

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra teorie obvodů



Bakalářská práce

Analýza vlivu modrého světla na lidského pozorovatele

Analysis of blue light impact on human observer

Autor: Matouš Vobr

Vedoucí práce: Ing. Karel Fliegel, Ph.D.

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vobr** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **491927**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza vlivu modrého světla na lidského pozorovatele

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of blue light impact on human observer

Pokyny pro vypracování:

Na základě studia odborné literatury podejte přehled poznatků v oblasti analýzy nevizuálního vlivu modrého světla na lidský organizmus. Soustředte se zejména na problematiku pozorování reprodukováného obrazu na různých typech zobrazovačů. Analyzujte vliv různých typů optických a softwarových filtrů potlačujících modrou složku světla na věmost vjemu reprodukováných barev.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Schlangen, L. J. M., Price, L. L. A., The Lighting Environment, Its Metrology, and Non-visual Responses, *Frontiers in Neurology*, 12, 2021.
- [2] Shih, K.-T., Liu, J.-S., Shyu, F., Yeh, S.-L., Chen, H. H., Blocking harmful blue light while preserving image color appearance, *ACM Transactions on Graphics*, 35, 2016.
- [3] Oh, J. H., Yoo, H., Park, H. K., Do, Y. R., Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night, *Scientific Reports*, 5, 2015.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Fliegel, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Karel Fliegel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Podpis autora práce

Poděkování

Děkuji Ing. Karlu Fliegelovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za podnětné návrhy, které práci obohatily a za čas, který mi věnoval při konzultacích.

Abstrakt

V současném světě je téma škodlivosti modrého světla poměrně rozšířené, a proto se tuto modrou složku umělého osvětlení snažíme zejména v noci potlačit. Tato práce podává ucelený přehled o možných rizicích spojených s umělým modrým světlem a hlavních důvodech, proč je toto světlo pro člověka vůbec škodlivé. Následně extrapoluje data o jednom z faktorů (ipRGC), který udává, jaké vlnové délky světla jsou pro člověka nejškodlivější z hlediska produkce melatoninu. Uvedená data poté využívá ke stanovení účinnosti spektrální propustnosti tří optických filtrů (antiblue, žlutý a červený) a jednoho softwarového filtru (s maximální nastavenou filtrací). Poté u dvou zobrazovačů (OLED a LCD) určuje barevné rozdíly metrikou CIEDE2000 na barvách testovacího obrazce Macbeth, aby tak bylo znázorněno, jakým způsobem se zmíněné filtrace modré složky podepíší na důvěryhodnosti barevného vjemu, a zároveň jsou tato data mezi filtry a monitory porovnána. Také zobrazuje omezení barevných gamutů způsobených filtrací u těchto displejů. Nakonec, na základě měření změn vyzařovaných spekter čistě červené, zelené, modré a bílé barvy u OLED panelu, pro různé úrovně softwarové filtrace, simuluje vliv těchto filtrací na barevném obrazci Macbeth. Výsledky normalizuje, aby si simulovaný a měřený výsledek zkreslení pro maximální softwarovou filtraci odpovídaly, a poté porovnává poměry účinností všech filtrací a způsobeného barevného zkreslení. Tímto navrženým způsobem hodnotí průměrnou věrnost vjemu reprodukováných barev. Výsledek z těchto vzorků například ukázal, že u OLED panelu se maximální softwarová filtrace vyrovná té optické červené filtraci.

Klíčová slova: modré světlo, ipRGC, barevné zkreslení, CIEDE2000, Macbeth

Abstract

Nowadays, the topic of the harmfulness of blue light is relatively widespread, which is why we try to suppress this blue component of artificial lighting, especially at night. This thesis provides a comprehensive overview of the possible risks associated with artificial blue light and the main reasons why this light is harmful to humans in the first place. It then extrapolates data from one of the factors (ipRGC), which indicates which wavelengths of light are most harmful to humans. It then uses the data to determine the spectral transmittance efficiency of three optical filters (antiblue, yellow and red) and one software filter (with filtration set to maximum). It then calculates the colour differences of the two displays (OLED and LCD) using the CIEDE2000 metric on the Macbeth test pattern colours to show how the blue component filtering affects the credibility of the colour perception and compares these data between filters and monitors. It also shows the colour gamut limitation caused by filtering on these displays. Finally, by measuring the changes in the radiated red, green, blue and white colour spectra of the OLED panel, for different levels of software filtering, it simulates the effect of these filtering on the Macbeth colour pattern. It normalizes the results so that the simulated and measured distortion result for maximum software filtering matches, and then compares the efficiency ratios of all filtering and the colour distortion caused. This way, it evaluates the average fidelity of the perceived colours. The result of these samples showed e.g., that for the OLED panel, the maximum software filtering results equals that of the optical red filtering.

Keywords: blue light, ipRGC, colour distortion, CIEDE2000, Macbeth

Seznam použitých zkratek

- BLH** z angl. „*blue light hazard*“ (do češtiny se obvykle nepřekládá).
Křivka citlivosti sítnice pro vlnové délky viditelného spektra. Značí vlnové délky, které přispívají ke vzniku onemocnění sítnice zvané fotoretinitida.
- ipRGC** z angl. „*intrinsically photosensitive retinal ganglion cell*“ (česky „*vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky sítnice*“).
Jedná se o buňky sítnice, které kvůli světlocitlivému pigmentu melanopsinu reagují zejména na modrou složku světla snížením produkce hormonu melatoninu, který svým deficitem způsobuje poruchy spánku a v důsledku toho další onemocnění.
- CIE** z fr. „*Commission internationale de l'éclairage*“ (česky „*Mezinárodní komise pro osvětlování*“).
Je mezinárodní organizace věnující se světlu, osvětlení, barvám a kolorimetrickým soustavám.
- CIEDE2000** CIE stejně jako výše, DE z fr. „*Distance euclidienne*“ (česky „*Euklidovská vzdálenost*“) a 2000 značí rok, kdy byl zaveden tento pojem a metrika barevné vzdálenosti, kterou představuje.
Jedná se o nejrozšířenější metriku počítání vzdálenosti dvou barev, označováno též jako ΔE_{00} .
- sRGB** z angl. „*standart Red Green Blue*“ (česky „*standardní Červená Zelená Modrá*“).
Jedná se o barevný prostor, tedy množinu reprodukovatelných barev, zavedenou organizací IEC od roku 1999 jejímž cílem bylo standardizování barev elektronických zobrazovačů.
- LCD CCFL** z angl. „*Liquid Crystal Display – Cold Cathode Fluorescent Lamp*“ (česky „*Displej z kapalných krystalů – Fluorescenční výbojka se studenou katodou*“).
Jedná se o technologii monitoru, jehož řízení filtrace barevných subpixelů je realizováno skrze kapalné krystaly, které s napětím mění svojí spektrální propustnost. Tento typ displeje vyžaduje pro všechny pixely společné podsvícení, jehož typ zde udává CCFL. V celém textu bude místo LCD CCFL zkráceně psáno LCD a bude tím myšlen právě výše uvedený typ monitoru s tímto podsvícením.

OLED z angl. „*Organic Light-Emitting Diode*“ (česky „*Organická světlo-emitující dioda*“).

Jedná se o další technologii monitoru. Ta využívá organické materiály, které přeměňují elektrickou energii na světelnou. To znamená, že na rozdíl od LCD tedy nepotřebuje pro všechny pixely monitoru společné podsvícení, protože už samotné barevné subpixely jsou zdrojem světla.

EMG záření elektromagnetické záření

IR záření infračervené EMG záření

UV záření ultrafialové EMG záření

Obsah

1	Úvod	13
2	Přehled poznatků vlivu modrého světla na organismus	15
2.1	Psychologický charakter škodlivosti	15
2.1.1	Cirkadiánní cyklus	15
2.1.2	Melatonin	15
2.1.3	Negativní vliv modrého světla na cirkadiánní cyklus	15
2.1.4	Modré světlo jakožto nepřímá příčina onemocnění	16
2.1.5	Použití modrého světla v medicíně	17
2.2	Fyziologický charakter škodlivosti	17
2.2.1	Müllerovy buňky	17
2.2.2	Fotochemické poškození sítnice modrým světlem	18
2.3	Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky – ipRGC	21
3	Základní aspekty kolorimetrie	22
3.1	Barva	22
3.2	Základní veličiny popisující barvu	23
3.3	Barevný metamerismus	23
3.4	Barevný prostor/diagram	23
3.5	Perceptuálně uniformní barevné prostory	25
3.6	Barevné rozdíly/vzdálenosti	26
3.7	Barevný gamut	27
4	Experimentální ověření vlivu filtrace	29
4.1	Aproximace křivky citlivosti ipRGC na viditelném spektru	29
4.2	Měření spektrometrem – spektrální propustnost optických filtrů	30
4.2.1	Účinnost blokace světla filtrů vzhledem k ipRGC	34
4.3	Měření spektro-radiometrem na testovacím obrazci Macbeth u OLED a LCD	35

4.3.1	Porovnání spekter monitorů.....	37
4.3.2	Barevné gamuty monitorů a jejich změny při filtraci.....	39
4.3.3	Barevné rozdíly testovacího obrazce na monitorech.....	41
4.3.4	Simulace úroňové softwarové filtrace u OLED panelu.....	45
5	Závěr.....	50
	Použitá literatura.....	52
	Příloha	57

1 Úvod

Ještě před necelými dvěma desítkami let nebyly k dispozici chytré telefony nebo monitory počítačů, nad kterými by lidé trávili nepřiměřeně velkou část volného času, a ještě před sto lety nebylo ani večerní pouliční osvětlení. Přirozeně tak původní a prakticky jediný světelný zdroj, se kterým se člověk v běžném životě setkával, bylo Slunce. Všechny živé organismy tedy přirozeně podléhaly vlivu a intenzitě slunečního svitu, a s tím spojeným cyklem střídání dne a noci. Je tedy logické, že mnohé biologické rytmy v rostlinné a živočišné říši se podřizují právě tomu slunečnímu. Není tedy divu, že s lidským vynálezem umělého, kdykoliv dostupného osvětlení, se tento přirozený řád denního světla a noční tmy narušil, což ovšem neblaze působí na náš spánkový režim, který je pro zdravé fungování organismu nezbytný. To samozřejmě neznamená, že člověkem vytvořené umělé světlo je pro náš život pouze špatné a škodlivé. Správně nastavené osvětlení nám umožňuje zvýšit pracovní výkonnost, pomáhá nám při zachraňování životů a obohacuje v mnohých oborech naši kulturu. Je však stále pravdou, že lidská společnost se po tisíce let vyvíjela až po dnešní technickou úroveň provázena slunečním svitem, střídajícím se s temnotou noci. Slunce však svítí jen v denní dobu, a to různou intenzitou se spektrálním rozložením barevných složek viditelného spektra v závislosti na mnohých meteorologických a klimatických aspektech jako je roční období a s ním související trvání dne, aktuální počasí apod. Až v současné, technologicky vyspělé době se setkáváme s technologiemi umělého osvětlení, které se snaží nenarušovat přirozený sluneční rytmus. Jsou to například chytré lampy, které v závislosti na průběhu času dne přizpůsobují svou intenzitu osvětlení a teplotu vyzařovaných barev, nebo třeba i možnosti nastavení v chytrých telefonech a monitorech počítačů na různé režimy „pohodlí pro oči“ a koneckonců dobře známé jsou i běžné komerční brýle, které údajně dokážou škodlivé světlo odfiltrovat.

Tato práce se zabývá tím, co konkrétně použitý typ filtrace, ať už optické nebo softwarové, s danou barevnou reprezentací dvou typů monitorů (OLED a LCD) dělá a jakým způsobem tyto filtrace chrání člověka před škodlivostí modrého světla.

Cílem praktické části práce bylo porovnat průměrné zkreslení barev způsobené daným typem filtrace a procentuálního snížení citlivosti ipRGC u dvou typů monitorů, a pomocí simulace úrovní softwarové filtrace u OLED panelu i srovnání všech použitých optických a softwarových filtrací dohromady.

V Přehled poznatků vlivu modrého světla na organismus jsou shrnuty nejnovější poznatky a zjištění o vlivu/škodlivosti modré složky světla na člověka na základě studie odborných článků zejména z období poslední dekády. Základní aspekty kolorimetrie shrnuje poznatky o základních veličinách kolorimetrie, barevných prostorech a gamutech a vyjádření barevných rozdílů a s tím

spojenými procesy lidského barevného vidění. Kapitola 4 obsahuje samotné měření, zobrazení a diskusi výsledků práce. Jsou to:

- Měření spektrálních propustností použitých optických filtrů a určení účinnosti blokace těchto filtrů vzhledem k citlivosti ipRGC.
- Zobrazení omezení gamutů dvou typů monitorů (OLED a LCD) způsobené optickou filtrací (filtry antiblue, žlutý a červený) a softwarovou filtrací (nastavenou na maximum).
- Kvantifikace barevných rozdílů metrikou CIEDE2000 pro uvedené typy filtrace u zmíněných zobrazovačů na testovacích barvách digitální palety Macbeth.
- Simulace softwarové filtrace u OLED panelu na barvách Macbeth pro různé úrovně filtrace (0, 20, 40, 60, 80 a 100 %, kde 100 % odpovídá výše zmíněné měřené softwarové filtraci u OLED panelu nastavené na maximum). Tato simulace je provedena na základě měření změny vyzařované intenzity jednotlivých barevných kanálů (R – červený, G – zelený a B – modrý) OLED panelu. Snížením těchto barevných kanálů se sníží i barevné souřadnice CIE RGB Macbeth barev, a pro ty je pak stanoven barevný rozdíl stejnou metrikou, jak je výše uvedeno. Výsledky metrik simulace pro veškeré úrovně filtrace jsou navíc normalizovány tak, aby si odpovídaly výsledky barevných rozdílů měřených dat (maximální softwarová filtrace u OLED) a výsledky barevných simulovaných dat (pro 100 % softwarovou filtrací). Poté jsou porovnány výsledky veškerých optických a veškerých softwarových filtrací (pro všechny zmíněné úrovně) u OLED, a to konkrétně jejich průměrná hodnota metriky CIEDE2000 na Macbeth a snížení reakce vzhledem k ipRGC.

2 Přehled poznatků vlivu modrého světla na organismus

V této části jsou shrnuty poznatky o vlivu modrého světla na člověka na základě studia odborných článků, zejména zahraničních výzkumných týmů z období poslední dekády [2]-[9], [11]-[15], [17]-[22], [24] a [25]. Vliv tohoto světla je dělen podle dvojího charakteru, a to psychologického a fyziologického.

2.1 Psychologický charakter škodlivosti

Tato část se zaměřuje na vliv psychologického charakteru (ovlivnění nálady, spánku, psychická únava apod.), který má nejčastěji dopad na kvalitu spánku, ale vzhledem k důležitosti kvalitního spánku jakožto regeneračního procesu, může tento vliv katalyzovat mnohem závažnější onemocnění.

2.1.1 Cirkadiánní cyklus

Cirkadiánní cyklus (také vnitřní lidský spánkový cyklus) je jeden z biorytmů, tedy kolísání aktivity a bdělosti nejčastěji v souvislosti s denní, měsíční nebo roční periodou. Jakožto biologický rytmus má tento cyklus u lidí periodu o délce běžně mezi 20 až 28 hodinami [1].

Vnitřní lidský spánkový cyklus se přizpůsobuje podle změny míry vystavení se krátkým vlnovým délkám (zejména modré složce) světla během střídání dne a noci, a to jak přírodního, tak umělého světla. Tento fenomén je úzce spojen s vlivem modrého světla na produkci melatoninu [8].

2.1.2 Melatonin

Melatonin, systematický název 5-methoxy-N-acetyltryptamin, je lidský hormon, nepřesně nazývaný „hormon spánku“, nebo také lépe „hormon tmy“, který je produkován především za tmy, respektive při absenci zejména modré složky světla (viz 2.3). Reguluje chronobiologické (cyklicky se opakující biologické) rytmy. Hormon je produkován epifýzou (nadvěskem mozkovým, tzn. částí mezimozku) [3].

2.1.3 Negativní vliv modrého světla na cirkadiánní cyklus

V posledních deseti letech vznikalo velké množství prací [2]-[9], [13]-[15], které hodnotily vliv komerčně prodávaných zdrojů umělého osvětlení (žárovky, displeje atd.) na lidské zdraví, protože se za posledních 20 let stalo toto téma poměrně hojně diskutovaným. Výzkumné týmy však často nepoužívají vždy stejné veličiny pro hodnocení vlivu dané obrazovky, někdy si dokonce navrhnou pro účely svých měření i nějakou vlastní metriku. Práce se přesto shodují ve vztážením svých výsledků k poklesu melatoninu u testovaných subjektů, protože se jedná o nejdůležitější důsledek.

V jedné z takových studií [2] byl zkoumán vliv vystavení lidského oka umělému světelnému záření z digitálních zobrazovačů (chytré telefony, monitory apod.) na zdravý lidský cirkadiánní cyklus za různých podmínek prostředí a nastavení obrazovky. Měření zde byla provedena u tří komerčně prodávaných chytrých telefonů, při používání oblíbené aplikace Messenger od sociální sítě Facebook v tmavé a také v osvětlené místnosti v noci přibližně 15 až 30 minut před usnutím. Výsledkem bylo, že používání telefonu v tmavé místnosti, mělo za následek snížení produkce melatoninu o 7,3 až 11,4 % a v osvětlené místnosti dokonce o 15,4 až 36,1 % [2].

Z výsledků tedy jednoznačně vyplývalo, že vystavení jakémukoli světlu ve večerních a nočních hodinách ovlivňuje produkci melatoninu, ovšem ukázalo se, že krátkovlnné modré světlo je v potlačení produkce melatoninu mnohem efektivnější než dlouhovlnné složky viditelného spektra (od žlutého po červené světlo). Jelikož je melatonin hormonem potřebným ke správné regeneraci organismu, jeho pokles způsobuje narušování biologických procesů, které se opírají o přirozené cykly dne a noci, což vede k možnosti vzniku dalších onemocnění. Proto by se lidé neměli vystavovat světlu, jehož podstatnou část tvoří modrá složka spektra, a to zejména v pozdních večerních hodinách, kdy se člověk přirozeně chystá ke spánku. Nejčastěji se uvádí 1,5 hodiny před usnutím [9].

2.1.4 Modré světlo jakožto nepřímá příčina onemocnění

Umělému osvětlení v noci je v Evropě vystaveno 99 % populace a takzvaný „světelný smog“ tudíž představuje jedno z nejrychleji rostoucích znečištění životního prostředí vůbec [11]. Toto umělé světlo má početné, velmi dobře zdokumentované dopady na faunu a většina z nich je bohužel negativních. Z živočišné říše má nejhorší dopady na člověka, protože ten se takovému světlu vystavuje nejvíce, ale má negativní vliv i na mnohé druhy zvířat, aktivních zejména v noci, jako jsou například sovy, netopýři, želvy, ryby, obojživelníci a plazi [12].

Naproti tomu je zajímavé, že vliv umělého osvětlení na rostliny byl zdokumentován méně, ačkoliv například stromy v centrech měst jsou umělému pouličnímu osvětlení vystavovány neustále. U mnohých lesních porostů v blízkosti silných zdrojů nočního umělého světla (typicky města a velkoměsta) bylo zjištěno, že takové stromy pak mají potíže s běžným přizpůsobováním se změnám, spojeným se střídáním ročních období, protože i stromy, stejně jako lidé, vyžadují určitý řád v cyklu střídání světla a tmy, jelikož jsou pro ně takové podmínky přirozené. Kupříkladu listnatým stromům, pokud jsou nadměrně vystaveny světlu, což jim umělé pouliční osvětlení ve městech bohatě dopřává, opadávají listy mnohem později a tím se tyto stromy na zimu zbytečně vyčerpávají oproti těm, které rostou v lesích bez vlivu umělého osvětlení [13].

Světlo obecně má hluboký dopad na již zmíněný cirkadiánní cyklus a fyziologické funkce organismu. Právě v tomto smyslu existují důkazy, které přímo poukazují na souvislost mezi umělým světlem a mnohými onemocněními, jako například zvýšení výskytu rakoviny ženského

prsu. Z nich lze například vyvodit, že ženy žijící v oblastech, kde jsou více vystaveny umělému světlu, podstupují o 30 až 50 % větší riziko vzniku tohoto onemocnění než ženy, žijící v místech s menší mírou umělého osvětlení [14], [15].

Modré světlo jakožto hlavního původce takových rizik bylo možné průkazně usvědčit až s objevem a popsáním melanopsinu, což je fotosenzitivní bílkovinný pigment světlocitlivých gangliových buněk (viz 2.3), který reaguje na světlo snížením produkce melatoninu, přičemž jeho maximální spektrální citlivost nastává právě pro vlnové délky modrého světla [16]. Právě ony dvě veličiny popisující světlo jsou tudíž zodpovědné za ovlivňování produkce melatoninu, konkrétně jeho intenzita a vlnová délka [17].

U lidí, vystavených umělému světlu v noci, zejména pak jeho modré složce, je tedy indikován zvýšený výskyt široké škály onemocnění a poruch, zahrnující spánkové a psychické poruchy, obezitu, cukrovku a několik druhů rakoviny [6].

2.1.5 Použití modrého světla v medicíně

I když z předchozího textu se může zdát, že modré světlo nemá snad žádné pozitivum a člověk by se mu měl co nejvíce vyhýbat, není to až tak docela pravda. Modré světlo má totiž za bílého dne mnohé pozitivní účinky na lidskou pracovní výkonnost, bdělost, pomáhá udržovat správný spánkový rytmus a obecně tím zvyšuje kvalitu spánku [18]. Dále je kupříkladu využíváno jako běžná léčba sezónní afektivní poruchy v podobě tzv. fototerapie [19], [20].

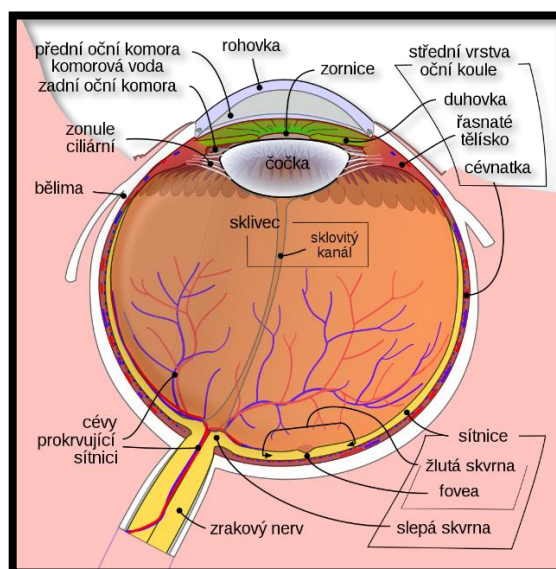
2.2 Fyziologický charakter škodlivosti

Tato část se zaměřuje na vliv fyziologického charakteru škodlivosti, tedy na možnosti fyzického poškození tkáně přímo spojené s vlivem modrého světla (patologické změny v lidském oku, které mohou být nevratné).

2.2.1 Müllerovy buňky

Müllerovy buňky jsou typ gliových buněk nacházejících se v sítnicích obratlovců. Tyto buňky zajišťují výživu, udržují vhodné prostředí pro správnou činnost nervových buněk sítnice a hrají také důležitou roli při její regeneraci. Jejich poškození může znamenat nenapravitelné škody na sítnici. Výživu sítnice zajišťují ionty draslíku, voda a určité proteiny (aquaporin-1, aquaporin-4 a Kir4.1), ale i další látky [21], [22].

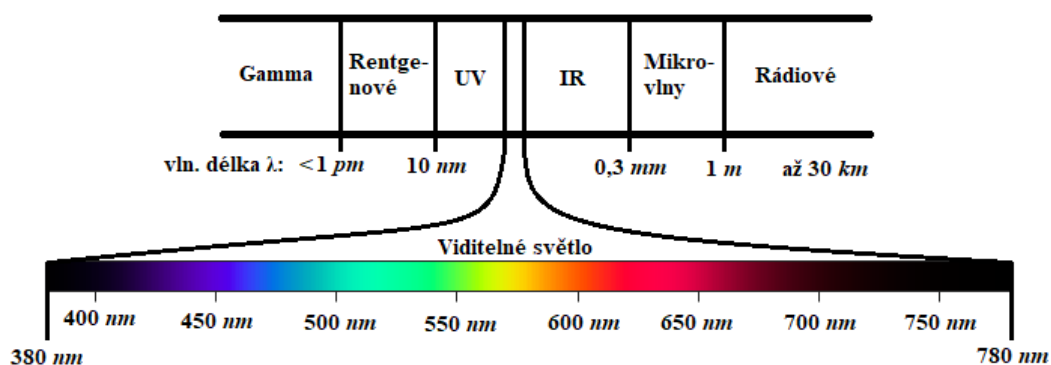
2.2.2 Fotochemické poškození sítnice modrým světlem



Obrázek 1: Průřez lidského oka (převzato z [23])

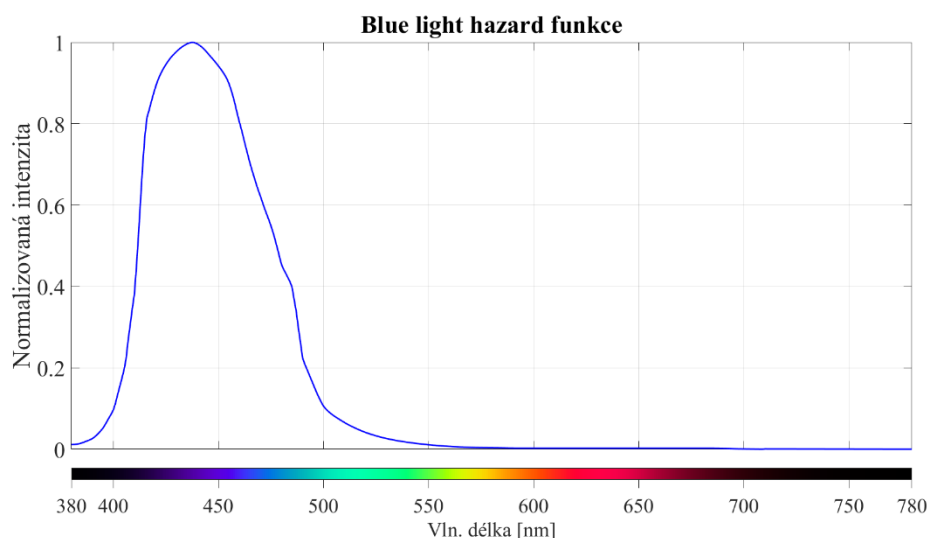
Viditelné složce EMG záření je logicky nejvíce vystavena pokožka a oči. Tato složka však dál do těla neproniká, neboť tělní tkáň jí dokážou pohltit. Zatímco fotodermatózy (kožní onemocnění způsobené viditelným světlem) nebyly u běžně používaných komerčních zdrojů umělého světla prokázány, u podobně způsobeného onemocnění očí (oční sítnice) už zdokumentované jsou a tehdy hovoříme o tzv. fotoretinitidě (v angl. *blue-light retinal injury*). Nebezpečí vzniku takového onemocnění se pak nejčastěji označuje jako „blue-light hazard“ (BLH) a to jak v anglické, tak české literatuře [21], [24].

Nejvyšší energii z EMG záření, které je nejbližší viditelnému světlu, má ultrafialové světlo ovšem to je pohlceno v oční čočce. Z druhé strany (vyšší vlnové délky než viditelné spektrum) sousedí viditelné světlo se zářením infračerveným, které je ovšem pohlceno sklivcem, takže jediné spektrum EMG vln, které pronikne až k sítnici, je za normálních podmínek to viditelné [21].



Obrázek 2: EMG spektrum záření (překresleno podle [26] a [49])

Z viditelného světla je energeticky nejbohatší, vzhledem k lidské spektrální citlivosti, právě modré světlo a jeho větší intenzita, než kterou dokážou tkáně sítnice zpracovat, jí může nenávratně poškodit. O relativní citlivosti oční sítnice (Müllerových buněk) na vlnové délky viditelného spektra vypovídá tzv. BLH křivka (funkce).



Obrázek 3: BLH funkce (extrapolováno z [53])

	Fialová	Modrá	Azurová	Zelená	Žlutá	Oranžová	Červená
	380 až 430 nm	430 až 500 nm	500 až 520 nm	520 až 565 nm	565 až 590 nm	590 až 625 nm	625 až 780 nm
Prům. norm. intenzita	0,38	0,67	0,07	0,02	0,00	0,00	0,00

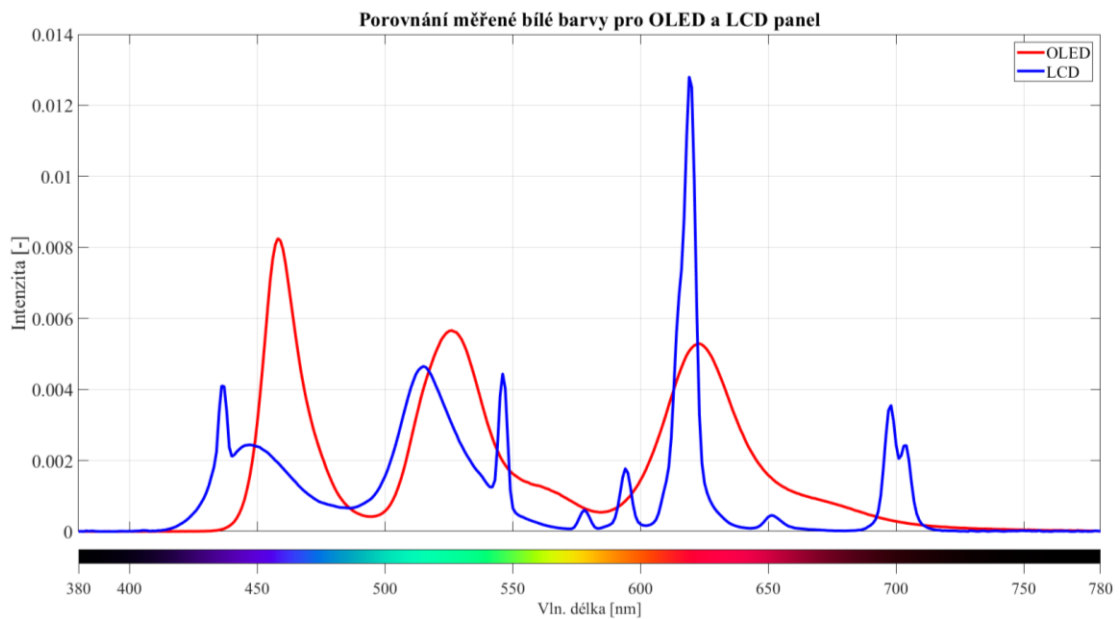
Tabulka 1: Průměrná normalizovaná intenzita BLH funkce daných úseků EMG záření

Data k BLH křivce (viz Obrázek 3) se nepodařilo získat ve volně dostupných zdrojích, ale bylo možno je extrapolovat pomocí online dostupného softwaru [47] z grafu této funkce ve článku [53] v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm s krokem 1 nm. Hodnoty Tabulka 1 byly vypočítány podle vzorce:

$$PNI(i) = avg\{intenzita(i)\}, \quad (1)$$

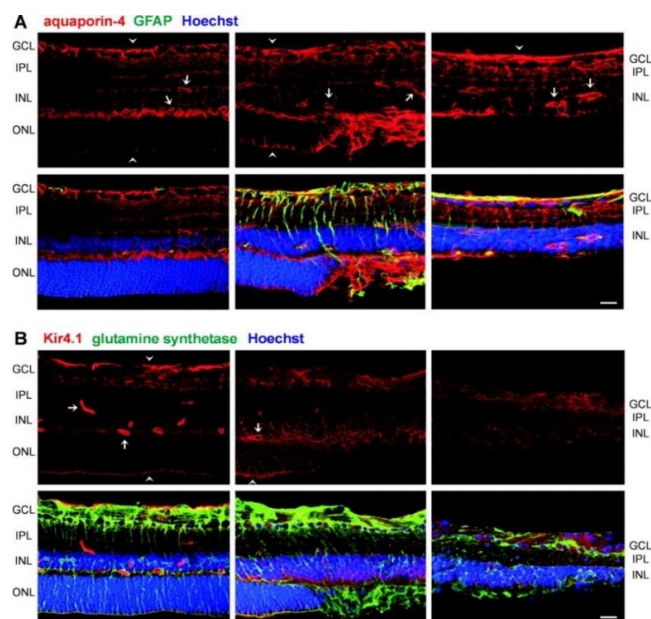
kde index $i \in \{\text{fialová, modrá, azurová, zelená, žlutá, oranžová a červená}\}$ značí pro kterou část viditelného spektra je $PNI(i)$ (průměrná normalizovaná intenzita) počítána, $intenzita(i)$ je oříznutý vektor intenzity Obrázek 3 podle levé a pravé hranice úseků vlnových délek (viz Tabulka 1) [49] a $avg\{-\}$ je operátor průměru.

Pro porovnání s BLH křivkou tu jsou ještě přidána změřená vyzařovaná spektra čistě bílé barvy (také jde zároveň o maximální intenzity vyzařování) pro OLED a LCD monitor z Kapitoly 4.



Obrázek 4: Vyzářovaná intenzita zobrazené čistě bílé barvy na maximálním jasu OLED a LCD zobrazovače

Bylo provedeno mnoho pokusů [21], [22], [25] na laboratorních zvířatech (myši, krysy, opice) jejichž oči byly vystaveny různým dávkám světla bohatého na modrou složku a všechny výsledky byly stejné. Se zvýšenou intenzitou záření modrého světla prokazovaly Müllerovy buňky větší hypertrofii, sníženou látkovou propustnost na vodu, ionty draslíku a zmíněné proteiny, které dokonce i někdy zcela vymizely. To zapříčinilo celkové poškození sítnicové tkáně, která vedla u testovaných subjektů k částečné nebo úplné slepotě, když byla sítnice poškozena zejména v oblasti žluté skvrny [25].



Obrázek 5: Úroveň poškození sítnicové tkáně podle míry vystavení intenzitě modrého světla od nejmenší-vlevo po maximální-vpravo (převzato z [25])

GCL je vrstva gangliových buněk, INL je vnitřní jaderná vrstva, IPL je vnitřní plexiformní vrstva a ONL je vnější jaderná vrstva [25].

Neexistují však žádné průkazné výsledky pokusů prováděných s lidskou tkání, a proto aplikování předchozích závěrů na člověka není zcela možné, jelikož se chování Müllerových buněk v lidské sítnici může lišit [21]. Z tohoto důvodu není dále v této práci tato křivka využita k hodnocení efektivity spektrálních blokad použitých optických a softwarových filtrů (viz Kapitola 4).

2.3 Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky – ipRGC

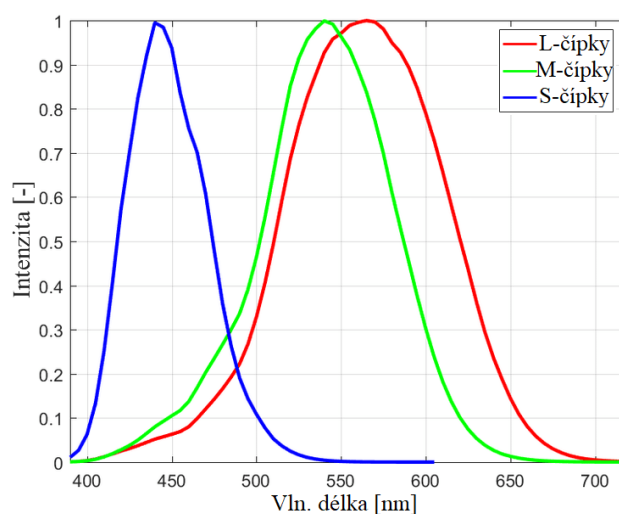
Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky (zkráceně ipRGC z anglického *intrinsically photosensitive retinal ganglion cell*) jsou poměrně nově objevenými receptorovými buňkami sítnice (objeveny u myši v roce 2002 [41], [42] a u člověka popsány v roce 2005 [43]) podobně jako Müllerovy buňky, ale narozdíl od nich obsahují melanopsin a vykonávají jinou, ne vždy zcela známou funkci [39], [44]. Podobně jako čípky a tyčinky se řadí mezi fotoreceptory sítnice, protože při pokusech u laboratorních myší, které neměly čípky ani tyčinky, byli tito hlodavci stále schopni rozpoznat terčíky s pruhem o vysokém kontrastu a najít tak cestu z bludiště [45]. Ovšem v procesu vidění mají zatím neznámou úlohu, a proto se neřadí mezi základní uváděné fotoreceptory oka, což jsou čípky a tyčinky. Je však známo, že ovlivňují cirkadiánní rytmus, díky melanopsinu, a zornicový reflex. Zda melanopsin také nějakým způsobem přispívá k procesu vidění je důležitá a stále nevyřešená otázka, jejíž zodpovězení může přinést nové šance na restituci vidění u pacientů, kteří ztratili zrak v důsledku onemocnění tyčinek a čípků [46].

3 Základní aspekty kolorimetrie

V této kratší kapitole jsou shrnuty poznatky, které je důležité znát pro pochopení zpracování měřených výsledků. Jedná se o definici barvy, některých veličin barvu popisujících, princip barevného vidění, barevné prostory a gamuty a vyjádření barevných rozdílů.

3.1 Barva

Z fyzikálního hlediska lze viditelné spektrum v principu rozlišit pouze pomocí vlnových délek, ale barevný vjem vzniká až funkcí fotoreceptorů v lidském oku, jejichž signál je zpracován v mozku. Fotoreceptory jsou dvojího základního typu. Tyčinky jsou zodpovědné za nebarevné vidění (vnímají kontrast) a čípky za barevné vidění. U čípků rozlišujeme tři druhy: L, M, S (červená, modrá a zelená) nebo také někdy označované jako ρ , γ , β (červená, modrá a zelená). Každý z těchto čípků obsahuje jiný světlocitlivý protein reagující na specifický rozsah barevného spektra [27].



Obrázek 6: Normalizované citlivosti L, M a S čípků na viditelném spektru (upraveno z [28])

3.2 Základní veličiny popisující barvu

Barvu, jakožto vjemovou reakci na viditelné EMG záření, je obtížné definovat (viz 3.1) a celkový dojem barvy ovlivňuje velké množství parametrů. Proto jsou zde shrnuty zavedené dílčí pojmy, které barvu lépe matematicky definují [29]:

- *Jas* (angl. *brightness*) je množství světla, které se zdá, že zdroj vyzařuje nebo odráží [29].
- *Barevnost* (angl. *colorfulness/chroma*) je vlastnost plochy jevící se více nebo méně barevnou, také nezávislost barvy na bílé nebo odstínech šedé [29].
- *Barevný tón/odstín* (angl. *hue*) značí odlišitelnost barvy od primárních barev (červená, zelená a modrá). Vyjadřuje se nejčastěji ve stupních barevného prostoru CIE L*C*h, jehož souřadnice h značí odstín (červená 0°, zelená 120° a modrá 240°) [29].
- *Sytost barvy* (angl. *saturation*) značí procentuální čistotu barevného tónu, vysoká sytost značí malé příměsi jiných barev [29].

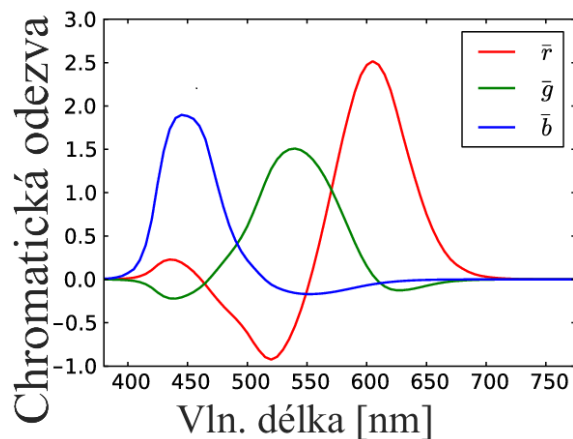
3.3 Barevný metamerismus

Každá spektrální barva má z fyzikálního hlediska svou jedinečnou vlnovou délku, taková barva se označuje jako monochromatická (je tvořena jedním paprskem EMG záření o jedné vlnové délce). Důležitou vlastností lidského zraku je však fakt, že v sítnici člověk nemá jedinečný světlocitlivý pigment, který by jako jediný reagoval na daný monochromatický paprsek, částečně na něj reagují všechny tři typy a výsledná barva se tak dá reprezentovat dalším způsobem, a to procentuálním zastoupením právě těchto tří základních barev. Toto je pouze biologický fenomén, který se například využívá v mnoha optimalizačních úlohách nalezení jiné reprezentace subjektivně vnímané stejné barvy. Například se snažíme potlačit škodlivost modré složky světla tím, že pro jednotlivé pixely digitálního obrazu hledáme ideální způsob reprezentace dané barvy specifickou pozicí v daném barevném prostoru. Podmínkou hledané reprezentace barvy je, aby obsahovala co nejmenší intenzitu ve spektru, na kterou je např. melanopsin nejvíce citlivý [30]. Další výhodou této vlastnosti lidského barevného vidění je existence bílé barvy a odstínů šedé, tyto barvy totiž nejsou spektrální a iluze těchto barev vzniká až v mozku [30], [39].

3.4 Barevný prostor/diagram

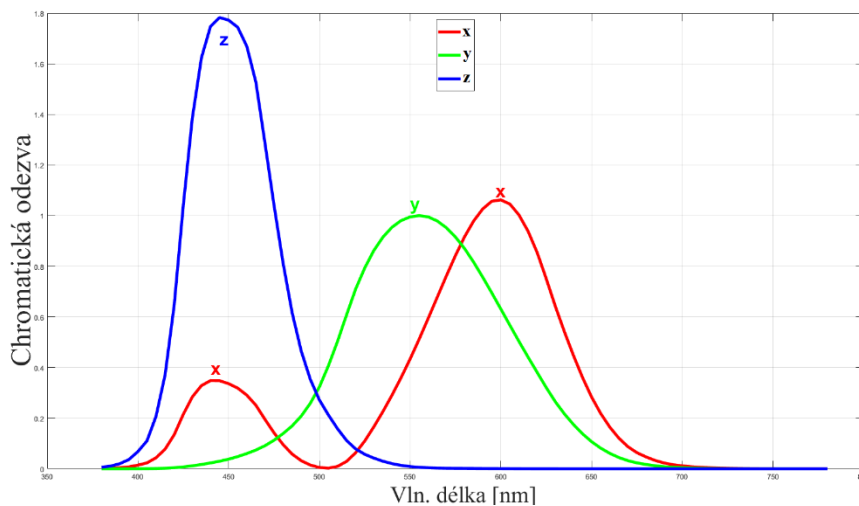
Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) v roce 1931 provedla přibližně dvacet pokusů s lidskými pozorovateli jejichž výsledkem bylo vytvoření barevného modelu nezávislého na světelném zařízení. Skupině pozorovatelů (označovaná jako 2°) bylo dáno za úkol pomocí tří světél (červená, zelená a modrá) namíchat shodnou barvu s jiným monochromatickým zdrojem světla o jedinečné vlnové délce. Při tomto experimentu byla světelným paprskům vystavena pouze centrální část sítnice (žlutá skvrna), kde jsou v dominantním zastoupení pouze čípky, které zpracovávají barevný vjem v lidském mozku. Tímto způsobem byl vytvořen první chromatický model, ze kterého bylo

později odvozeno mnoho dalších barevných prostorů (př. CIE XYZ, CIE xy(Y)), protože pro daný problém bylo potřeba vyvinout vlastní barevný prostor, který by vyhovoval potřebám úlohy. CIE RGB se dá také zobrazit jako graf třech chromatických členitelů \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} , které popisují potřebné množství těchto složek k vytvoření spektrální barvy [31].



Obrázek 7: CIE RGB – Chromatické členitele r , g , b (upraveno z [31])

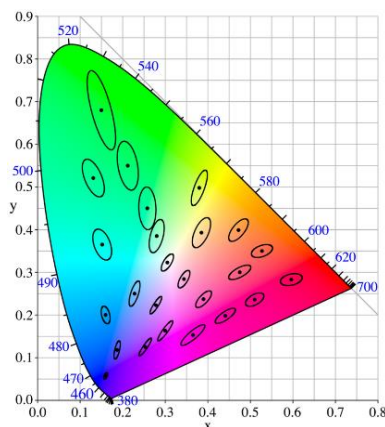
CIE XYZ je označován za prostor referenční a je prvním takovým prostorem, matematicky definovaným. Na rozdíl od CIE RGB jeho osy X, Y, Z neoznačují všechny nějaké procentuální zastoupení červené, modré či zelené, ale zde osa Y představuje jas, osa X odpovídá modré barvě a osa Z zase kombinaci všech tří souřadnic RGB tak, aby jeho trichromatické členitele x , y , z nebyly záporné jako je tomu u \bar{r} , \bar{g} , \bar{b} [32].



Obrázek 8: CIE XYZ – Chromatické členitele x , y , z (upraveno z [33])

3.5 Perceptuálně uniformní barevné prostory

CIE RGB a CIE XYZ mají však nevýhodu ve svém prostorovém rozložení barev a jejich vzdáleností. V těchto prostorech například jedna referenční barva (b1) má nějakou euklidovskou vzdálenost a subjektivní hodnocení barevného rozdílu od jiné barvy (b2) a jiná referenční barva (b3) má třeba stejnou euklidovskou vzdálenost od barvy (b4) jako má b1 od b2, ale jejich subjektivní hodnocení rozdílu může být zcela jiné. Tedy euklidovská vzdálenost barev v těchto prostorech nekoreluje se subjektivním hodnocení barevných rozdílů.



Obrázek 9: MacAdamsovy elipsy v diagramu chromatičnosti CIE xy, elipsy plochou značí barvy, které jsou pro lidské oko v rámci jedné elipsy nerozeznatelné (převzato z [34])

Byly proto vytvořeny perceptuálně uniformní (z anglického „*perceptually uniform*“, česky „*vnímáním jednotné*“) barevné prostory, které tento problém řeší a jsou tedy vhodnější k měření barevných rozdílů.

Jedním z takových je i prostor CIE $L^*a^*b^*$, který byl navržen v roce 1976. Je založen na souřadnicích L^* (jas), a^* (červeno-zelená) a b^* (žluto-modrá). Pro převod z prostoru CIE XYZ do CIE $L^*a^*b^*$ je potřeba krom souřadnic X, Y, Z měřené barvy ještě znát pozici referenčního bílého bodu X_n, Y_n, Z_n :

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \tag{2}$$

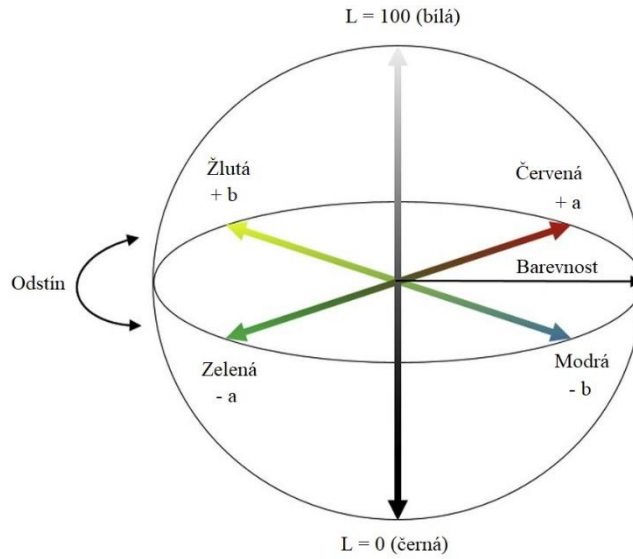
$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right], \tag{3}$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right], \tag{4}$$

kde $f(x) = \sqrt[3]{x}$ pro $x > \left(\frac{24}{116}\right)^3$

a $f(x) = \frac{841}{108} \cdot x$ pro $x \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3$.

Vzorce převzaty z [35].



Obrázek 10: Barevný prostor CIE L*a*b* (upraveno z [36])

3.6 Barevné rozdíly/vzdálenosti

Nejvíce známá vzdálenost dvou barev v prostoru CIE L*a*b* je vzdálenost ΔE_{ab}^* dvou barev (L_1^*, a_1^*, b_1^* a L_2^*, a_2^*, b_2^*) a spočítá se jako:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}. \quad (5)$$

Obvyklý limit pro nerozlišitelný rozdíl vjemu barev je $\Delta E_{ab}^* < 1$ [37]. Jelikož se však ukázalo, že ΔE_{ab}^* nekoreluje zcela dobře s lidským vnímáním barev (zejména v oblastech modré barvy), bylo vyvinuto již mnoho rozšíření této vzdálenosti, které se na tento problém zaměřují, přičemž asi ta nejznámější je vzdálenost CIEDE2000 – ΔE_{00} :

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_C \cdot S_H}\right)^2 + R_T \cdot \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right) \cdot \left(\frac{\Delta H'}{k_C \cdot S_H}\right)}, \quad (6)$$

kde S_L, S_C, S_H a R_T jsou váhovací funkce svělosti, odstínu a sytosti, R_T je korekce rozdílu odstínu a sytosti v modré oblasti prostoru CIELAB a k_L, k_C, k_H jsou další korekční faktory. L_i', C_i', H_i' jsou transformované pozice L_i^*, a_i^*, b_i^* odpovídající jasu, barevnosti a odstínu [37], [38]. Samotný výpočet od L_1^*, a_1^*, b_1^* a L_2^*, a_2^*, b_2^* po ΔE_{00} je poměrně komplikovaný, ale je implementovaný v mnoha rozšířeních pro Matlab, a i v Matlabu nativně. Vzorce (5) a (6) byly převzaty z [37].

I když se ukázalo, že ΔE_{ab}^* není pro měření barevných rozdílů, zejména pak pro modré světlo, úplně ideální, stále se pro svou jednoduchost používá, hlavně kvůli faktu, že jeho nejčastější rozšíření ΔE_{00} se doporučuje zejména pro malé barevné rozdíly [37].

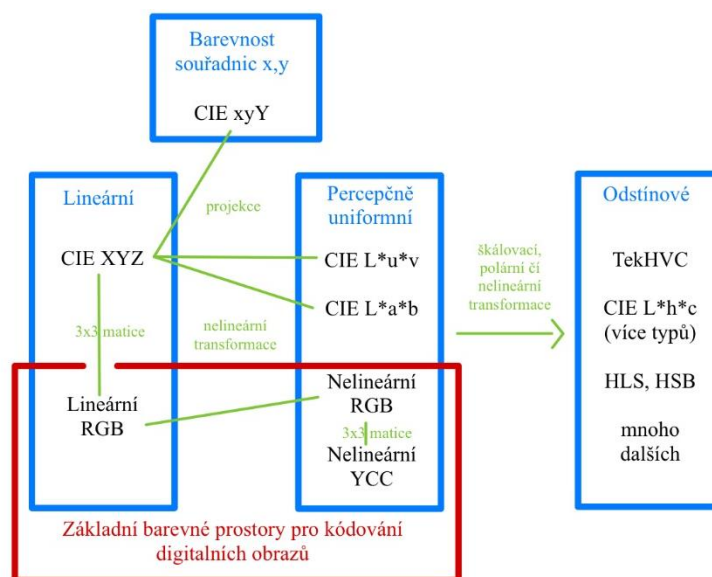
Vzhledem k problémům ΔE_{ab}^* a komplikovanosti výpočtu ΔE_{00} se ještě často používá podobně jednoduchý výpočet jako ΔE_{ab}^* , ale v transformovaném prostoru CIE L*C*h*,

kde L^* zůstává stejné, C^* odpovídá barevnosti a h^* odpovídá odstínu. Tato vzdálenost se pak také označuje jako ΔE_{ab}^* a navíc se počítá ΔC_{ab}^* , která odpovídá kombinovanému rozdílu barevnosti a odstínu [30].

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt[2]{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta h^*)^2} \quad (7)$$

$$\Delta C_{ab}^* = \sqrt[2]{(\Delta C^*)^2 + (\Delta h^*)^2} \quad (8)$$

V různých barevných prostorech mohou jejich dané souřadnice označovat jinou veličinu či barvu nebo dokonce spektrum barev, proto je důležité tyto prostory bez příslušných transformací nezaměňovat [32].



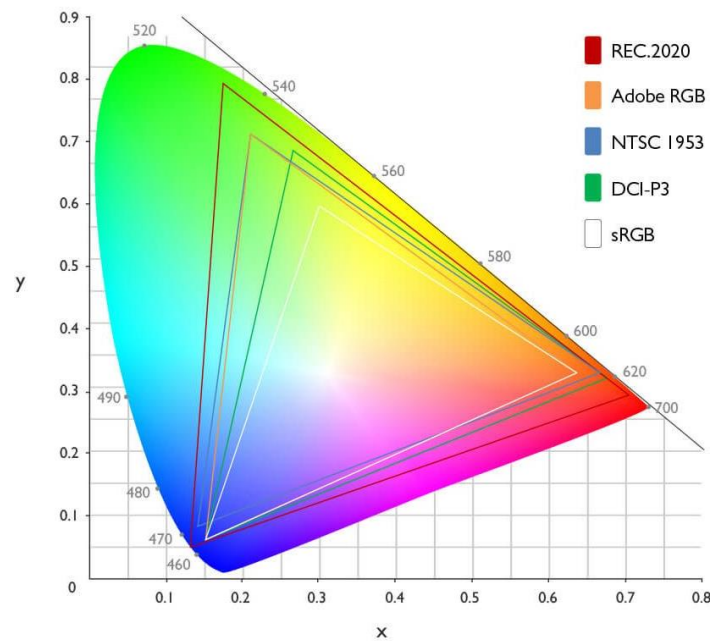
Obrázek 11: Základní barevné prostory a stručné naznačení vzájemných transformací mezi nimi (vytvořeno podle [32])

3.7 Barevný gamut

Barevný gamut je definován jako rozsah barev, který je konkrétní zařízení schopno zobrazovat nebo zaznamenávat. Obvykle se zobrazuje jako uzavřená oblast mezi primárními barvami v diagramu chromatičnosti CIE xy (dvourozměrný), nebo diagramu chromatičnosti CIE L'u'v' (trojrozměrný), který je pro konkrétní zařízení sestaven. Například primárními barvami monitoru jsou červená, zelená a modrá. Barevný gamut monitoru je proto zobrazován jako trojúhelníková oblast uzavřená barevnými souřadnicemi příslušejícími červené, zelené a modré barvě monitoru v CIE xy [40].

Standardní barevný gamut je barevný formát (prostor) sRGB, který je standardizován organizací IEC od roku 1999. Důvodem pro standardizaci barevného gamutu byla snaha o prosazení snazšího způsobu reprodukce barev. Pokud by všechna barevná zařízení (digitální kamery, skenery, monitory, tiskárny, projektory atd.) dokázala reprodukovat barevný gamut sRGB správným způsobem, obrazy by mohly být těmito barevnými zařízeními reprodukovány s maximální podobností. Tento úkaz je důsledkem skutečnosti, že barevná zařízení mají stejnou schopnost

(samozřejmě za předpokladu provedení řádné kalibrace) zaznamenávat, zobrazovat nebo tisknout stejný rozsah barev. To znamená, že u téhož obrazu bude dosahováno stejného omezení odchylek mezi barvami reprodukoványi různými zařízeními. Takto by tedy bylo možno dosahovat vysoké věrnosti barev nebo řízené reprodukce barev. Tato koncepce je uplatňována rovněž při reprodukování barev obsažených v gamutu [40].



Obrázek 12: Barevné gamuty různých barevných prostorů (formátů) vykreslené v diagramu chromatičnosti CIE xy (převzato z [40])

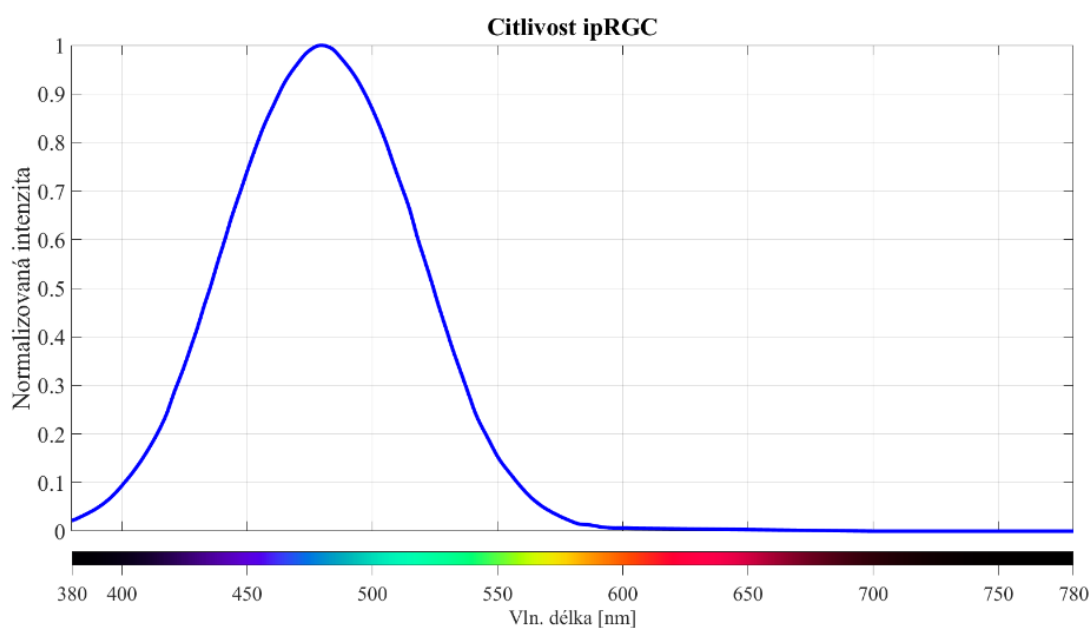
4 Experimentální ověření vlivu filtrace

V této kapitole je použita aproximace křivky spektrální citlivosti vzhledem k ipRGC (viz 2.3), ke které je vztažena efektivita spektrální blokace níže zmíněných optických filtrů (viz 4.2). Stejným způsobem jsou data této křivky použita i pro měření omezení čistě bílé barvy dvou typů zobrazovačů (OLED a LCD) (viz 4.3.3 a 4.3.4). Dále jsou zde počítány barevné rozdíly na barvách testovacího obrazce Macbeth (viz Obrázek 20) způsobené zmíněnými optickými filtracemi a také softwarovou filtrací nastavenou na maximum – 100 % (viz 4.3.3) pro zmíněné monitory a je zde zobrazeno i jejich omezení gamutů způsobené těmito filtracemi (viz 4.3.2). Nakonec jsou zde simulovány vlivy jednotlivých úrovní softwarové filtrace na barvy Macbeth, které jsou upraveny, aby odpovídaly měřeným vlivům softwarové filtrace nastavené na maximum. Výsledky účinnosti blokace vzhledem k ipRGC a průměrného barevného zkreslení přes všechny barvy Macbeth jsou pak porovnány u OLED pro všechny použité úrovně softwarové filtrace a všechny optické filtry (viz 4.3.4).

Všechna měření (viz 4.2 a 4.3) proběhla v laboratoři FEL ČVUT na katedře radioelektroniky.

4.1 Aproximace křivky citlivosti ipRGC na viditelném spektru

Data ke křivce se nepodařilo získat ve volně dostupných zdrojích, ale aproximoval jsem je obdobným způsobem jako BLH funkci v 2.2.2 a to s použitím stejného softwaru [47], ale logicky za použití grafu jiné křivky (ipRGC) ve článku [30] a to v potřebném rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm s krokem 1 nm, přičemž největší citlivost nastává pro vlnovou délku 480 nm.



Obrázek 13: Extrapolovaná křivka citlivosti ipRGC interpolovaná do vln. délek 380 až 780 nm s krokem 1 nm

	Fialová	Modrá	Azurová	Zelená	Žlutá	Oranžová	Červená
	380 až 430 nm	430 až 500 nm	500 až 520 nm	520 až 565 nm	565 až 590 nm	590 až 625 nm	625 až 780 nm
Prům. norm. intenzita	0,153	0,822	0,738	0,268	0,029	0,006	0,001

Tabulka 2: Průměrná normalizovaná intenzita citlivosti ipRGC daných úseků EMG záření

Hodnoty Tabulka 2 byly získány stejným způsobem jako pro Tabulka 1 (viz 2.2.2) podle vzorce (1), ale za použití dat intenzity citlivosti ipRGC křivky Obrázek 13.

4.2 Měření spektrometrem – spektrální propustnost optických filtrů

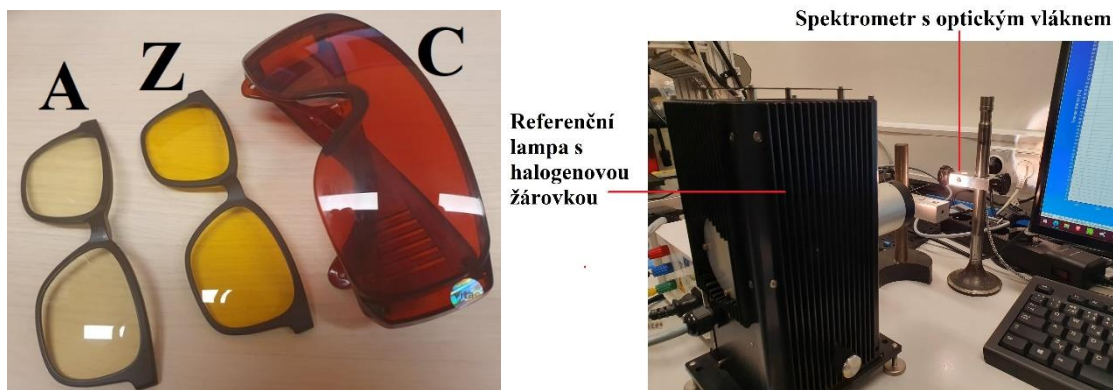
V této kapitole jsou měřeny spektrální propustnosti optických filtrů. Jednalo se o filtry: antiblue (dále už jen A), žlutý (dále už jen Z), červený (dále už jen C). Tyto propustnosti jsou poté mezi sebou porovnány a je zde určena jejich účinnost blokace vzhledem k ipRGC (viz 4.1). Následně se je diskutován jejich pravděpodobný vliv u zobrazovačů (omezení gamutů, barevné zkreslení a účinnost blokace vzhledem k ipRGC).

Měření bylo provedeno s následujícími přístroji:

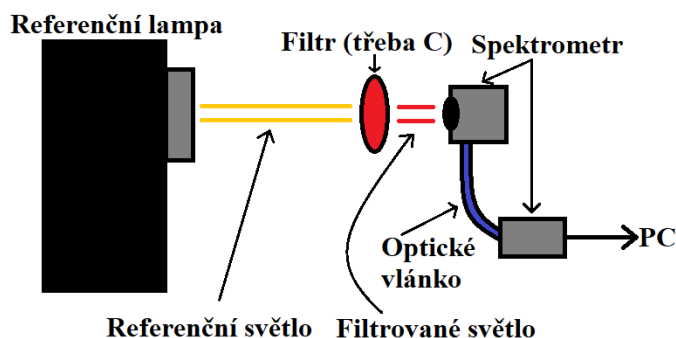
- referenční lampa s halogenovou žárovkou (LOT-Oriel)
- stabilizační napájecí zdroj pro lampu (LOT-Oriel)
- spektrometr s optickým vláknem (Avantes Avaspec-3648).

Filtr	Výrobce	Model	Barva	Uvedená blokace	Zdroj
A	SWING	TR 381 - C193CL03	mírně jantarová	-neuvedeno-	[54]
Z	SWING	TR 381 - C193CL02	žlutá	-neuvedeno-	[54]
C	Hynek Medřický	univerzální	tmavě červená	100 % pod 570 nm	[48]

Tabulka 3: Specifikace použitých optických filtrů



Obrázek 14: Vlevo použité filtry, vpravo měřící aparatura

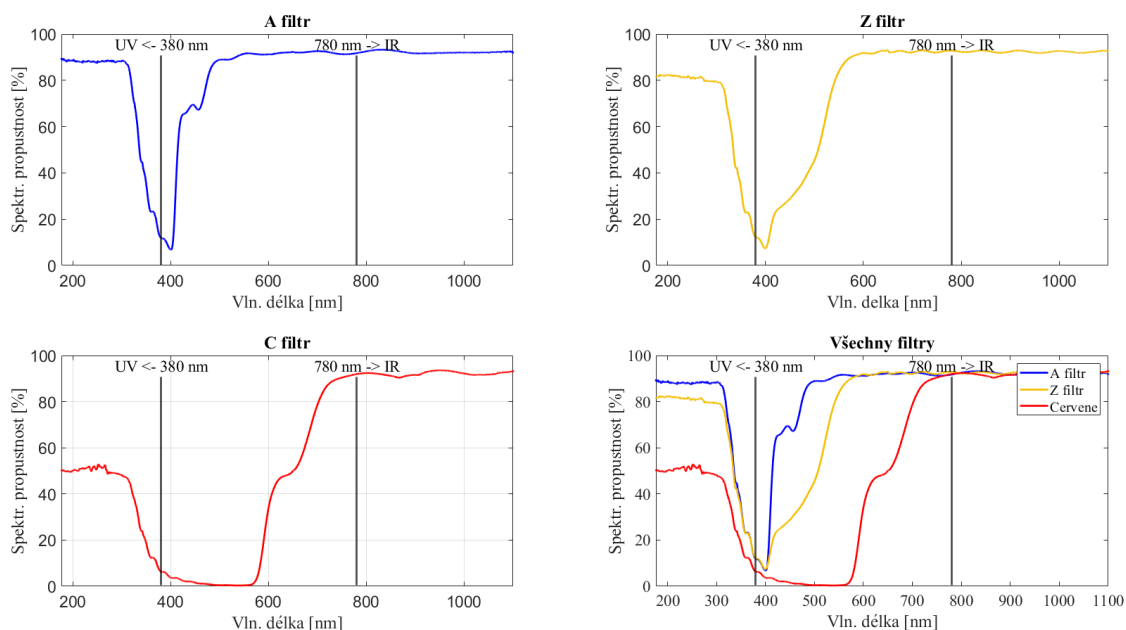


Obrázek 15: Blokové schéma měření spektrometrem LOT-Oriel

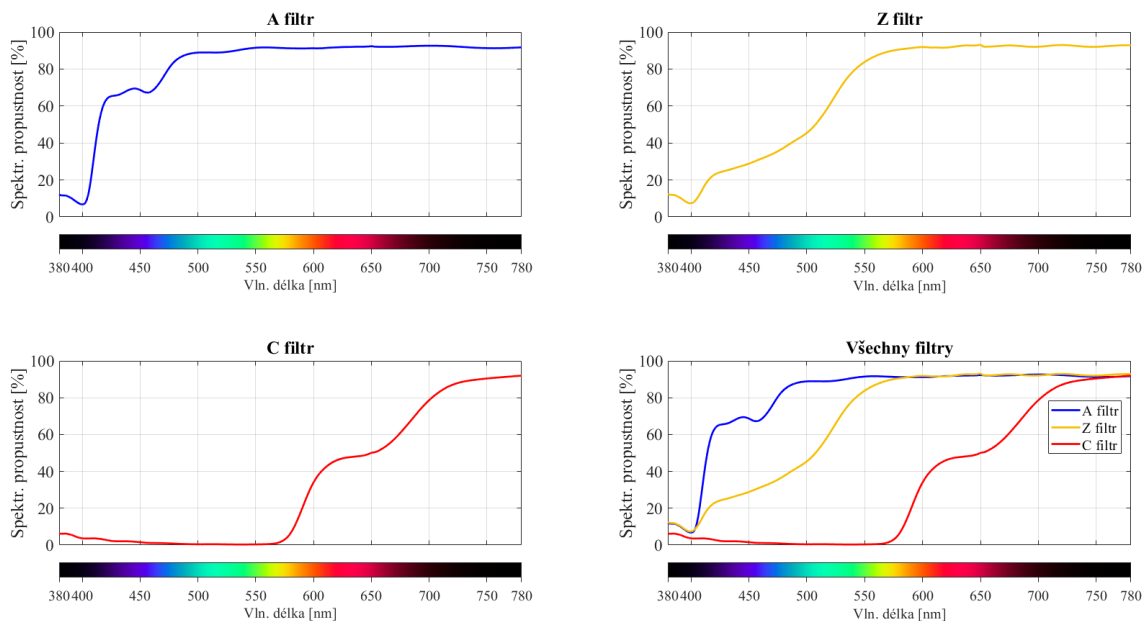
Princip měření spektrální propustnosti probíhá podle následujícího vzorce:

$$T(\lambda) = \frac{S(\lambda) - D(\lambda)}{R(\lambda) - D(\lambda)} \quad (9)$$

kde $T(\lambda)$ je spektrální propustnost (angl. *transmittance*) odpovídá procentuální hodnotě propustnosti hodnotami 0 až 100 (0 až 1), $S(\lambda)$ je spektrum filtrovaného referenčního záření (s filtrem), $R(\lambda)$ je spektrum referenčního záření žárovky (bez filtru) a $D(\lambda)$ je temný snímek (dark frame), což je aditivní chyba detekovaného spektra bez zdroje záření žárovky a také parazitní záření, které nelze v laboratoři odstranit.



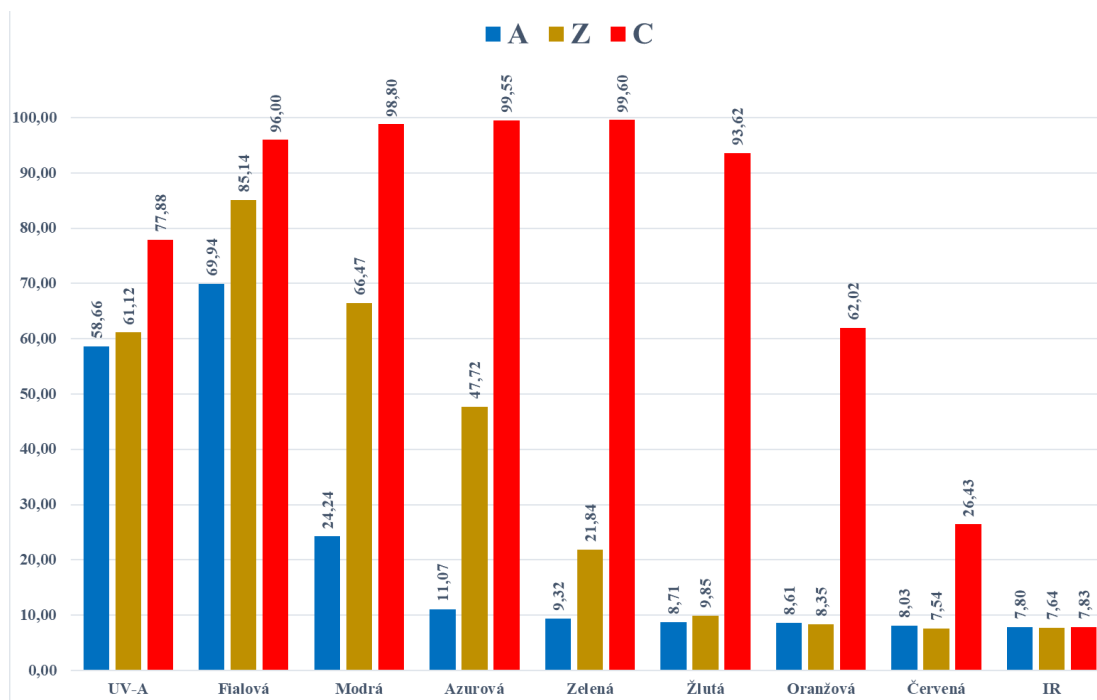
Obrázek 16: Spektrální propustnosti filtrů A, C a Z – surová měřená data vlnových délek 176,26 až 1100,17 nm



Obrázek 17: Spektrální propustnosti filtrů A, C a Z – interpolovaná data do vlnových délek viditelného spektra (380 až 780 nm s krokem 1 nm)

	UV-A	Fialová	Modrá	Azurová	Zelená	Žlutá	Oranžová	Červená	IR
Filtr	315 až 380 nm	380 až 430 nm	430 až 500 nm	500 až 520 nm	520 až 565 nm	565 až 590 nm	590 až 625 nm	625 až 780 nm	780 až 1100 nm
A	58,66	69,94	24,24	11,07	9,32	8,71	8,61	8,03	7,80
Z	61,12	85,14	66,47	47,72	21,84	9,85	8,35	7,54	7,64
C	77,88	96,00	98,80	99,55	99,60	93,62	62,02	26,43	7,83

Tabulka 4: Průměrná procentuální blokace daných úseků EMG záření pro filtry A, C a Z



Obrázek 18: Průměrná procentuální blokace daných úseků EMG záření pro filtry A, C a Z - Tabulka 4 jako sloupcový graf

Na Obrázek 16 jsou zobrazeny grafy surových dat spektrální propustnosti jednotlivých optických filtrů, které jsou pak i v posledním grafu zobrazeny společně pro porovnání. Ve všech těchto grafech jsou přidány příslušné vodorovné čáry, které označují pravou hranici UV záření a levou hranici IR záření a tím ohraničují viditelné spektrum pro lepší orientaci.

Na Obrázek 17 už jsou vykreslené průběhy spektrálních propustností, interpolované do hodnot 380 až 780 nm s krokem 1 nm, což odpovídá viditelnému spektru.

V Tabulka 4 jsou pak vypsány průměrné hodnoty blokace záření pro úseky vlnových délek měřeného spektra u jednotlivých filtrů. Hodnoty byly určeny ze surových měřených dat. Tučně vyznačené červené hodnoty označují maximální průměrnou úroveň blokace z jednotlivých úseků. Její hodnoty byly vypočítány podle vzorce (1) stejně jako v Tabulka 1 a Tabulka 2 (viz 2.2.2 a 4.1). Místo dat intenzit byla však použita data spektrální propustnosti daných filtrů. Spektrální úseky viditelného EMG záření byly navíc ze stejného zdroje [49] doplněny o blízké UV-A a IR záření, aby bylo možné porovnat, jak moc filtry zasahují blokací do blízkých neviditelných spekter.

Samozřejmě levá mez UV-C neodpovídá skutečné hranici UV-C (to je definováno v rozmezí 100 až 280 nm) stejně tak pravá hranice IR (780 nm až 0,3 mm) [49]. Spektrometr totiž měřil v rozsahu vlnové délky 176,26 až 1100,17 nm.

Nemálo prodejců včetně pana Medřického tvrdí, že filtry čiré až jantarové barvy jsou pro blokaci modrého světla poměrně neúčinné, protože jejich blokace se soustředí zejména do oblasti blízkého UV záření (UV-A) a fialového světla [50]. To je dobře vidět v Tabulka 4, kde pro A filtr je průměrná blokace UV-A a fialového světla silně převažující nad blokací modrého světla s průměrnou hodnotou přibližně 24 % oproti 59 % pro UV-A a 70 % pro fialové světlo. To je vzhledem k Tabulka 2 neúčinné, protože podle ní je průměrná hodnota normalizované intenzity citlivosti ipRGC pro fialové světlo 0,23, což je oproti hodnotě pro modré světlo 0,83 poměrně zanedbatelné, kde také citlivost nabývá svého maxima na vlnové délce 480 nm. Je zde také vidět, že propustnost světla nad přibližně 500 nm se u A filtru pohybuje stabilně přes 90 %. Tento filtr by tedy měl způsobovat nejmenší barevné zkreslení oproti ostatním.

Stejně tak u Z filtru je vysoká průměrná blokace pro UV-A a maximální průměrná blokace pro fialové světlo, ale narozdíl od A filtru se zde poměrně vysoká hodnota blokace zachovává až do modrého spektra (67 % pro modré a 48 % pro azurové). Porovnatelně pak Z filtr blokuje zelené světlo jako A filtr blokuje modré světlo. Od žlutého světla přes delší vlnové délky je pak propustnost světla u Z filtru také stabilní kolem 90 %.

Pro C filtr je v Tabulka 4 vidět, že blokace pro fialové až po žluté světlo včetně je téměř 100 % tedy skutečně pod 570 nm tento filtr blokuje téměř všechno viditelné spektrum, od této hodnoty začíná propustnost filtru prudce stoupat. Jelikož tento filtr zcela blokuje fialové, modré,

azurové, zelené a žluté vlnové délky, lze očekávat, že bude způsobovat největší barevné zkreslení, ale na druhou stranu bude neúčinnější v blokaci světla vzhledem k ipRGC křivce citlivosti.

4.2.1 Účinnost blokace světla filtrů vzhledem k ipRGC

Procentuální blokaci modrého světla vzhledem k datům ipRGC (viz Obrázek 13) pro jednotlivé filtry jsem spočítal podle následujícího vzorce:

$$X_i = \left(1 - \sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} T_i(\lambda) \cdot ipRGC_{norm}(\lambda) \right) \cdot 100 [\%], \quad (10)$$

kde index $i \in \{A, Z, C\}$ podle typu filtru, $T_i(\lambda)$ je spektrální propustnost daného filtru podle indexu v hodnotách $T_i(\lambda) \in [0; 1]$, $ipRGC_{norm}(\lambda)$ je normalizovaná křivka Obrázek 13, pro kterou platí $\sum_{\lambda = 380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} ipRGC_{norm}(\lambda) = 1$.

Filtr:	A	B	C
X [%]	21,86	58,49	98,73

Tabulka 5: Procentuální účinnost blokace světla filtrů vzhledem k ipRGC křivce citlivosti

Ač je A filtr určený k používání u počítačového monitoru kvůli blokaci modrého světla za účelem nenarušení cirkadiánního rytmu, z Tabulka 5 je zřejmé, že se k tomuto účelu zjevně příliš nehodí. Jeho průměrná blokace vzhledem k ipRGC dosahuje pouze 22 % oproti poměrně úctyhodným 58 % pro Z filtr a téměř 100 % pro C filtr, ale u C se to dalo očekávat už podle Tabulka 4 a z Obrázek 16 a Obrázek 17. Nutno však podotknout, že tyto výsledky platí pro hypotetický světelný zdroj s uniformním spektrálním vyzařováním (viz vzorec (9)), který má velmi široké a spojité spektrum. Kdežto monitory, u kterých bude filtrace také aplikována, mohou vyzařovat světlo ve velmi omezeném spektru, což může účinnost filtrace vzhledem k ipRGC změnit.

4.3 Měření spektro-radiometrem na testovacím obrazci Macbeth u OLED a LCD

Tato kapitola se věnuje dalšímu měření, které proběhlo se spektro-radiometrem značky Konica Minolta model CS-2000 [56].

Prvním cílem měření bylo zobrazení omezení gamutů monitorů OLED a LCD (viz 4.3.2) způsobené optickými filtry (A, Z a C) a všemi úrovněmi softwarové filtrace (dále už jen S0/ref., S20, S40, S60, S80, S90 a S100)) pro OLED a pro LCD jen s optickými filtracemi (způsobem viz 3.7).

Dalším cílem měření bylo určení barevných rozdílů metrikou CIEDE2000 (viz 3.6) způsobených optickými a S100 filtrací na barvách obrazce Macbeth (viz Obrázek 20) a určení účinností těchto filtrací vzhledem k ipRGC pro oba monitory. U OLED panelu navíc pro všechny softwarové filtrace, ale pouze pro barvu čistě červenou [255, 0, 0], zelenou [0, 255, 0] a modrou [0, 0, 255] (viz 4.3.3).

Posledním cílem bylo stanovení zeslabení jednotlivých barevných kanálů OLED panelu pro všechny softwarové filtrace. Pomocí těchto hodnot zeslabení červeného, zeleného a modrého kanálu pro dané úrovně softwarové filtrace byl následně simulován vliv těchto filtrací na Macbeth na kterých byl spočítána metrika CIEDE2000 a výsledky simulace byly upraveny pro všechny úrovně tak, aby si S100 simulovaná a S100 skutečně měřená (viz 4.3.3) odpovídaly (viz 4.3.4). Poté byly výsledky průměrného zkreslení a účinnosti filtrace všech použitých filtrací (A, Z, C, S20, S40, S60, S80 a S100) u OLED, získané měřením nebo simulací, společně porovnány a diskutovány.

Spektro-radiometr měřil pro dané barvy jejich spektrální intenzitu vyzařování a pozice v různých barevných prostorech (CIE XYZ, CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*u^*v^*$ a pozice v diagramu chromatičnosti CIE xy). Výrobce například uvádí, že má ze shora omezenou polarizační chybu¹ na dvě procenta, což je velmi příhodná vlastnost například u LCD monitorů, které využívají polarizačních filtrů. Jediným problémem, se kterým jsem se u tohoto přístroje setkal, je ten, že výrobce neuvádí způsob výpočtu souřadnic CIE $L^*a^*b^*$, kde ve vzorci (2), (3) a (4) je vidět, že transformace z CIE XYZ do tohoto prostoru je navíc závislá na pozici referenční bílé barvy. Pro jistotu jsem tedy ΔE_{00} pro daná měření barev počítal od CIE XYZ přes transformace podle vzorců (2), (3) a (4) a až z těchto získaných $L^*a^*b^*$ souřadnic jsem počítal ΔE_{00} . Brožura² k přístroji CS-2000 jinak obsahuje velmi detailní anglicky psané specifikace parametrů přístroje.

¹ Chyba v pozorovaném směru, která se mění se stavem polarizace přijímaných vln vzhledem k navržené rovině polarizace [55].

² https://sensing.konicaminolta.us/wp-content/uploads/cs-2000-2000a_instruction231g_eng-77j2p3b685.pdf



Obrázek 19: Spektro-radiometr CS-2000 (převzato z [56])

Monitory byly nastaveny na svůj maximální možný jas, aby se zamezilo vlivu parazitického osvětlení (pozice čistě bílé [255, 255, 255] v prostoru CIE $L^*a^*b^*$ byla pro OLED $L^* \approx 123 \text{ cd/m}^2$ a pro LCD $L^* \approx 106 \text{ cd/m}^2$).

94.28.13 1 11° 86% 37% 01 Dark Skin	241.148.108 2 18° 55% 95% 02 Light Skin	97.119.171 3 222° 43% 67% 03 Blue Sky	90.103.39 4 72° 62% 40% 04 Foliage	164.131.196 5 270° 33% 77% 05 Blue Flower	140.253.153 6 127° 46% 99% 06 Bluish Green
255.116.21 7 24° 92% 100% 07 Orange	7.47.122 8 219° 94% 48% 08 Purplish Blue	222.29.42 9 356° 87% 87% 09 Moderate Red	69.0.68 10 301° 100% 27% 10 Purple	187.255.19 11 77° 93% 100% 11 Yellow Green	255.142.0 12 33° 100% 100% 12 Orange Yellow
0.0.142 13 240° 100% 56% 13 Blue	64.173.38 14 108° 78% 68% 14 Green	203.0.0 15 0° 100% 80% 15 Red	255.217.0 16 51° 100% 100% 16 Yellow	207.3.124 17 324° 99% 81% 17 Magenta	0.148.189 18 193° 100% 74% 18 Cyan
255.255.255 19 0° 0% 100% 19 White	249.249.249 20 0° 0% 98% 20 Neutral 8	180.180.180 21 0° 0% 71% 21 Neutral 6.5	117.117.117 22 0° 0% 46% 22 Neutral 5	53.53.53 23 0° 0% 21% 23 Neutral 3.5	0.0.0 24 0° 0% 0% 24 Black

Obrázek 20: Macbeth digitální barevná paleta s barevnými čtverci s RGB souřadnicemi barev s čísly 1 až 24 (upraveno z [51])

Označení	Výrobce	Pokrytí sRGB	Rozlišení	Udávaný max jas	TYP
ATNA33TP11-0 ³	SAMSUNG	100 %	3840×2160	528 cd/m ²	OLED
ColorEdge CG242W ⁴	EIZO	100 %	1920×1200	270 cd/m ²	CCFL LCD

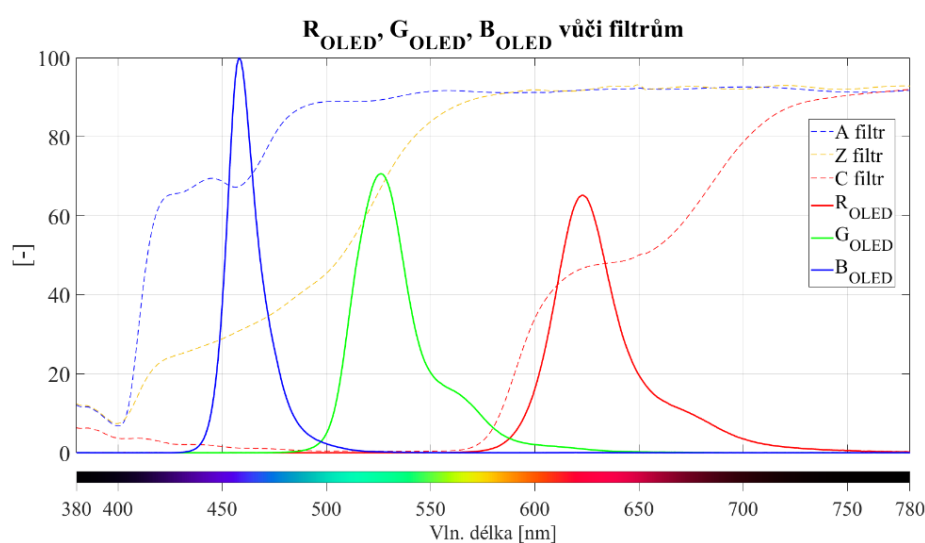
Tabulka 6: Základní informace a parametry k použitým displejům

³ https://www.eizoglobal.com/support/db/files/catalogs/ce/ColorEdge_DI_0903.pdf

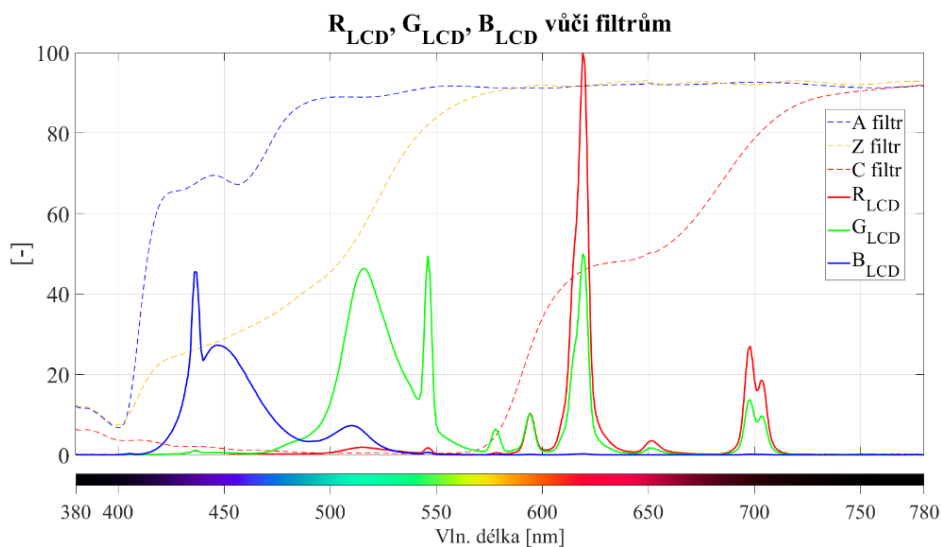
⁴ <https://laptopmedia.com/screen/samsung-atna33tp11-1/>

4.3.1 Porovnání spekter monitorů

Tato část zobrazuje spektra barevných kanálů monitorů (čistě červená, zelená a modrá barva) obou monitorů pro porovnání se spektrálními propustnostmi optických filtrů. Spektra monitorů bylo nutné normalizovat do rozměrů spekter filtrů z Obrázek 17, aby bylo možné křivky společně zobrazit, ovšem poměr mezi jednotlivými nefiltrovanými kanály R, G, B v rámci jednoho monitoru byl zachován. Normalizace spekter v rámci jednoho monitoru se uskutečnila tak, že byla nalezena maximální hodnota vyzařované intenzity (všech tří kanálů dohromady) a následně byly všechny hodnoty kanálů poděleny touto hodnotou (aby ta maximální hodnota byla rovna 1) a následně se jednotlivé hodnoty kanálů vynásobily 100. Takto budou hodnoty v rozmezí 0 až 100, což je stejné jako spektrální propustnosti optických filtrů.



Obrázek 21: OLED – R, G, B spektra vůči optickým filtrům



Obrázek 22: LCD – R, G, B spektra vůči optickým filtrům

Kanál:	R	G	B
OLED	38 %	35 %	27 %
LCD	26 %	48 %	26 %

Tabulka 7: Procentuální zastoupení intenzit kanálů vzhledem k jejich celkovému součtu

Hodnoty v Tabulka 7 byly získány prostým poměrem mezi součtem intenzit jednoho kanálu a celkovým součtem intenzit všech kanálů v rámci jednoho monitoru.

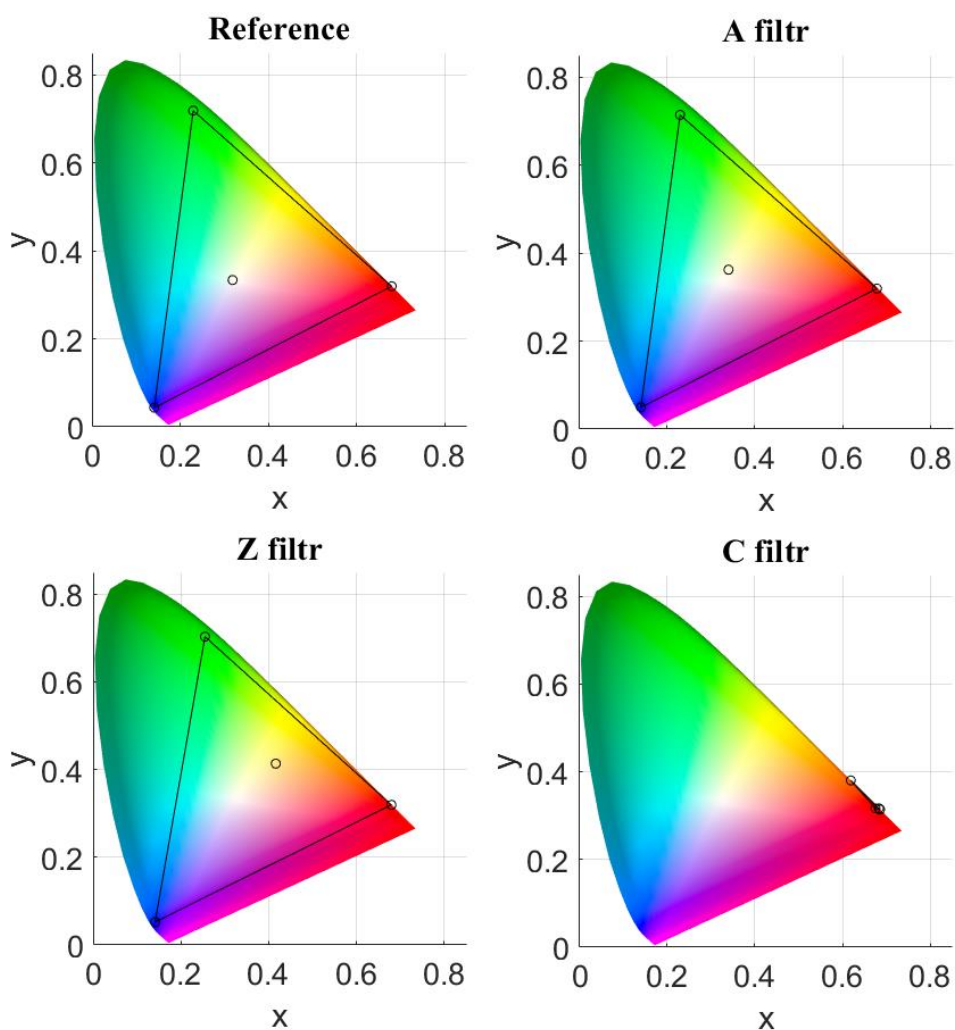
Z Obrázek 21 a Obrázek 22 je vidět rozdíl technologií OLED a LCD. OLED panel má v kanálech spíše úzkopásmové vyzařování narozdíl od LCD, kde jsou kanály široké a navzájem zasahují do svých spekter. Tento fakt by podle mě mohl svědčit o složitějším továrním softwarovém nastavení LCD displeje pro správné barevné reprezentace. Například při pohledu na spektrum čistě zelené u LCD (G_{LCD}) je tuto barvu nutno reprezentovat světlem azurového, zeleného a překvapivě i červeného spektra⁵ a výrazně slabším žlutým spektrem oproti OLED. Barevná reprezentace u LCD je tedy závislá na širším spektrálním pásmu, což by mohlo mít za příčinu výraznější omezení barevného gamutu při optické filtraci oproti OLED panelu. Podle Tabulka 7 má OLED nejsilnější červený kanál (R_{OLED}), na rozdíl od LCD, který má výrazně nejsilnější zelený (G_{LCD}).

Co se předpokládaných výsledků optické filtrace týče, tak u A filtru je vidět, že v oblasti mezi 450 až 500 nm má krátké snížení spektrální propustnosti navzdory obecnému charakteru své křivky. Tato prohlubeň pokrývá většinu B_{OLED} a je tedy i možné, že A filtr bude tedy u OLED panelu o něco efektivněji blokovat jeho spektrum vzhledem k ipRGC než u LCD. B_{LCD} se nachází o něco více v oblasti fialového světla, kde má většina filtrů vysokou blokaci (u A a Z filtrů jejich nejvyšší (viz Tabulka 4)). Je tedy pravděpodobné, že zkreslení u LCD způsobené Z filtrem bude znatelnější než u OLED, tedy i účinnost blokace vzhledem k ipRGC bude u LCD vyšší. C filtr (viz Tabulka 4) má opravdu silnou blokaci všude mimo červené světlo, a tedy nemá příliš význam diskutovat o rozdílu jeho vlivu na dané monitory. Zkreslení i efektivita vzhledem k ipRGC bude velmi vysoká u obou monitorů.

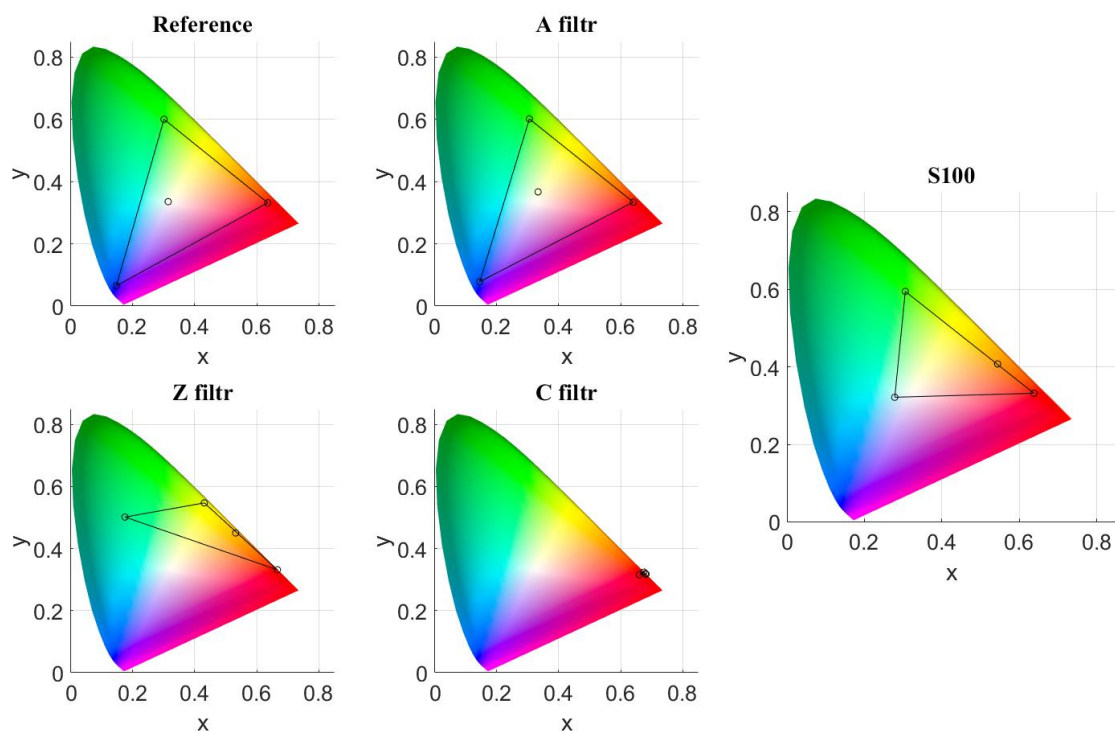
⁵ Při porovnání s [57] a zkontrolováním všech měřených vlivů filtrací na zelený kanál LCD jsem dospěl k názoru, že je tato vlastnost zcela v pořádku. Všechny filtrace zeleného kanálu u LCD měly v oblasti červené barvy podobný tvar.

4.3.2 Barevné gamuty monitorů a jejich změny při filtraci

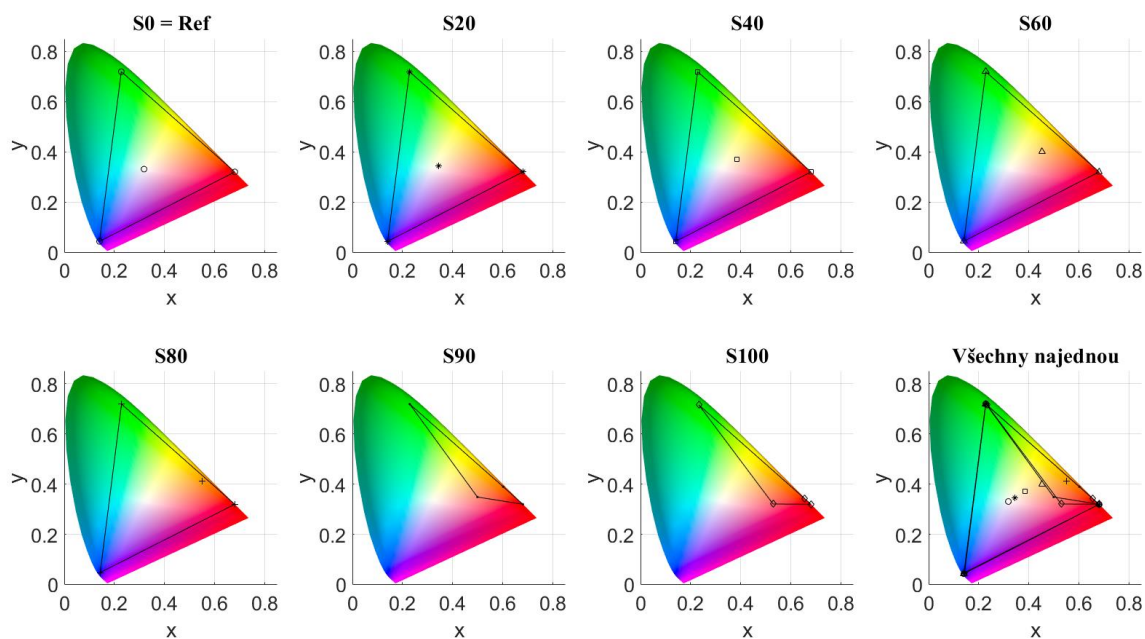
V této části jsou zobrazeny v diagramu chromatičnosti CIE xy gamuty zmíněných monitorů a jejich příslušných filtrací s optickými filtry. U OLED panelu je přidána filtrace S0, S20, S40, S60, S80, S90 a S100 a u LCD je softwarová filtrace také, ale jen S100. Hrany trojúhelníků jsou dány pozicemi čistě červené, zelené a modré barvy s příslušnou filtrací. Do grafů jsou navíc vloženy pozice čistě bílé [255, 255, 255] s příslušnou filtrací, naznačující svým posunem vůči referenci barevné zkreslení daného filtru.



Obrázek 23: OLED – gamut a jeho omezení optickou filtrací



Obrázek 24: LCD – gamut a jeho omezení optickou filtrací a S100 filtrací



Obrázek 25: OLED – gamut a jeho omezení S20, S40, S60, S80, S90 a S100 filtrací

	Filtrace:	Ref.	A	Z	C	S20	S40	S60	S80	S90	S100
Pokrytí sRGB [%]	OLED	100	100	100	0	100	100	100	100	13	13
	LCD	97	94	19	0	-	-	-	-	-	44

Tabulka 8: Pokrytí prostoru (formátu) sRGB filtrovanými gamuty LCD a OLED

Pokrytí prostoru sRGB danými filtrovanými gamuty bylo spočítáno podle vzorce:

$$Pokrytí = \left(\frac{vol\{\Delta_{sRGB} \cap \Delta_i\}}{vol\{\Delta_{sRGB}\}} \right) \cdot 100 [\%], \quad (11)$$

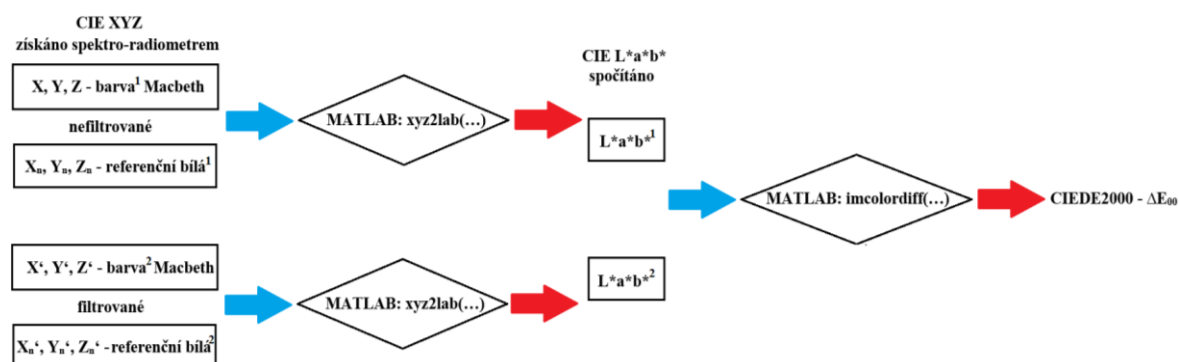
kde Δ_{sRGB} je prostor sRGB, Δ_i je gamut i -té filtrace monitoru, kde index $i \in \{\text{Ref, A, Z, C, S20, S40, S60, S80, S90 a S100}\}$ značí typ použité filtrace (nebo nefiltrované reference) a $vol\{-\}$ je operátor objemu (v CIE xy se jedná o plochy trojúhelníků).

Na barevných diagramech Obrázek 23, Obrázek 24 a Obrázek 25 je vidět dle Obrázek 21 a Obrázek 22, že omezení gamutů monitorů způsobené filtrací A brýlemi je zcela minimální, a vzhledem k pozici bílé dochází k nejslabšímu zkreslení u obou monitorů. U Z brýlí je omezení (dle předpokladu viz 4.3.1) výraznější u LCD monitoru. U C brýlí je omezení i zkreslení největší.

U softwarové filtrace s OLED monitorem je zajímavé, že posunem bílé je mezi jednotlivými úrovněmi vidět pravidelný průběh zkreslení, ale gamut se výrazně omezí až přechodem mezi 80 a 90 % filtrace.

4.3.3 Barevné rozdíly testovacího obrazce na monitorech

V této kapitole jsou zobrazeny vypočtené metriky barevného rozdílu CIEDE2000 - ΔE_{00} pomocí integrované metody v prostředí Matlab `imcolordiff()`. Jak už bylo řečeno v 4.3, měřením spektrometru byly sice získány potřebně souřadnice barev $L^*a^*b^*$, ale nebylo uvedeno, jaký referenční bílý bod k tomu byl použit. Proto zde byla metrika CIEDE2000 počítána pomocí změřených filtrovaných (resp. referenčních) souřadnic X, Y, Z barev Macbeth a změřených příslušně filtrovaných (resp. referenčních) souřadnic X_n, Y_n, Z_n čistě bílé barvy. Tato metrika je spočítána u barev zmíněného testovacího obrazce (viz Obrázek 20) se všemi optickými filtry a S100 pro oba monitory. Pro úroveň softwarové filtrace u OLED panelu je barevný rozdíl počítán jen pro čistě červenou (R), zelenou (G) a modrou (B).



Obrázek 26: Schéma výpočtu CIEDE2000

Číselné výsledky metrik jsou pro ΔE_{00} barevně označeny následujícím způsobem:

- zelená hodnota se zeleným pozadím: $0 \leq \Delta E_{00} < 6$ od těžko zpozorovatelné až zpozorovatelné,
- žlutá hodnota se žlutým pozadím: $6 \leq \Delta E_{00} < 12$ uspokojivé,
- červená hodnota s červeným pozadím: $12 \leq \Delta E_{00} < 24$ výrazné,
- černá hodnota s šedým pozadím: $24 \leq \Delta E_{00} < \infty$ velmi výrazné.

Tento způsob hodnocení je mírně upraven z [52], kde jsem první čtyři míry sloučil do jedině, protože prvních tří úrovně zkreslení (těžko zpozorovatelné, mírně zpozorovatelné a zpozorovatelné) dosahuje poměrně málo hodnot.

$\Delta E_{\min}(k)$	$\Delta E_{\max}(k)$	Perception of color difference
0.0	0.5	Hardly
0.5	1.5	Slight
1.5	3.0	Noticeable
3.0	6.0	Appreciable
6.0	12.0	Much
12.0	24.0	Very much
24.0	∞	Strongly

Obrázek 27: Subjektivní hodnocení číselné metriky barevného rozdílu CIEDE2000 (převzato z [52])

Dále pak pro konkrétní měření spočítáno procentuální snížení reakce vůči citlivosti ipRGC (viz Obrázek 13) podle vzorce:

$$Filtr_{ipRGC}(i) = \left(1 - \frac{\langle W_i(\lambda) | ipRGC(\lambda) \rangle}{\langle W_{ref}(\lambda) | ipRGC(\lambda) \rangle} \right) \cdot 100 [\%], \quad (12)$$

kde index $i \in \{A, Z, C, S100\}$ podle typu filtru, $W_i(\lambda)$ je vektor změřeného spektra i -té filtrace čistě bílé barvy monitoru, $W_{ref}(\lambda)$ je vektor spektra nefiltrované bílé, $ipRGC(\lambda)$ je vektor křivky Obrázek 13 a operátor $\langle | \rangle$ je standardní skalární součin.

Metrika	Obrázek:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔE_{00}	A	1,3	1,2	3,6	1,2	2,5	1,4	2,2	4,7	1,3	1,3	1,4	2,4	5,5	1,1
	Z	3,0	3,6	8,1	3,3	4,8	2,4	4,2	12,7	5,8	3,1	5,2	6,1	16,8	1,5
	C	23,5	35,0	9,7	36,7	8,8	31,1	42,7	7,3	45,7	21,6	47,3	44,4	53,6	50,0
	S100	13,7	14,2	9,3	32,5	19,5	32,6	22,7	10,6	39,2	33,5	45,7	17,7	12,0	52,3
Metrika	Obrázek:	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Průměr	Medián	Nárůst průměru	
ΔE_{00}	A	1,6	2,5	1,3	3,7	2,3	2,6	2,3	2,0	1,5	1,7	2,2	1,8	/	
	Z	6,2	8,0	5,1	9,2	5,0	5,0	4,6	3,8	2,9	2,2	5,5	4,9	3 krát	
	C	49,3	32,7	43,1	48,1	2,0	16,3	12,8	14,7	13,6	23,7	29,7	31,9	14 krát	
	S100	41,7	24,9	50,3	28,9	1,9	2,0	2,9	2,9	2,2	3,2	21,5	18,6	10 krát	

Tabulka 9: OLED – ΔE_{00} s Macbeth pro optické filtry a S100

	A	Z	C	S100
Snížení reakce vzhledem k citlivosti ipRGC [%]	29	61	100	97

Tabulka 10: OLED – snížení reakce spektrální citlivosti ipRGC, optické filtry a S100

Metrika	Obrazec:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔE_{00}	A	1,3	2,2	2,7	1,4	2,1	0,3	3,2	4,0	0,7	1,5	2,2	3,6	5,0	1,4
	Z	6,3	9,0	9,9	13,2	9,7	10,0	15,8	12,9	6,3	9,1	19,1	20,1	18,5	18,6
	C	20,1	15,2	13,4	31,1	10,9	25,7	25,8	9,0	31,6	18,0	46,5	19,2	54,2	27,0
	S100	17,9	15,3	12,3	22,1	14,6	10,5	32,7	11,5	13,0	11,3	28,5	32,2	11,1	26,7
Metrika	Obrazec:	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Průměr	Medián	Změna průměru	
ΔE_{00}	A	0,9	3,6	0,5	2,6	0,6	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	1,7	1,4	/	
	Z	6,6	22,2	10,4	7,7	6,0	5,1	5,8	4,7	3,7	3,4	10,6	9,4	6 krát	
	C	40,9	21,6	33,9	21,8	8,1	1,3	7,5	10,7	11,1	21,2	21,9	20,6	12 krát	
	S100	17,5	35,2	16,6	15,3	4,5	3,0	1,5	2,5	4,1	8,4	15,4	13,8	9 krát	

Tabulka 11: LCD – ΔE_{00} s Macbeth a R, G, B pro optické filtry a S100

	A	Z	C	S100
Snížení reakce vzhledem k citlivosti ipRGC [%]	22	87	100	70

Tabulka 12: LCD – snížení reakce spektrální citlivosti ipRGC, optické filtry a S100

Metrika	Barva:	R	G	B	Průměr	Medián	Nárůst průměru
ΔE_{00}	S20	2,6	1,4	4,2	2,7	2,6	/
	S40	6,2	4,1	11,7	7,3	6,2	3 krát
	S60	11,7	9,1	24,5	15,1	11,7	6 krát
	S80	20,9	25,0	46,3	30,8	25,0	11 krát
	S90	27,0	49,5	30,1	35,5	30,1	13 krát
	S100	39,7	71,1	28,2	46,3	39,7	17 krát

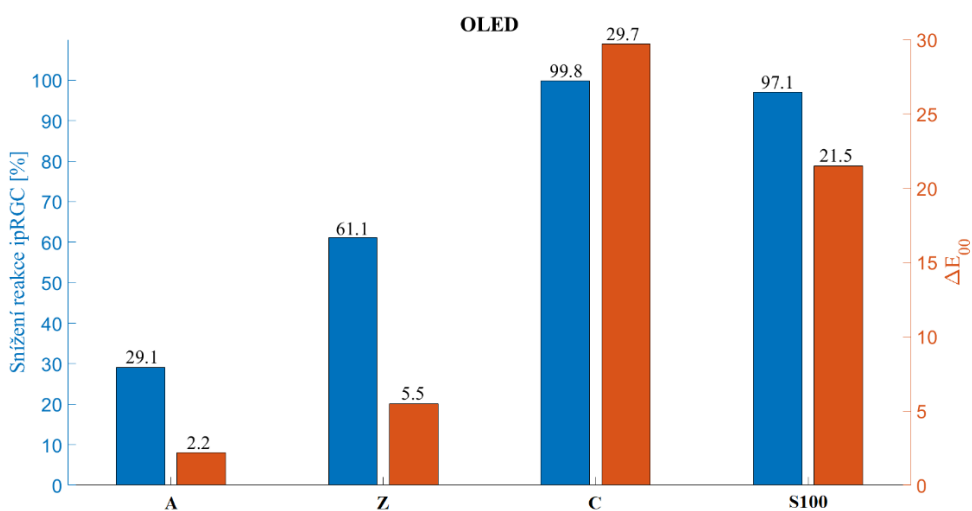
Tabulka 13: OLED - ΔE_{00} s R, G, B, W pro úroveň softwarové filtrace Win10

	S20	S40	S60	S80	S90	S100
Snížení reakce vzhledem k citlivosti ipRGC [%]	19	42	66	85	92	97

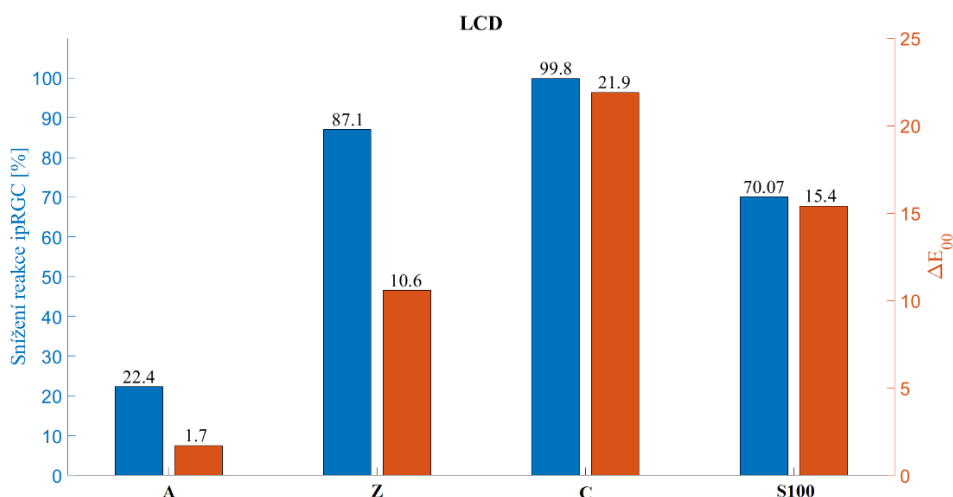
Tabulka 14: OLED – snížení reakce spektrální citlivosti ipRGC, úroveň softwarového filtru

Z Tabulka 9, Tabulka 10, Tabulka 11 a Tabulka 12 je patrné, že předpoklady (viz 4.3.1) byly správné. Filtrace A filtrem má o 7 % větší účinnost vzhledem k ipRGC u OLED panelu. Filtrace Z filtrem je vůči ipRGC efektivnější u LCD monitoru (o 26 %), protože jeho modrý kanál se nachází v oblasti větší spektrální blokace tohoto filtru oproti OLED. C filtr má blokaci téměř stoprocentní na širokém spektrálním pásmu (viz Obrázek 17), takže u obou monitorů je vzhledem k ipRGC stejně efektivní. Tyto monitory mají však tuto procentuální hodnotu docela jinou pro filtraci S100, a to z důvodu rozdílů technologie těchto panelů. OLED má každý barevný subpixel (R, G a B) s vlastním podsvícením na rozdíl od LCD, které má jeden společný panel podsvícení pro všechny pixely a jejich jednotlivé subpixely jsou pouze filtry, které mění s napětím svoji spektrální propustnost. Tento fakt způsobuje, že pokud bychom chtěli u OLED panelu zcela zrušit modrý kanál (softwarová filtrace), tak se pouze vypne podsvícení těchto modrých subpixelů a skutečně bychom tím dosáhli úplného odfiltrování modrého kanálu. U LCD však podsvícení zůstává a spektrální propustnost subpixelů nemůže být při maximu dokonale nepropustná, a tak malé množství světla pronikne i skrze ty modré.

U OLED panelu přibližně odpovídá procentuální nastavení režimu nočního osvětlení snížení reakce vzhledem k citlivosti ipRGC. Tento výsledek znamená, že uživatelé OLED panelu prakticky nepotřebují žádné optické filtry, protože si je tímto nastavením mohou snadno nahradit, a to i efektivněji, protože průměrné barevné zkreslení způsobené S100 filtrem je o něco nižší než u C filtru. Ovšem obě tyto hodnoty už jsou v oblasti výrazného zkreslení.



Obrázek 28: OLED – porovnání průměrného ΔE_{00} a snížení reakce ipRGC



Obrázek 29: LCD – porovnání průměrného ΔE_{00} a snížení reakce ipRGC

Filtr:	A	Z	C	S100
OLED	13,2	11,1	3,4	4,5
LCD	13,2	8,2	4,6	4,6

Tabulka 15: Poměr snížení citlivosti vzhledem k ipRGC a průměrného zkreslení ΔE_{00} pro dané filtrace u obou monitorů s přidanou barevnou škálou

4.3.4 Simulace úrovně softwarové filtrace u OLED panelu

V této kapitole je simulován vliv úrovně softwarové filtrace (S20, S40, S60, S80, S90 a S100) u OLED panelu na barvách Macbeth, a následně jsou pro tato simulovaná zkreslení vypočítány barevné rozdíly metrikou CIEDE2000 od jejich příslušných referenčních barev. Následně jsou výsledky simulovaných barevných rozdílů normalizovány tak, aby hodnoty ΔE_{00} jednotlivých barev Macbeth pro S100 (simulace) odpovídaly hodnotám ΔE_{00} z Tabulka 9 pro S100, které je měřené (viz 4.3.3).

Simulace jednotlivých úrovní filtrace pro kanály R, G a B je určeno podle vzorce:

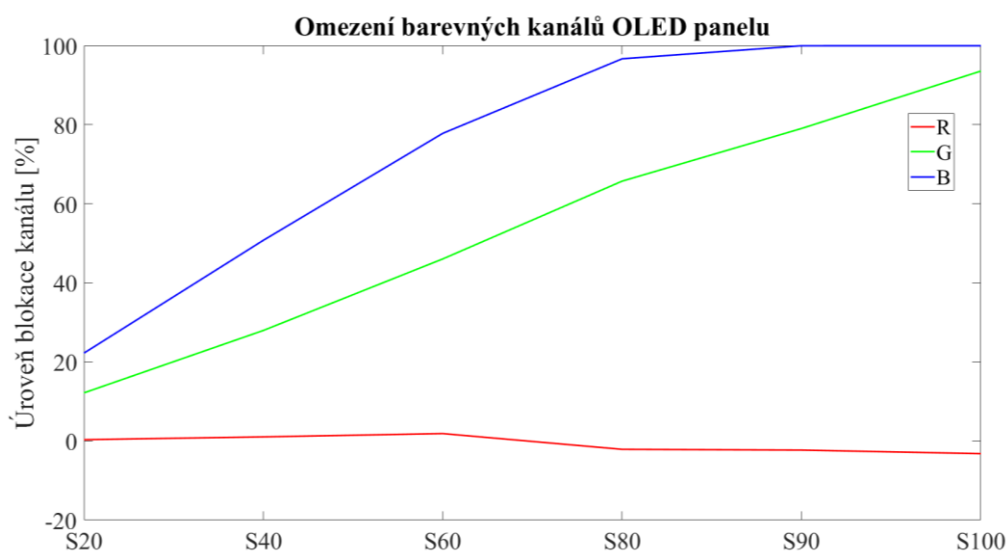
$$Blokace(x\%)_{i\text{-kanál}} = \left(1 - \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} i_x(\lambda)}{\sum_{\lambda=380}^{780} i_{ref}(\lambda)} \right) \cdot 100 [\%], \quad (13)$$

kde $x \in \{20, 40, 60, 80, 90, 100\}$ je úroveň měřené softwarové blokace, $i \in \{R, G, B\}$ značí daný kanál, $i_x(\lambda)$ je změřené spektrum i -tého kanálu pro $x\%$ blokaci a $i_{ref}(\lambda)$ značí referenční změřené spektrum i -tého kanálu. $Blokace(x\%)_{i\text{-kanál}}$ tedy říká, o kolik procent se musí snížit i -tý referenční kanál, aby bylo docíleno $x\%$ blokace softwarového filtru.

Úroveň software filtru	20%	40%	60%	80%	90%	100%
R	0,3	1,0	1,9	-2,1	-2,3	-3,2
G	12,2	27,9	46,0	65,7	79,0	93,5
B	22,2	50,7	77,8	96,6	99,9	99,9

Tabulka 16: Procentuální snížení R, G, B kanálů k aproximaci softwarové filtrace

Záporné hodnoty Tabulka 16 znamenají, že by se měl kanál zesílit (př.: -3,2 značí zesílení o 3,2 %).



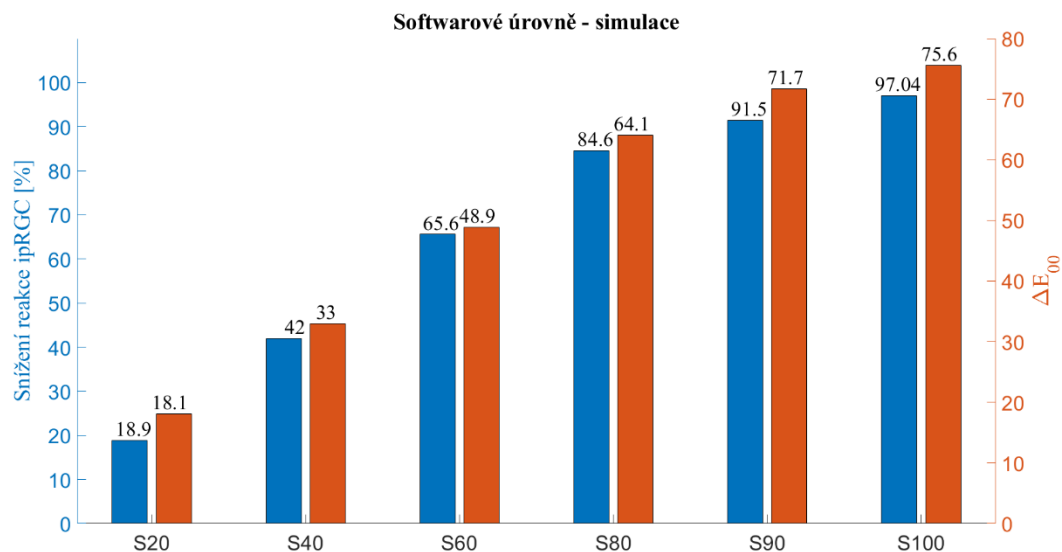
Obrázek 30: Procentuální snížení R, G, B kanálů k aproximaci softwarové filtrace - grafické znázornění Tabulka 16

Metrika	Barva:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔE_{00}	S20	1,4	5,7	17,4	13,7	25,3	9,3	6,6	12,8	3,4	11,4	9,2	11,1	14,1	7,3
	S40	3,1	12,1	62,9	39,9	54,0	24,3	13,5	39,6	6,5	30,3	26,6	22,8	38,7	18,3
	S60	4,9	18,0	91,1	81,5	72,8	49,1	19,5	60,9	7,9	52,6	63,0	32,6	75,5	34,5
	S80	5,1	22,6	89,2	122,1	72,6	108,6	23,2	103,3	8,1	61,3	121,3	38,9	122,8	65,1
	S90	5,5	24,6	88,7	134,0	71,0	151,9	24,5	114,8	8,0	61,4	142,0	41,0	138,2	116,3
	S100	5,6	25,3	88,6	138,3	70,1	170,9	25,1	117,0	8,1	61,4	149,8	41,9	138,3	160,8
Metrika	Barva:	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24*	Průměr	Medián	Nárůst průměru	
ΔE_{00}	S20	0,2	18,9	12,1	19,1	43,5	43,5	43,1	42,5	40,7	22,9	18,1	13,2	/	
	S40	0,6	45,8	30,7	60,6	45,9	45,9	45,8	45,5	44,7	33,9	33,0	36,3	2 krát	
	S60	1,1	72,3	46,1	103,7	49,3	49,3	49,2	49,1	48,6	41,3	48,9	49,1	3 krát	
	S80	1,2	90,4	50,0	124,1	52,8	52,3	52,2	52,1	51,8	46,2	64,1	52,5	4 krát	
	S90	1,3	96,0	50,1	132,2	54,6	54,0	53,9	53,8	53,5	48,5	71,7	54,3	4 krát	
	S100	1,8	98,2	50,1	141,0	55,5	54,8	54,5	54,4	54,1	49,4	75,6	55,1	4 krát	

Tabulka 17: OLED – ΔE_{00} s Macbeth pro simulované softwarové filtrace daných úrovní

V Tabulka 17 byly pro výpočty použity stejné barvy testovacího obrazce Macbeth (viz Obrázek 20), krom čistě černé [0, 0, 0] (barva č. 24). Místo té jsem použil černou (24*)

s úmyslně přidanou aditivní chybou [3, 3, 3], protože filtrace podle Tabulka 16 by s nulovými hodnotami kanálů čistě černé nic neudělaly.

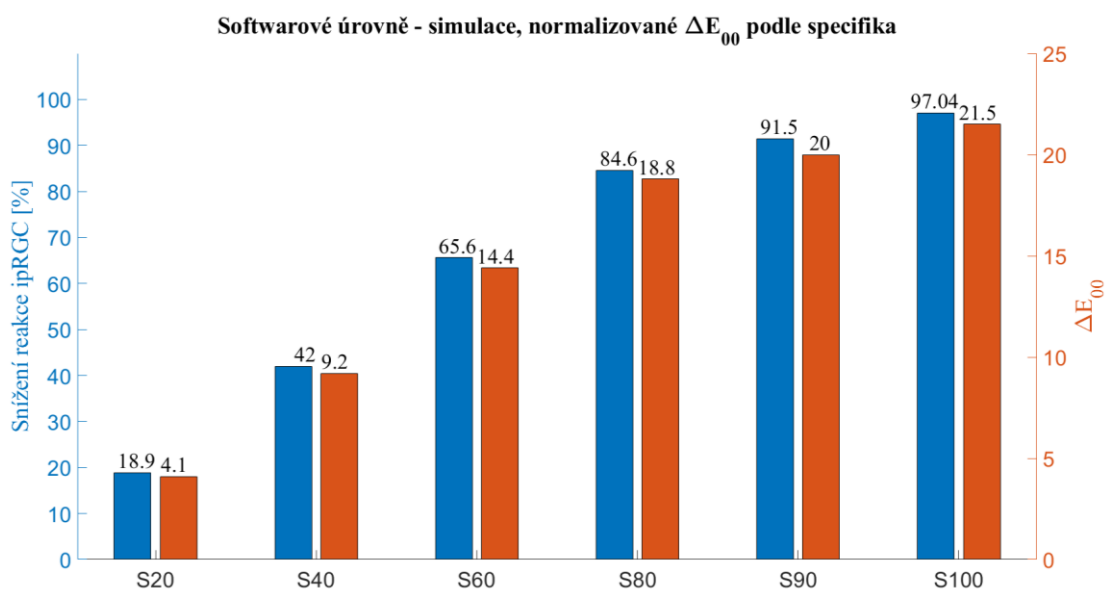


Obrázek 31: OLED – simulace úrovně software filtru – porovnání průměrného ΔE_{00} a snížení reakce ipRGC

Z porovnání průměrné hodnoty metriky CIEDE2000 Tabulka 9 a Tabulka 17 pro S100 filtraci je vidět, že si výsledky neodpovídají. U simulace je průměrné ΔE_{00} mnohem vyšší. Ovšem poměr mezi jednotlivými úrovněmi zkreslení by měl být zachován. Tedy by stačilo vynásobit jednotlivé sloupce (CIEDE2000 daných barev) Tabulka 17 tak, aby poslední úroveň S100 odpovídala měřeným výsledkům z Tabulka 9 pro S100.

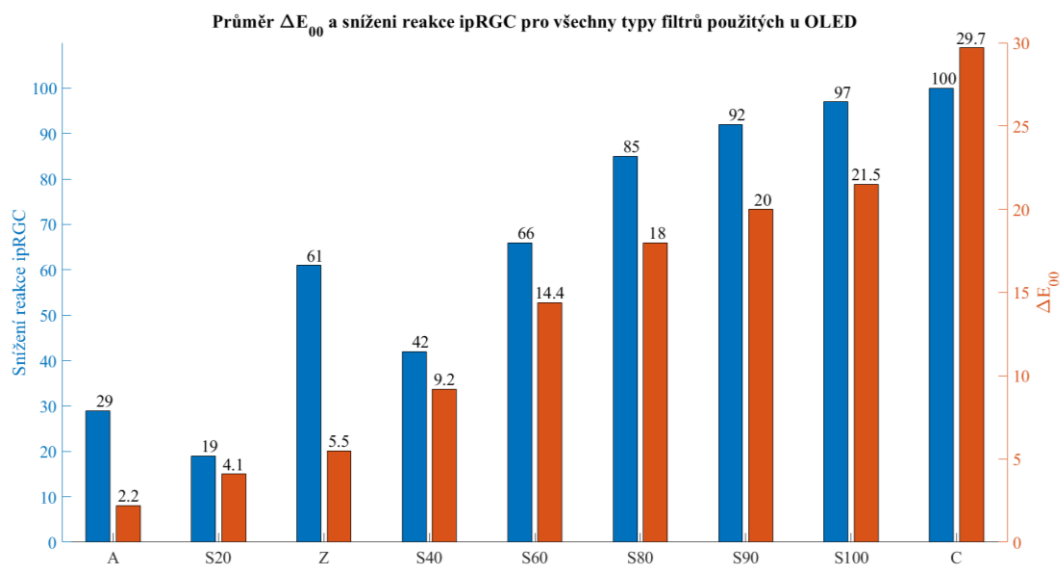
Metrika	Barva:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ΔE_{00}	20%	3,5	3,2	1,8	3,2	7,0	1,8	6,0	1,2	16,2	6,2	2,8	4,7	1,2	2,4
	40%	7,7	6,8	6,6	9,4	15,0	4,6	12,3	3,6	31,3	16,6	8,1	9,6	3,4	6,0
	60%	12,0	10,1	9,6	19,2	20,2	9,3	17,6	5,5	38,4	28,7	19,2	13,8	6,6	11,2
	80%	12,6	12,7	9,4	28,7	20,2	20,7	21,0	9,4	39,1	33,5	37,0	16,5	10,7	21,2
	90%	13,6	13,8	9,3	31,5	19,7	28,9	22,2	10,4	38,9	33,6	43,3	17,4	12,0	37,8
	100%	13,7	14,2	9,3	32,5	19,5	32,6	22,7	10,6	39,2	33,5	45,7	17,7	12,0	52,3
Metrika	Barva:	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	Průměr	Medián	Nárůst průměru	
ΔE_{00}	20%	2,5	1,1	0,3	0,9	1,4	1,1	6,3	0,7	43,6	5,5	4,1	3,0	/	
	40%	8,6	1,8	0,2	0,8	2,0	0,3	5,4	0,1	78,6	3,4	9,2	7,2	2	
	60%	18,9	3,8	0,7	2,2	4,2	0,9	11,1	0,3	151,5	9,1	14,4	11,6	4	
	80%	29,6	5,7	1,0	4,5	5,6	1,8	15,9	0,5	185,7	15,7	18,0	18,3	4	
	90%	31,1	7,1	1,0	6,8	5,6	3,9	19,0	0,8	189,1	18,3	20,0	18,5	5	
	100%	33,5	7,7	1,0	7,4	5,5	5,5	20,1	0,9	188,3	18,3	21,5	18,6	5	

Tabulka 18: OLED – ΔE_{00} s Macbeth pro simulované softwarové filtrace daných úrovně filtrace, normalizováno



Obrázek 32: OLED – simulace úrovně software filtru – porovnání průměrného ΔE_{00} a snížení reakce ipRGC, normalizováno

Data z Obrázek 32 mohou teď porovnat s daty z Obrázek 28 a získám tím porovnání všech použitých typů filtrací na OLED panelu (jejich snížení reakce ipRGC a průměrného zkreslení CIEDE2000).



Obrázek 33: Srovnání účinností všech použitých filtrací na OLED panelu

Filtr	A	Z	S20	S40	S60	S80	S90	S100	C
Poměr [-]	13,18	11,09	4,63	4,56	4,58	4,72	4,6	4,51	3,36

Tabulka 19: Poměr snížení reakce ipRGC a průměrného ΔE_{00} všech filtrů na OLED panelu

Jeden z poznatků podle Tabulka 19 a Obrázek 33 je například to, že S100 filtr dosahuje dokonce o něco lepších výsledků, co se průměrného zkreslení týče než C filtr. Ten mu zde přirozeně konkuruje, protože se jedná o filtry s velmi vysokou efektivitou blokace vzhledem k ipRGC. Narozdíl od C brýlí si ostatní optické filtry vedou svými poměry (viz Tabulka 19) nejlépe ze všech. I přesto by dle mého názoru mohla být softwarová filtrace, alespoň tedy u OLED panelu, efektivní náhradou optické filtrace, už jen proto, že jí má většina lidí na svém počítači integrovanou díky OS Windows, a také proto, že softwarovou filtrací u OLED panelu je díky jeho technologii zaručena dokonalá blokace modrého světla.

V kapitole 4 byl tedy porovnán vliv A, Z, C a S100 filtrací na monitorech OLED a LCD. Bylo zjištěno, že vliv filtrace se může zásadně lišit, a to jak na průměrném barevném zkreslení, tak na efektivitě vzhledem k ipRGC, protože monitory vytvářejí barevné reprezentace zcela odlišným spektrálním vyzařováním. Dále byl porovnán vliv těchto filtrací na barevné gamuty zobrazovačů, kde se ukázalo, že OLED byl vůči omezení gamutu vlivem filtrace odolnější než LCD (vzhledem k sRGB). V poslední části této kapitoly byly simulovány úroňové softwarové filtrace, které byly upraveny a porovnány s měřenými výsledky u OLED panelu. Sice si softwarová filtrace poměrem snížení reakce ipRGC a průměrného barevného zkreslení na Macbeth nevedla nejlépe, ale S90 a S100 úroň měly prakticky 100 % snížení reakce vzhledem k ipRGC stejně jako C filtr, ale přitom vykazovaly mnohem nižší zkreslení než on, tudíž by mohly tento filtr lépe nahradit.

5 Závěr

V první části práce (Kapitola 2) byl podán přehled současného stavu poznání o škodlivosti modrého světla. Shrnutí ukázalo, že negativní vliv modrého světla je úzce spojen s citlivostí melanopsinu (světlocitlivého pigmentu gangliových buněk sítnice) právě na vlnové délky modrého světla. Tento pigment nacházející se ve ipRGC, reaguje na přítomnost modré složky světla snížením produkce hormonu melatoninu, jehož deficit způsobuje spánkové poruchy a vyvolává v organismu další, mnohem nebezpečnější onemocnění (např. rakovinu, obezitu, cukrovku). Z hlediska fotochemického poškození sítnice (fotoretinitida) bylo zjištěno, že modré světlo skutečně takové onemocnění způsobovat může (poškozením Müllerových buněk), ale to bylo prokázáno zatím jen u laboratorních zvířat, nikoliv u člověka. O riziku vzniku fotoretinitidy pro různé vlnové délky světla vypovídá BLH funkce. Na základě předchozích zjištění práce popisuje (viz 2.3) a aproximuje křivku citlivosti ipRGC (viz 4.1). Použitím dat této křivky práce stanovuje efektivitu daných typů filtrací a tím navrhuje metodiku hodnocení efektivity filtrace v Kapitole 4, kde je tato efektivita porovnávána s průměrnou hodnotou metriky CIEDE2000 na barvách Macbeth u daných typů zobrazovačů.

V další části se práce zabývá porovnáním vlivů světelné filtrace tří komerčně prodávaných optických filtrů a softwarové filtrace (nastavené na 100 %) na dvou typů monitorů (OLED a LCD) a také vlivů úrovní softwarových filtrací, ale jen pro OLED panel. Tento vliv byl hodnocen pomocí počítání průměrného barevného zkreslení na testovacím obrazci Macbeth, a stanovení efektivity filtrace vzhledem ke křivce citlivosti ipRGC.

Jeden z výsledků analýzy dokazuje, že vliv dané filtrace je silně závislý na typu monitoru. Ačkoli mají optické filtry jen jednu svou změřenou spektrální propustnost, tak efektivita jejich filtrace vzhledem k ipRGC je velmi závislá na typu monitoru a jeden filtr nemá stejné výsledky pro oba monitory. Pro OLED například vyšla efektivita vyšší pro A filtr a u LCD zase pro Z filtr, a to z důvodů rozdílů spektrálního vyzařování LCD a OLED, tedy konkrétně na pozici a intenzitě modrého kanálu ve spektru daného zobrazovače.

Dalším cílem práce bylo znázornění omezení gamutů monitorů způsobené použitými filtracemi. Toto bylo i zobrazeno změnou pokrytí prostoru sRGB. Ukázalo se, že u OLED většina ze softwarových a optických filtrací zachovává 100 % pokrytí sRGB, což by mohlo přinášet vhodné zázemí pro kompenzace barevného zkreslení těchto filtrací. Omezení gamutů filtracemi bylo výraznější u LCD panelu.

Posledním cílem práce bylo na základě měření omezení barevných kanálů OLED pro úroňové softwarové filtrace simulovat vliv těchto filtrací na barvách Macbeth. Výsledky této simulace byly normalizovány tak, aby se daly porovnat s měřenými výsledky filtrů. Tím bylo

získáno u OLED porovnání všech filtrací (A, Z, C, S20, S40, S60, S80, S90 a S100). Ukázalo se, že u tohoto monitoru dosahuje softwarová filtrace obstojných výsledků poměru efektivity vzhledem k ipRGC v porovnání s průměrným zkreslením u zbytku filtrů. Tyto softwarové filtrace mohou tedy u OLED sloužit jako velmi účinný nástroj blokace modrého světla, a to také proto, že procentuální nastavení tohoto filtru přibližně značí procentuální snížení citlivosti vzhledem k ipRGC, což je velmi praktické.

Rozšířením této práce by mohlo být další následné měření pro další filtry (optické a softwarové filtry třeba jiných OS a softwarové filtrace v samotných nastaveních monitorů) na jiných typech monitorů. Hlavní možností rozšíření práce by bylo zaměření se na kompenzace barevného zkreslení způsobeného optickými a softwarovými filtracemi [30], [53] pro různé zobrazovače.

Použitá literatura

- [1] KASSIN, Saul M. *Psychologie*. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1716-3. S. 131–132.
- [2] OH, Ji Hye, et al. Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night. *Scientific reports*, 2015, 5.1: 1-9.
- [3] Melatonin supplementation for sleep? Research into side effects, dosage, benefits & more | Examine.com. Independent Analysis on Supplements & Nutrition | Examine.com [online]. Copyright © 2011 [cit. 14.05.2022].
Dostupné z: <https://examine.com/supplements/melatonin/>
- [4] WEST, Kathleen E., et al. Blue light from light-emitting diodes elicits a dose-dependent suppression of melatonin in humans. *Journal of applied physiology*, 2011.
- [5] WALSH, C. M., et al. Blue light from light-emitting diodes directed at a single eye elicits a dose-dependent suppression of melatonin in horses. *The Veterinary Journal*, 2013, 196.2: 231-235.
- [6] STEVENS, Richard G., et al. Adverse health effects of nighttime lighting: comments on American Medical Association policy statement. *American journal of preventive medicine*, 2013, 45.3: 343-346.
- [7] CALVO-SANZ, Jorge A.; TAPIA-AYUGA, Carlos E. Blue light emission spectra of popular mobile devices: the extent of user protection against melatonin suppression by built-in screen technology and light filtering software systems. *Chronobiology International*, 2020, 37.7: 1016-1022.
- [8] ZAIDI, Farhan H., et al. Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. *Current biology*, 2007, 17.24: 2122-2128.
- [9] CAJOCHEN, Christian, et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The journal of clinical endocrinology & metabolism*, 2005, 90.3: 1311-1316.
- [10] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Journal Světlo*, 2010, 56-58.
- [11] CINZANO, Pierantonio; FALCHI, Fabio; ELVIDGE, Christopher D. The first world atlas of the artificial night sky brightness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2001, 328.3: 689-707.
- [12] NAVARA, Kristen J.; NELSON, Randy J. The dark side of light at night: physiological, epidemiological, and ecological consequences. *Journal of pineal research*, 2007, 43.3: 215-224.
- [13] BRIGGS, Winslow R. Physiology of plant responses to artificial lighting. *Ecological consequences of artificial night lighting*, 2006, 389-411.

- [14] KLOOG, Itai, et al. Light at night co-distributes with incident breast but not lung cancer in the female population of Israel. *Chronobiology international*, 2008, 25.1: 65-81.
- [15] STEVENS, Richard G. Testing the light-at-night (LAN) theory for breast cancer causation. *Chronobiology international*, 2011, 28.8: 653-656.
- [16] HANKINS, Mark W.; PEIRSON, Stuart N.; FOSTER, Russell G. Melanopsin: an exciting photopigment. *Trends in neurosciences*, 2008, 31.1: 27-36.
- [17] FALCHI, Fabio, et al. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of environmental management*, 2011, 92.10: 2714-2722.
- [18] VIOLA, Antoine U., et al. Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian journal of work, environment & health*, 2008, 297-306.
- [19] KURLANSIK, Stuart L.; IBAY, Annamarie D. Seasonal affective disorder. *American family physician*, 2012, 86.11: 1037-1041.
- [20] BLEHAR, Mary C.; ROSENTHAL, Norman E. Seasonal affective disorders and phototherapy: report of a National Institute of Mental Health—sponsored workshop. *Archives of general psychiatry*, 1989, 46.5: 469-474.
- [21] BRINGMANN, Andreas; WIEDEMANN, Peter. Müller glial cells in retinal disease. *Ophthalmologica*, 2012, 227.1: 1-19.
- [22] BERNARDOS, Rebecca L. Late-Stage Neuronal Progenitors in the Retina Are Radial Muller Glia That Function as Retinal Stem Cells
Dostupné z: <https://www.jneurosci.org/content/27/26/7028.long>.
- [23] Lidské oko – Wikipedie. [online].
Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lidsk%C3%A9_oko
- [24] OliNo » Blog Archive » Blue light hazard for the human eye. 302 Found [online].
Dostupné z: <http://www.olino.org/blog/us/articles/2011/09/13/blue-light-hazard-for-the-human-eye>
- [25] IANDIEV, Ianors, et al. Muller cell response to blue light injury of the rat retina. *Investigative ophthalmology & visual science*, 2008, 49.8: 3559-3567.
- [26] Světlo: Elektromagnetické vlnění, spektrum a fotony (článek) | Khan Academy. Khan Academy | Bezplatné online kurzy, lekce a cvičení [online]. Copyright © 2022 Khan Academy [cit. 01.01.2022]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecnachemie/xfed2aace53b0e2de:atomy-a-jejich-vlastnosti/xfed2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- [27] MAUSFELD, Rainer; HEYER, Dieter (ed.). *Colour perception: Mind and the physical world*. Oxford University Press, 2003.

- [28] COLIBAN, Radu-Mihai, et al. Linear and non-linear models for remotely-sensed hyperspectral image visualization. *Remote Sensing*, 2020, 12.15: 2479.
- [29] DANNHOFFEROVÁ, Jana. *Velká kniha barev. Kompletní průvodce pro grafiky*, 2012.
- [30] SHIH, Kuang-Tsu, et al. Blocking harmful blue light while preserving image color appearance. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2016, 35.6: 1-10.
- [31] JOHANSEN, Villads Egede; ANDKJÆR, Jacob; SIGMUND, Ole. Design of structurally colored surfaces based on scalar diffraction theory. *JOSA B*, 2014, 31.2: 207-217.
- [32] POYNTON, Charles A. A guided tour of colour space. In: *New Foundation for Video Technology: The SMPTE Advanced Television and Electronic Imaging Conference*. SMPTE, 1995. p. 167-180.
- [33] Image Analyst (2022). `Get_xyz()` (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/51560-get_xyz), MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 6, 2022.
- [34] MacAdam ellipse – Wikipedia. [online]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/MacAdam_ellipse
- [35] OHTA, Noboru a Alan R. ROBERTSON. *Colorimetry: fundamentals and applications*. Chichester, West Sussex: J. Wiley, 2005. ISBN isbn:978-0-470-09472-3.
- [36] LY, Bao Chau K., et al. Research techniques made simple: cutaneous colorimetry: a reliable technique for objective skin color measurement. *Journal of Investigative Dermatology*, 2020, 140.1: 3-12. e1.
- [37] SHARMA, Gaurav; WU, Wencheng; DALAL, Edul N. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 2005, 30.1: 21-30.
- [38] LUO, M. Ronnier; CUI, Guihua; RIGG, Bryan. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur*, 2001, 26.5: 340-350.
- [39] SCHLANGEN, Luc JM; PRICE, Luke LA. The lighting environment, its metrology, and non-visual responses. *Frontiers in Neurology*, 2021, 12: 235.
- [40] Co je barevný gamut? | BenQ Česko. [online]. Copyright © BenQ Corporation. Všechna práva vyhrazena. [cit. 03.04.2022]. Dostupné z: <https://www.benq.eu/cs-cz/knowledge-center/knowledge/color-gamut-monitor.html>

- [41] BERSON, David M.; DUNN, Felice A.; TAKAO, Motoharu. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, 295.5557: 1070-1073.
- [42] HATTAR, Samer, et al. Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity. *Science*, 2002, 295.5557: 1065-1070.
- [43] DACEY, Dennis M., et al. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN. *Nature*, 2005, 433.7027: 749-754.
- [44] ZHAO, Xiwu, et al. Prolonged inner retinal photoreception depends on the visual retinoid cycle. *Journal of Neuroscience*, 2016, 36.15: 4209-4217.
- [45] ECKER, Jennifer L., et al. Melanopsin-expressing retinal ganglion-cell photoreceptors: cellular diversity and role in pattern vision. *Neuron*, 2010, 67.1: 49-60.
- [46] SKORKOVSKÁ, Karolína; SKORKOVSKÁ, Šárka. Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky sítnice. *Česká a slovenská oftalmologie*, 2015, 3.
- [47] WebPlotDigitizer – Copyright 2010-2021 Ankit Rohatgi. [online]. Dostupné z: <https://apps.automeris.io/wpd/>
- [48] Červené brýle – filtr modrého světla – univerzální DOPRAVA ZDARMA ZÁSILKOVNOU – Designlight. E-shop s designovým osvětlením a zdravými žárovkami – Designlight [online]. Dostupné z: <https://www.design-light.cz/dalsi/cervene-bryle-filtr-modreho-svetla-tmavsi-univerzalni-doprava-zdarma-zasilkovnou/?variantid=5373>
- [49] Fyzika: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 04.05.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [50] Blog: Hynek Medřický [online]. Dostupné z: <https://www.medricky.cz/blog>
- [51] Macbeth Color Checker | Measured with Spectrolino + UV filte... | Flickr. Find your inspiration. | Flickr [online]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/26352925@N02/6713510533>
- [52] YANG, Yang; MING, Jun; YU, Nenghai. Color image quality assessment based on CIEDE2000. *Advances in Multimedia*, 2012, 2012.
- [53] ZHANG, Jingjing, et al. Blue light hazard optimization for white light-emitting diode sources with high luminous efficacy of radiation and high color rendering index. *Optics & Laser Technology*, 2017, 94: 193-198.
- [54] The best Unbreakable and Antibacterial eyewear in the World.. The best Unbreakable and Antibacterial eyewear in the World. [online]. Dostupné z: <http://www.swingeyewear.com/OpModel.aspx?Model=TR381>
- [55] IALA AISM [online]. Dostupné z: https://www.iala-aism.org/wiki/dictionary/index.php/Polarization_error
- [56] CS-2000 Spectroradiometer | Konica Minolta Sensing. [online]. Copyright © 2006 [cit. 15.05.2022]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.us/us/products/cs-2000-spectroradiometer/>

- [57] WOODS, Andrew J.; YUEN, Ka Lun; KARVINEN, Kai S. Characterizing crosstalk in anaglyphic stereoscopic images on LCD monitors and plasma displays. *Journal of the Society for Information Display*, 2007, 15.11: 889-898.

Příloha

Následující tabulka popisuje obsah přiložených elektronických příloh práce. Příloha obsahuje:

- implementace výpočtů a grafického zobrazení metodik použitých v Kapitole 4 (Matlab skripty),
- změřená data stejné kapitoly,
- data určená zmíněnými Matlab skripty a
- lokální textové soubory popisující obsah daného adresáře.

Cesta	Název	Typ	Obsah
ipRGC_krivka	ipRGC.xlsx	Excel tabulka	data ipRGC křivky, interpolovaná do 380-780
	ipRGC_avg.xlsx		data ipRGC křivky průměrovaná do úseků EMG
	ipRGC_curve.m	Matlab code	Skript interpolující data ipRGC.txt do ipRGC.xlsx
	ipRGC.txt	Textové soubory	data ipRGC křivky, extrapolovaná ze článku
	README.txt		lokální popis obsahu dané složky
Spektrální_vlastnosti_filtru	antiblu, červený, žlutý		Složky
			.DRK, .REF, .TTT, .TCM soubory měřené spektrometrem
	ipRGC.xlsx	Excel tabulky	data ipRGC křivky
	spektr_propust_filtru.xlsx		data vytvořena spectral_transmittance.m
	procent_ucinnost_filtru_k_ipRGC.xlsx		tabulka účinnosti propustností filtrů vzhledem k ipRGC
	prumer_filtrace.xlsx		tabulka průměrných filtrací v úsecích EMG pro jednotlivé filtry
	neinterpolovane_vykresleni.m	Matlab codes	skript vykreslující surová změřená data propustností
	spectral_transmittance.m		skript interpolující surová data do 380:780 a vykreslující je
	antiblu.txt	Textové soubory	změřená spektrální propustnost A filtru
	zluty.txt		změřená spektrální propustnost Z filtru
cerveny.txt	změřená spektrální propustnost C filtru		
README.txt	lokální popis obsahu dané složky		
Mereni_spektra_radiometrem (OLED Surova data	A, C, Z, REF1, REF2, S100, S_urovne	Složky	.ces interní soubory softwaru měření, .xlsx tabulky všech měřených dat
Mereni_spektra_radiometrem (OLED Metriky	oled_dE00_opt_s100.xlsx	Excel tabulky	tabulka dE00 - optické filtry a s100 u OLED
	oled_dE00_urovne.xlsx		tabulka dE00 - úrovně softw. filtrací na R,G,B u OLED
			tabulka dE00
	oled_dE00_simulace.xlsx	Matlab codes	- simulované úrovně filtrací na Macbeth u OLED
	oled_dE00_opt_s100.m		skript počítající data oled_dE00_opt_s100.xlsx
	oled_dE00_urovne.m		skript počítající data oled_dE00_urovne.xlsx
oled_dE00_simulace.m		skript počítající data oled_dE00_simulace.xlsx	
Mereni_spektra_radiometrem (OLED ipRGC_citlivost	ipRGC.xlsx	Excel tabulky	data ipRGC křivky
	oled_ipRGC.xlsx		tabulka efektivity optick. filtrů a s100 na OLED
	oled_ipRGC_urovne.xlsx		tabulka efektivity filtrace úrovní softw. filtrace na OLED
	oled_iprgc_opt_s100.m	Matlab codes	skript počítající oled_ipRGC.xlsx
	oled_iprgc_urovne.m		skript počítající oled_ipRGC_urovne.xlsx
Mereni_spektra_radiometrem (OLED	oled_antiblu.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - A filtr, OLED
	oled_bez1.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - reference1, OLED
	oled_bez2.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - reference2, OLED
	oled_cerveny.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - C filtr, OLED
	oled_s100.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - S100, OLED
	oled_urovne.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - softw. úrovně, OLED
	oled_zluty.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - Z filtr, OLED
	oled_gamut_opt_s100.m	Matlab codes	skript zobrazující gamuty optických, s100 filtrací u OLED
	oled_gamut_urovne.m		skript zobrazující gamuty úrovní softw.h filtrací u OLED
	README.txt	Textový soubor	lokální popis obsahu dané složky
Mereni_spektra_radiometrem (LCD Surova data	A, C, Z, REF1, REF2, S100	Složky	.ces interní soubory softwaru měření, .xlsx tabulky všech měřených dat

Cesta	Název	Typ	Obsah
Mereni_spektro_radiometrem LCD	ipRGC.xlsx	Excel tabulky	data ipRGC křivky
	kd_antiblue.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - A filtr, LCD
	kd_bez1.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - reference1, LCD
	kd_bez2.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - reference2, LCD
	kd_cerveny.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - C filtr, LCD
	kd_S100.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - S100 filtr, LCD
	kd_zluty.xlsx		pozice a spektra Macbeth barev a R, G, B, W - Z filtr, LCD
	kd_dE00_opt_s100.xlsx		tabulka vypočtených dE00 pro optické filtry a s100 u LCD
	kd_ipRGC.xlsx		tabulka efektivity filtrace optických filtrů a s100 na LCD
	kd_dE00_opt_s100.m		skript počítající data kd_dE00_opt_s100.xlsx
	kd_gamut.m	skript zobrazující gamuty optických a s100 filtrací u LCD	
	kd_iprgc.m	skript počítající kd_ipRGC.xlsx	
	README.txt	Textový soubor	lokální popis obsahu dané složky