtr: Tento filtr patří do skupiny IIR filtrů, tedy s nekonečnou impulzní odezvou. Pomocí kódu (viz obr. 7.7) jsem vypočítala koeficienty filtru a následně aplikovala na původní signál.

```
K = t(2)-t(1);
Fs = 1/K; %vzorkovací frekvence
filter_f = 200; %hodnota frekvence filtru v Hz
rad_filtru=3; %strmost filtru
polovina_Fs=Fs/2;
Wn=filter_f/polovina_Fs;
[b,a] = butter(rad_filtru,Wn,'low'); %lowpass Butterworth filter
Idiode_filter = filter(b,a,Idiode);
```

Obrázek 7.7: Kód pro Butterworth filter.

Equiripple filtr: K tomuto FIR filtru jsem v Matlabu využila grafické prostředí pro návrh filtrů - nástroj FDATool, kam jsem zadala potřebné parametry. Ty jsem si uložila do souboru a pro filtraci následně načetla a aplikovala ve svém skriptu.

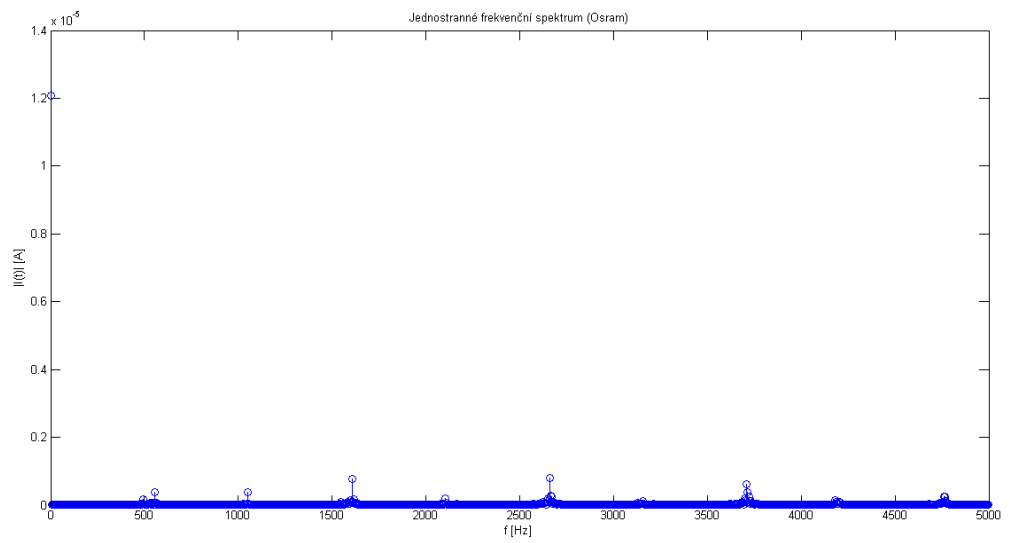
Filtr dle koeficientů z normy: Poslední typ filtru vychází z obr. 5.2. Jednotlivé frekvenční složky získané z FFT jsou vážené hodnotami, které předepisuje norma [6]. Každé frekvenci norma přiřazuje váhu podle toho, jak by měla být rušivá. Tedy např. frekvence, u kterých je povolena 100% modulace, nejsou pro naše účely zajímavé a vynásobila jsem je tak nulou. Nízké frekvence v rozmezí od 1 do 8 Hz jsou naopak v normě násobeny malým číslem, protože jakákoliv modulace je v této oblasti rušivá. Takové frekvence jsou pro tento filtr ale nejzajímavější a byly tak naopak vynásobeny relativně vysokým číslem. Ekvivalentní postup byl použit pro další frekvenční složky.

7.4 Výsledné hodnoty FP a FI

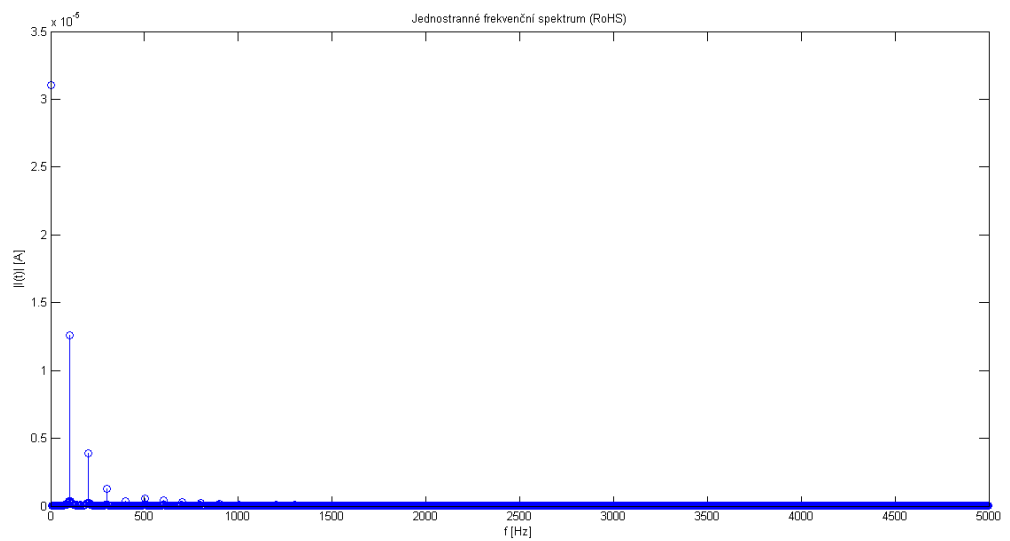
Dalším krokem po návrhu filtrů byl výpočet FP a FI i z nově vytvořených odfiltrovaných signálů. Výsledné hodnoty jsou (společně s hodnotami z původního signálu) uvedeny v tabulce.

		Původní hodnoty	Dolní propust 70 Hz			Dolní propust 200 Hz			Koeficienty dle normy
			„Nulovací“ filtr	Butterworth filtr	Equiripple filtr	„Nulovací“ filtr	Butterworth filtr	Equiripple filtr	
Osram	FP [%]	20.68	0.33	0.18	0.23	0.56	0.64	0.20	3.81
	FI	0.044	0.00072	0.00044	0.00056	0.00098	0.0011	0.00045	0.0063
RoHS	FP [%]	47.67	0.98	13.30	0.20	42.06	41.10	17.69	41.01
	FI	0.13	0.00093	0.042	0.00053	0.13	0.13	0.056	0.12

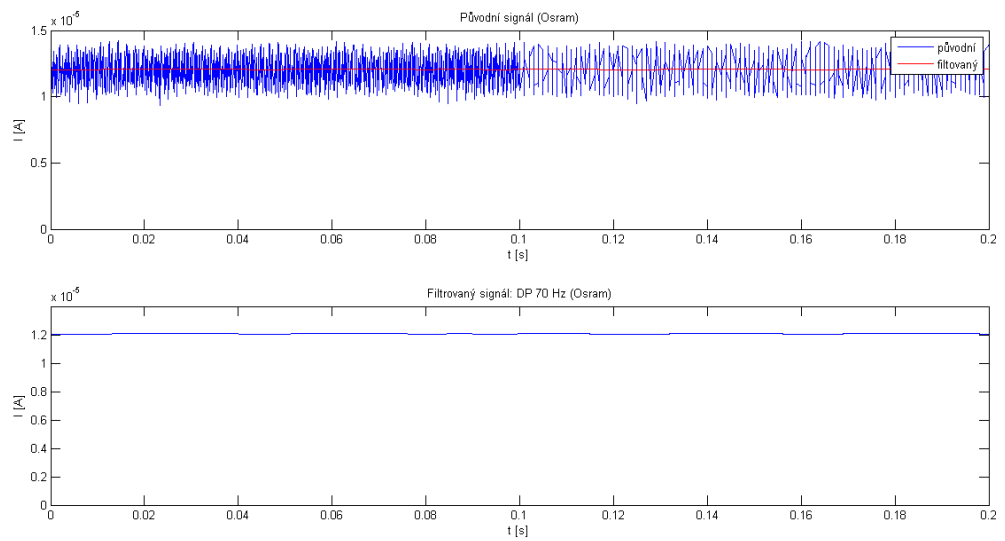
Obrázek 7.8: Tabulka s výslednými hodnotami FP a FI.



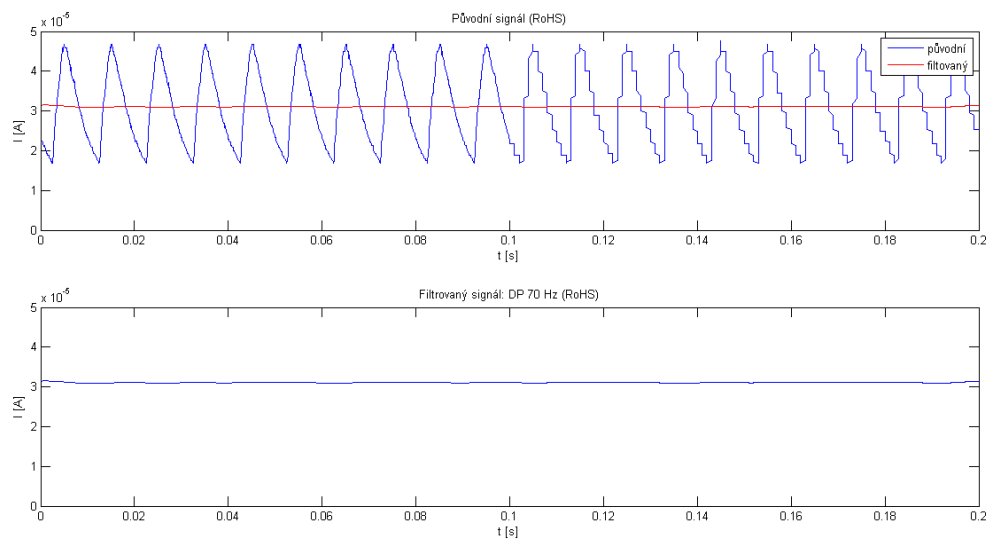
Obrázek 7.9: Osram: Jednostranné frekvenční spektrum.



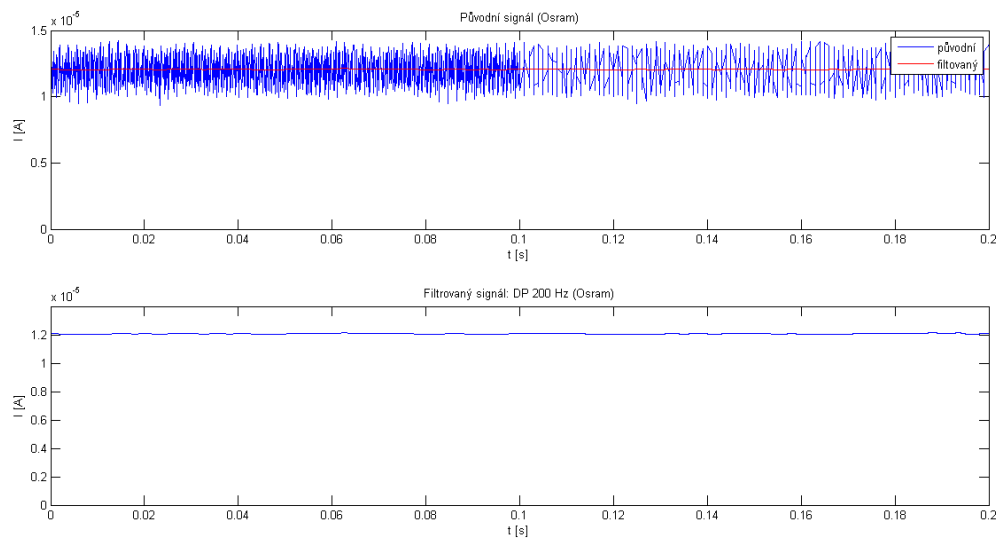
Obrázek 7.10: RoHS: Jednostranné frekvenční spektrum.



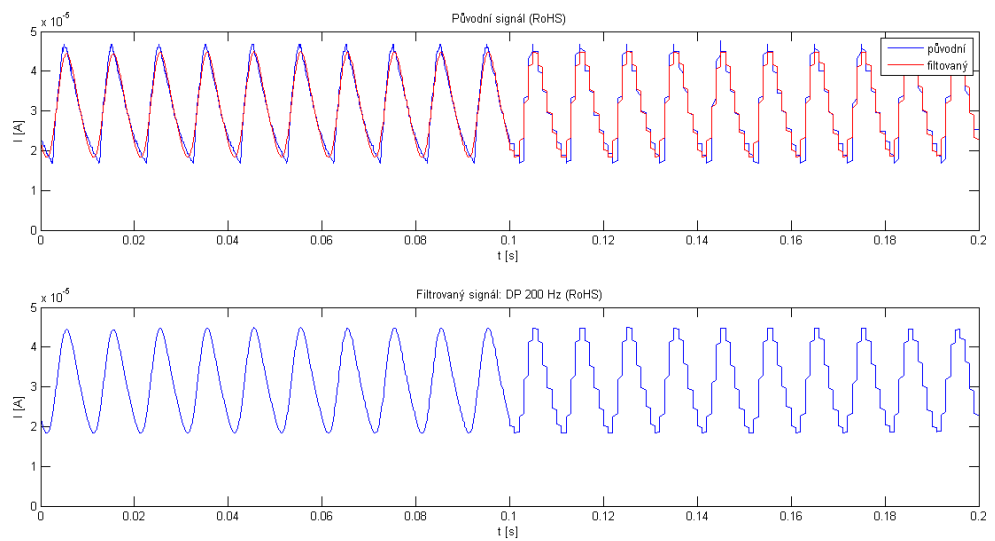
Obrázek 7.11: Osram: „Nulovací“ filtr, DP 70 Hz.



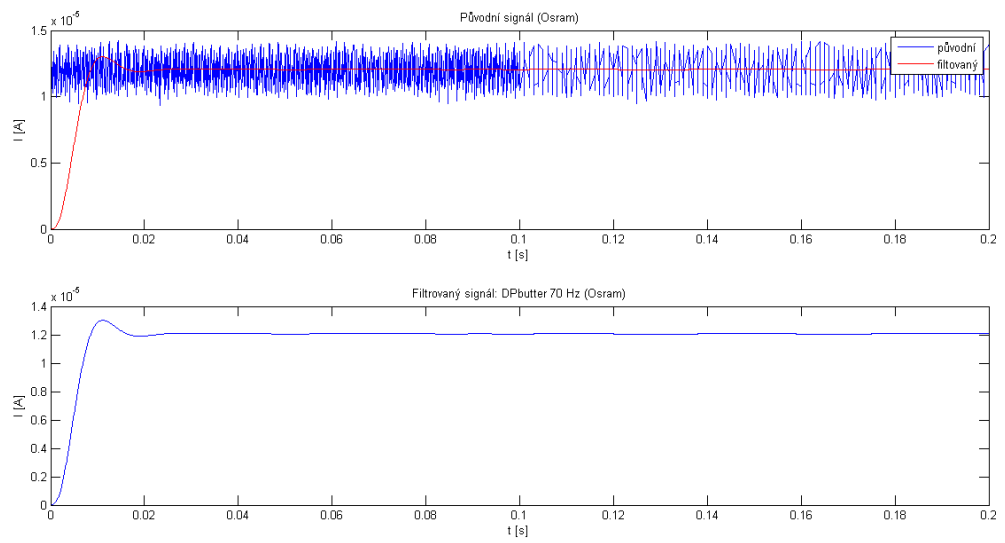
Obrázek 7.12: RoHS: „Nulovací“ filtr, DP 70 Hz.



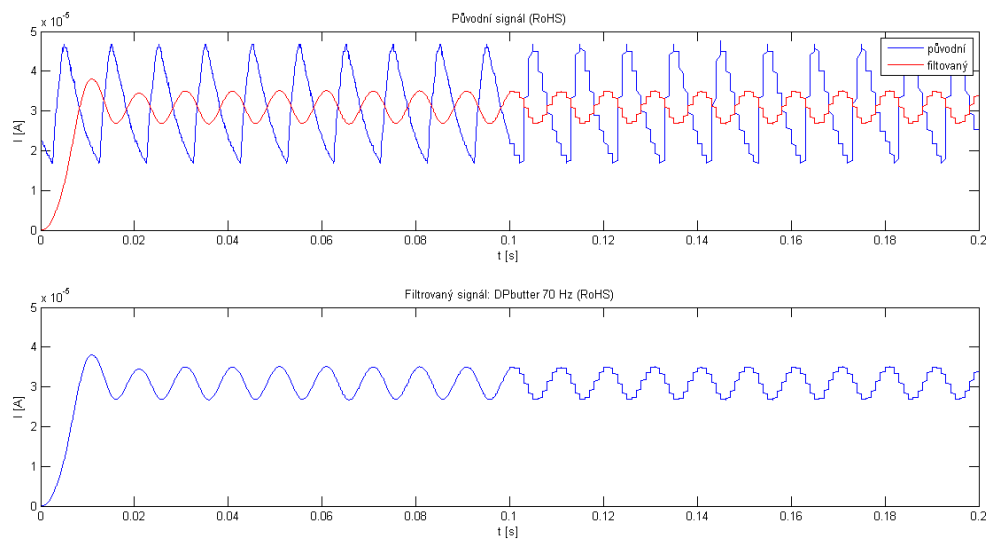
Obrázek 7.13: Osram: „Nulovací“ filtr, DP 200 Hz.



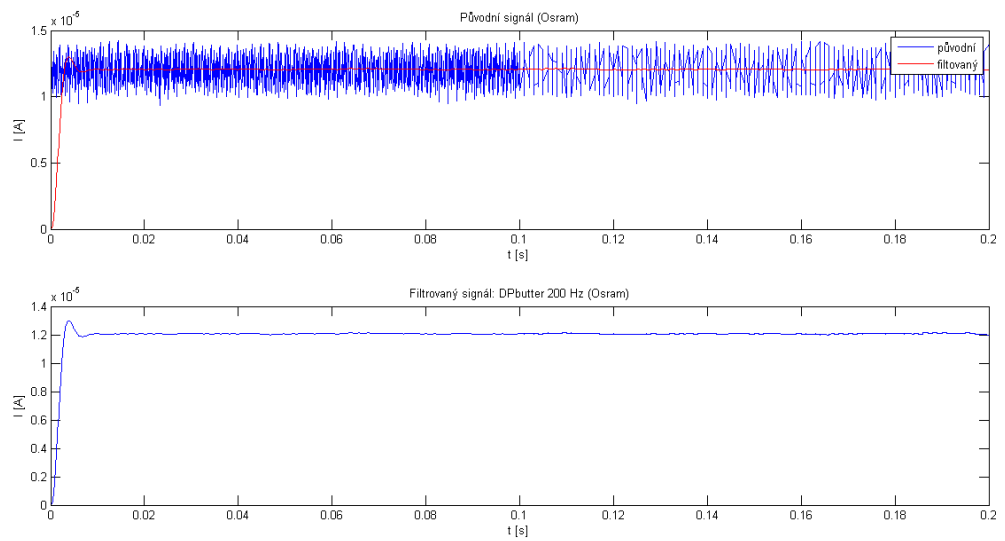
Obrázek 7.14: RoHS: „Nulovací“ filtr, DP 200 Hz.



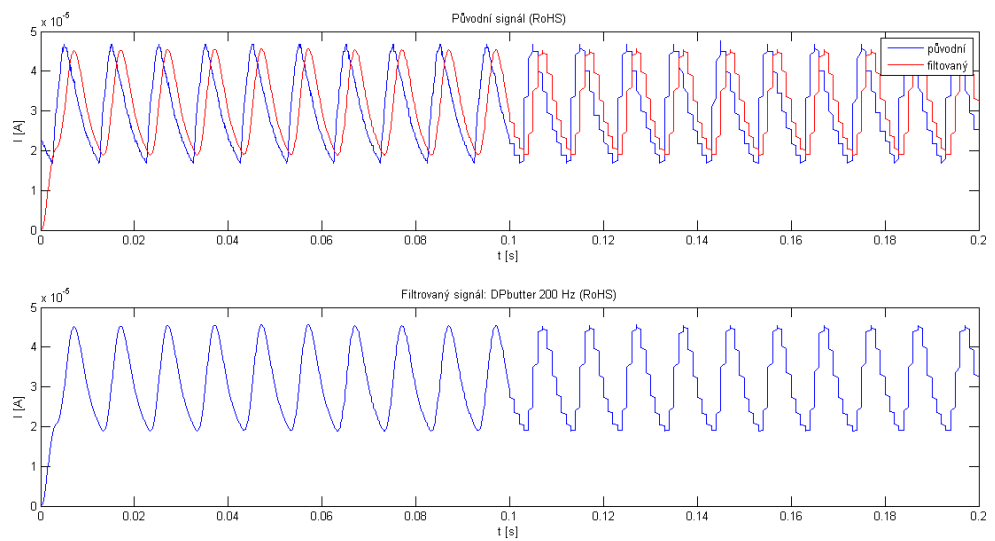
Obrázek 7.15: Osram: Butterworth filtr, DP 70 Hz.



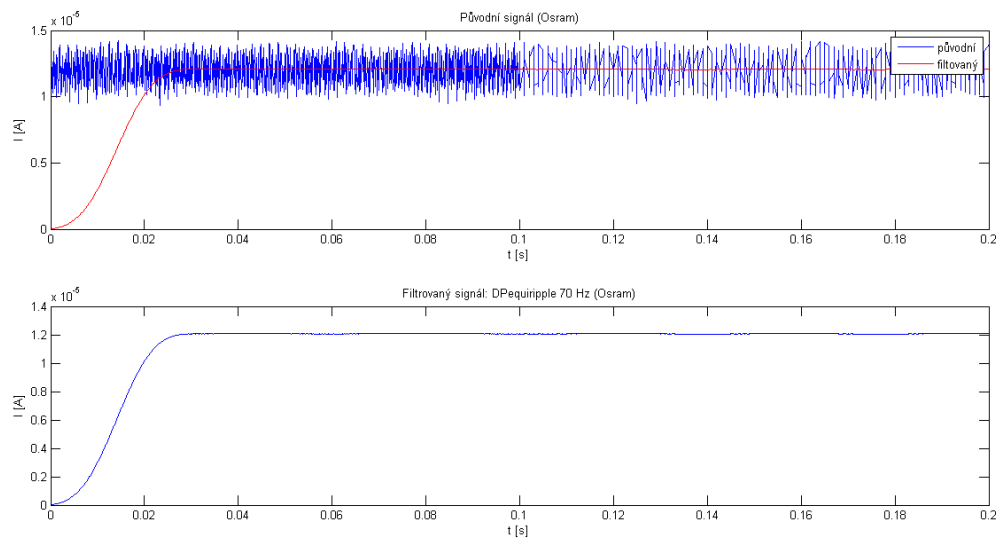
Obrázek 7.16: RoHS: Butterworth filtr, DP 70 Hz.



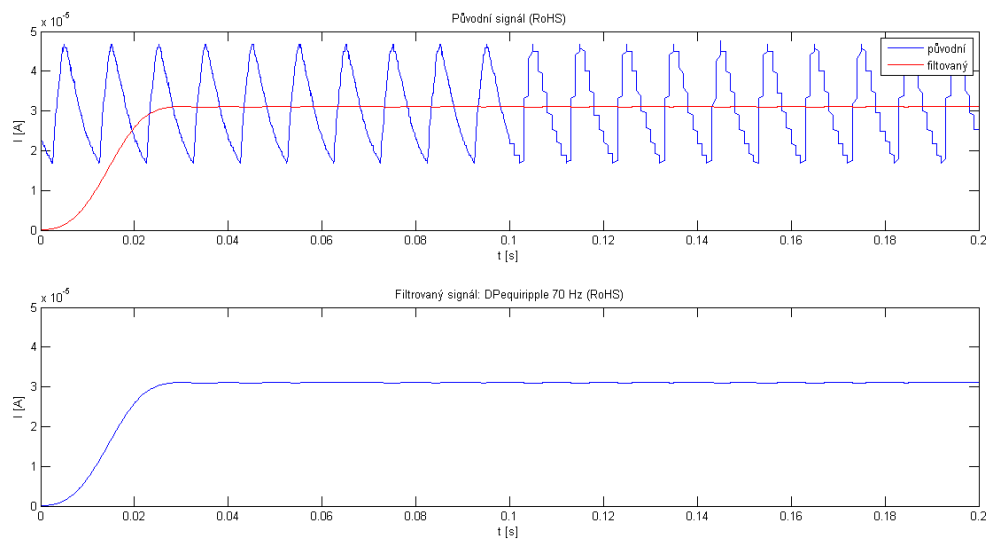
Obrázek 7.17: Osram: Butterworth filtr, DP 200 Hz.



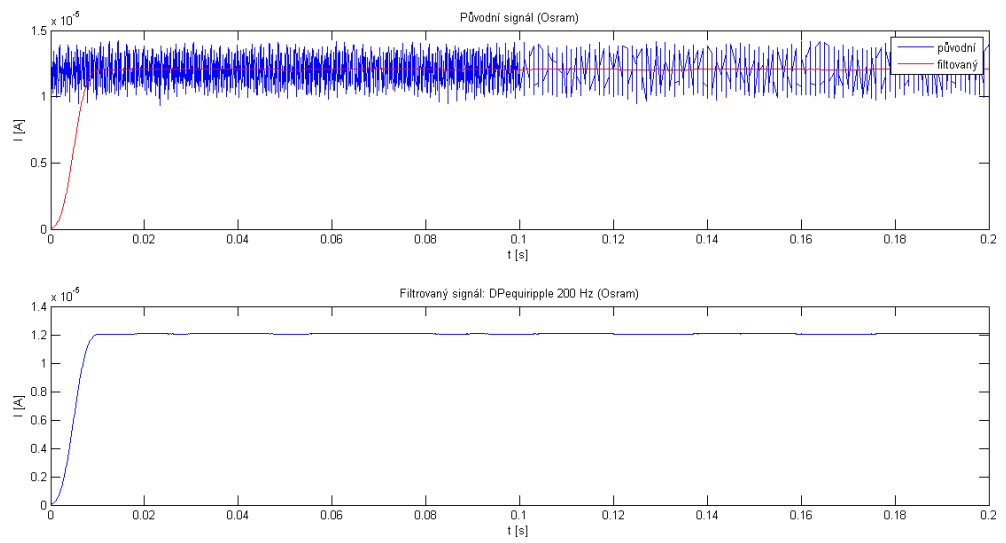
Obrázek 7.18: RoHS: Butterworth filtr, DP 200 Hz.



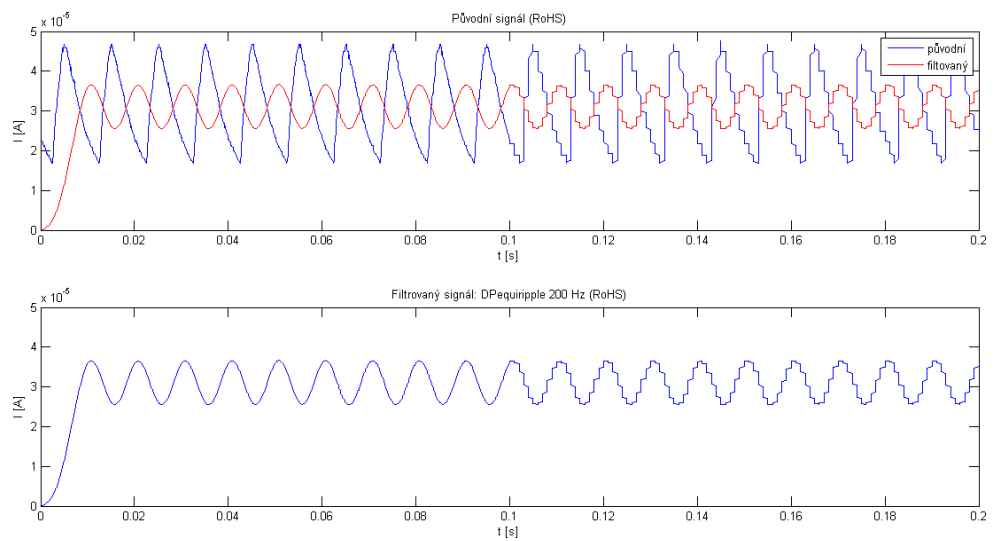
Obrázek 7.19: Osram: Equiripple filtr, DP 70 Hz.



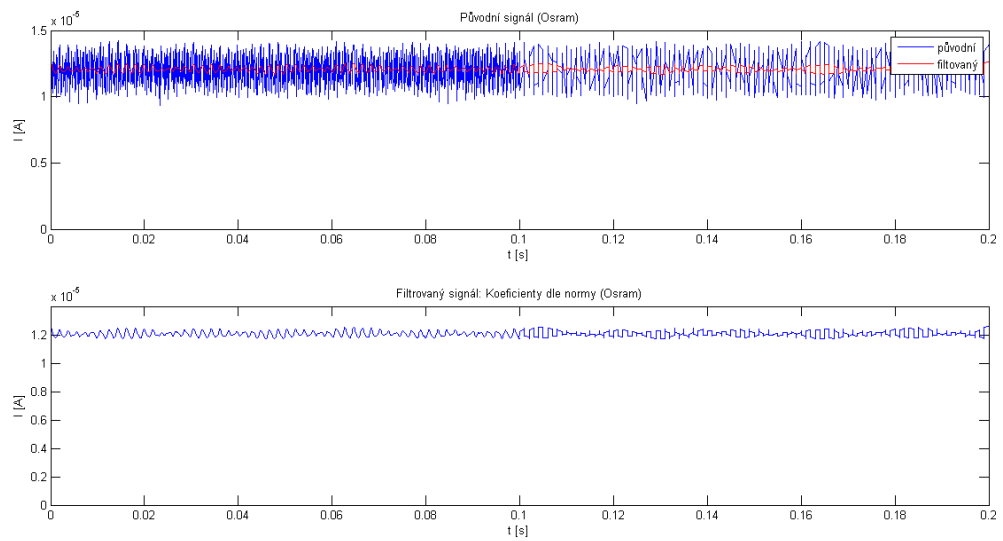
Obrázek 7.20: RoHS: Equiripple filtr, DP 70 Hz.



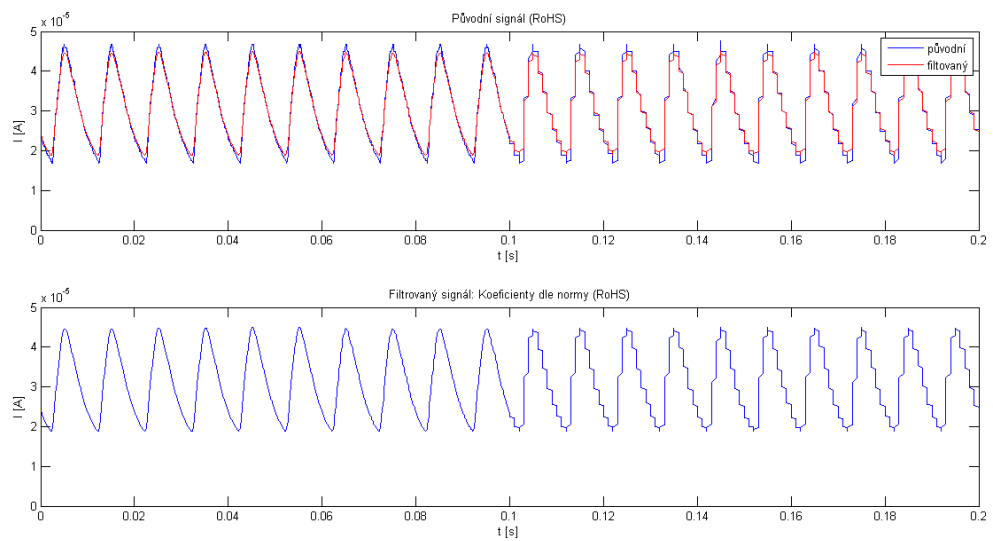
Obrázek 7.21: Osram: Equiripple filtr, DP 200 Hz.



Obrázek 7.22: RoHS: Equiripple filtr, DP 200 Hz.



Obrázek 7.23: Osram: Koeficienty dle normy.



Obrázek 7.24: RoHS: Koeficienty dle normy.

7.5 Analýza výsledných dat

Na základě vnitřních schémat vybraných LED osvětlení a poznatků o předřadnicích se dalo předpokládat, že u žárovky Osram bude neviditelný flicker o vyšších frekvencích a u RoHS bude flicker o frekvenci 100 Hz. Grafy znázorňující jednostranná frekvenční spektra obou žárovek domněnky potvrzují. Z frekvenčního spektra pro Osram vyplývá, že frekvence flickeru je přítomna až od cca 550 Hz. U spektra pro RoHS si můžeme všimnout dominantní frekvence 100 Hz.

Hodnota FP z původního signálu pro Osram vychází cca 21 %. Výskyt flickeru je ale až na frekvencích, které na člověka už nemají rušivý účinek. Můžeme říci, že tato hodnota je tak příliš pesimistická a aplikované filtry ji tak významně snížily zohledněním na skutečný dopad na člověka. Jelikož se významnější frekvenční složka nachází až nad mezní frekvencí filtrů, má jejich aplikace na původní signál ve všech případech podobný efekt, což je patrné i z grafů.

Hodnota FP z původního signálu pro RoHS vychází cca 48 %. Aplikace dolnoproputných filtrů s hraniční frekvencí 70 Hz tuto hodnotu výrazně snížila. V tomto případě ale byl naopak takovýto druh filtrace spíše na škodu, došlo totiž k odfiltrování dominantní složky 100 Hz. Toto přílišné vyhlazení průběhu je možné pozorovat i z grafu. Vhodnější byly pro tento typ žárovky filtry s dolní propustí do 200 Hz, které zohlednily dominantní složku spektra či použití filtru s koeficienty.

7.6 Diskuze

Obecně vyšly hodnoty ukazatelů flickeru po filtraci ve všech případech menší než hodnoty původního signálu. Tímto postupem došlo k optimalizaci FP a zohlednění skutečného dopadu na člověka. U dolnoproputných filtrů je ale třeba dát si pozor, abychom nefiltrovali významné frekvence, jako tomu bylo u žárovky RoHS a mezní frekvence DP 70 Hz.

Doporučovala bych tak spíš používání filtrů s dolní propustí do 200 Hz, zohledňovala bych tak sice už neviditelný flicker, ale jak plyne z kap. 5.1, i ten se může při delším působení na člověka fyziologicky projevit. Usuzuji, že i filtr s použitím

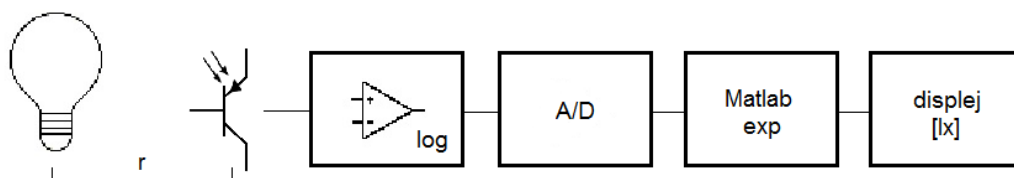
koeficientů by mohl být vhodný právě kvůli tomu, že rušivým složkám přiřazuje větší relativní důležitost oproti jiným frekvenčním složkám, které už tak rušivé nejsou.

Co se týče „nulovacího“ filtru, nejedná se o zcela korektní způsob filtrace a zanáší do signálu chyby. Důvody, proč tomu tak je, souvisí se složitější teorií týkající se filtrů. Tato problematika je ovšem již nad rámec této práce.

7.7 Návrh doporučení pro praxi

Na základě předchozích poznatků bych při stanovení ukazatelů flickeru navrhovala použití filtru Butterworth či Equiripple s dolní propustí 200 Hz či filtr se zohledněním koeficientů z normy [6]. Tímto způsobem lze získat přesnější hodnoty, které upřednostňují dopad na člověka.

Dále by se mohl zkonstruovat luxmetr s jedním rozsahem podle následujícího schématu. Světelný zdroj by se nacházel ve vzdálenosti r od detektoru světla, např. fototranzistoru. Z něj by šla data přes logaritmický zesilovač. Logaritmicizace se dělá kvůli velkému rozsahu úrovně osvětlení, rozsah přes několik řádů se tak mnohonásobně zmenší. Dalším blokem je A/D převodník a následně procedura z Matlabu, která by data převedla pomocí exponenciální funkce zpět na původní osvětlení a posledním krokem by bylo zobrazení na displej v lx.



Obrázek 7.25: Návrh luxmetru.

Závěr

Asi jako každá věc má i LED osvětlení své klady a zápory. Ze získaných poznatků si však lze všimnout i určitého paradoxu. Již víme, že LED má emisní spektrum se špičkou pro modrou barvu a toto modré světlo je škodlivé pro sítnici. Pokud se však podíváme do zdravotnictví, zjistíme, že se LED světlo o určitých vlnových délkách používá mj. pro léčbu očních poranění.

Co se týče navržených filtrů, kromě nich vidím jako další užitečný výstup své práce čistě fakt, že se jedná o publikaci v českém jazyce, která se zabývá mj. problematikou flickeru, protože při hledání zdrojů jsem ve většině případů nacházela spíše cizojazyčné zdroje popisující tuto oblast.

Cílem této práce bylo shromáždění základních poznatků o LED osvětlení, pojednání o světelných jevech s ním spojených, o vlivu LED zdrojů umělého osvětlení na člověka a bližší analýza ukazatelů flickeru za využití navržených matematických filtrů. Tyto cíle byly splněny ve všech bodech.

Literatura

- [1] REICHL, J., M. VŠETIČKA. Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. ©2006 – 2016 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny/>
- [2] HABEL, J., P. ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [3] MURTINGER, K. LED diody: Nobelova cena a problémy s modrou barvou. *Nazeleno.cz* [online]. ©2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z WWW: <http://www.nazeleno.cz/led-diody-nobelova-cena-a-problemy-s-modrou-barvou.aspx>
- [4] LÁZŇOVSKÝ, M. Nobelovu cenu za fyziku získali objevitelé modrých diod. *Technet.cz* [online]. ©2014 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z WWW: http://technet.idnes.cz/nobelova-cena-za-fyziku-2014-095-/tec-vesmir.aspx?c=A120430_140546_tec-vesmir_mla
- [5] GIGALIGHTING. Světelné zdroje LED. *Gigalighting.cz* [online]. ©2016 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z WWW: <http://www.gigalighting.cz/svetelne-zdroje-led.htm>
- [6] LEHMAN, B., M. POPLAWSKI, H. WOLFMAN. *IEEE Recommended Practices for Modulating Current in High-Brightness LEDs for Mitigating Health Risks to Viewers*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2015.

- [7] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Solid-state lighting technology fact sheet. Flicker*. Building Technologies Office, 2013.
- [8] MARTINSONS, C., G. ZISSIS. *Solid State Lighting Annex: Potential Health Issues of Solid State Lighting. Final Report*. International Energy Agency 4E Solid State Lighting Annex, 2014.
- [9] LEHMAN, B. et al. *Proposing measures of flicker in the low frequencies for lighting applications*. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011.
- [10] HABEL, J. *Elektrické světlo*. Praha: ČVUT, 2011.
- [11] HORÁK, D. Modré světlo brání usnutí. Je obsažené i v teplé LED žárovce? *Living.iprima.cz* [online]. ©2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z WWW: <http://living.iprima.cz/bydleni/modre-svetlo-brani-usnuti-je-obsazene-i-v-teple-led-zarovce>
- [12] LIBERMAN, J. *Světlo: lék budoucnosti: jak ho využít ke svému uzdravení hned teď*. Ořech: Blue step, 2006. ISBN 80-239-6719-3.
- [13] FRIML, L., L. S. JURČOVÁ. Seriál LED osvětlení, 4. díl – Barevná teplota světla. *Afimocz.cz* [online]. ©2013 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <http://www.afimocz.cz/serial-led-osvetleni-4-dil-barevna-teplota-svetla/>
- [14] LEDME. Co je to PFC? *Ledme.cz* [online]. ©2015 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.ledme.cz/content/28-co-je-to-pfc>
- [15] ĎAĎO, S. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999.
- [16] DOLEŽAL, I. a kol. *Analogová elektronika*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2014. ISBN 978-80-7494-136-8.
- [17] HORTEL, M. Proudové zrcadlo. *Mlab.cz* [online]. ©2005 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z WWW:

<http://www.mlab.cz/Articles/Texts%20Krouzek/Proudové%20zrcadlo/DOC/Proudové%20zrcadlo.cs.pdf>

- [18] FUKSA, A. Světlo a biologické hodiny. *Světlo*. 2010/6, s. 56-58. Dostupné z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42567.pdf>
- [19] NATURAL HEALTH PRODUCTIONS INC. LED Light Therapy. *Mylighttherapy.com* [online]. ©2014-2016 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z WWW: <http://www.mylighttherapy.com/led-light-therapy.html>
- [20] LIN, J. U.S. Researchers Test IR LED Treatments for Gulf War Illness. *Ledinside.com* [online]. ©2015 [cit. 2016-03-15]. Dostupné z WWW: http://www.ledinside.com/news/2015/4/us_researchers_test_ir_led_treatments_for_gulf_war_illness
- [21] WAGINGER, M., K. FECKOVÁ. ASSIST vydal kalkulačné smernice, ako sa vyhnúť stroboskopickým efektom pri klasickom osvetlení. *Uspornaziarovka.sk* [online]. ©2013 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <http://www.uspornaziarovka.sk/forum/2013/05/10/assist-vydal-kalkulacne-smernice-ako-sa-vyhnut-stroboskopickym-efektom-pri-klasickom-osvetleni>
- [22] FUNCTION SPACE. Stroboscopic Effect: Applications And Mechanism. *Functionspace.com* [online]. ©2014 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <http://functionspace.com/articles/134/Stroboscopic-Effect—Applications-And-Mechanism>
- [23] VOGELS, I., M., L., C., I. HERNANDO *Effect of Eye Movements on Perception of Temporally Modulated Light*. International conference on the Effects of Light on Wellbeing, 2012. Dostupné z WWW: <http://2012.experiencinglight.nl/doc/28.pdf>
- [24] THENAKEDSCIENTISTS. Why do LED tail lights trail to me and not to the rest of my family? *Thenakedscien-*

- tists.com* [online]. ©2012 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z WWW: <http://www.thenakedscientists.com/forum/index.php?topic=45126.0>
- [25] KUCHARŤ, M. Technologie projektorů a jejich kvality. DLP technologie. *PCtuning.tyden.cz* [online]. ©2008 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z WWW: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/monitory-lcd-panely/12213-technologie-projektoru-a-jejich-kvality?start=3>
- [26] KUCHARŤ, M. Technologie projektorů a jejich kvality. LCD technologie. *PCtuning.tyden.cz* [online]. ©2008 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z WWW: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/monitory-lcd-panely/12213-technologie-projektoru-a-jejich-kvality?start=2>
- [27] POWELL, E. The Great Technology War: LCD vs. DLP. *Projectorcentral.com* [online]. ©2005 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z WWW: http://www.projectorcentral.com/lcd_dlp_update7.htm?page=Rainbow-Artifacts
- [28] PROJECTORGUIDE. Rainbow effect. *Projector-guide.com* [online]. ©2015 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z WWW: <http://www.projector-guide.com/rainbow-effect.html>
- [29] AUSMEDIA. DLP Sensitive. *Ausmedia.com.au* [online]. ©2013 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z WWW: http://www.ausmedia.com.au/DLP_Sensitive.htm
- [30] JINNO, M. et al. *Effective Illuminance Improvement of a Light Source by Using Pulse Modulation and Its Psychophysical Effect on the Human Eye*. Japan: EHIME University, 2008.
- [31] JINNO, M. et al. *Beyond the Physical Limit: Energy Saving Lighting and Illumination by Using Repetitive Intense and Fast Pulsed Light Sources and the Effect on Human Eyes*. Japan: EHIME University, 2008.
- [32] KALLONIATIS, M., LUU CH. Temporal Resolution. *Webvision.med.utah.edu* [online]. ©2007 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z WWW:

<http://webvision.med.utah.edu/book/part-viii-gabac-receptors/temporal-resolution/>

- [33] RIPKA, P., A. TIPEK. *Master Book On Sensors*. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 80-7300-129-2.
- [34] DOLEŽAL, I. a kol. *Analogová elektronika*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2014. ISBN 978-80-7494-136-8.
- [35] TEXAS INSTRUMENTS INC. *LM10 Operational Amplifier and Voltage Reference*. 2015.
- [36] HAMAMATSU. *Application circuit examples*.