



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MĚŘENÍ MELANOPIKÝCH VELIČIN VE VNITŘNÍCH PROSTORECH JASOVÝM ANALYZÁTOREM LDA – LUMIDISP

THE MEASUREMENT OF MELANOPIC QUANTITIES IN INDOOR SPACES WITH THE LUMINANCE
ANALYSER LDA - LUMIDISP

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Siegel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

BRNO 2023

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Josef Siegel

ID: 78296

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Měření melanopických veličin ve vnitřních prostorech jasovým analyzátozem LDA – LumiDISP

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše melanopických veličin
2. Rešerše měřicích přístrojů, které dokáží měřit melanopické veličiny
3. Laboratorní porovnávací měření
4. Praktické měření ve vybraných interiérech
5. Zhodnocení výsledků a stanovení nejistot měření

DOPORUČENÁ LITERATURA:

doporučená literatura podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na měření melanopických veličin ve vnitřních prostorech a jejich vliv na člověka a jeho cirkadiální rytmy. Melanopické veličiny jsou specifické parametry světla, které ovlivňují biologické reakce a fyziologické procesy v našem těle.

Pro měření těchto veličin je využíván jasový analyzátor, který umožňuje kvantifikovat spektrální složky světla.

Zahrnuje také hodnocení melanopického příspěvku různých zdrojů osvětlení, jako jsou LED svítidla, žárovky nebo denní světlo.

Klíčová slova

melanopické veličiny, cirkadiální rytmy, jasový analyzátor, vnitřní prostory, světelné zdroje, obrazovky, osvětlení

Abstract

This thesis focuses on measuring melanopic quantities in indoor spaces and their impact on individuals and their circadian rhythms. Melanopic quantities are specific parameters of light that influence biological responses and physiological processes in our bodies.

To measure these quantities, a photometric analyzer is utilized, enabling the quantification of spectral components of light.

It also evaluates the melanopic contributions of various lighting sources, such as LED fixtures, incandescent bulbs, or natural daylight.

Keywords

melanopic quantities, circadian rhythms, photometric analyzer, indoor spaces, light sources, screens, lighting

Bibliografická citace

SIEGEL, Josef. *Měření melanopických veličin ve vnitřních prostorech jasovým analyzátozem LDA – LumiDISP* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151321>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Josef Siegel</i>
VUT ID studenta:	78296
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	2022/23
Téma závěrečné práce:	<i>Měření melanopických veličin ve vnitřních prostorech jasovým analyzátozem LDA – LumiDISP</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Motyčkovi, Ph.D. za pedagogickou podporu a vedení při tvorbě této práce. Taktéž bych rád poděkoval své manželce a mým dětem za celkovou podporu a schovívavost při studiu na vysoké škole a slibuji jim, že po úspěšném dokončení studia, vynahradím všem všechnen čas, kterým jsem se jim nemohl v posledních letech plně věnovat.

V Brně dne: 22. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1. VLV MELANOPICKÝCH VELIČIN NA ČLOVĚKA	13
1.1 BIOLOGICKÉ RYTMY	13
1.2 CIRKADIÁLNÍ RYTMY	13
1.2.1 Změny cirkadiánního systému a cirkadiánní preference v průběhu věku	13
1.2.2 Doporučený počet hodin spánku	14
1.2.3 Chronotypy	14
1.2.4 Synchronizátory cirkadiánních rytmů	15
1.3 VNÍMÁNÍ SVĚTLA	15
1.4 STAVBA LIDSKÉHO OKA	15
1.4.1 Vizuální vnímání	16
1.4.2 Oblasti vidění	16
1.4.3 Nevizuální vnímání	17
1.5 NERVOVÁ VRSTVA OKA	17
1.6 SUPRACHIASMATICKÉ JÁDRO	18
1.6.1 Vliv střídání světla a tmy na SCN	18
1.7 MELANOPSIN	18
2. AKČNÍ SPEKTRA FOTORECEPTORŮ	19
2.1 VÝPOČTY α -OPIC (MELANOPICKÝCH) VELIČIN	20
2.1.1 α -opic (melanopický) zářivý tok	20
2.1.2 α -opic (melanopická) intenzita ozáření	20
2.1.3 α -opic (melanopická) zář	20
2.1.4 α -opic (melanopická) světelná účinnost záření	20
2.1.5 α -opic (melanopická) světelná účinnost záření denního světla D65	21
2.1.6 α -opic (melanopický) ekvivalentní jas denního světla D65	21
2.1.7 α -opic (melanopický) poměr účinnosti denního světla D65	21
3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE MELANOPICKÝCH VELIČIN	22
3.1 KONVENČNÍ METODY MĚŘENÍ JASU	22
3.1.1 Luxmetry	22
3.1.2 Jasoměry	22
3.2 CHYBY FOTOMETRICKÝCH PŘÍSTROJŮ	23
3.3 MODERNÍ METODY MĚŘENÍ	24
3.3.1 Princip jasové kamery	24
3.3.2 Expozice snímku	25
3.4 MODERNÍ JASOVÉ KAMERY	26
3.4.1 LumiCam 4000B / 2400B	26
3.4.2 GL OPTICAM 3.0 4K TEC	28
3.4.3 Jasový analyzátor LumiDISP – LDA ML6	29
4. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ	32

4.1	POROVNÁNÍ RŮZNÝCH TYPŮ OBRAZOVEK	32
4.1.1	<i>Výběr testovacího obrazce</i>	32
4.1.2	<i>Testovací obrazec</i>	35
4.1.3	<i>Režimy zobrazování (noční osvětlení)</i>	35
4.2	POSTUP MĚŘENÍ	37
4.2.1	<i>Měření spektrometrem JETI specbos 1211UV</i>	38
4.2.2	<i>Vyhodnocení měření spektrometrem JETI specbos 1211UV</i>	40
4.3	MĚŘENÍ S JASOVÝM ANALYZÁTOREM LDA-LUMIDISP	40
4.3.1	<i>Nastavení programu LumiDISP</i>	41
4.3.2	<i>Základní ovládání</i>	42
4.3.3	<i>Kontrola expozice</i>	44
4.3.4	<i>Zpracování přidání L kanálu do snímku</i>	44
4.3.5	<i>Vložení detektorů a export dat</i>	45
5.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ OBRAZOVEK	46
5.1	LCD MONITOR SAMSUNG SYNCMASTER 2443	47
5.2	NOTEBOOK ASUS EXPERTBOOK 1417	49
5.3	NOTEBOOK ASUS ZENBOOK 14R5	51
5.4	TABLET SAMSUNG GALAXY TAB 10	53
5.5	MOBILNÍ TELEFON SAMSUNG A52S	55
5.6	LCD MONITOR BENQ GW2265M	57
5.7	TELEVIZE LG 75UN7070	59
5.7.1	<i>Porovnání základních spekter</i>	60
6.	MĚŘENÍ SVÍTIDEL	61
6.1	VÝBĚR SVÍTIDEL	61
6.2	POSTUP MĚŘENÍ	61
6.3	OPTIMALIZACE MĚŘENÍ	62
6.4	ZPRACOVÁNÍ	63
6.5	KOREKCE PARAZITNÍHO OSVĚTLENÍ	64
6.6	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	66
7.	MĚŘENÍ VYBRANÝCH INTERIÉRŮ	67
7.1	VÝBĚR	67
7.2	POSTUP MĚŘENÍ	68
7.3	ČERPACÍ STANICE	69
7.4	OBČERSTVENÍ	72
7.5	OBCHOD	74
8.	ZÁVĚR	76
	LITERATURA	78
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	80

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Stavba lidského oka [4]	16
1.2	Vrstvy sítnice [5]	17
1.3	Suprachiasmatické jádro získává informace o světle ze sítnice oka a synchronizuje rytmy [6]	18
2.1	Akční spektra [9]	19
3.1	Princip a schéma jasového analyzátoru	24
3.2	Optické řešení LumiCam B s kolečkem barevných filtrů [15].....	27
3.3	Upevnění filtrů LumiCam B [15]	27
3.4	GL OPTICAM 3.0 4K TEC [16].....	28
3.5	LumiDISP – LDA ML6 v transportním kufru [18].....	30
3.6	Ukázka výstupu měření pomoví LumiDISP [18]	31
4.1	Procentuální zastoupení barev na internetu dle WebFX [22].....	34
4.2	Další možnost zobrazení používaných barev na webových stránkách dle Paula Heberta [23].....	34
4.3	Vytvořená testovací paleta barev [18]	35
4.4	Nastavení intenzity nočního osvětlení ve Windows 10.....	36
4.5	Pracoviště v laboratoři	37
4.6	Nastavení intenzity nočního osvětlení v systému Android pomocí ručně vyrobené stupnice.	38
4.7	Prostředí programu JETI LiVal	39
4.8	Ukazatel měřené oblasti spektrometru JETI specbos 1211UV	39
4.9	Jasový analyzátor LDA-LumiDISP	41
4.10	Stromová struktura programu LumiDISP	42
4.11	Ovládací paleta snímání obrazu	43
4.12	Rozložení klávesových zkratk, pro ovládání	43
4.13	Kontrola správnosti expozice (vlevo správná, vpravo přeexponovaná).....	44
4.14	Vložení detektorů do snímku a tvorba šablony	45
4.15	Příkaz na dávkové zpracování	45
5.1	Zobrazení teploty chromatičnosti měřených zařízení v barevném prostoru CIE XYZ.....	46
5.2	Spektrum monitoru Samsung SyncMaster 2443 v závislosti na intenzitě NM	47
5.3	Melanopická zář monitoru Samsung SyncMaster 2443 v závislosti na intenzitě NM.....	48
5.4	Spektrum notebooku Asus ExpertBook 14i7 v závislosti na intenzitě NM	49
5.5	Melanopická zář notebooku Asus ExpertBook 14i7 v závislosti na intenzitě NM.....	50
5.6	Spektrum notebooku Asus Zenbook 14R5 v závislosti na intenzitě NM.....	51
5.7	Melanopická zář notebooku Asus Zenbook 14R5 v závislosti na intenzitě NM.....	52
5.8	Spektrum tabletu Samsung Galaxy Tab 10 v závislosti na intenzitě NM	53
5.9	Melanopická zář tabletu Samsung Galaxy Tab 10 v závislosti na intenzitě NM	54
5.10	Spektrum telefonu Samsung A52s v závislosti na intenzitě NM	55
5.11	Melanopická zář telefonu Samsung A52s v závislosti na intenzitě NM	56
5.12	Spektrum monitoru Benq GW2265M v závislosti na intenzitě NM	57
5.13	Melanopická zář monitoru Benq GW2265M v závislosti na intenzitě NM	58
5.14	Porovnání spekter dvou měřených notebooků.....	60
5.15	Porovnání spekter dvou měřených monitorů.....	60
6.1	Optimální umístění měřených svítidel.....	62
6.2	Nastavení měřicí sekvence HDR	62
6.3	Tvorba HDR	63
6.4	Výsledný snímek složený metodou HDR.....	63
6.5	Označená jednotlivá svítidla, určená pro export dat.....	64
6.6	Patrný rozdíl teplot chromatičnosti svítidel.....	65

6.7	Nevhodně umístěná svítidla pro potřeby měření	65
6.8	Histogram zastoupení svítidel dle melanopické záře	66
7.1	Pořizování snímků v interiérech	68
7.2	Přidání kanálu E do snímku s intenzitou melanopického ozáření	68
7.3	Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #1	69
7.4	Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #2	70
7.5	Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #3	71
7.6	Pohled na měřenou scénu občerstvení #1	72
7.7	Pohled na měřenou scénu občerstvení #2	73
7.8	Pohled na měřenou scénu v obchodě #1	74
7.9	Pohled na měřenou scénu v obchodě #2	75

SEZNAM TABULEK

1.1	Doporučený počet hodin spánku [3].....	14
2.1	Hodnoty α -opic světelné účinnosti záření denního světla D65 pro jednotlivá akční spektra [7], [26].21	
3.1	Přípustné chyby luxmetrů a jasoměrů pro jednotlivé typy měření [11]	22
3.2	V této šabloně jsou definované následující důležité styly [19]	23
3.3	Parametry použitých snímačů v LumiCam 4000B / 2400B [14]	26
3.4	Parametry dodávaných objektivů pro LumiCam 4000B / 2400B [14].....	28
3.5	Tabulka technických parametrů GL OPTICAM 3.0 4K TEC [16]	29
3.6	Parametry snímače LumiDISP – LDA ML6	30
3.7	Parametry dodávaných objektivů pro LumiDISP – LDA ML6 [18].....	31
4.1	Seznam barev v testovací paletě dle RGB barevného modelu	35
5.1	Porovnání změřených veličin pro monitor Samsung SyncMaster 2443.....	47
5.2	Odchytky měřených veličin pro monitor Samsung SyncMaster 2443	48
5.3	Porovnání změřených veličin pro notebook Asus ExpertBook 14i7.....	49
5.4	Odchytky měřených veličin pro notebook Asus ExpertBook 14i7	50
5.5	Porovnání změřených veličin pro notebook Asus Zenbook 14R5	51
5.6	Odchytky měřených veličin pro notebook Asus Zenbook 14R5.....	52
5.7	Porovnání změřených veličin pro tabletu Samsung Galaxy Tab 10.....	53
5.8	Odchytky měřených veličin pro monitor tablet Samsung Galaxy Tab 10	54
5.9	Změřené veličiny pro telefon Samsung A52s.....	55
5.10	Porovnání změřených veličin pro monitor Benq GW2265M.....	57
5.11	Odchytky měřených veličin pro monitor Benq GW2265M	58
5.12	Změřené veličiny pro televizi LG 75UN7070	59
5.13	Změřené veličiny pro televizi LG 75UN7070, pro jednotlivé obrazové režimy.....	59
7.1	Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #1	69
7.2	Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #2.....	70
7.3	Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #3.....	71
7.4	Změřené veličiny pro scénu občerstvení #1	72
7.5	Změřené veličiny pro scénu občerstvení #2	73
7.6	Změřené veličiny pro scénu v obchodě #1	74
7.7	Změřené veličiny pro scénu v obchodě #2.....	75

ÚVOD

Hlavním faktorem, který ovlivňuje naše cirkadiální rytmy, je světlo. Zejména modrá složka světla má silný vliv na náš biologický systém a má schopnost synchronizovat naše vnitřní hodiny s vnějším prostředím. Když je modré světlo přítomno, dochází k potlačení produkce melatoninu, hormonu, který se podílí na regulaci spánku a bdění. Tímto způsobem modré světlo signalizuje našemu tělu, že je čas být bdělý a aktivní.

V moderním životě jsou však cirkadiální rytmy často narušovány. Umělé osvětlení, zejména vnitřní osvětlení, a elektronická zařízení s obrazovkami vydávají značné množství modrého světla, které může rušit náš přirozený biologický rytmus. Dlouhodobé narušení cirkadiálních rytmů může mít negativní dopad na naše zdraví, včetně poruch spánku, únava, narušení hormonální rovnováhy a zhoršení nálady.

Měření melanopických veličin má klíčový význam při posuzování a hodnocení vlivu světelného prostředí na lidské zdraví a pohodu. Melanopické veličiny jsou založeny na citlivosti melanopsinových gangliových buněk (ipRGCs) v oku, které jsou zodpovědné za nevizuální účinky světla, zejména regulaci cirkadiálních rytmů.

Pomocí měření melanopických veličin lze identifikovat nevhodné světelné podmínky, které mohou narušovat cirkadiální rytmy a způsobovat negativní účinky. Tímto způsobem je možné optimalizovat osvětlení ve vnitřních prostorech, jako jsou kanceláře, školy, nemocnice nebo domovy, a vytvořit prostředí, které podporuje zdraví a pohodu jedinců.

Cílem této práce je provést měření melanopických veličin pomocí radiospektrometru a jasového analyzátoru LDA LumiDISP. Měření jasovým analyzátozem s výhodou poskytne ucelený obraz melanopických veličin ve zkoumaném prostoru.

1. VLIV MELANOPICKÝCH VELIČIN NA ČLOVĚKA

1.1 Biologické rytmy

V lidském těle se neustále odehrávají různé procesy. Tyto procesy mají své vlastní cykly, které se opakují v určitých intervalech, které se mohou lišit délkou. Tyto cykly nazýváme biorytmy.

Existují procesy v našem těle, které mají delší cykly, jako je například menstruační cyklus. Naopak existují procesy s kratšími cykly, jako je dýchání a srdeční činnost. Existují také cykly, které se opakují přibližně každý den, jako je spánek a bdění nebo tělesná teplota.

1.2 Cirkadiální rytmy

Cirkadiální rytmy jsou biologické rytmické procesy, které se opakují přibližně každých 24 hodin a ovlivňují širokou škálu fyziologických, behaviorálních a psychologických funkcí organismů. Tyto rytmy jsou synchronizovány naším vnitřním biologickým hodinovým systémem, který je citlivý na přirozený cyklus světla a tmy.

Cirkadiální rytmy jsou přítomny u všech živých organismů, nejen u člověka, a regulují mnoho aspektů našeho života. Například na spánkový a bdělý cyklus, hladinu energie, teplotu těla a funkci imunitního systému [1].

1.2.1 Změny cirkadiálního systému a cirkadiální preference v průběhu věku

Biorytmy v našem těle procházejí vývojem od narození až do stáří, přičemž největší rozdíl v rytmech je pozorován během dospívání a rané dospělosti. Následuje stručný přehled jednotlivých období [2]:

- **Prenatální období:** Od početí do narození, které trvá přibližně 280 dní. I během tohoto období se vyvíjí cirkadiální systém, ačkoli plod nemá přímý přístup k vnějšímu světu.
- **Novorozenec, kojeneček, batole:** Mezi 1. a 3. měsícem od narození se začíná vyvíjet cirkadiální rytmus spánku a bdění. Zejména mezi 3. a 4. měsícem se dítě začíná přizpůsobovat vnějším stimulům, jako je denní světlo, teplotní změny a přísun stravy.
- **Věk 4-5 let:** Ve věku 4 let se spánek plně řídí cirkadiálním rytmem.
- **Věk 8-14 let:** V této době dochází k posunu cirkadiální preference směrem k večernímu typu, přičemž největší posun nastává mezi 12. a 13. rokem.
- **Puberta:** V pubertě se cirkadiální preference dále posouvá směrem k večernímu typu.

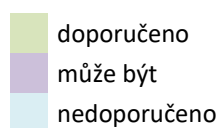
- **Dospělost (20-60 let):** Spánek získává na stabilitě. S rostoucím věkem se člověk probouzí dříve, a kolem věku 20 let dochází k posunu cirkadiánní preference zpět k rannímu typu. Ve stáří lidé spí méně a často se unaví dříve.

1.2.2 Doporučený počet hodin spánku

S vývojem cirkadiálních rytmů, prochází i vývoj přirozené doby potřeby spánku, Americká organizace National Sleep Foundation sestavila doporučení, ve kterém stanovila počet hodin spánku pro každou věkovou skupinu, na sestavení se podílelo celkem 18 expertů z různých oborů vědy a medicíny.

Tabulka 1.1 Doporučený počet hodin spánku [3]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Novorozenec (0-3 měsíce)																								
Kojenec (4-1 měsíců)																								
Batole (1-2 roky)																								
Předškolní věk (3-5 let)																								
Školní věk (6-13 let)																								
Teenager (14-17 let)																								
Dospívající (18-25 let)																								
Dospělý (26-64 let)																								
Starší dospělý (65+ let)																								



1.2.3 Chronotypy

Chronotyp člověka se odkazuje na individuální rozdíly v přirozeném biologickém rytmu spánku a bdění u jednotlivců. Zjednodušeně řečeno, chronotyp je určitý vzor preferencí a rytmů, které ovlivňují, zda jsme spíše raní typ skřivan (cyklus 23,5 h), noční typ sova (cyklus až 25 h), nebo někde mezi těmito dvěma extrémy.

Chronotyp je částečně geneticky determinován, ale také může být ovlivněn vnějšími faktory, jako je prostředí a životní styl.

1.2.4 Synchronizátory cirkadiánních rytmů

Hlavním faktorem, který ovlivňuje synchronizaci cirkadiánních rytmů, je světlo, tma a střídání činnosti a spánku. Naši předci, kteří neměli přístup k umělému osvětlení, se během dne vystavovali přímému slunečnímu světlu a v noci pouze přirozenému světlu z oblohy. To znamenalo, že spánek začínal brzy večer a končil ráno za úsvitu.

Pro správné nastavení cyklů byla také důležitá vysoká rozdílnost intenzity osvětlení, kde naši předci v jeskyních byli během dne vystaveni slunečnímu záření s intenzitou až 10 tisíc luxů, zatímco večer a v noci měli jen jednotky luxu z noční oblohy. Tato vysoká rozdílná intenzita osvětlení přispívala k přirozené synchronizaci jejich cirkadiánních rytmů.

Nicméně v současnosti jsme často vystaveni umělému osvětlení jak ve dne, například v budovách, na pracovištích a v kancelářích, tak i navečer a v noci, když používáme televize, počítače a mobilní telefony s významnou složkou modrého světla. Neustálé používání tohoto umělého osvětlení má za důsledek, že jsou rozdíly v intenzitě osvětlení během dne minimální. To má za následek horší synchronizaci našich cirkadiánních rytmů.

V důsledku toho často usínáme pozdě večer nebo dokonce po půlnoci, a probouzíme se až v pozdních dopoledních hodinách.

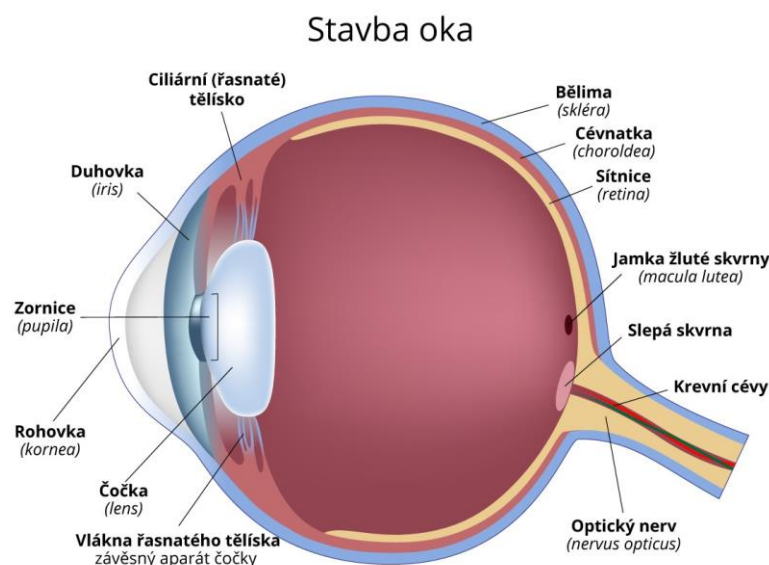
1.3 Vnímání světla

Zrak je klíčový pro vnímání a přijímání informací, přičemž přibližně 80-95% podnětů a vjemů je zprostředkováno zrakovým systémem. Naše oči mají složitou optiku, která umožňuje zaostřování obrazu na sítnici pomocí změn tvaru oční čočky (akomodace) a regulaci množství světla vstupujícího do oka skrze změny průměru zornice (adaptace prvního stupně). Další adaptace zraku na množství světla se děje skrze změny citlivosti sítnice, což je spojeno se světlocitlivými pigmenty v čípcích a tyčinkách a propojováním těchto struktur do různě velkých vjemových polí.

Kromě vizuálních receptorů v podobě čípků a tyčinek má oko také nevizuální fotoreceptory, které ovlivňují tzv. cirkadiánní rytmy člověka na základě množství světla v daném prostředí. Trvalý nedostatek světla může vyvolávat deprese, zatímco nadměrné osvětlení během odpočinku může omezovat produkci melatoninu a tím narušovat spánek.

1.4 Stavba lidského oka

Oko je smyslový orgán zraku, skládá se ze světlocitlivé vrstvy, obsahující světlocitlivé buňky a optického systému, který usměrňuje paprsky tak, aby dopadaly na sítnici. Oko má přibližně tvar koule o poloměru 12 mm.



Obrázek 1.1 Stavba lidského oka [4]

1.4.1 Vizualní vnímání

Vidění závisí na intenzitě světla v prostředí a rozlišuje se mezi denním (fotopickým), mezopickým a nočním (skotopickým) viděním. Přejedem z denního vidění na noční dochází k postupnému přechodu vnímání světla z čípků na tyčinky, což znamená přechod od vnímání barev k černobílému vidění.

Pro vnímání barev je zapotřebí dostatečného množství denního světla. Lidské oko vnímá optické záření v rozmezí vlnových délek přibližně od 380 do 770 nm. Světlo v tomto rozmezí vlnových délek je vnímáno nerovnoměrně podle spektrální citlivosti $V(\lambda)$, která při denním vidění dosahuje maxima při vlnové délce 555 nm, což odpovídá žlutozelené barvě světla. Citlivost zraku klesá směrem ke kratším i delším vlnovým délkám. Tento jev je výsledkem evolučního vývoje lidstva.

Zrakový systém je vybaven třemi typy čípků, které jsou citlivé na tři pásma vlnových délek světla: krátkovlnné (modré), středovlnné (žlutozelené) a dlouhovlnné (červené) oblasti.

1.4.2 Oblasti vidění

Fotopické (denní) vidění

- vnímané vlnové délky 400 až 750 nm při maximální citlivosti na 555 nm
- Barevné vidění
- zajištěné hlavně čípkami
- vnímaný jas $>10^2 \text{ cd/m}^2$
- rychlá adaptace na světlo (20 – 60 s)

Skotopické (noční) vidění

- maximum pro vlnové délky se pohybuje okolo 500 nm
- Vnímání pouze jasu (změny intenzity)
- zajištěno pouze tyčinkami
- vnímaný jas 10^{-3} cd/m²
- adaptace dvoufázová, plná adaptace po 40 až 60 minutách

1.4.3 Nevizuální vnímání

Sítnice oka neobsahuje pouze tyčinky a čípky, sloužící k vnímání obrazu, ale také další druh světlocitlivých buněk. Jedná se o část gangliových buněk, které mají v sobě pigment melanopsin a reagují přímo na světlo. Tyto buňky se nazývají mRGCs nebo také ipRGCs (intrinsically photoreceptive retinal ganglion cells).

U člověka tvoří tyto speciální gangliové buňky sítnice obsahující melanopsin 0,2 % všech gangliových buněk sítnice, což je zhruba 3000 buněk na jedno oko [8]. Fotoreceptory ipRGC jsou nejcitlivější na světlo vlnové délky 460 - 480 nm.

Přítomnost tohoto typu světločivných elementů je nově prokazována i v duhovce.

1.5 Nervová vrstva oka

Sítnice, je bohatě inervovaná blána, jejíž tloušťka kolísá od 0,1 mm až k 0,5 mm při okraji papily optiku, jehož nadzdvižení je dáno nahromaděním nervových vláken.



Obrázek 1.2 Vrstvy sítnice [5]

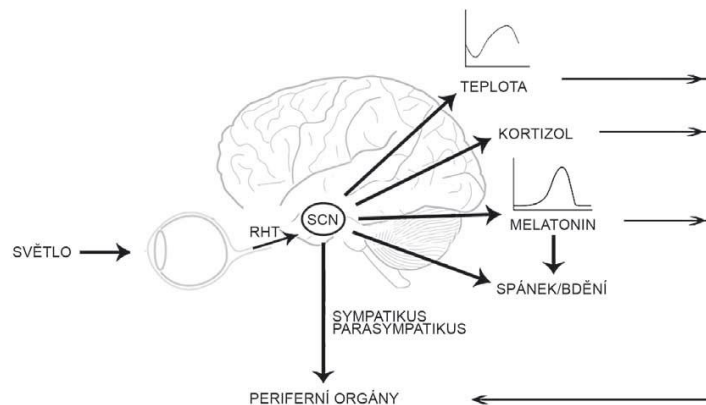
1.6 Suprachiasmatické jádro

Suprachiasmatické jádro (SCN) je malá oblast umístěná v hypothalamu mozku. Toto jádro je hlavním regulátorem cirkadiálních rytmů u savců, včetně člověka. SCN přijímá informace o světle prostřednictvím retinohypotalamické dráhy (RHT) a pomocí těchto signálů synchronizuje vnitřní biologické hodiny s vnějším světlem. SCN ovlivňuje mnoho procesů v těle, včetně spánku, bdění, hormonálních výkyvů a dalších rytmických funkcí. Poruchy SCN mohou vést k poruchám spánku a dalším problémům s cirkadiálním rytmem.

1.6.1 Vliv střídání světla a tmy na SCN

Střídání světla a tmy je klíčové pro udržování stabilních cirkadiálních rytmů. Světlo přítomné během dne signalizuje SCN, že je den, což vede k aktivaci bdělosti a potlačení produkce hormonu melatoninu, který je spojen s usínáním. Naopak, tma signalizuje SCN, že je noc, a to vede k uvolnění melatoninu a přípravě těla na spánek.

Porušení tohoto přirozeného střídání světla a tmy, například v důsledku nočního osvětlení nebo nedostatečné expozice denního světla, může narušit SCN a cirkadiální rytmy. To může vést k potížím se spánkem, problémům s náladou, sníženému výkonu a dalším negativním dopadům na zdraví a pohodu.



Obrázek 1.3 Suprachiasmatické jádro získává informace o světle ze sítnice oka a synchronizuje rytmy [6]

1.7 Melanopsin

Melanopsin je světlocitlivý pigment přítomný v gangliových buňkách v sítnici oka.

Melanopsin je citlivý na modré a blízké ultrafialové světlo, které je klíčové pro signalizaci stavu světla a tmy.

Melanopsin je tedy důležitým prvkem pro vnímání světla a jeho úloha v non-image-forming reakcích, jako je regulace cirkadiálních rytmů, je důležitá pro správnou funkci našeho biologického systému.

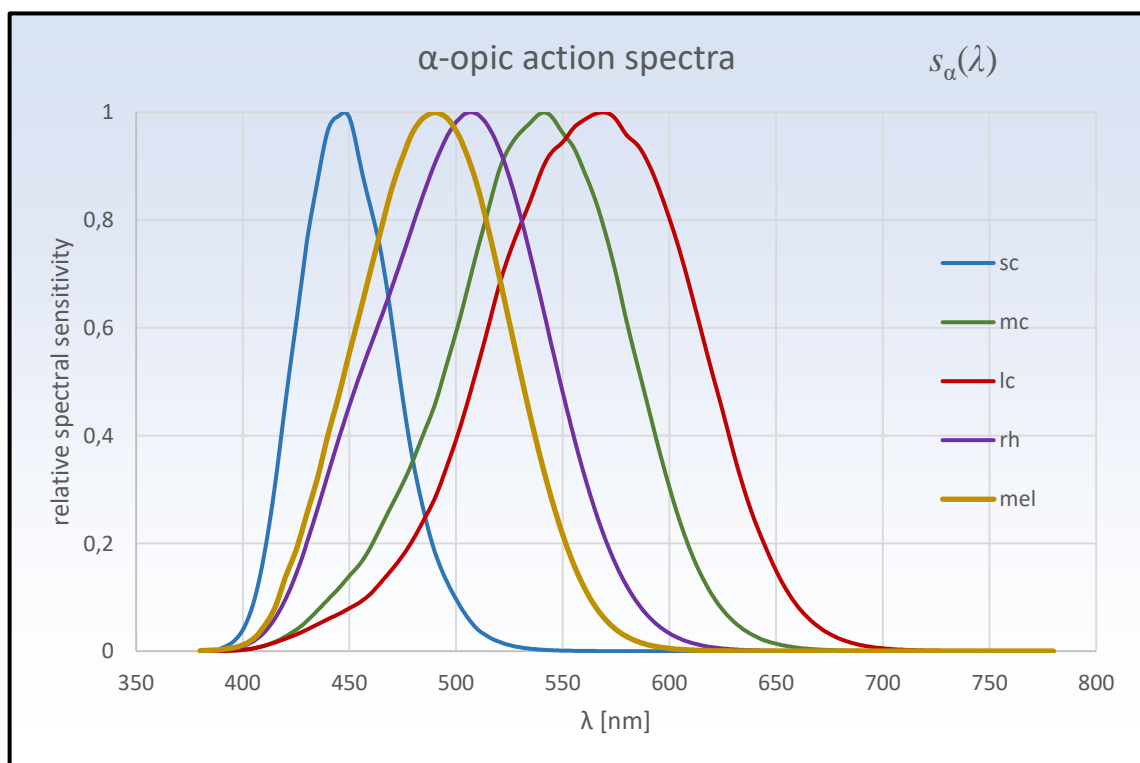
2. AKČNÍ SPEKTRA FOTORECEPTORŮ

V mezinárodní normě CIE S 026/E:2018 jsou popsána akční spektra fotoreceptorů, která jsou zodpovědná za vnímání světla v lidském oku. Tato norma definuje funkce, veličiny a metriky spektrální citlivosti pro všechny pět typů fotoreceptorů v oku, včetně melanopsinových gangliových buněk (ipRGCs), které mají vliv na nevizuální účinky světla.

Akční spektra fotoreceptorů jsou specifické křivky, které ukazují, jakým způsobem je každý fotoreceptor citlivý na různé vlnové délky světla. Tyto spektra byly získávána prostřednictvím měření a analýzy, které umožňují určit, jak intenzivně je každý fotoreceptor stimulován světlem různého spektrálního složení.

V normě CIE S 026/E:2018 jsou poskytnuty tabulky a grafy s akčními spektry fotoreceptorů, které umožňují kvantifikovat jejich citlivost na různé vlnové délky. Tím se usnadňuje hodnocení a porovnání vlivu různých světelných podmínek na lidské vnímání a fyziologii.

Přesné znalosti akčních spekter fotoreceptorů jsou klíčové pro správné navrhování osvětlení a minimalizaci negativních účinků světelného prostředí na lidské zdraví a pohodu.



Obrázek 2.1 Akční spektra [9]

2.1 Výpočty α -opic (melanopických) veličin

Dále jsou uvedené vztahy pro výpočet světelných veličin podle akčního spektra $s_\alpha(\lambda)$. Tyto veličiny byly definované normou CIE S 026/E:2018.

2.1.1 α -opic (melanopický) zářivý tok

Ekvivalentem k fotopické veličině světelný tok Φ_V je zářivý tok, který vyjadřuje vyzářené množství energie za určitý čas. Veličina Φ_α má jednotku miliwatt (mW):

$$\Phi_\alpha = \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2.1)$$

kde $\Phi_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální zářivý tok [7], [26].

2.1.2 α -opic (melanopická) intenzita ozáření

Jako ekvivalent k fotopické veličině intenzitě osvětlení E je intenzita ozáření, která je definována jako plošná hustota zářivého toku dopadajícího na určitou plochu. Jednotkou této veličiny je miliwatt na metr čtvereční (mW/m²):

$$E_\alpha = \int E_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2.2)$$

kde $E_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální intenzita ozáření [7], [26].

2.1.3 α -opic (melanopická) zář

K fotopické veličině jas L je ekvivalentem melanopická veličina zář, která je prostorovou hustotou zářivého toku vyzářeného plošným zdrojem. Tato veličina se udává v jednotkách miliwatt na metr čtvereční na steradián (mW/m².sr):

$$L_\alpha = \int L_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda, \quad (2.3)$$

kde $L_{e,\lambda}(\lambda)$ je spektrální zář [7], [26].

2.1.4 α -opic (melanopická) světelná účinnost záření

Světelná účinnost záření obecně udává, kolik se elektromagnetické záření projevuje jako viditelné světlo. Jedná se o podíl α -opic zářivého toku Φ_α a světelného toku Φ_V , jednotkou je miliwatt na lumen (W/lm) [7], [26]:

$$K_{\alpha,V} = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi_V} = \frac{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda}{K_m \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (2.4)$$

2.1.5 α -opic (melanopická) světelná účinnost záření denního světla D65

Jedná se o podíl α -opic zářivého toku standardizovaného denního světla (D65) a světelného toku standardizovaného denního světla (D65). Jednotkou je miliwatt na lumen α -opic světelná účinnost záření denního světla D65 a je dána vztahem [7], [26]:

$$K_{\alpha,V}^{D65} = \frac{\Phi_{\alpha}^{D65}}{\Phi_V^{D65}}. \quad (2.5)$$

Tabulka 2.1 Hodnoty α -opic světelné účinnosti záření denního světla D65 pro jednotlivá akční spektra [7], [26].

$K_{\alpha,V}^{D65}$	Hodnota (mW/lm)
$K_{SC,V}^{D65}$	0,817
$K_{mc,V}^{D65}$	1,456
$K_{lc,V}^{D65}$	1,629
$K_{rh,V}^{D65}$	1,450
$K_{mel,V}^{D65}$	1,326

2.1.6 α -opic (melanopický) ekvivalentní jas denního světla D65

Jde o jas vytvořený zářením odpovídajícím normovanému dennímu světlu (D65), který způsobuje stejnou α -opicovou odezvu L_{α} jako zkušební zdroj světla. Jednotkou je kandela na metr čtvereční ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) a je dán vztahem:

$$L_{V,\alpha}^{D65} = \frac{L_{\alpha}}{K_{\alpha,V}^{D65}}, \quad (2.6)$$

kde L_{α} je α -opicová zář a $K_{\alpha,V}^{D65}$ je α -opicová světelná účinnost záření denního světla D65 [7], [26].

2.1.7 α -opic (melanopický) poměr účinnosti denního světla D65

Tato veličina je dána poměrem α -opic světelné účinnosti záření a α -opic světelné účinnosti záření denního světla D65. Jedná se o bezrozměrnou veličinu danou vztahem [7], [26]:

$$\gamma_{\alpha,V}^{D65} = \frac{K_{\alpha,V}}{K_{\alpha,V}^{D65}} = \frac{\Phi_{\alpha}/\Phi_V}{\Phi_{\alpha}^{D65}/\Phi_V^{D65}}. \quad (2.7)$$

3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE MELANOPICKÝCH VELIČIN

3.1 Konvenční metody měření jasu

Luxmetry a jasoměry jsou přístroje používané k měření fotopických veličin.

3.1.1 Luxmetry

Luxmetr je zařízení, které měří intenzitu osvětlené v jednotkách nazývaných lux. Jedná se o standardní jednotku, která udává intenzitu světla dopadajícího na určitou plochu. Luxmetr obsahuje světlocitlivý senzor, obvykle fotodiodu nebo fototranzistor, který přijímá světlo a generuje elektrický signál, který je následně převeden na čitelné hodnoty luxů. Luxmetr je často používán v osvětlovací technice, architektuře, fotografii a průmyslu pro správné nastavení osvětlení a zajištění bezpečnosti v pracovních prostředích.

3.1.2 Jasoměry

Jasoměr je přístroj, který měří jas, což je subjektivní vnímání intenzity světla lidským okem. Jasoměr je obvykle vybaven kalibrovanou stupnicí, která poskytuje číselné hodnoty jasu. Existuje několik různých typů jasoměrů, včetně spotřebitelských zařízení pro měření jasu displejů elektronických zařízení. Profesionální jasoměry používané v průmyslu a vědeckém výzkumu často využívají technologii fotometrie a spektrofotometrie k přesnému měření jasu a vyhodnocování spektrálních charakteristik světelných zdrojů.

Oba přístroje, luxmetr i jasoměr, jsou užitečné pro objektivní měření jasu v různých aplikacích. Luxmetr se zaměřuje na měření osvětlenosti ve formě luxů, zatímco jasoměr je určen pro subjektivní hodnocení jasu lidským okem. Oba přístroje přispívají k optimalizaci osvětlení a zajištění správných světelných podmínek pro různé činnosti a prostředí.

Tabulka 3.1 Přípustné chyby luxmetrů a jasoměrů pro jednotlivé typy měření [11]

Přesnost	Typ měření	Celková přípustná chyba v %		Třída
		Luxmetry	Jasoměry	
L	Laboratorní	± 3	± 5	1
A	Přesné	± 5	± 7,5	2
B	Provozní	± 10	± 10	3
C	Orientační	± 20	± 20	4

3.2 Chyby fotometrických přístrojů

Chyby fotometrických přístrojů zahrnují chyby kalibrace, vliv okolního osvětlení, úhel zdroje světla, spektrální citlivost a teplotní vlivy. Přístroje vyžadují pravidelnou kalibraci. Teplota může ovlivnit citlivost senzorů. Správná péče a dodržování specifikací výrobce jsou důležité pro minimalizaci chyb.

Tabulka 3.2 V této šabloně jsou definované následující důležité styly [19]

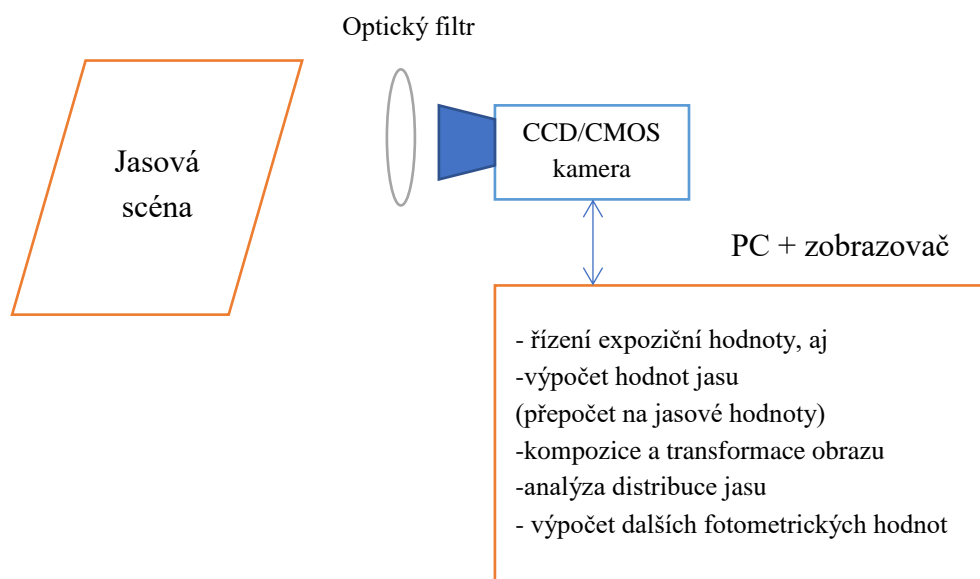
Druh chyby	Značení	Luxmetry	Jasoměry
Spektrální chyba	f_1''	2%	3%
	$f_1(Z)_{max}$	0,60%	–
Směrová chyba luxmetru (chyba směrové citlivosti)	f_2	1,50%	–
Prostorová	$f_{2,o}$	10%	–
Válcová	$f_{2,z}$	5%	–
Poloválcová	$f_{2,zh}$	5%	–
Přímá odezva jasoměru	$f_{2(g)}$	–	2%
Chyba způsobená okrajem jasoměru	$f_{2(u)}$	–	1%
Nelinearita	f_3	0,20%	0,20%
Chyba zobrazení jednotky	f_4	0,20%	0,20%
Nestabilita	f_5	0,20%	0,10%
Vliv teploty	f_6		
Činitel teploty	l	0,2 %/K	0,2 %/K
Modulované záření	f_7	0,10%	0,10%
Chyba polarizace světla	f_8	2%	0,10%
Chyba nerovnoměrného osvětlení snímací plochy	f_9		
Chyba přebuzení	f_{10}		
Crest factor	c		
Chyba změny rozsahu	f_{11}	0,10%	0,10%
Chyba zaostření jasoměru	f_{12}	–	0,40%
Frekvenční chyba			
Dolní limit	f_l	33 Hz	33 Hz
Horní limit	f_u	10^5 Hz	10^5 Hz
Odezva na UV záření	u	0,20%	0,20%
Odezva na IR záření	r	0,20%	0,20%
Stárnutí fotočlánku			
Vliv napájecího napětí			
Vliv vnějšího magnetického rušení (EMI)			

3.3 Moderní metody měření

Moderní metodou měření jasů je využití jasových kamer, které mohou rozdílnou konstrukci, ale všechny vycházejí z níže uvedeného principu.

3.3.1 Princip jasové kamery

Jasová kamera, také známá jako „luminance camera“, je zařízení, které slouží k měření jasů scény nebo objektů. Princip jasové kamery spočívá v zachycení světla a jeho přeměně na elektrický signál, který je dále zpracován a převeden na čitelná čísla reprezentující jasovou hodnotu.



Obrázek 3.1 Princip a schéma jasového analyzátoru

Jasová kamera se skládá z několika klíčových komponent. Nejdůležitější součástí je obrazový senzor. Tento senzor je rozdělen na řadu malých světlocitlivých buněk nazývaných pixely. Každý pixel zachycuje světelný tok dopadající na danou oblast scény.

Při expozici se světelný tok na pixelech přemění na elektrický náboj. Náboj se následně převádí na napětí a je digitalizován pomocí analogově-digitálního převodníku (ADC). Tím vznikne digitální obraz, kde každý pixel obsahuje číselnou hodnotu reprezentující jasovou intenzitu odpovídající danému bodu scény.

3.3.2 Expozice snímku

Změna hodnot expozice, jako je ISO, clona, čas a krok EV (Exposure Value), má významný vliv na výslednou expozici a kvalitu snímku. Zde je stručný popis vlivu těchto faktorů:

ISO: Zvýšení hodnoty ISO zvyšuje citlivost snímače na světlo, což umožňuje fotografování za nižších světelných podmínek. Nicméně vyšší ISO hodnoty také přinášejí větší obrazový šum, který snižuje kvalitu fotografie. Nízké ISO hodnoty jsou vhodné pro dobře osvětlené scény s menším šumem, zatímco vyšší ISO hodnoty jsou vhodné pro situace s nedostatečným osvětlením.

Clona: Clona ovlivňuje množství světla, které vstupuje do objektivu. Menší clonové číslo (širší clona) umožňuje větší množství světla a kratší expozici, což je vhodné pro situace s nedostatečným osvětlením. Na druhé straně větší clonové číslo (užší clona) omezuje množství světla a prodlužuje expozici, což je vhodné pro situace s dostatečným osvětlením a větší hloubkou ostrosti.

Čas (expoziční doba): Doba expozice určuje, jak dlouho je snímač vystaven světlu. Delší čas expozice umožňuje zachytit více světla, což je vhodné pro scény s nedostatečným osvětlením. Naopak kratší čas expozice snižuje množství zachyceného světla, což je vhodné pro scény s vysokým kontrastem a pohybem, aby se zabránilo rozmazání.

Krok EV (Exposure Value): Krok EV je nastavení expozice, které kombinuje změny clony, času a ISO do jednoho parametru. Posunutí hodnoty EV o +1 znamená zdvojnásobení expozice, zatímco posunutí o -1 znamená poloviční expozici. Změna kroku EV umožňuje rychlou úpravu expozice bez ručního nastavování jednotlivých parametrů.

3.4 Moderní jasové kamery

Vývoji a výzkumu v oblasti jasových kamer se věnují firmy po celém světě pro široké spektrum jejich následného využití.

3.4.1 LumiCam 4000B / 2400B

Tato jasová kamera od firmy Konica Minolta využívá k detekci CMOS snímač o rozlišení 5 MPx nebo 12 MPx v monochromatickém nebo barevném spektru.

Každé rozlišení má dle požadavků zákazníka možné varianty:

- Mono – pro měření jasu
- Color – pro měření jasu a analýzu chromatičnosti na základě 4 filtrů, která je zvláště vhodná pro širokopásmové světelné zdroje
- Advanced – pro měření jasu a analýzu chromatičnosti s podporou 6 filtrů pro optimální měření testovacích objektů na bázi LED

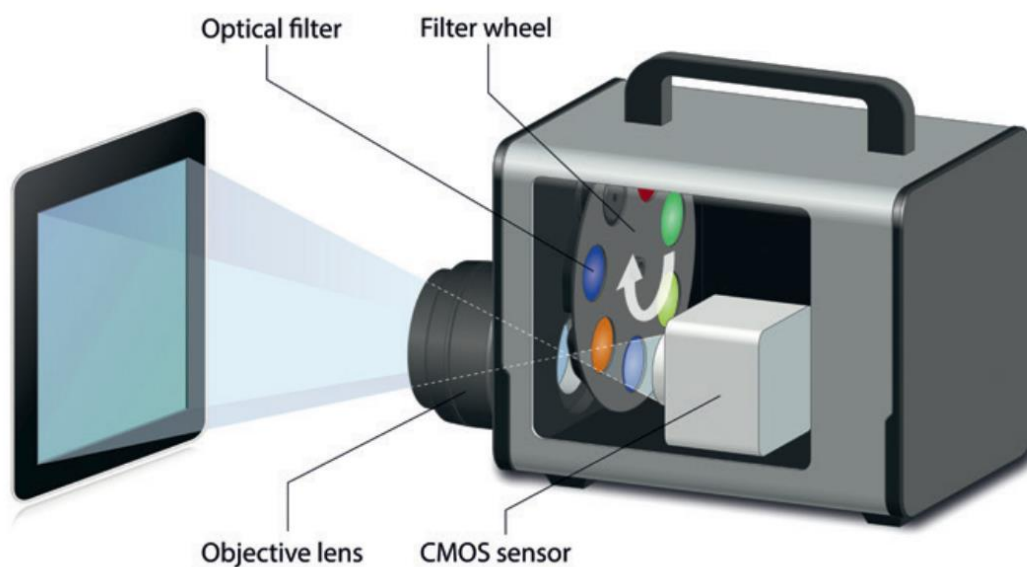
Tabulka 3.3 Parametry použitých snímačů v LumiCam 4000B / 2400B [14]

	LumiCam 4000B	LumiCam 2400B
Sensor	Sony IMX304LLR CMOS Sensor	Sony IMX264LLR CMOS Sensor
Rozměr senzoru	1,1" (17,52 mm úhlopříčka)	2/3" (11,1 mm úhlopříčka)
Počet efektivních pixelů (h x v)	4096 x 3000 (12 megapixels, CMOS)	2428 x 2028 (5 megapixels)
Velikost pixelu	3,45 μm x 3,45 μm	3,45 μm x 3,45 μm
A/D převodník	12 bit	12 bit
Doba expozice	40 μs až 30 s	40 μs až 30 s

Mezi CMOS snímačem a objektivem, který disponuje automatickým zaostřováním, je umístěno kolo s jednotlivými barevnými filtry, které se dle potřeby zařazují.

Každému pixelu snímače fotoaparátu je přiřazena kalibrovaná hodnota jasu a barvy pro generování 2D obrazu fotometrických dat.

Výměna dat mezi LumiCam B a řídicím PC probíhá přes síťový kabel, k vyhodnocení slouží softwarová platforma výrobce LumiCam nebo LumiSuite, oba programy dokážou získávat a analyzovat získané fotometrické informace.



Obrázek 3.2 Optické řešení LumiCam B s kolečkem barevných filtrů [15]

Celý systém umožňuje rychlou výměnu objektivu s různými ohniskovými vzdálenostmi. Pro kompenzování jasu scény je možnost i osazení ND filtry, které jsou pro snadnou manipulaci opatřeny magnetickým mechanismem.



Obrázek 3.3 Upevnění filtrů LumiCam B [15]

Tabulka 3.4 Parametry dodávaných objektivů pro LumiCam 4000B / 2400B [14]

Ohnisková vzdálenost	24 mm	50 mm	100 mm
Minimální vzdálenost zaostření	12 cm	44 cm	18 cm
Minimální vzdálenost měření	21 cm	50 cm	30 cm
Velikost obrazu při minimální vzdálenosti (h x v)	46 mm x 39 mm	71 mm x 59 mm	12 mm x 10 mm
Velikost pixelu na minimální vzdálenosti	19 μm x 19 μm	29 μm x 29 μm	5 μm x 5 μm
Velikost obrazu při vzdálenosti 1 m (h x v)	318 mm x 266 mm	152 mm x 127 mm	73 mm x 61 mm
Velikost pixelu při vzdálenosti 1 m	128 μm x 128 μm	63 μm x 63 μm	30 μm x 30 μm

Měřicí systém byl vyvinut pro přesné určení jasů a rozložení barev během několika sekund. Se svými různými modely splňuje komplexní požadavky na měření v automobilovém průmyslu, letectví, všeobecném osvětlení nebo výstavnictví, kde se používá pro zajištění kvality, např. přístrojových desek, zobrazovacích panelů nebo kokpitů.

3.4.2 GL OPTICAM 3.0 4K TEC

Řešení od firmy GL OPTIC byl navržen jako systém pro měření silničního osvětlení podle normy EN 13201: 2016.



Obrázek 3.4 GL OPTICAM 3.0 4K TEC [16]

System je osazen monochromatickým CMOS snímačem s rozlišením 4K s $V(\lambda)$ filtrem. Standardně je osazen objektivem s ohniskovou vzdáleností 50 mm, zatímco ostatní jsou k dispozici na vyžádání. System je vybaven sadou pomocného příslušenství pro měření osvětlení komunikací.

Dodávaný software obsahuje specializovaný modul pro analýzu silničního osvětlení podle EN 13201 a také několik univerzálních analytických nástrojů, jako jsou: označování zájmových bodů, statistické parametry, histogramy, lineární průřezy, 3D zobrazení jasu.

Tabulka 3.5 Tabulka technických parametrů GL OPTICAM 3.0 4K TEC [16]

Užití	Silniční osvětlení a další světelné zdroje, displeje, svítící a osvětlené plochy
MĚŘENÍ	
Rozlišení snímače	4096×2168 (4K, 9 MPix)
A/D převodník	12 bit
Rozsah měření	0,01 cd/m ² ... 150000 cd/m ²
Rozlišení	0,01 cd/m ²
Dynamický rozsah	1:15000000
Ohnisková vzdálenost	200 mm až nekonečno
Minimální pracovní plocha	56 mm x 30 mm (na 200 mm vzdálenosti)
Nejistota spektrální odezvy	Class A (f1') < 3 %
Doba integrace	50 μs až 10 s
VLASTNOSTI	
Typ měřicího snímače	CMOS monochromatický
Optický systém	50mm f/1.8 lens.
Rozměry [V x Š x H]	149 mm x 306 mm x 265 mm
Hmotnost	5,7 kg
IP odolnost	54
Připojení k PC	USB 3.0

3.4.3 Jasový analyzátor LumiDISP – LDA ML6

Mezi zahraniční produkty se plně řadí jasový analyzátor LumiDISP vyvíjený více než 20 let v České republice výzkumnými pracovníky na Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně.

System je založen na rozboru jasových poměrů pomocí digitální fotografie. Data se zpracovávají z datového RAW souboru fotoaparátu, který obsahuje data získaná ze snímače, bez následné obrazové komprese (např. JPG). Na snímač se nasazuje filtr, který respektuje spektrální citlivosti.



Obrázek 3.5 LumiDISP – LDA ML6 v transportním kufru [18]

Sada LumiDISP – LDA ML6 obsahuje následující komponenty:

- Měřicí fotoaparát NIKON Z6 kalibrovaný na základní zdroje světla
- 3 výměnné objektivy
- Filtry pro $V(\lambda)$ korekci
- Nabíječka baterií, druhý záložní akumulátor
- Čtečku paměťových karet
- Software na CD
- Tištěnou příručku
- Kalibrační certifikát a několik propojovacích kabelů

Tabulka 3.6 Parametry snímače LumiDISP – LDA ML6

Sensor	BSI CMOS 24,5 Mpx
Velikost senzoru	35,9 x 23,9 mm
Rozlišení senzoru	6062 x 4041
Velikost pixelu	5,92 μm
A/D převodník	14 bit / 16 383 úrovní
Měřicí rozsah	0,001 – 10 000 000 cd/m^2

Jasový analyzátor LumiDISP zpracovává snímaná data digitálního fotoaparátu Nikon Z6 z výstupních souborů formátu RAW (přímo ze senzoru) a jejich převod na jasovou informaci. Na fotoaparátu je nasazen hardwarový filtr, pomocí něhož dojde k přizpůsobení ke křivce spektrální citlivosti normálního pozorovatele. Základní parametry jasového analyzátoru LumiDisp jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 3.7 Parametry dodávaných objektivů pro LumiDISP – LDA ML6 [18]

	8-15 mm	40 mm	135 mm
Výrobce	Nikon	Sigma	Sigma
Clona	f/3,5-4,5	f/1,4	f/1,8
Zorný úhel	180 °	71 °	19 °
Minimální vzdálenost zaostření	16 cm	40 cm	89 cm
Minimální vzdálenost měření	21 cm	50 cm	30 cm

Jasový analyzátor LumiDISP-LDA ML6 nabízí široké spektrum využití analýzy statické jasové scény. Je možné vytvoření jasové mapy, pak zjišťovat hodnoty jasu v kterémkoli bodě na scéně. Pro vizualizaci je možné si zvolit barevné stupnice.



Obrázek 3.6 Ukázka výstupu měření pomoví LumiDISP [18]

4. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ

Měření bylo rozděleno na více částí, které na sebe postupně logicky navazovaly. V první části, porovnáním měřících metod cirkadiálních veličin pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP a spektrometru Jeti, měření jednotlivých typů obrazovek. Dále měření jednotlivých typů dostupných světelných zdrojů a na závěr měření celkové scény ve vybraných veřejných interiérech.

První část měření pro seznámení s měřícími přístroji probíhala v laboratoři světelné techniky na VUT.

4.1 Porovnání různých typů obrazovek

Pro účely měření byla vybrána zařízení, která jsou běžně dostupná uživatelům, zejména na LCD obrazovky a OLED obrazovky. Tento výběr byl založen na aktuálním zastoupení těchto typů obrazovek na trhu:

LCD obrazovky, se zastoupením na trhu s přibližně 85%: LCD (Liquid Crystal Display) obrazovky jsou jednou z nejrozšířenějších technologií v počítačových monitorech, televizích a mobilních telefonech. Tyto obrazovky fungují pomocí tekutých krystalů, které řídí průchod světla. LCD obrazovky jsou často používány kvůli své vysoké dostupnosti a relativně nižším nákladům.

OLED obrazovky, zastoupení okolo 8%: OLED (Organic Light Emitting Diode) obrazovky jsou moderní technologií, která se stále více rozšiřuje na trhu. Tyto obrazovky se skládají z organických materiálů, které vytvářejí vlastní světlo při připojení elektrického proudu. OLED obrazovky nabízejí lepší kontrast, vyšší barevnou přesnost a širší pozorovací úhly ve srovnání s LCD obrazovkami.

Při měření byly zahrnuty různé varianty LCD a OLED obrazovek, aby byl získán komplexní přehled o zastoupení těchto technologií na trhu. Cílem bylo získat relevantní data z rozšířených a používaných jednotlivých typů obrazovek u běžných uživatelů.

4.1.1 Výběr testovacího obrazce

Po vytipování měřených zařízení, byla navržena měřící metoda, spočívající v porovnání reprezentativních snímků, vybraných dle četnosti zobrazování.

Nejprve byl vytvořen seznam jednotlivých webových stránek podle aktuální návštěvnosti, jak českých, tak i zahraničních. Dále byly pořízeny jednotlivé reprezentativní snímky obrazovek webových stránek, včetně tmavých režimů, pokud to nastavení jednotlivých webových stránek umožňovalo.

V Česku (podle Gemius Audience [24]):

- Seznam.cz (29,9 %)
- **Google.cz (19,5 %)**
- **YouTube.com (14,7 %)**
- **Facebook.com (12,7 %)**
- Centrum.cz (7,5 %)
- iDNES.cz (4,6 %)

Celosvětově (podle Similarweb [25]):

- **Google.com (92,5 %)**
- **YouTube.com (2,3 %)**
- **Facebook.com (1,6 %)**
- Baidu.com (0,8 %) - čínský vyhledávač
- Wikipedia.org (0,6 %)

Pro prvním měření se ukázalo, že zvolení jednotlivých snímků webových stránek nebylo vhodné z následujícího důvodu.

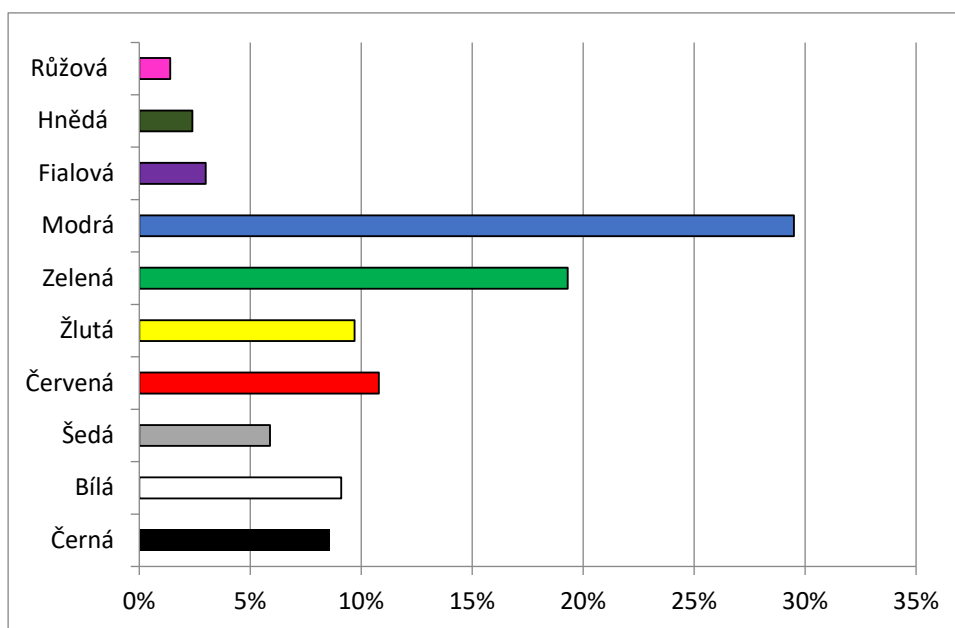
Aby mohlo proběhnout zdárně měření a zpracování snímků pro fotopické a melanopické spektrum pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, bylo klíčové, aby se během výměny filtrů (fotopického a melanopického) vložených do bajonetového adaptéru nepohnulo s fotoaparátem a tím byly oba snímky se shodným záběrem. Drobný posun snímků lze korigovat v programu pro zpracování, ale tento postup je zdlouhavý a korekce lze použít jednoduše jen v osách X a Y, případné otočení fotoaparátu v podle osy Z, by se muselo korigovat složitým výpočtem a určení rotace.

Z tohoto důvodu byly pro měření navrženy obdélníkové obrazce s definovanou barvou, tím se zjednodušila metoda zpracování a eliminovala chyba, která by vznikla pohybem fotoaparátu.

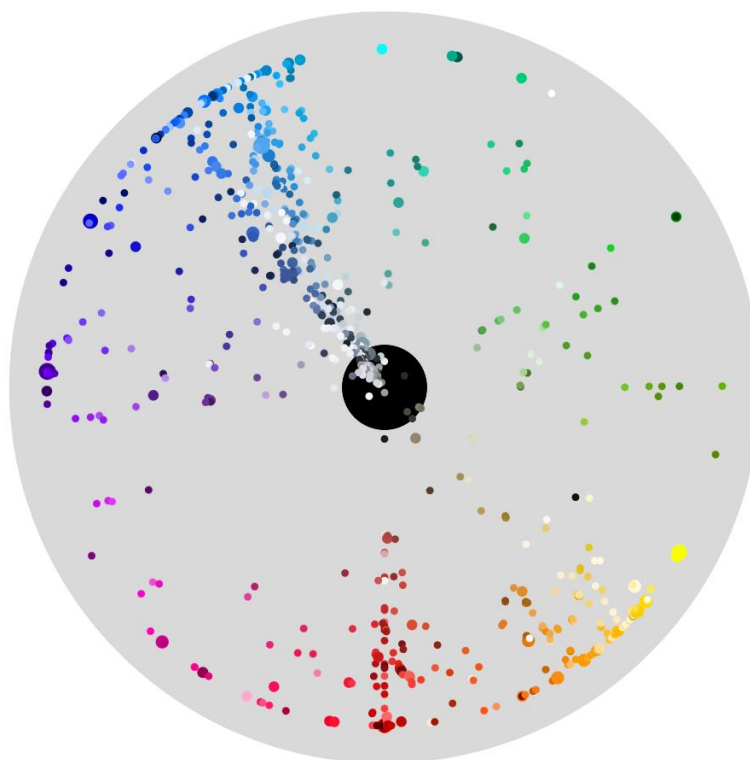
Bylo navrženo rozmístění jednotlivých barev do matice (3x5) testovacího obrazce. Jednotlivé barvy byly zvoleny podle statistik dostupných na internetu, například podle WebFX [22].

Nutno podotknout, že většina dostupných statistik se vztahuje pouze na barvy používané na webových stránkách, a nezahrnuje barvy v obrázcích, videích a dalších médiích.

Zastoupení jednotlivých barev je možné nalézt v následujícím grafu:



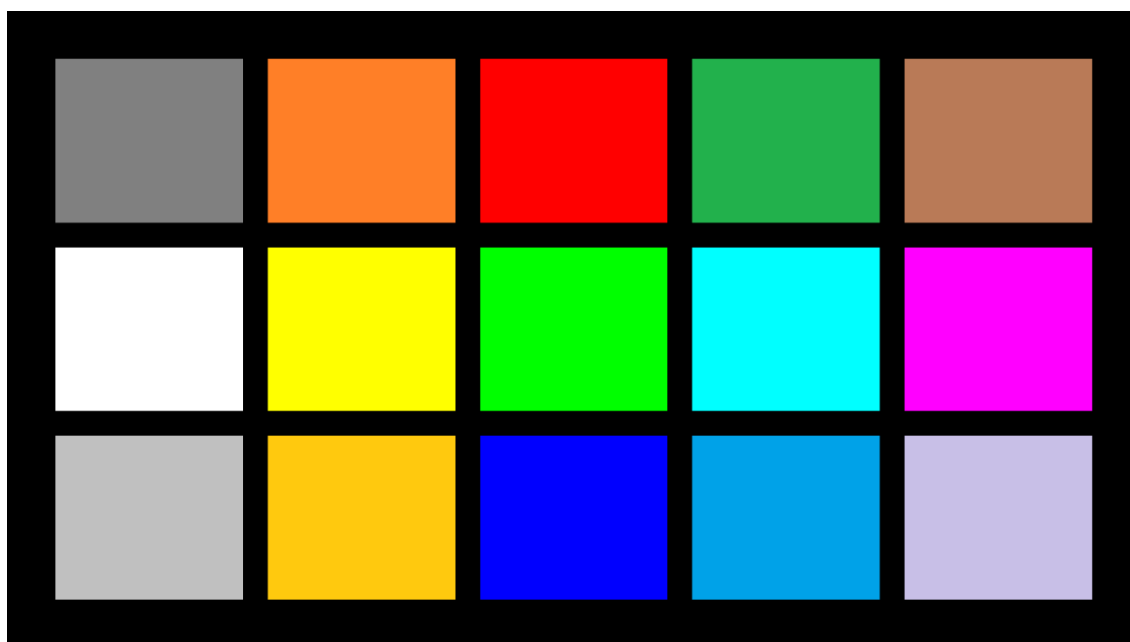
Obrázek 4.1 Procentuální zastoupení barev na internetu dle WebFX [22]



Obrázek 4.2 Další možnost zobrazení používaných barev na webových stránkách dle Paula Heberta [23]

4.1.2 Testovací obrazec

Většina zobrazovacích panelů má rozlišení FullHD, proto byla vybrána velikost obrazce s rozměry 1920 x 1080 pixelů, jednotlivé obdélníky v matici mají rozměr 320 x 280 pixelů, výběr vycházel z výše uvedených statistik, kde byly zahrnuty základní barvy (bílá, červená, zelená a modrá) a nejvýše používané. Seznam barev dle RGB barevného modelu je uveden v tabulce 4.1.



Obrázek 4.3 Vytvořená testovací paleta barev [18]

Tabulka 4.1 Seznam barev v testovací paletě dle RGB barevného modelu

(128, 128, 128)	(255, 127, 39)	(255, 0, 0)	(34, 177, 76)	(185, 122, 87)
(0, 0, 0)	(255, 255, 0)	(0, 255, 0)	(0, 255, 255)	(255, 0, 255)
(192, 192, 192)	(255, 201, 14)	(0, 0, 255)	(132, 240, 109)	(200, 191, 231)

4.1.3 Režimy zobrazování (noční osvětlení)

Moderní zařízení mají již v sobě integrované funkce pro omezení melanopické záře, obecně lze najít v zařízeních pod názvem „Night light/mode/shift“ a pro běžného uživatele se jeví jako posun teploty chromatičnosti do teplejších barev.

Mimo tuto funkci bývají vybaveny funkcí automatického snižování jasu, což také zvyšuje pohodlí pro uživatele ve večerních hodinách.

Nastavení se závisí na typu použitého zařízení.

Na počítačích s operačním systémem Windows 10 a vyšší:

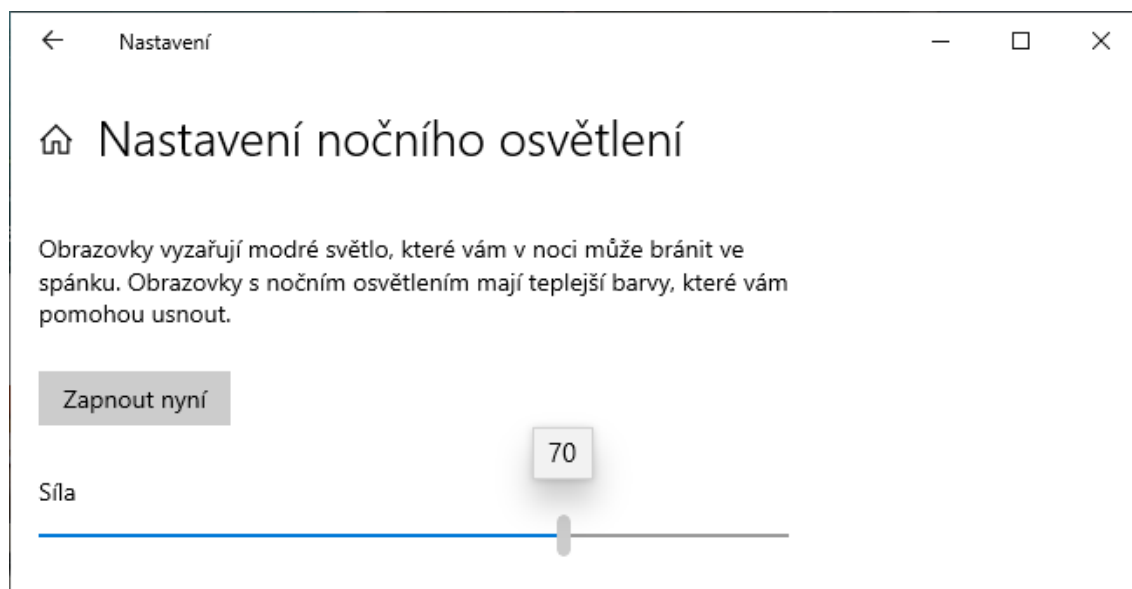
Noční režim v operačním systému Windows se nazývá „Night light“. Umožňuje snížit množství modrého světla vycházejícího z obrazovky a tak zlepšit kvalitu spánku. Uživatel si může nastavit jeho intenzitu v rozmezí 0 až 100 a plánovat, kdy se má aktivovat, buď dle pevně nastaveného času, nebo dle aktuálního východu a západu slunce.

Na mobilních telefonech nebo tabletech s operačním systémem Android 10 a vyšší:

Noční režim v Androidu se nazývá „Night mode“ a lze ho najít v nastavení displeje. Intenzitu lze nastavit na posuvníku od minimální po maximální hodnotu, bez možnosti odečíst aktuální číselný stav nastavení. Kromě snížení modrého světla nabízí i další možnosti úpravy barev, jako je snížení kontrastu a zvýraznění barev. Obvykle je také k dispozici funkce „Adaptive brightness“, která automaticky nastavuje jas podle okolního osvětlení.

Na mobilních telefonech nebo tabletech s operačním systémem iOS (iPhone):

Noční režim v iOS se nazývá „Night Shift“. Funguje podobně jako noční režim v Androidu a Windows a umožňuje snížit modré světlo. Uživatel si může nastavit jeho intenzitu a plánovat, kdy se má aktivovat. V novějších verzích iOS je také k dispozici funkce „True Tone“, která automaticky přizpůsobuje teplotu barev podle okolního světla.



Obrázek 4.4 Nastavení intenzity nočního osvětlení ve Windows 10

4.2 Postup měření

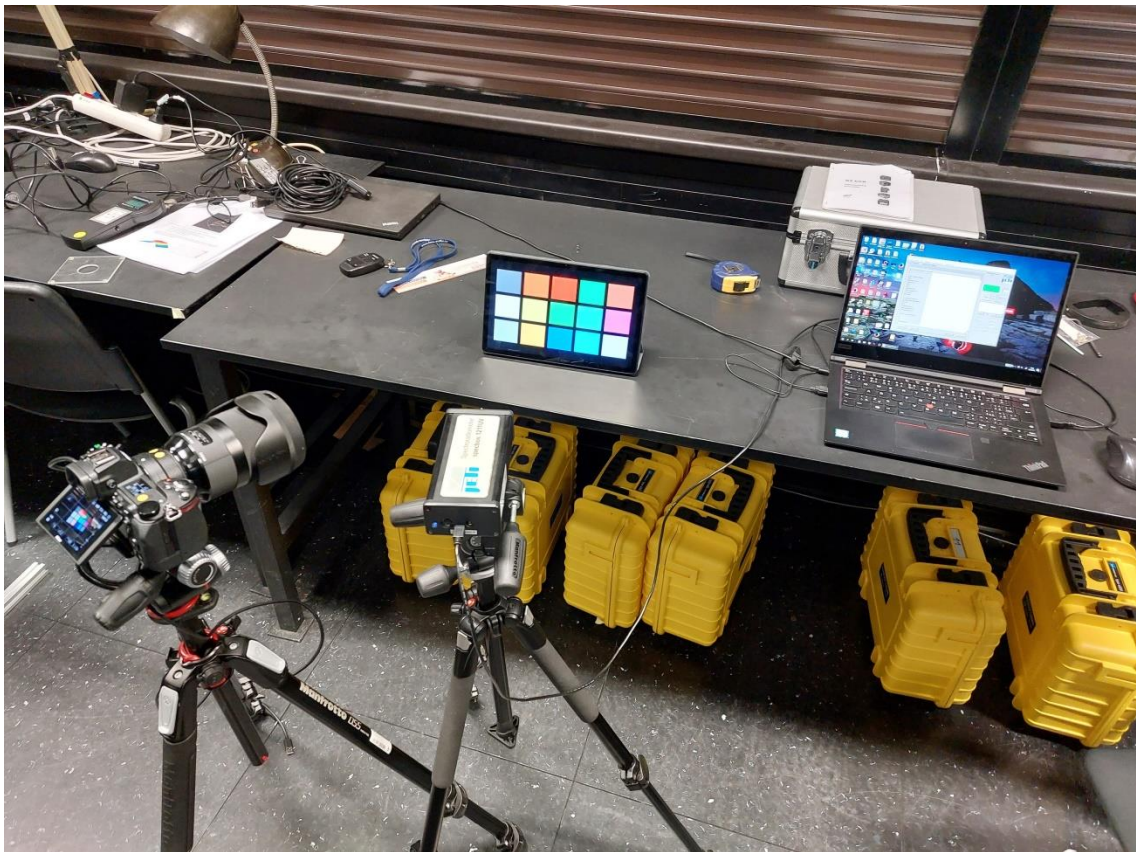
Měření probíhalo v laboratoři světelné techniky na VUT a byl zvolen následující pracovní postup.

Pokud měřené zařízení umožňovalo nastavení teploty chromatičnosti (typicky monitor), byla nastavena její hodnota co nejbližší hodnotě 6500 K při vypnutém nočním osvětlení, poté byl zobrazena testovací paleta na celé obrazovce.

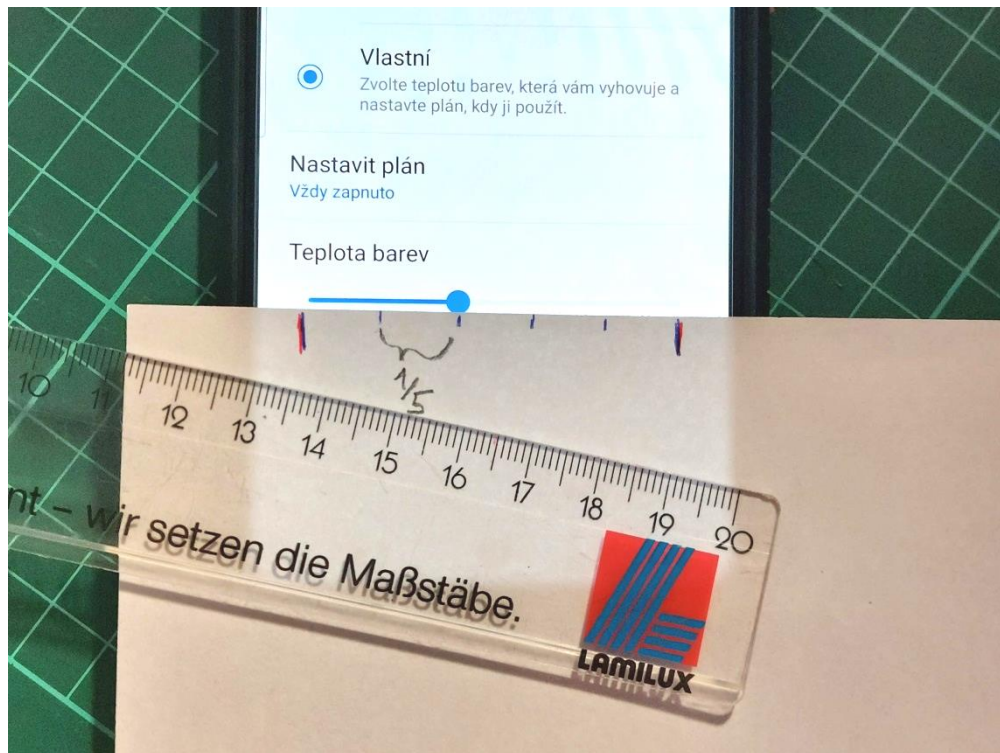
Jasový analyzátor LDA-LumiDISP s nasazeným 1. filtrem (fotopický) byl umístěn na stativ před testovací obrazovku a postupně byly do PC zaznamenány snímky pro vybrané intenzity nastavení nočního osvětlení. Pro Windows v rozsahu 0 – 100 s krokem 10. U zařízení se systémem Android v rozsahu min – max s krokem 1/5 rozsahu, pomocí vyrobené stupnice na pomocném papíru.

Předchozí krok byl opakován i pro nasazený 2. filtr (melanopický), při výměně byla maximalizována snaha nepohnout s fotoaparátem ani měřeným objektem.

Na závěr bylo opakováno měření spekter jednotlivých barev (15) testovací palety pro totožné kroky nastavení nočního osvětlení spektrometrem JETI specbos 1211UV.



Obrázek 4.5 Pracoviště v laboratoři



Obrázek 4.6 Nastavení intenzity nočního osvětlení v systému Android pomocí ručně vyrobené stupnice.

4.2.1 Měření spektrometrem JETI specbos 1211UV

Použitý spektrometr JETI specbos 1211UV byl připojen k počítači pomocí mini USB kabelu. Pro ovládání slouží program JETI LiVal, jehož prostředí je přehledné a účelné. Hlavní část programu zobrazuje měřená data a v levém sloupci jsou základní ovládací prvky pro práci se spektrometrem.

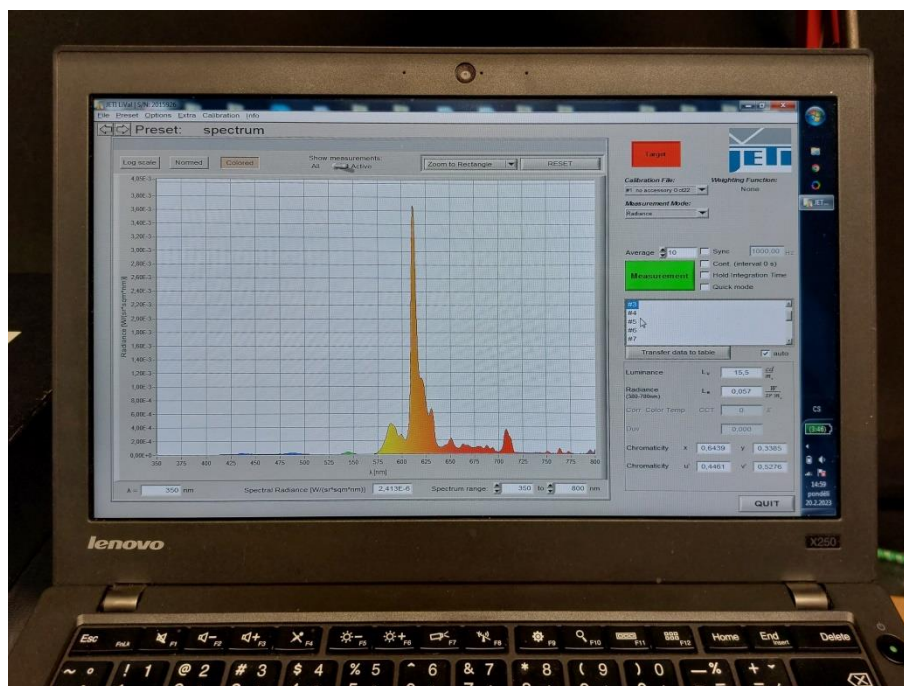
Před samotným měřením bylo nastaveno požadované měřené spektrum 380 – 780 nm, samotný přístroj umožňuje měřit v rozsahu 230 – 1000 nm. Pro zpřesnění měření byl zvolen počet opakování jednotlivých měření na počet 10. Ten však z časové náročnosti musel být u měření tmavých polí snižován, kde docházelo ke značnému prodloužení doby měření z obvyklé doby okolo 5 s až k dobám v řádu jednotek minut.

Spektrometrem byl umístěn před měřený objekt na stativu, aby se zamezilo jeho pohybu během měření.

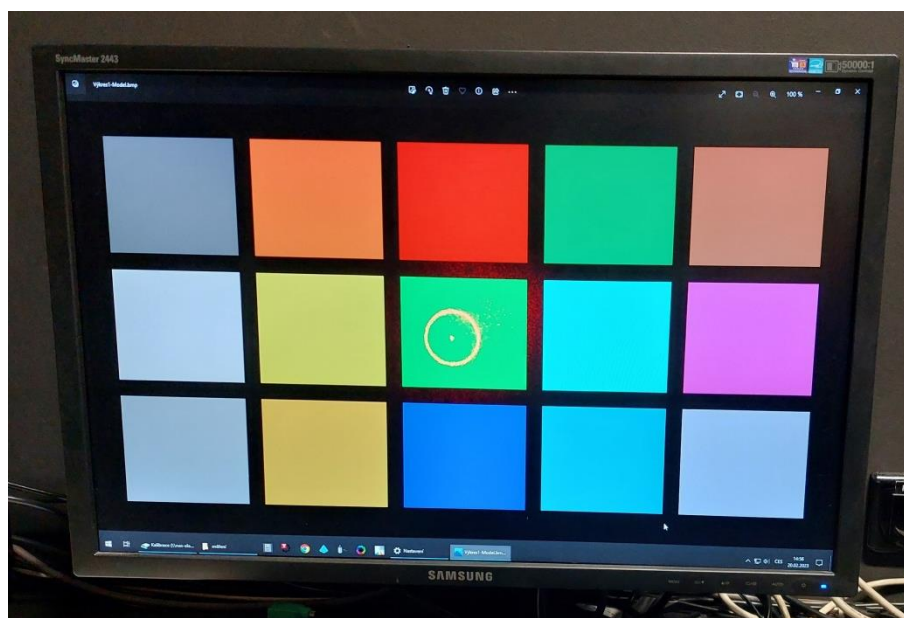
Pro snazší nastavení měření měřené oblasti bylo s výhodou použito automatické zapínání ukazatele pod tlačítkem „Target“.

Jednotlivé záznamy měření jsou postupně automaticky číslovány (#1, #2, #3, ...), čehož bylo využito pro jednodušší identifikaci měřeného záznamu měření během vyhodnocování výsledků. Aby byla eliminována chyba v zpětné identifikaci záznamu,

byl vždy první záznam z měřeného cyklu přejmenován aktuální hodnotou nastavené intenzity nočního osvětlení.



Obrázek 4.7 Prostředí programu JETI LiVal



Obrázek 4.8 Ukazatel měřené oblasti spektrometru JETI specbos 1211UV

4.2.2 Vyhodnocení měření spektrometrem JETI specbos 1211UV

Výsledná data byla z programu JETI LiVal vyexportována do datového souboru typu xls. Který sloužil jako zdroj dat následného zpracování.

Původní varianta zpracování jednotlivých spekter, v nástroji Toolbox „CIE S 026 alpha-opic Toolbox.xls“ v programu Excel vycházející z normy CIE S026-2018, byla neefektivní.

Z toho důvodu byla vytvořena vlastní tabulka na zpracování jednotlivých změřených spekter, která pomocí fotopické váhovací křivky vypočítávala jas L , pomocí melanopické křivky ekvivalent jasu melanopickou zář L_{mel} , jejich vzájemný podíl jako veličinu ELR (efficacy of luminous radiation) a EDL (equivalent daylight D65 luminance). Pro vzájemné porovnání spekter byly také průběhy přepočítány na normativní hladinu jasu 100 cd.m^{-2} .

4.3 Měření s jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP

Jak bylo již zmíněno jasový analyzátoz LDA-LumiDISP je speciálně upravený fotoaparát, od čehož se odvíjí způsob měření, shodný s pořizováním běžné fotografie. Ve výhodě jsou uživatelé, kteří již mají zkušenosti s fotografováním v pokročilých režimech.

S jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP je možné pracovat ve dvou režimech. V prvním je možné použít samostatný fotoaparát s příslušným obrazovým filtrem a ukládat jednotlivé snímky na paměťovou kartu fotoaparátu. Pro správně pořízený snímek je klíčové, aby byla expozice snímku ve správných mezích, to lze sledovat na histogramu snímku na displeji fotoaparátu. Pro tento režim využití je nutná pokročilejší znalost měření, abychom se vyhnuly snímekům se špatnou expozicí.

Nebo zvolit postup kdy je jasový analyzátoz LDA-LumiDISP připojený pomocí USB-C kabelu s počítačem s ovládacím programem LumiDISP. Tato metoda umožňuje okamžitou kontrolu snímku a uložení snímku do databáze projektu, kde si může uživatel jednotlivé snímky třídit do požadované struktury.



Obrázek 4.9 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP

Jasový analyzátor LDA-LumiDISP se řadí mezi konkurenčními řešeními mezi kompaktní zařízení, avšak může běžného uživatele, zvyklého na kompaktnější fotoaparáty, překvapit hmotností celé sestavy, přesahující 2 kg.

Kde jednotlivé hmotnosti sestavy činní:

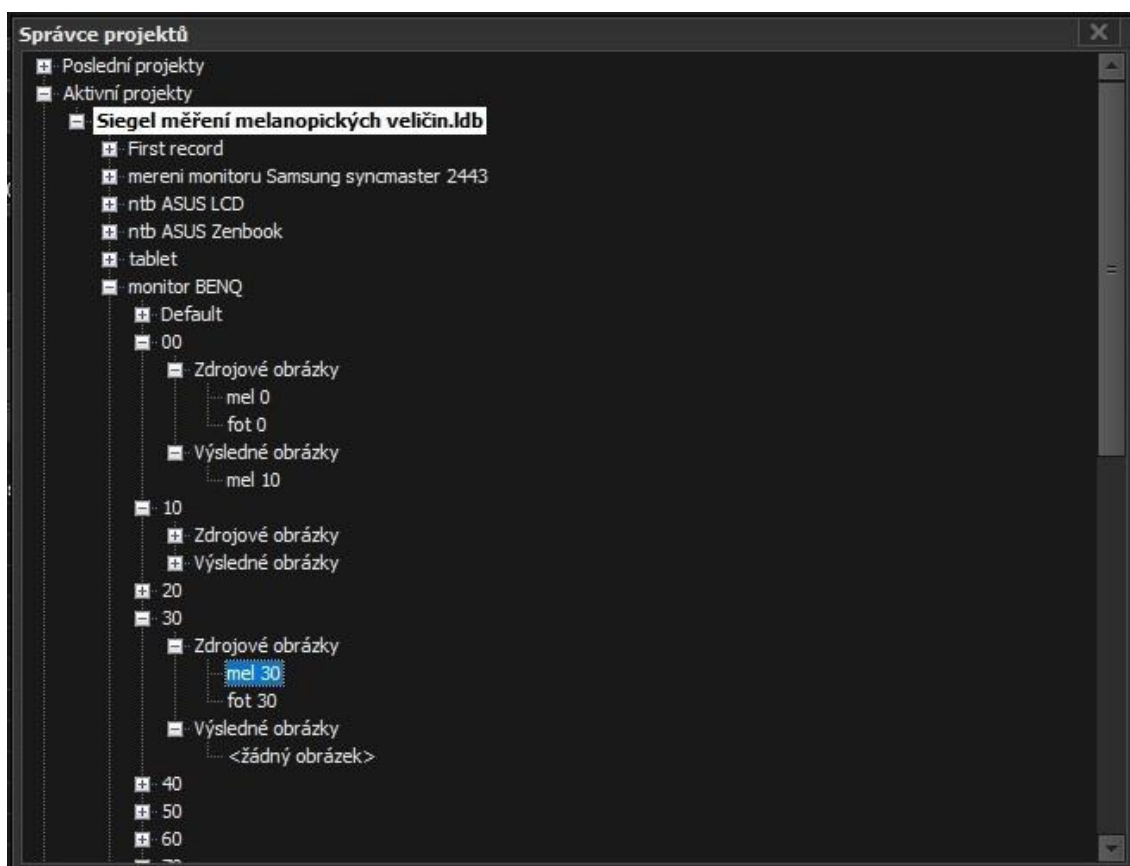
Tělo fotoaparátu Nikon Z6 II	705 g
Adaptér Nikon FTZ II	129 g
Objektiv Sigma 40mm/f1,4	1264 g

4.3.1 Nastavení programu LumiDISP

Před samotným měřením je nutné vytvořit nový projekt nebo vybrat existující projekt, ve kterém chce uživatel pokračovat. Veškerá měřená data i výsledky jsou ukládána do databáze projektu na předem určeném místě. Je důležité, aby uživatel měl dostatečnou kapacitu úložného prostoru na svém počítači, protože velikost dat se může lišit v závislosti na rozsahu projektu.

Velikost databáze se může pohybovat od menších projektů s velikostí v desítkách GB, přes středně velké projekty s velikostí v nižších stovkách GB až po rozsáhlejší projekty blížící se TB. Je tedy důležité mít k dispozici dostatečný úložný prostor, aby bylo možné efektivně spravovat všechna naměřená data.

Pro lepší orientaci a organizaci dat je možné data řadit do stromové struktury dle logického uvážení. To umožňuje uživatelům snadno identifikovat a lokalizovat konkrétní soubory a informace v rámci projektu. Stromová struktura umožňuje hierarchické uspořádání dat a snadnou navigaci mezi jednotlivými složkami a soubory projektu. Tímto způsobem se uživatelé mohou lépe orientovat ve svých projektech a usnadňuje se jim práce s daty.



Obrázek 4.10 Stromová struktura programu LumiDISP

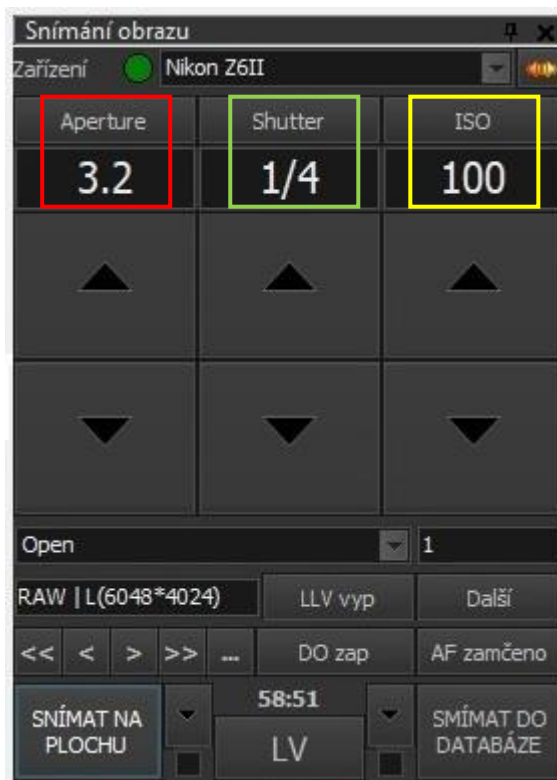
4.3.2 Základní ovládání

Po připojení jasového analyzátoru LDA-LumiDISP s počítačem bylo nutné zaktivovat připojení v ovládací paletě snímání obrazu, pro aktivaci této palety lze s výhodou požit klávesou zkratku „F2“. Využití klávesových zkratk, uživateli usnadní práci a zrychlí proces snímání.

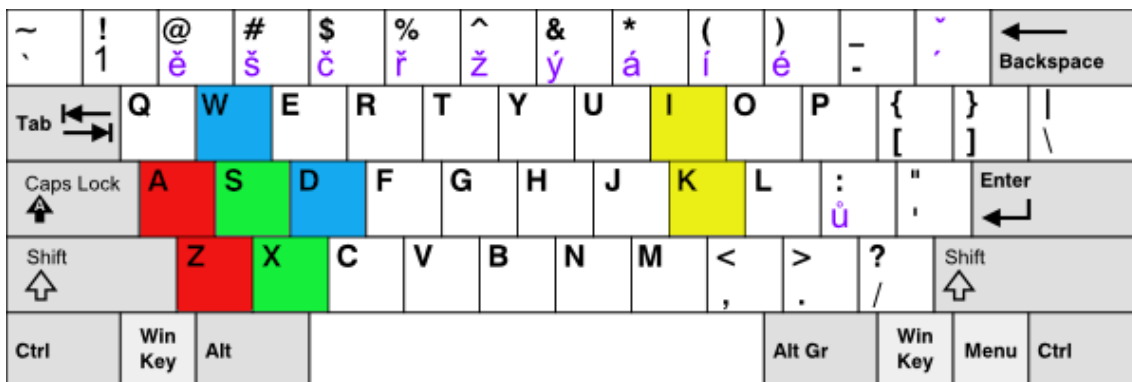
Aktuální obraz je možné uložit přímo do vybraného pohledu (Snímat do databáze), tlačítkem či zkratka „D“, nebo pouze zobrazit na pracovní ploše (Snímat na plochu), zkratka „W“, případně kontrolovat expozici pomocí živého náhledu (LV).

Pro rychlou práci v terénu, lze s výhodou využít klávesových zkratk pro ovládání expozice a citlivosti ISO.

Aperture (clona): **A/Z**
 Shutter (čas expozice): **S/X**
 ISO: **I/K**



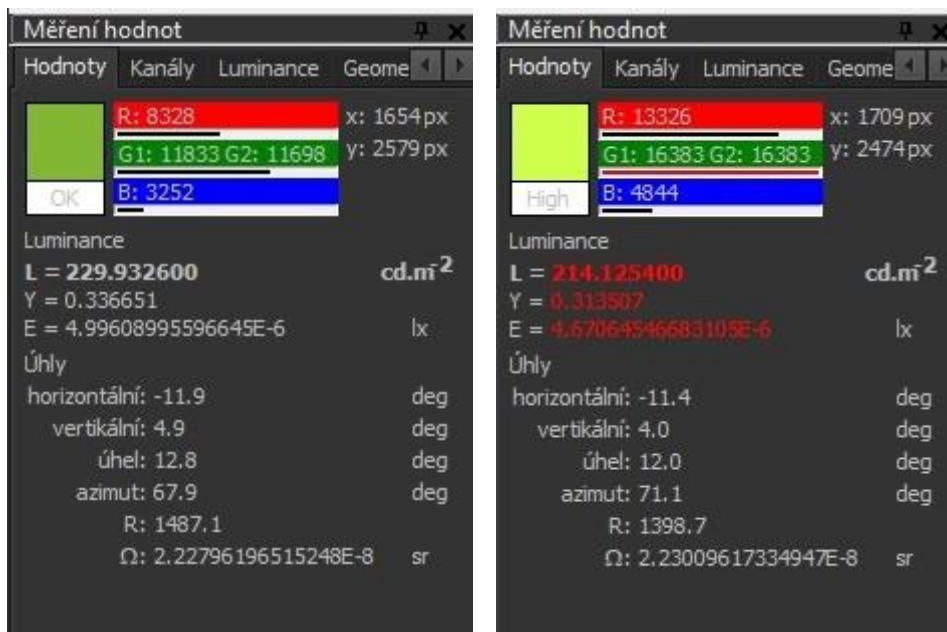
Obrázek 4.11 Ovládací paleta snímání obrazu



Obrázek 4.12 Rozložení klávesových zkratk, pro ovládání

4.3.3 Kontrola expozice

Uživatel má možnost po pořízení snímku zkontrolovat správnost expozice, pomocí ovládací palety Měření hodnot v editaci pořízeného záznamu. Vybuzení jednotlivých kanálů by optimálně nemělo překračovat 2/3 rozsahu. Naopak je nutné dávat pozor, aby nedošlo k podexponování záznamu a tím se zvýšila nepřesnost měření.



Obrázek 4.13 Kontrola správnosti expozice (vlevo správná, vpravo přeexponovaná)

4.3.4 Zpracování přidání L kanálu do snímku

Aby bylo možné snímky analyzovat z pohledu jasové scény, bylo potřeba do snímků přidat speciální datový kanál nesoucí informaci o hodnotě jasu, případně melanopické záře.

Příkazem Vytvořit kanál, lze vyvolat příkaz k vytvoření požadovaného kanálu. Dle použitého filtru (LUMINANCE/MELANOPIC) a ohniska objektivu je nutné ze seznamu vybrat příslušné kalibrační nastavení.

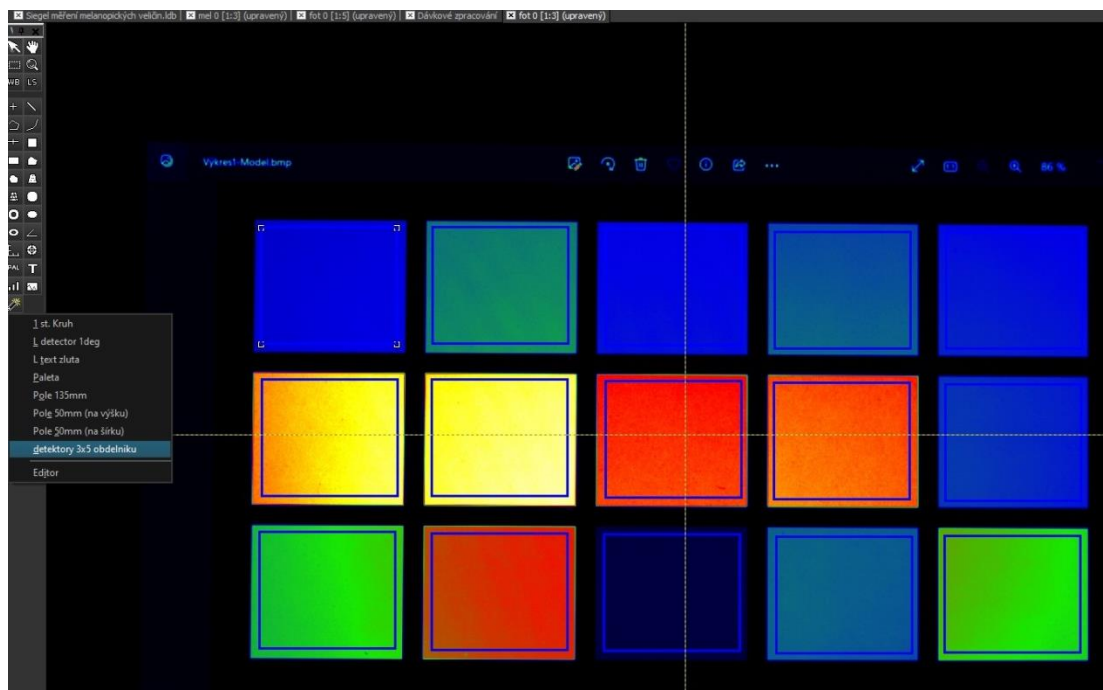
Takto zpracovat lze aktuálně otevřený snímek, nebo dávkově všechny snímky, které jsou zařazené do seznamu snímků.

Tato operace zabírá při zpracování nejvíce času, v závislosti na výpočetním výkonu počítače, obvykle u jednoho snímku okolo 15 s.

Přidáním informací do snímků dojde také ke zvětšení velikosti záznamu, z původní vstupní velikosti okolo 30 MB na přibližně 100 MB.

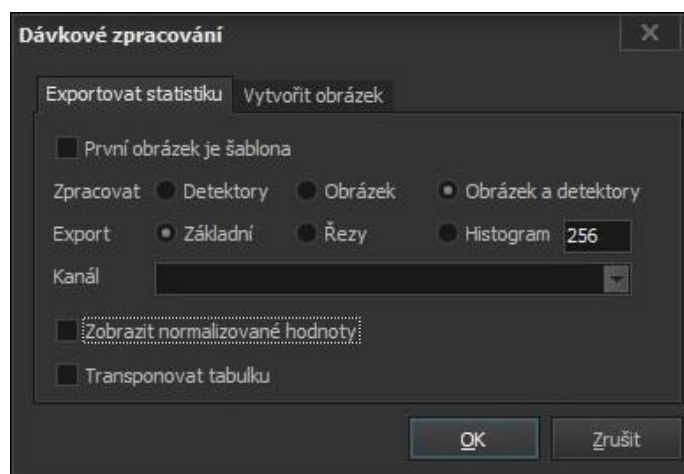
4.3.5 Vložení detektorů a export dat

Do snímku lze vložit již dříve vytvořené detektory, speciální prvky, které programu definují jednotlivé oblasti, které se mají vyhodnocovat. Vytvořená kompozice lze uložit do šablony a s výhodou využít na dalších snímcích.



Obrázek 4.14 Vložení detektorů do snímku a tvorba šablony

K hromadnému zpracování slouží příkaz Dávkové zpracování, požadované snímky je nutné umístit do seznamu na zpracování, první záznam může sloužit jako šablona. Není tedy nutné kopírovat detektory do všech snímků, ale využije se umístění detektorů v prvním snímku, ten ale není zahrnut do vypisovaných výsledků.



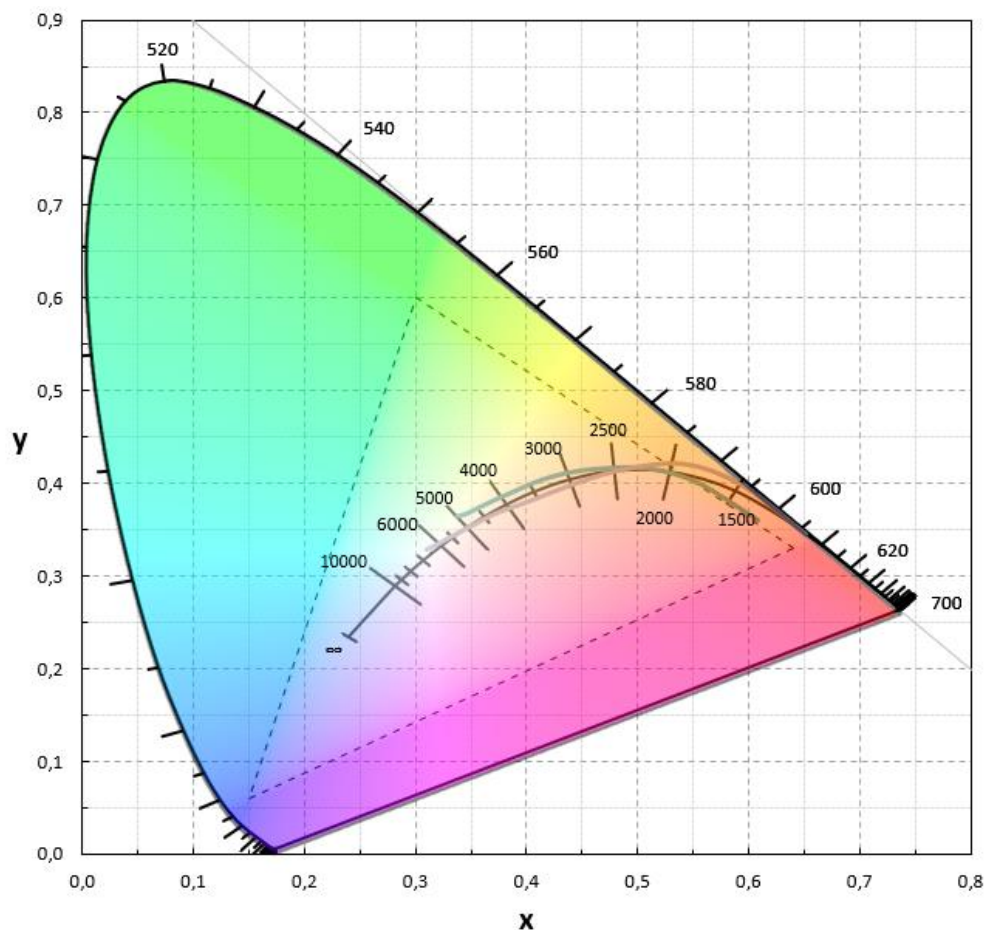
Obrázek 4.15 Příkaz na dávkové zpracování

5. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ OBRAZOVEK

V následující kapitole jsou vyhodnoceny jednotlivé změřené veličiny zkoumaných obrazovek.

Pro reprezentaci výsledků bylo vybráno políčko obsahující bílou barvu, které obsahuje celé spektrum. Hodnoty jsou zobrazené v tabulkách a grafech v závislosti na nastavení intenzity noční osvětlení, dále označováno zkratkou NM (Night mode).

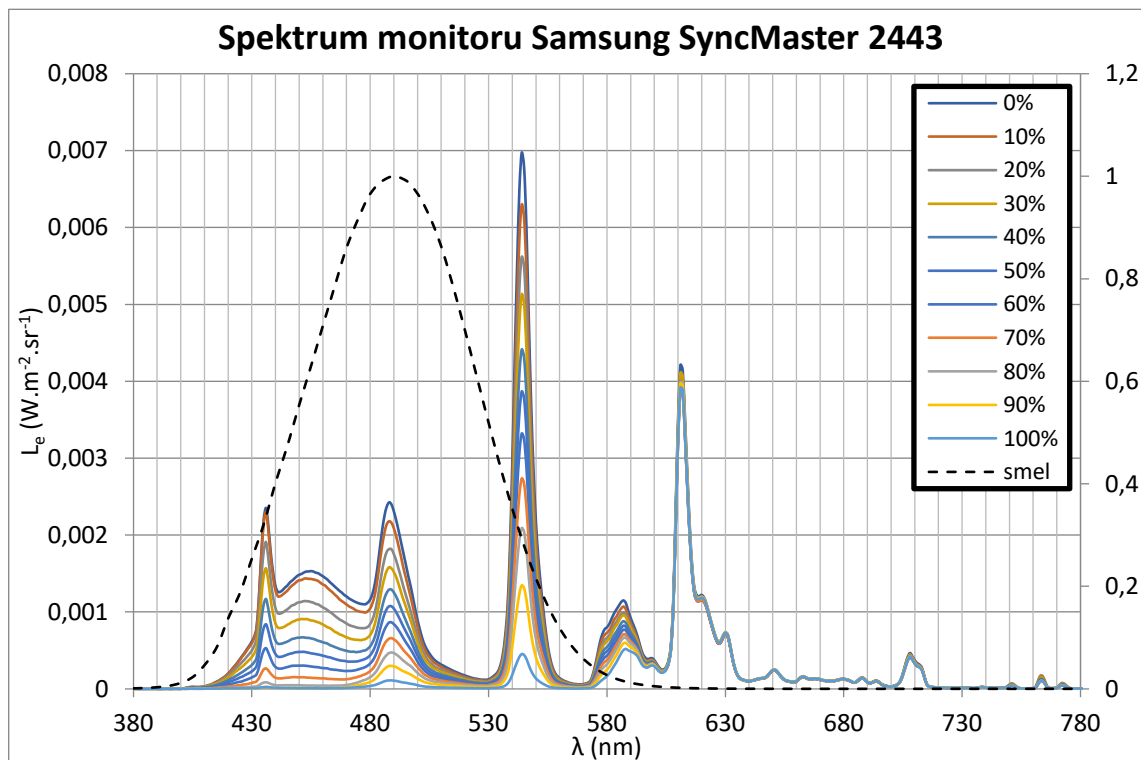
Na následujícím obrázku je zobrazen posun teploty chromatičnosti pro Notebook Asus ExpertBook 14i7 (modrá barva) a Notebook Asus Zenbook 14R5 (šedá barva) v barevném prostoru CIE XYZ (nebo také CIE 1931) v závislosti na intenzitě NM.



Obrázek 5.1 Zobrazení teploty chromatičnosti měřených zařízení v barevném prostoru CIE XYZ

5.1 LCD monitor Samsung SyncMaster 2443

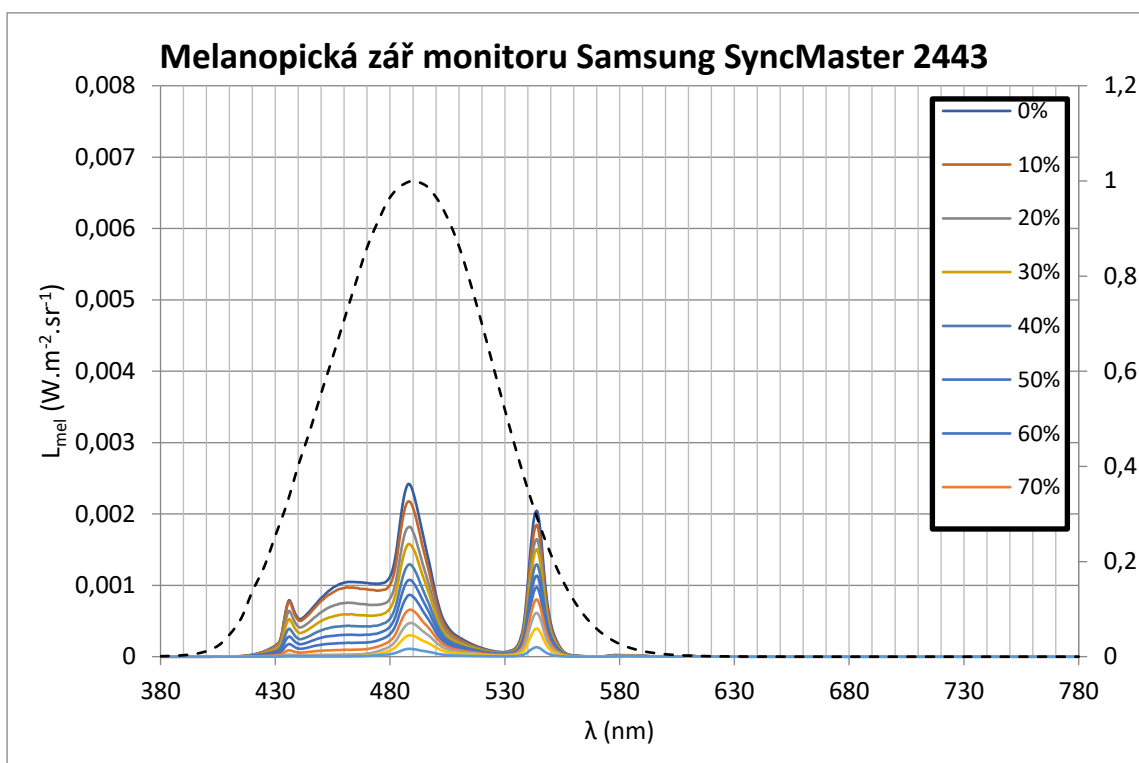
Výsledky prvního testovaného monitoru Samsung SyncMaster 2443, který disponuje zobrazovacím panelem typu TN podsvíceném CCFL výbojkami. Ve spektru jsou patrné jednotlivé špičky vlnových délek dle použitého luminoforu ve výbojce.



Obrázek 5.2 Spektrum monitoru Samsung SyncMaster 2443 v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.1 Porovnání změřených veličin pro monitor Samsung SyncMaster 2443

NM	L		L_{mel}		ELR		EDL	
	cd.m ⁻²		mW.m ⁻² .sr ⁻¹		mW.lm ⁻¹		cd.m ⁻²	
%	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA
0	77,6	74,3	104,0	100,7	1,340	1,355	78,4	75,9
10	71,0	70,7	95,0	95,7	1,338	1,353	71,6	72,2
20	64,5	65,1	78,9	81,0	1,225	1,244	59,5	61,1
30	60,2	58,8	67,1	67,3	1,115	1,145	50,6	50,8
40	53,4	53,0	53,8	55,1	1,007	1,040	40,5	41,5
50	48,2	47,6	43,3	44,6	0,900	0,938	32,7	33,6
60	43,2	42,5	33,4	34,8	0,773	0,817	25,2	26,2
70	38,0	37,8	24,1	25,5	0,635	0,675	18,2	19,2
80	33,1	32,4	16,2	16,9	0,489	0,522	12,2	12,8
90	27,0	26,3	9,9	10,3	0,366	0,391	7,4	7,8
100	19,7	18,9	3,8	3,9	0,191	0,209	2,8	3,0



Obrázek 5.3 Melanopická zář monitoru Samsung SyncMaster 2443 v závislosti na intenzitě NM

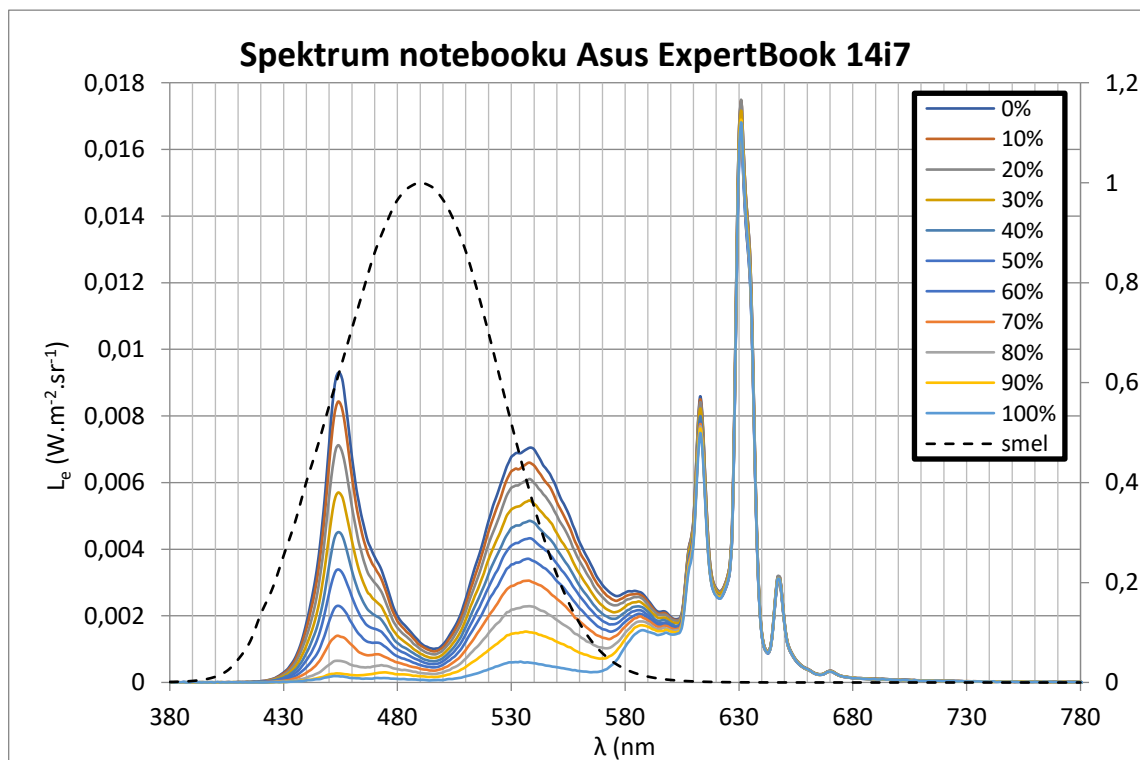
Tabulka 5.2 Odchyly měřených veličin pro monitor Samsung SyncMaster 2443

NM	ΔL		ΔL_{mel}		ΔELR		ΔEDL	
	cd.m ⁻²	%	mW.m ⁻² .sr ⁻¹	%	mW.lm ⁻¹	%	cd.m ⁻²	%
0	3,26	4,2%	3,31	3,2%	-0,01	-1,1%	2,49	3,2%
10	0,26	0,4%	-0,72	-0,8%	-0,02	-1,1%	-0,54	-0,8%
20	-0,65	-1,0%	-2,06	-2,6%	-0,02	-1,6%	-1,55	-2,6%
30	1,38	2,3%	-0,21	-0,3%	-0,03	-2,7%	-0,16	-0,3%
40	0,40	0,7%	-1,32	-2,5%	-0,03	-3,2%	-1,00	-2,5%
50	0,59	1,2%	-1,28	-2,9%	-0,04	-4,2%	-0,96	-2,9%
60	0,69	1,6%	-1,33	-4,0%	-0,04	-5,7%	-1,01	-4,0%
70	0,24	0,6%	-1,35	-5,6%	-0,04	-6,3%	-1,02	-5,6%
80	0,69	2,1%	-0,71	-4,4%	-0,03	-6,6%	-0,54	-4,4%
90	0,65	2,4%	-0,44	-4,5%	-0,03	-7,1%	-0,34	-4,5%
100	0,83	4,2%	-0,17	-4,5%	-0,02	-9,1%	-0,13	-4,5%

V tabulce 5.2 jsou zobrazeny odchyly jasového analyzátoru LDA LumiDISP od referenčního spektrometru JETI. Odchyly u měřených veličin se pohybovaly do 5,6 %, což bylo pod velikostí nejistoty (na kraji snímku do 10%) jasového analyzátoru LDA-LumiDISP.

5.2 Notebook Asus ExpertBook 14i7

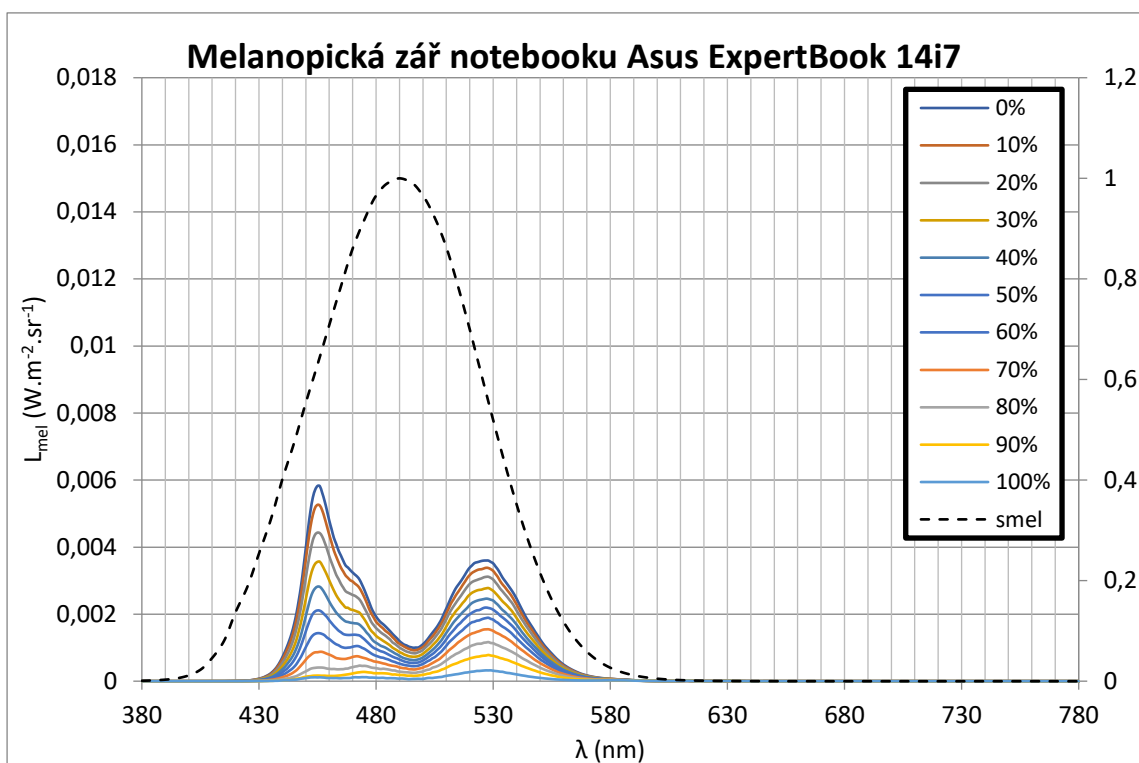
Druhým měřeným zařízením byl přenosný počítač Asus s panelem typu IPS a podsvícením LED.



Obrázek 5.4 Spektrum notebooku Asus ExpertBook 14i7 v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.3 Porovnání změřených veličin pro notebook Asus ExpertBook 14i7

M	L		L_{mel}		ELR		EDL	
	cd.m ⁻²		mW.m ⁻² .sr ⁻¹		mW.lm ⁻¹		cd.m ⁻²	
%	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA
0	308,7	309,9	307,7	316,5	0,997	1,021	232,1	238,6
10	292,9	293,3	283,9	291,2	0,969	0,993	214,1	219,5
20	275,1	274,6	252,5	257,8	0,918	0,939	190,4	194,4
30	251,6	252,1	215,7	220,9	0,857	0,876	162,7	166,5
40	229,4	230,8	183,4	188,3	0,800	0,816	138,3	142,0
50	210,1	210,1	153,8	157,2	0,732	0,748	116,0	118,5
60	189,1	188,1	122,9	124,6	0,650	0,662	92,7	93,9
70	168,0	164,9	93,8	93,8	0,558	0,569	70,7	70,8
80	142,8	142,3	64,2	65,1	0,450	0,458	48,4	49,1
90	117,9	116,1	40,3	40,4	0,342	0,347	30,4	30,4
100	88,0	85,6	17,7	17,4	0,201	0,203	13,3	13,1



Obrázek 5.5 Melanopická zář notebooku Asus ExpertBook 14i7 v závislosti na intenzitě NM

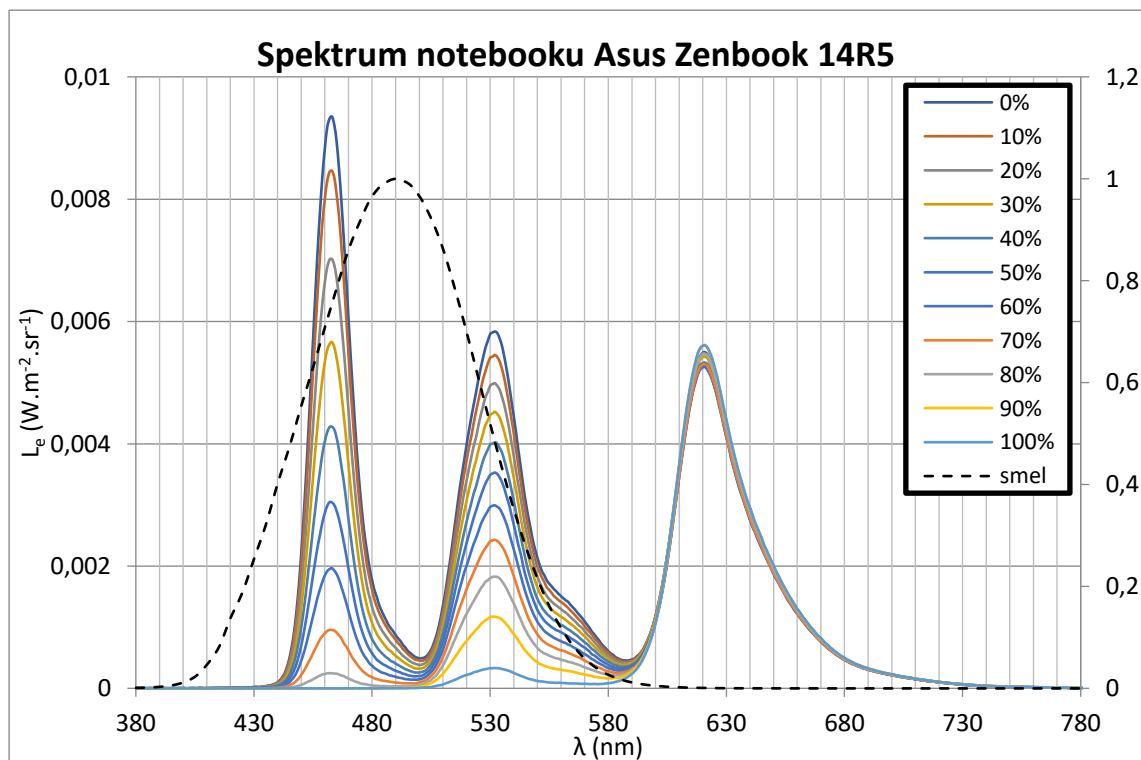
Tabulka 5.4 Odchytky měřených veličin pro notebook Asus ExpertBook 14i7

NM	ΔL		ΔL_{mel}		ELR		ΔEDL	
	cd.m ⁻²	%	mW.m ⁻² .sr ⁻¹	%	mW.lm ⁻¹	%	cd.m ⁻²	%
0	-1,19	-0,4%	-8,75	-2,8%	-0,02	-2,4%	-6,59	-2,8%
10	-0,46	-0,2%	-7,24	-2,5%	-0,02	-2,4%	-5,46	-2,5%
20	0,54	0,2%	-5,27	-2,1%	-0,02	-2,3%	-3,97	-2,1%
30	-0,53	-0,2%	-5,14	-2,4%	-0,02	-2,2%	-3,88	-2,4%
40	-1,34	-0,6%	-4,89	-2,7%	-0,02	-2,1%	-3,69	-2,7%
50	-0,05	0,0%	-3,35	-2,2%	-0,02	-2,2%	-2,52	-2,2%
60	0,96	0,5%	-1,66	-1,3%	-0,01	-1,9%	-1,25	-1,3%
70	3,11	1,9%	-0,04	0,0%	-0,01	-1,9%	-0,03	0,0%
80	0,42	0,3%	-0,92	-1,4%	-0,01	-1,7%	-0,69	-1,4%
90	1,80	1,5%	-0,04	-0,1%	-0,01	-1,7%	-0,03	-0,1%
100	2,35	2,7%	0,23	1,3%	0,00	-1,4%	0,18	1,3%

V tabulce 5.4 jsou zobrazeny odchytky jednotlivých změřených a vypočtených veličin jasového analyzátoru LDA LumiDISP od referenčního spektrometru JETI. Odchytky u měřených veličin se pohybovaly do 2,7 %, což bylo pod velikostí nejistoty (na kraji snímku do 10%) jasového analyzátoru LDA-LumiDISP.

5.3 Notebook Asus Zenbook 14R5

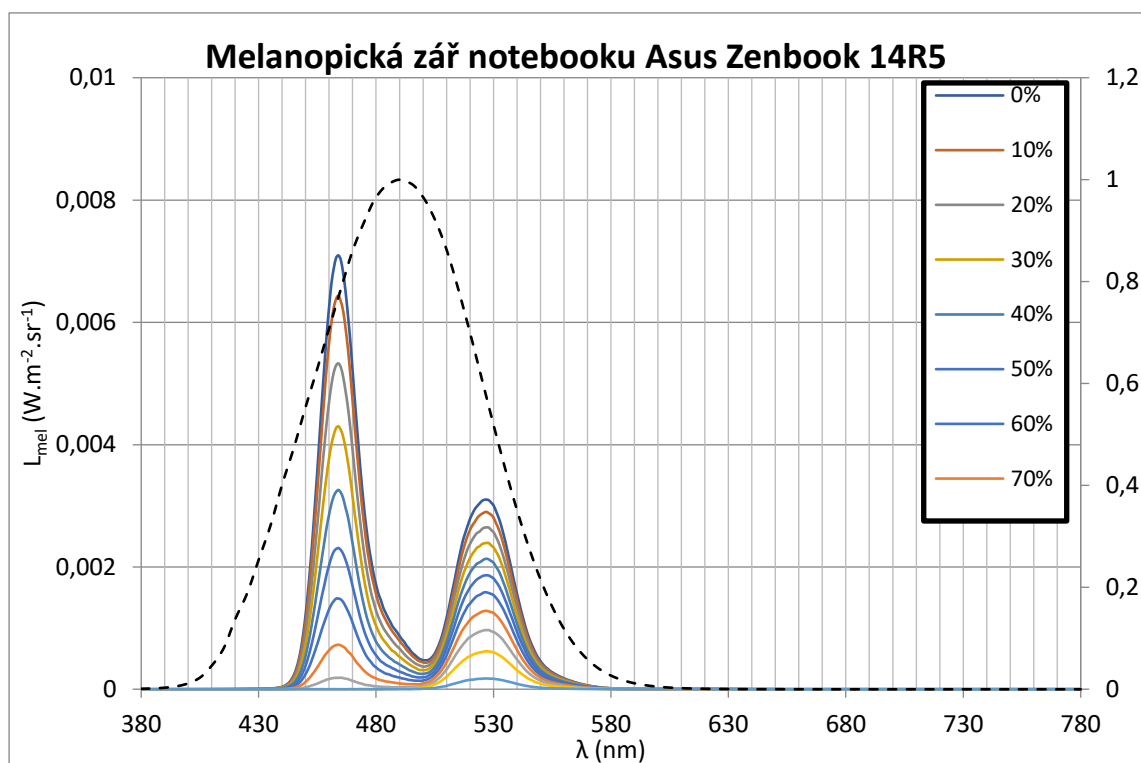
Další přenosný počítač Asus disponoval zobrazovacím panelem typu OLED, je zde patrný posun modré složky do kratší vlnové délky.



Obrázek 5.6 Spektrum notebooku Asus Zenbook 14R5 v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.5 Porovnání změřených veličin pro notebook Asus Zenbook 14R5

NM	L		L _{mel}		ELR		EDL	
	cd.m ⁻²		mW.m ⁻² .sr ⁻¹		mW.lm ⁻¹		cd.m ⁻²	
%	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA
0	182,0	174,1	250,5	251,8	1,377	1,446	188,9	189,8
10	172,6	165,3	229,7	230,8	1,331	1,396	173,2	174,0
20	160,9	154,2	197,9	198,8	1,230	1,289	149,2	149,9
30	148,7	143,0	167,2	167,6	1,125	1,173	126,1	126,4
40	135,4	129,9	136,0	136,3	1,004	1,049	102,6	102,7
50	122,7	117,8	107,1	107,1	0,873	0,909	80,7	80,7
60	109,9	105,1	80,4	80,2	0,732	0,763	60,6	60,5
70	96,8	92,7	54,6	54,7	0,563	0,590	41,1	41,3
80	84,7	80,5	33,3	33,4	0,393	0,414	25,1	25,1
90	71,7	68,3	18,8	18,9	0,262	0,276	14,2	14,2
100	54,1	51,2	5,5	5,4	0,102	0,106	4,2	4,1



Obrázek 5.7 Melanopická zář notebooku Asus Zenbook 14R5 v závislosti na intenzitě NM

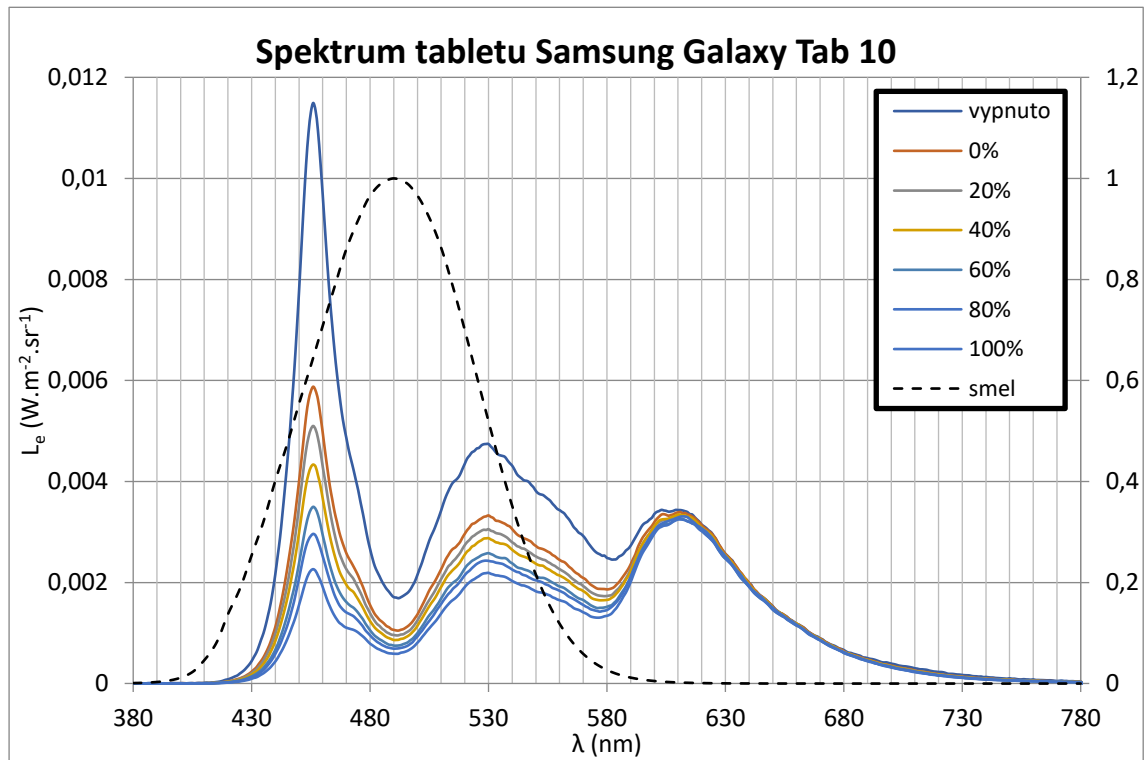
Tabulka 5.6 Odchytky měřených veličin pro notebook Asus Zenbook 14R5

NM	ΔL		ΔL_{mel}		ΔELR		ΔEDL	
	cd.m ⁻²	%	mW.m ⁻² .sr ⁻¹	%	mW.lm ⁻¹	%	cd.m ⁻²	%
0	7,84	4,3%	-1,22	-0,5%	-0,07	-5,0%	-0,92	-0,5%
10	7,31	4,2%	-1,08	-0,5%	-0,07	-4,9%	-0,81	-0,5%
20	6,62	4,1%	-0,88	-0,4%	-0,06	-4,8%	-0,66	-0,4%
30	5,71	3,8%	-0,43	-0,3%	-0,05	-4,3%	-0,32	-0,3%
40	5,55	4,1%	-0,25	-0,2%	-0,04	-4,5%	-0,19	-0,2%
50	4,83	3,9%	-0,02	0,0%	-0,04	-4,1%	-0,01	0,0%
60	4,78	4,4%	0,14	0,2%	-0,03	-4,4%	0,10	0,2%
70	4,17	4,3%	-0,16	-0,3%	-0,03	-4,8%	-0,12	-0,3%
80	4,18	4,9%	-0,06	-0,2%	-0,02	-5,4%	-0,04	-0,2%
90	3,39	4,7%	-0,10	-0,5%	-0,01	-5,5%	-0,08	-0,5%
100	2,89	5,3%	0,11	2,0%	0,00	-3,5%	0,08	2,0%

V tabulce 5.6 jsou zobrazeny odchytky jasového analyzátoru LDA LumiDISP od referenčního spektrometru JETI. Odchytky u měřených veličin se pohybovaly do 5,3 %, což bylo pod velikostí nejistoty (na kraji snímku do 10%) jasového analyzátoru LDA-LumiDISP.

5.4 Tablet Samsung Galaxy Tab 10

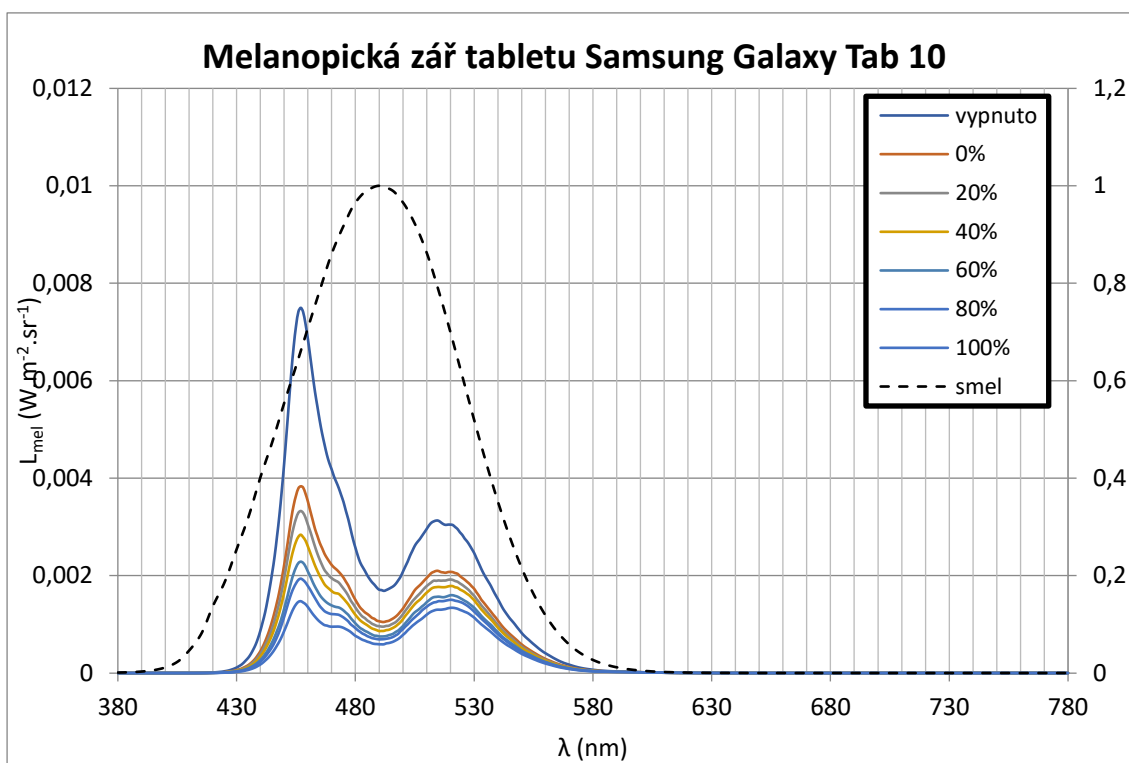
Mezi měřené zařízení byl také zařazen tablet Samsung Galaxy Tab 10 s displejem typu AMOLED.



Obrázek 5.8 Spektrum tabletu Samsung Galaxy Tab 10 v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.7 Porovnání změřených veličin pro tabletu Samsung Galaxy Tab 10

NM	L		L _{mel}		ELR		EDL	
	cd.m ⁻²		mW.m ⁻² .sr ⁻¹		mW.lm ⁻¹		cd.m ⁻²	
%	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA
vyp	248,5	271,3	344,3	393,1	1,385	1,449	259,6	296,4
0	187,2	201,4	204,1	226,5	1,090	1,124	153,9	170,8
20	175,0	191,5	182,8	205,5	1,045	1,073	137,9	155,0
40	167,4	182,2	164,0	183,5	0,980	1,007	123,7	138,4
60	153,7	170,9	140,1	161,6	0,912	0,946	105,6	121,9
80	148,6	162,7	127,3	138,5	0,857	0,851	96,0	104,4
100	137,1	151,4	106,9	119,8	0,780	0,791	80,6	90,3



Obrázek 5.9 Melanopická zář tabletu Samsung Galaxy Tab 10 v závislosti na intenzitě NM

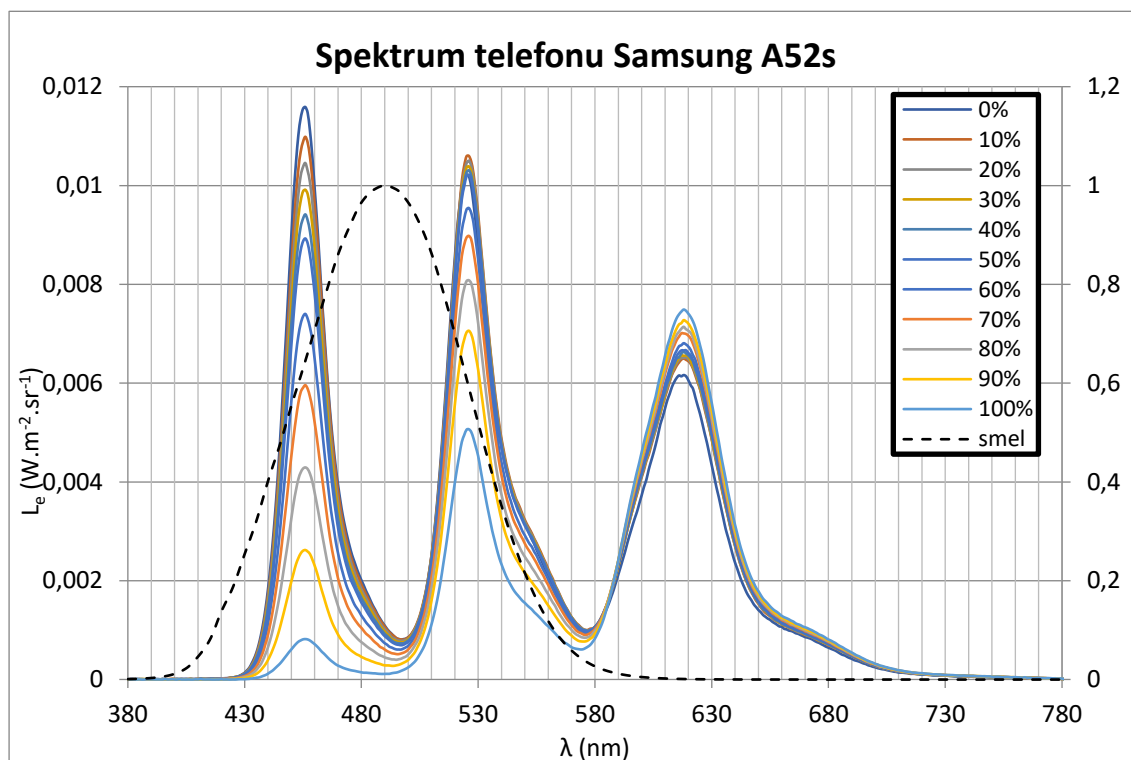
Tabulka 5.8 Odchytky měřených veličin pro monitor tablet Samsung Galaxy Tab 10

NM	ΔL		ΔL_{mel}		ELR		ΔEDL	
	cd.m ⁻²	%	mW.m ⁻² .sr ⁻¹	%	mW.lm ⁻¹	%	cd.m ⁻²	%
vyp	-22,79	-9,2%	-48,87	-14,2%	-0,06	-4,6%	-36,85	-14,2%
0	-14,18	-7,6%	-22,34	-10,9%	-0,03	-3,1%	-16,85	-10,9%
20	-16,56	-9,5%	-22,71	-12,4%	-0,03	-2,7%	-17,12	-12,4%
40	-14,72	-8,8%	-19,47	-11,9%	-0,03	-2,8%	-14,68	-11,9%
60	-17,20	-11,2%	-21,51	-15,4%	-0,03	-3,7%	-16,22	-15,4%
80	-14,17	-9,5%	-11,19	-8,8%	0,01	0,7%	-8,44	-8,8%
100	-14,27	-10,4%	-12,89	-12,1%	-0,01	-1,5%	-9,72	-12,1%

V tabulce 5.8 jsou zobrazeny odchytky jasového analyzátoru LDA LumiDISP od referenčního spektrometru JETI. Odchytky u měřených veličin se pohybovaly až do 15,4 %, což přesahuje velikost nejistoty (na kraji snímku do 10%) jasového analyzátoru LDA-LumiDISP. Odchytky byly způsobeny s největší pravděpodobností dopouštěním se chyb během měření, zejména nebylo možné přesně opakovaně nastavit stejnou intenzitu NM.

5.5 Mobilní telefon Samsung A52s

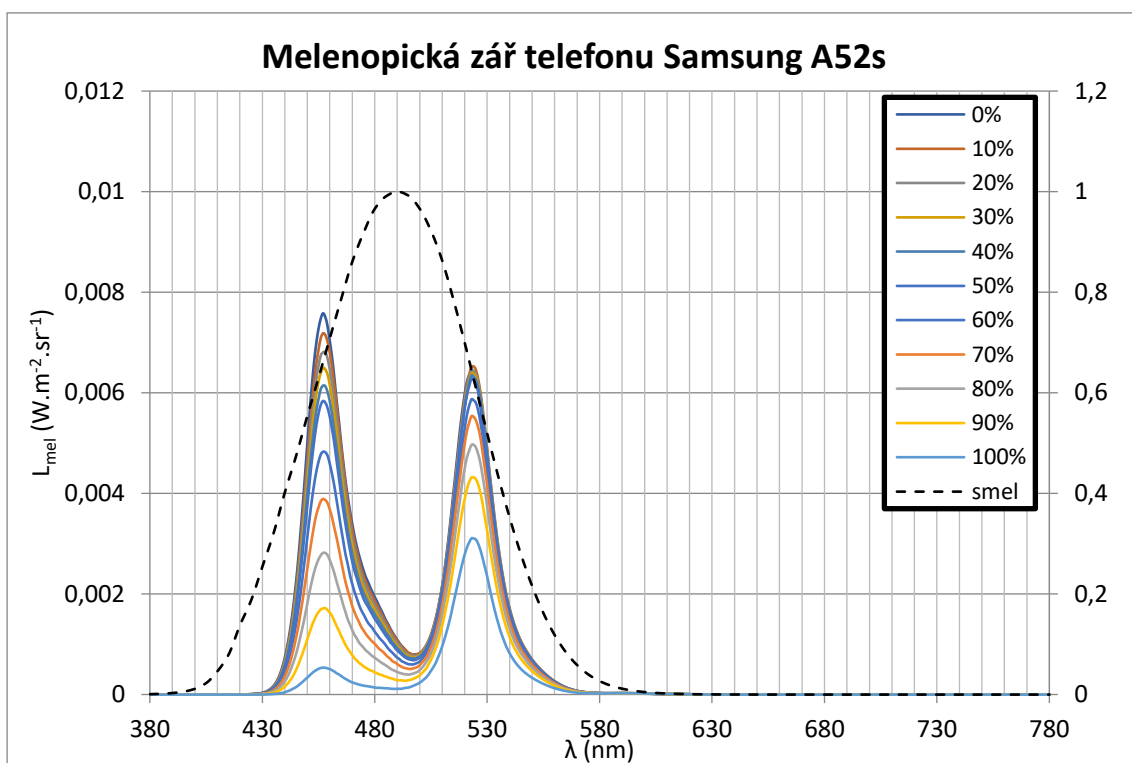
Pro porovnání byl taky vybrán mobilní telefon Samsung A52s s totožnou technologií displeje AMOLED jako předchozí tablet.



Obrázek 5.10 Spektrum telefonu Samsung A52s v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.9 Změřené veličiny pro telefon Samsung A52s

NM	L	L_{mel}	ELR	EDL
%	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$	$\text{mW}\cdot\text{lm}^{-1}$	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$
0	270,5	354,5	1,311	267,3
10	282,2	349,7	1,239	263,7
20	280,0	338,8	1,210	255,4
30	278,2	328,5	1,181	247,7
40	276,7	318,2	1,150	239,9
50	275,3	308,5	1,121	232,6
60	263,0	272,2	1,035	205,3
70	254,2	238,9	0,940	180,2
80	237,8	197,4	0,830	148,8
90	218,7	152,6	0,698	115,0
100	183,6	91,5	0,498	69,0

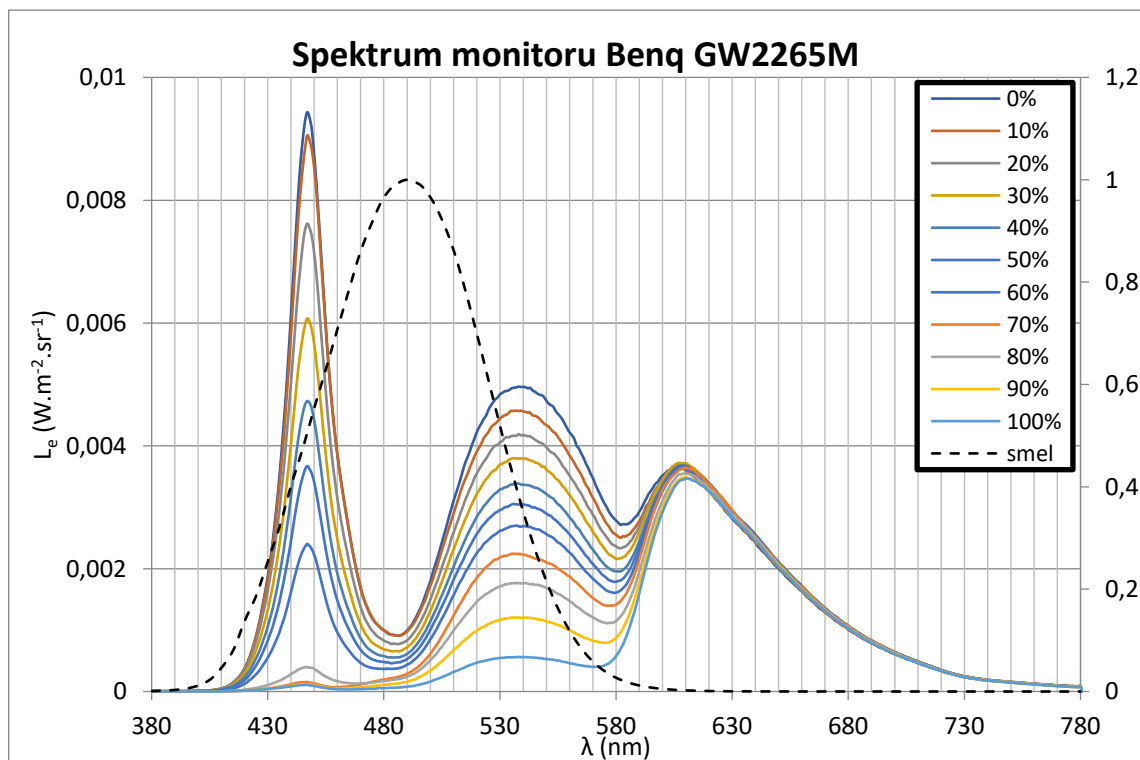


Obrázek 5.11 Melanopická zář telefonu Samsung A52s v závislosti na intenzitě NM

Pro toto zařízení byla získaná data pouze pomocí radiospektrometru JETI.

5.6 LCD monitor Benq GW2265M

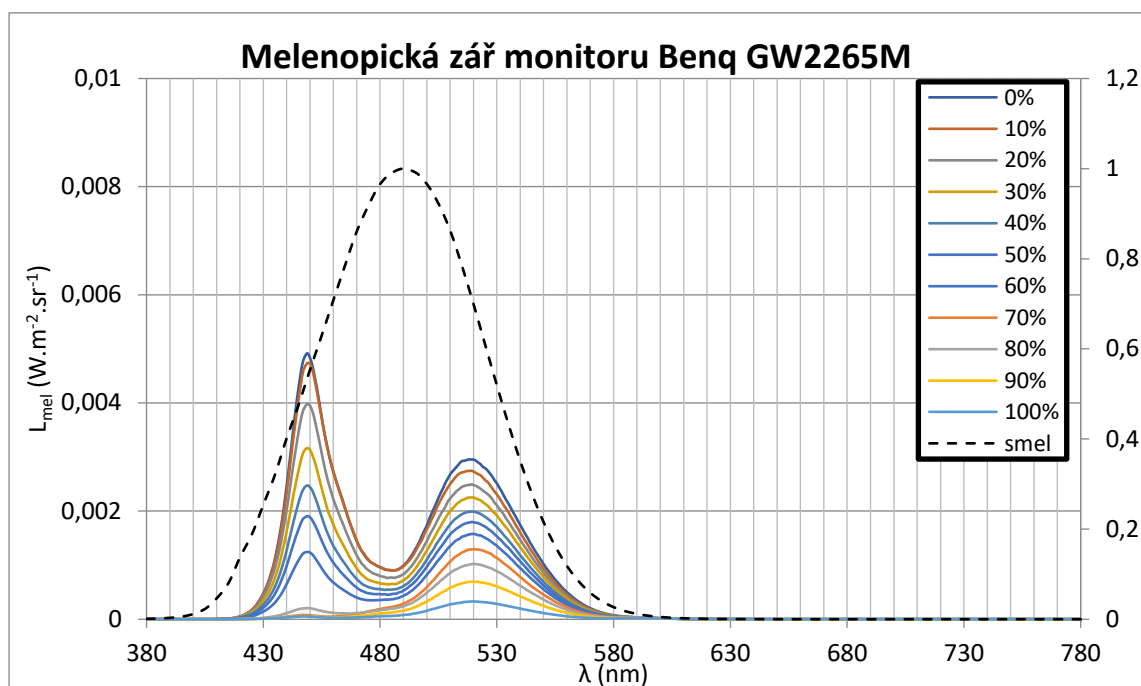
Další monitor Benq GW2265M byl vybaven panel typu VA s podsvícením LED.



Obrázek 5.12 Spektrum monitoru Benq GW2265M v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.10 Porovnání změřených veličin pro monitor Benq GW2265M

NM	L		L_{mel}		ELR		EDL	
	$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$		$\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$		$\text{mW}\cdot\text{lm}^{-1}$		$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$	
%	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA	Jeti	LDA
0	266,0	255,5	274,0	276,2	1,030	1,081	206,6	208,2
10	249,0	245,6	261,7	N/A	1,051	N/A	197,3	N/A
20	232,3	229,3	227,5	236,2	0,979	1,030	171,5	178,1
30	215,6	211,9	193,7	197,9	0,898	0,934	146,0	149,3
40	196,5	193,2	162,8	165,1	0,829	0,855	122,8	124,5
50	181,9	176,6	138,0	136,4	0,759	0,773	104,0	102,9
60	165,8	161,1	109,7	107,6	0,662	0,668	82,7	81,2
70	145,6	141,6	64,9	66,1	0,446	0,467	48,9	49,8
80	125,3	119,1	55,4	51,6	0,442	0,433	41,8	38,9
90	101,5	94,5	35,8	33,8	0,353	0,358	27,0	25,5
100	75,6	69,9	17,8	16,4	0,235	0,235	13,4	12,4



Obrázek 5.13 Melanopická zář monitoru Benq GW2265M v závislosti na intenzitě NM

Tabulka 5.11 Odchytky měřených veličin pro monitor Benq GW2265M

NM	ΔL		ΔL_{mel}		ELR		ΔEDL	
	cd.m ⁻²	%	mW.m ⁻² .sr ⁻¹	%	mW.lm ⁻¹	%	cd.m ⁻²	%
0	10,49	3,9%	-2,12	-0,8%	-0,05	-4,9%	-1,60	-0,8%
10	3,40	1,4%	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
20	2,99	1,3%	-8,71	-3,8%	-0,05	-5,2%	-6,56	-3,8%
30	3,70	1,7%	-4,28	-2,2%	-0,04	-4,0%	-3,23	-2,2%
40	3,32	1,7%	-2,32	-1,4%	-0,03	-3,2%	-1,75	-1,4%
50	5,28	2,9%	1,53	1,1%	-0,01	-1,8%	1,15	1,1%
60	4,62	2,8%	2,04	1,9%	-0,01	-1,0%	1,54	1,9%
70	3,97	2,7%	-1,22	-1,9%	-0,02	-4,7%	-0,92	-1,9%
80	6,25	5,0%	3,78	6,8%	0,01	1,9%	2,85	6,8%
90	6,93	6,8%	2,00	5,6%	0,00	-1,3%	1,51	5,6%
100	5,69	7,5%	1,35	7,6%	0,00	0,1%	1,02	7,6%

V tabulce 5.11 jsou zobrazeny odchytky jasového analyzátoru LDA LumiDISP od referenčního spektrometru JETi. Odchytky u měřených veličin se pohybovaly do 7,5 %, což bylo pod velikostí nejistoty (na kraji snímku do 10%) jasového analyzátoru LDA-LumiDISP. Bohužel během zpracování dat v LumiDISPu došlo ke ztrátě jednoho snímku, z toho důvodu nebyly vyhodnoceny veličiny pro intenzitu NM 10 %.

5.7 Televize LG 75UN7070

Jako zástupce další kategorie televizí byla vybrána televize LG 75UN7070 s IPS panelem a typem podsvícením Direct LED.

Měřená data byla získána pouze pomocí jasového analyzátoru LDA LumiDISP.

První částí byla televize připojena k počítači a z počítače byly postupně nastavovány jednotlivé stupně intenzity NM, poté byly změřeny nativní obrazové režimy televize.

Tabulka 5.12 Změřené veličiny pro televizi LG 75UN7070

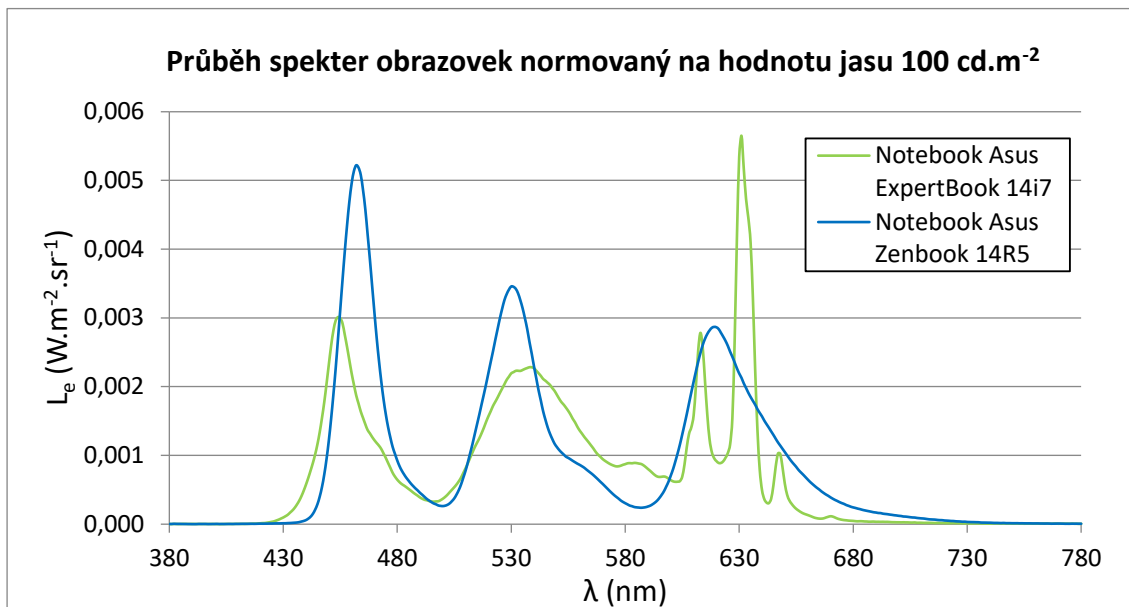
NM	L	L_{mel}	ELR	EDL
%	$cd.m^{-2}$	$mW.m^{-2}.sr^{-1}$	$mW.lm^{-1}$	$cd.m^{-2}$
0	224,8	303,5	1,350	228,8
10	213,5	278,1	1,303	209,7
20	199,4	246,1	1,234	185,5
30	179,9	207,5	1,154	156,5
40	159,6	167,3	1,048	126,2
50	138,2	129,2	0,935	97,4
60	117,5	93,0	0,792	70,1
70	90,9	55,8	0,614	42,0
80	74,4	31,6	0,424	23,8
90	64,6	19,7	0,305	14,8
100	47,1	7,0	0,149	5,3

Tabulka 5.13 Změřené veličiny pro televizi LG 75UN7070, pro jednotlivé obrazové režimy

Režim televize	L	L_{mel}	ELR	EDL
	$cd.m^{-2}$	$mW.m^{-2}.sr^{-1}$	$mW.lm^{-1}$	$cd.m^{-2}$
standart	224,8	303,5	1,350	228,8
eco	237,8	316,8	1,332	238,9
kino	207,0	226,6	1,095	170,9
sport	234,0	317,3	1,356	239,2
game	217,8	279,3	1,282	210,6
HDR	243,8	266,5	1,093	200,9
film	206,1	225,3	1,093	169,9
expert světlý	206,9	226,3	1,094	170,6
expert tmavý	168,5	183,2	1,087	138,1
živý	234,1	317,3	1,355	239,3

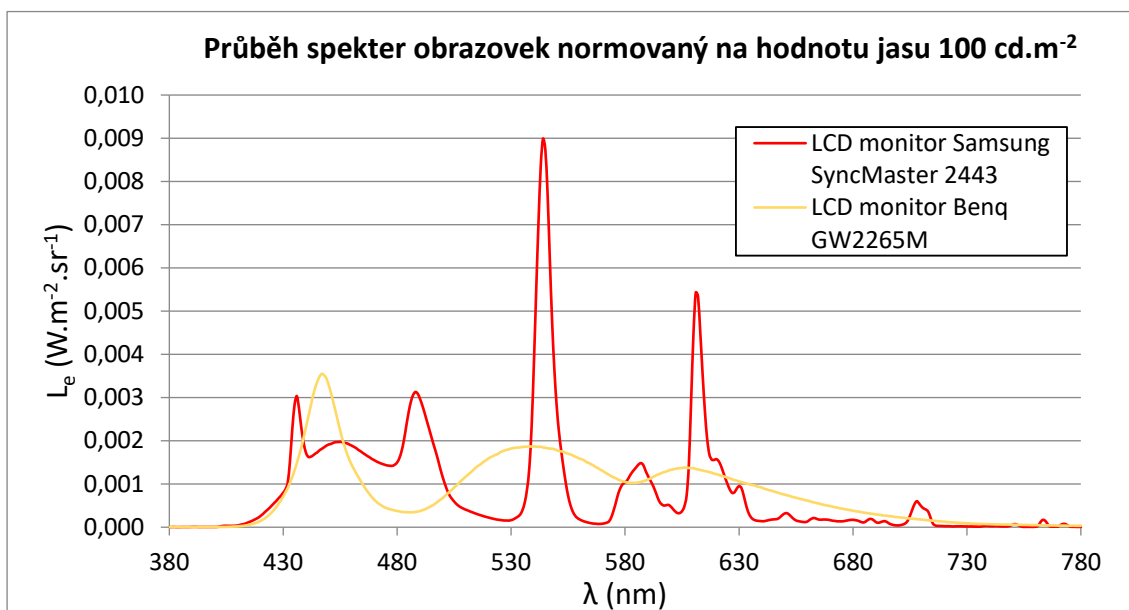
5.7.1 Porovnání základních spekter

V následujících grafech jsou porovnány pro názornost spektra jednotlivých typů panelů a podsvícení. U notebooku s OLED displejem je patrný negativní posun modré složky blíže vrcholu melanopické váhovací křivky smel.



Obrázek 5.14 Porovnání spekter dvou měřených notebooků

Na následujícím grafu je patrný vliv typu podsvícení zobrazovacích panelů. Monitor Samsung disponuje výbojkami CCFL a monitor Benq LED diodami.



Obrázek 5.15 Porovnání spekter dvou měřených monitorů

6. MĚŘENÍ SVÍTIDEL

V další části měření bylo zaměřeno na aktuálně dostupná svítidla na trhu. Hlavním cílem této fáze bylo vytvořit anonymní přehled svítidel a provést statistické zhodnocení, abychom zjistili, jaká míra svítidel je vhodná pro použití ve večerních hodinách.

6.1 Výběr svítidel

Pro místa měření byly vybrány prodejny specializující se na světelnou techniku a větší hobby markety, které často nabízejí široký sortiment svítidel. Tato místa byla považována za vhodná, protože zde bylo očekáváno, že budou k dispozici různé typy svítidel reprezentující dostatečný vzorek dostupných svítidel na trhu.

Avšak v průběhu měření se ukázalo, že i když ve většině obchodů byl dostatečný výběr svítidel, ne všechny prostory byly ideální pro realizaci měření. Okolní podmínky, jako je intenzita ostatního osvětlení v prodejně, odrazivost stěn a další faktory, které mohly ovlivnit přesnost měření a získané výsledky.

Ideálně by mělo být zajištěno, aby podmínky v měřeném prostoru byly co nejbližší těm, které se setkáváme v reálných podmínkách používání svítidel. To je důležité pro získání přesných a relevantních dat a vlastnostech svítidel.

6.2 Postup měření

Měření melanopické záře svítidel bylo provedeno v hobby marketu. Jasový analyzátor byl umístěn na stabilní stativ pro zajištění ostrosti snímků a možnosti pořízení rozdílných expozic.

Pro měření melanopické záře svítidel byl použit pouze melanopický filtr. Výměna filtrů se v terénu z důvodu obtížnosti a případně časté výměny neosvědčila.

Pro zvýšení dynamického rozsahu snímku, byla zvolena metoda skládání více snímků s rozdílnou expozicí, aby bylo dosaženo zachycení širšího rozsahu světelných hodnot. Tato technika je známa jako HDR (High Dynamic Range).

Svítidla byla umístěna na jednotlivých panelech včetně pořadového čísla, které odkazovalo na příslušné místo v regálu, kde byla umístěna svítidla k volnému prodeji. Z popisu svítidla nebo prodejního balení bylo většinou možné vyčíst potřebné údaje potřebné pro následující zpracování dat.

Celý proces snímání několika set svítidel byl poměrně časově náročný, měření probíhalo ve večerních hodinách, během kterých se v obchodě našťastí nepohybovalo v oddělení svítidel mnoho osob.

Jak bylo zmíněno, ne ve všech prostorech bylo vhodné realizovat měření. Limitujícím faktorem bylo potřebné místo před vystavenými svítidly pro umístění měřicí soustavy (Jasový analyzátor LDA, stavit, přenosný počítač, blok na poznámky), dále samotné umístění jednotlivých svítidel a nemožnosti jednotlivého ovládnutí svítidel.

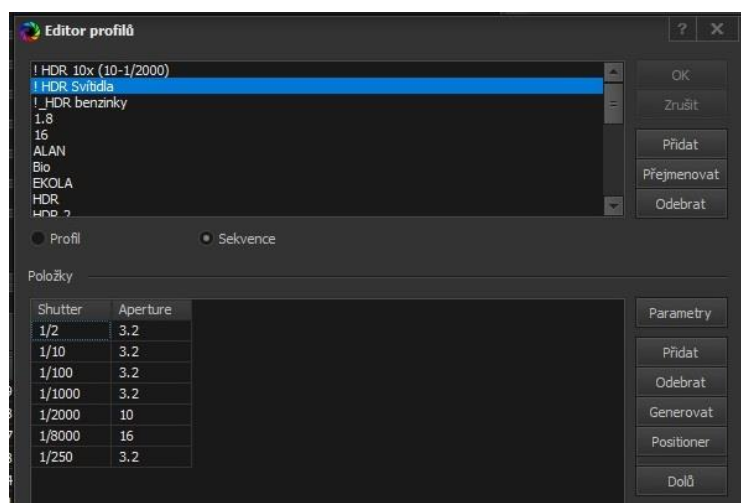


Obrázek 6.1 Optimální umístění měřených svítidel

6.3 Optimalizace měření

Pro snížení potřebného času snímání scény, bylo upuštěno od ručního nastavování expozice snímku, ze zkušenosti ze zkušebních měření byla sestavena vlastní měřící sekvence, daných parametrů časů expozice a velikosti clony.

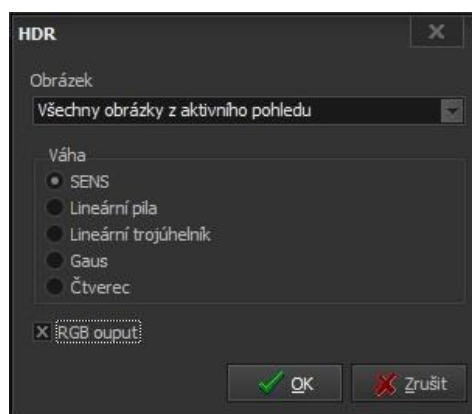
V editoru profilů si může uživatel vytvořit vlastní sekvenci pro jednotlivé snímky, na výběr jsou položky času expozice (Shutter), velikost clony (Aperture) a hodnota citlivosti ISO.



Obrázek 6.2 Nastavení měřící sekvence HDR

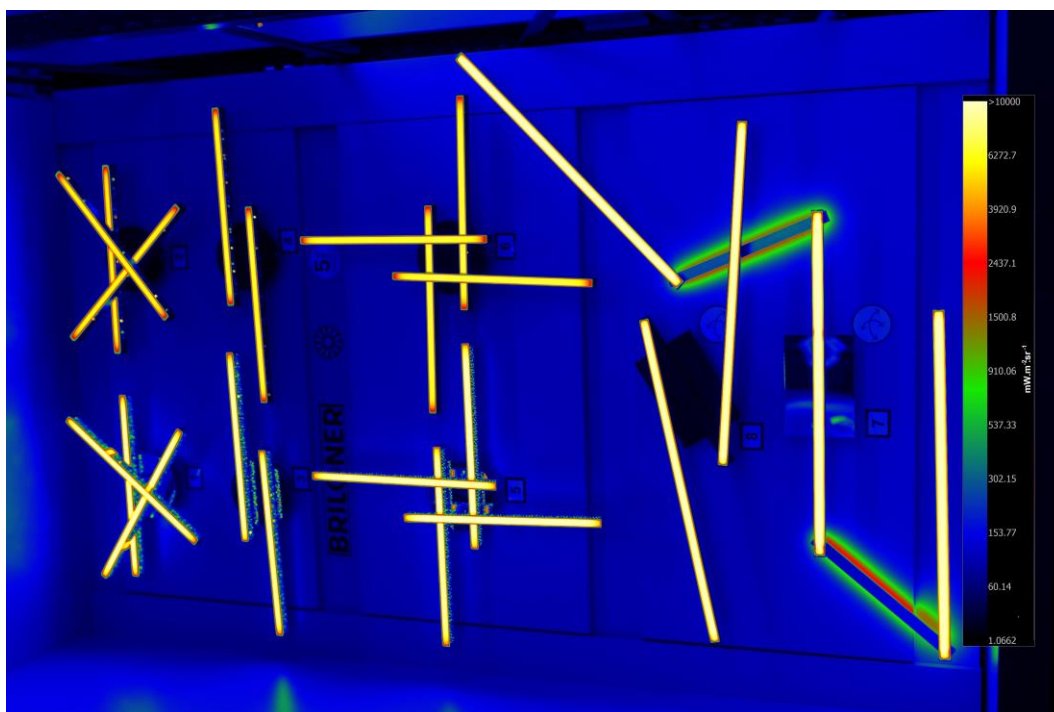
6.4 Zpracování

Ušetřený čas v terénu a eliminace chybného snímku, byl vykoupen většími nároky na zpracování. Každý záběr obsahoval sedm snímků, kterým bylo přidat jasový kanál, následně bylo možné převést zdrojové snímky do výsledného, pomocí příkazu tvorby HDR. Metoda výpočtu byla ponechána z výchozí nastavení „SENS“ a pro výpočet RGB kanálů vybrána volba „RGB output“.



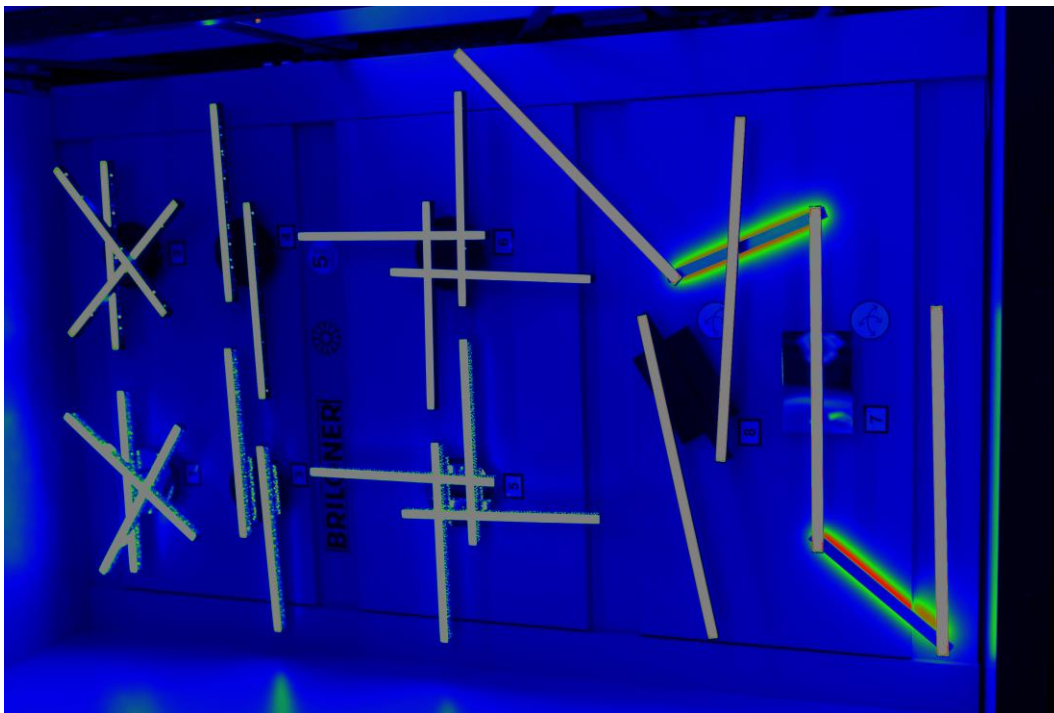
Obrázek 6.3 Tvorba HDR

Výsledkem byl snímek vysokým dynamickým rozsahem, bez přexponovaných bodů. Pro stejné zobrazení všech snímků bylo v paletě nastaveno logaritmické měřítko na hodnotu 2 a rozsah L_{mel} omezen na hodnotu $10000 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.



Obrázek 6.4 Výsledný snímek složený metodou HDR

Následně byly v editaci výsledného snímku pomocí nástroje „Svítidlo“, pod ikonou v nabídce se zkratkou „LS“, vybrány jednotlivé svítidla. Pro nastavení detekce byl zvolen relativní práh 10 %.



Obrázek 6.5 Označená jednotlivá svítidla, určená pro export dat

Z výsledných snímků s vybranými svítidly byly pomocí dávkového zpracování vyexportované kýžené měřená data, která sloužila k dalšímu zpracování.

Při dávkovém zpracování je nutné zrušit volbu Zobrazit na normalizované hodnoty.

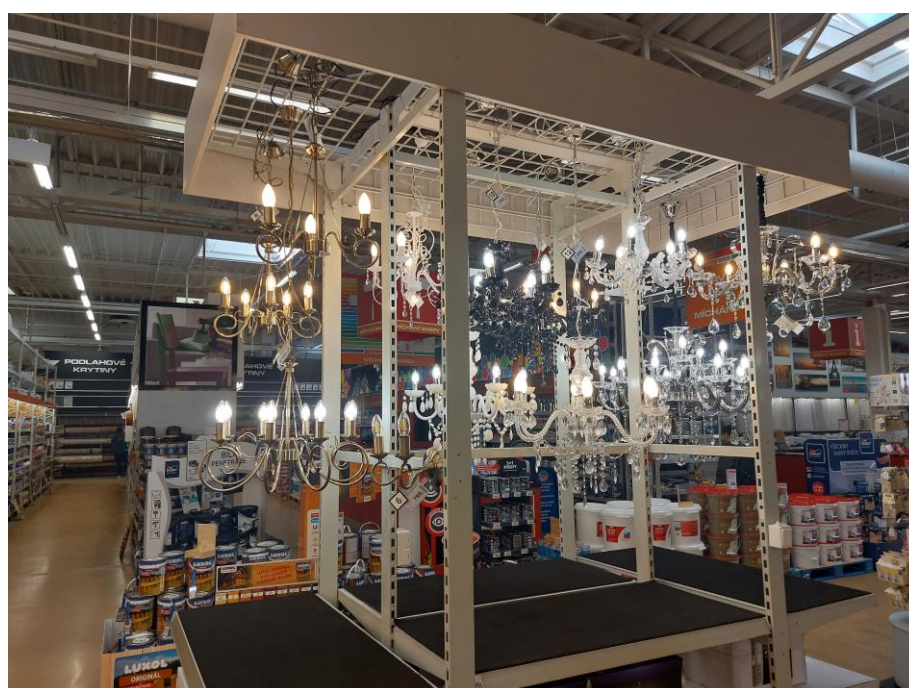
6.5 Korekce parazitního osvětlení

Z důvodu nemožnosti mít vždy rozsvícené jednoho světelného zdroje ve scéně, byla navržena korekce parazitního osvětlení. Metoda vycházela z úvahy, že měřicí podmínky v daném objektu jsou homogenní, vlastnosti materiálů světelných zdrojů a prostředí jsou podobné. Při uvažování těchto předpokladů, bylo poté možné určit procentuální příspěvek parazitního osvětlení k samotné melanopické záři jednotlivého světelného zdroje.

Z vybraných snímků, které byly zaznamenány jak s rozsvícenými tak se zhasnutými světelnými zdroji, byl vypočten procentuální příspěvek parazitního osvětlení prostředí pro každý světelný zdroj. Jednotlivé procentuální příspěvky pro každý světelný zdroj byly zprůměrovány a výsledkem byla konstanta pro korekci parazitního osvětlení daného objektu. Hodnota konstanty se obvykle pohybovala okolo 2% příspěvku prostředí k samotné melanopické záři jednotlivého světelného zdroje.



Obrázek 6.6 Patrný rozdíl teplot chromatičnosti svítidel



Obrázek 6.7 Nevhodně umístěná svítidla pro potřeby měření

6.6 Zhodnocení výsledků

Do výsledků bylo zařazeno 208 zkoumaných světelných zdrojů. Průměrná hodnota světelných zdrojů melanopické záře L_{mel} činila $4605,1 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, při hodnotě mediánu L_{mel} $3352,5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$.

Do výsledků byla promítnuta i deklarovaná teplota chromatičnosti světelných zdrojů, ze statistiky vychází pozitivní zjištění, že největší skupinu tvořily světelné zdroje s teplotou chromatičnosti do 3000 K.

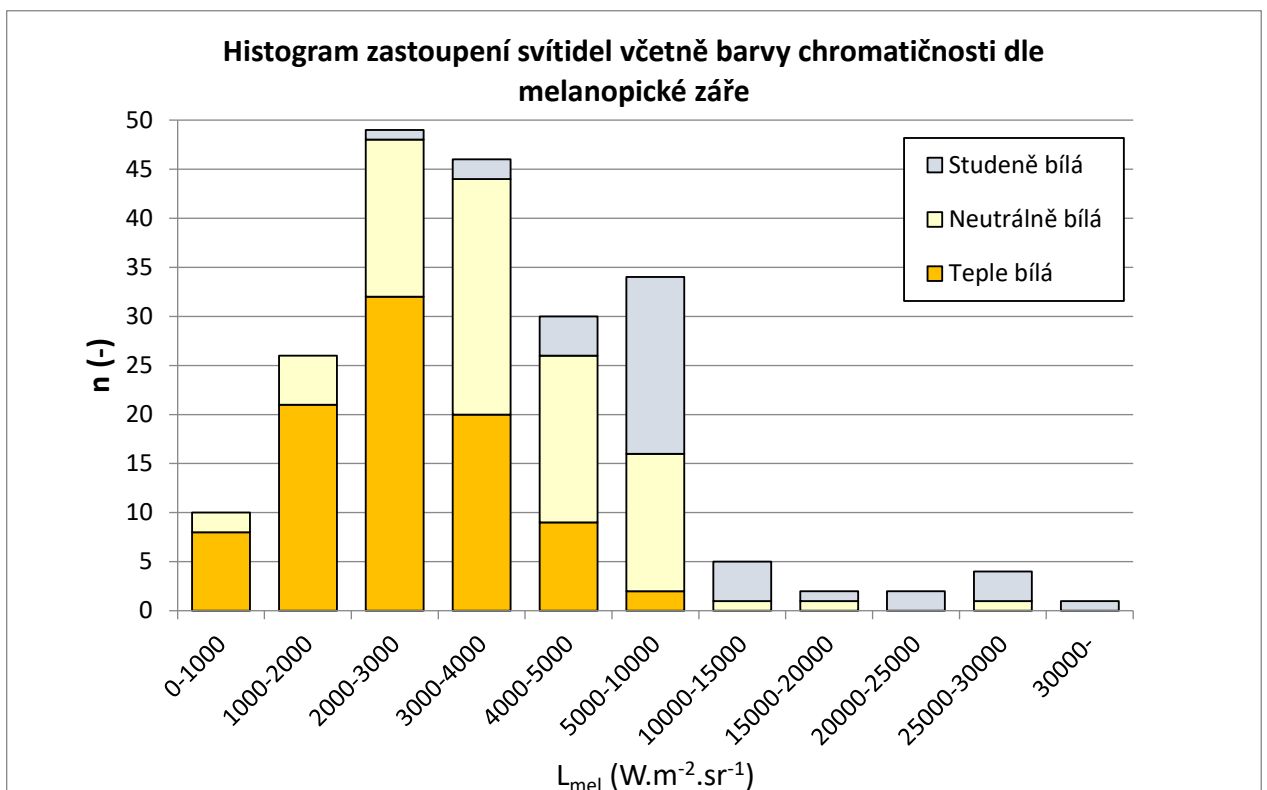
Zastoupení jednotlivých světelných zdrojů v kategoriích:

- Teple bílá (do 3000 K) 44 %
- Neutrálně bílá (3000 – 4000 K) 38,8 %
- Studeně bílá (nad 4000 K) 17,2 %

Z histogramu zastoupení světelných zdrojů včetně teploty chromatičnosti dle melanopické záře, lze vyčíst korelaci mezi barvou chromatičnosti a velikostí melanopické záře.

Kde pro nižší hodnoty melanopické záře jsou zastoupeny pro teple bílé světelné zdroje, kde průměrné hodnoty melanopické záře L_{mel} činí:

- Teple bílá (do 3000 K) $2620 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
- Neutrálně bílá (3000 – 4000 K) $4586 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$
- Studeně bílá (nad 4000 K) $10347 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$



Obrázek 6.8 Histogram zastoupení svítidel dle melanopické záře

7. MĚŘENÍ VYBRANÝCH INTERIÉRŮ

Poslední částí našeho měření byla analýza melanopické záře ve vybraných interiérech, které jsou často frekventované lidmi ve večerních hodinách. Zvoleno bylo několik typů interiérů, které jsou běžné v každodenním životě.

Jedním z těchto typů interiérů byly čerpací stanice. Ty jsou často v provozu i v nočních hodinách a slouží jako místo, kde lidé tankují svá vozidla a nakupují různé zboží.

Dalším typem interiérů, které byly zahrnuty do měření, byly restaurace rychlého občerstvení s nočním provozem. Tyto restaurace jsou oblíbené mezi lidmi, kteří si chtějí rychle a pohodlně pochutnat na jídle. Avšak osvětlení může mít negativní vliv na jejich cirkadiánní rytmus.

Posledním typem interiéru, který byl zahrnut, byly prodejny s prodlouženou otevírací dobou. Tyto prodejny jsou často navštěvovány lidmi i ve večerních hodinách.

Cílem tohoto měření v různých typech interiérů bylo získat komplexní přehled o melanopické záři v prostředích, kde se lidé často pohybují ve večerních hodinách. Tato data by nám mohla v budoucnu umožnit lépe porozumět vlivu osvětlení na lidské tělo a zdraví.

7.1 Výběr

Prvními měřenými interiéry byly čerpací stanice. Nicméně, úspěšnost umožnění provedení měření byla omezená. Důvodem byl interní zákaz pořizování snímků v interiérech na čerpacích stanicích. Zákaz většinou nebyl změněn ani přes příslib anonymního zpracování dat. Dalším limitujícím faktorem byla časová omezení, protože většina čerpacích stanic zavírá kolem 22:00.

Situace v restauracích rychlého občerstvení byla ještě obtížnější. Přestože mnoho restaurací má dlouhou otevírací dobu, prostory restaurací bývají vždy zaplněné a většina manažerů těchto restaurací nebyla ochotna omezovat své hosty kvůli měření. Avšak bylo provedeno jedno měření ve společných prostorech pro více restaurací nacházejících se v nákupním centru.

Na závěr se podařilo realizovat měření v obchodu s potravinami mající otevírací dobu do 21:00.

Přes veškeré obtíže s realizací měření v některých interiérech se podařilo získat dostatečné množství dat pro analýzu melanopické záře v těchto prostředích.

Pro měření v interiérech se také osvědčila menší varianta stativu pro jasový analyzátor LDA-LumiDISP, se kterým není pořizování snímků poutající pozornost obsluhy.

Snímky interiérů čerpacích stanic byly pořízeny objektivem s ohniskem 15 mm, ty z časových důvodů nebyly vyhodnoceny.



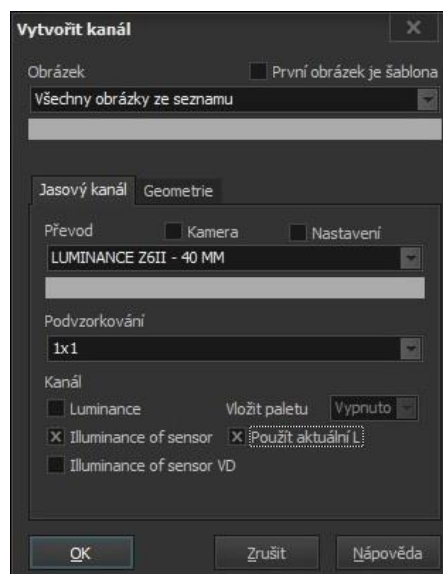
Obrázek 7.1 Pořizování snímků v interiérech

7.2 Postup měření

Postup měření byl obdobný jako u měření světelných zdrojů, opět bylo využito snímání sekvence snímků, přidáním L kanálu a následného vytvoření jednoho výsledného snímku pomocí metody HDR.

Aby bylo možné posuzovanou scénu zhodnotit z pohledu vlivu na ozáření gangliových buněk v našem zrakovém orgánu, tak by se scéna nesměla posuzovat z porovnávání jednotlivých melanopických září světelných zdrojů.

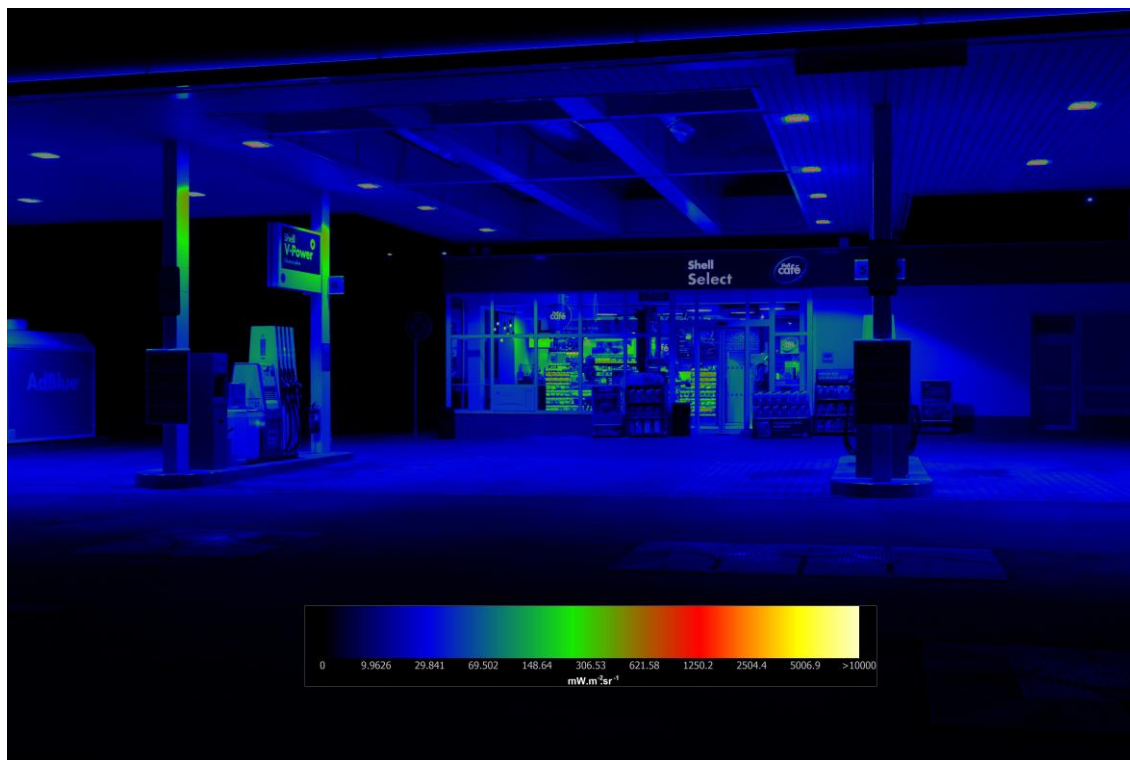
Vliv melanopického záření lze posoudit z hodnoty intenzity ozáření E_a . Abychom tyto veličinu z výsledného snímku mohli získat, bylo potřeba do výsledného snímku přidat nový „kanál E“ nesoucí informaci o intenzitě ozáření.



Obrázek 7.2 Přidání kanálu E do snímku s intenzitou melanopického ozáření

7.3 Čerpací stanice

Čerpací stanice těsně před zavírací dobou v 21:50, u hlavní příjezdové silnice do Brna, snímek byl pořízen během března, kde slunce zapadá okolo 18:00 a astronomický soumrak nastává okolo 20:00. Dominantními přispěvateli k celkové intenzitě melanopického ozáření jsou zejména světelné zdroje na střeše čerpací stanice.

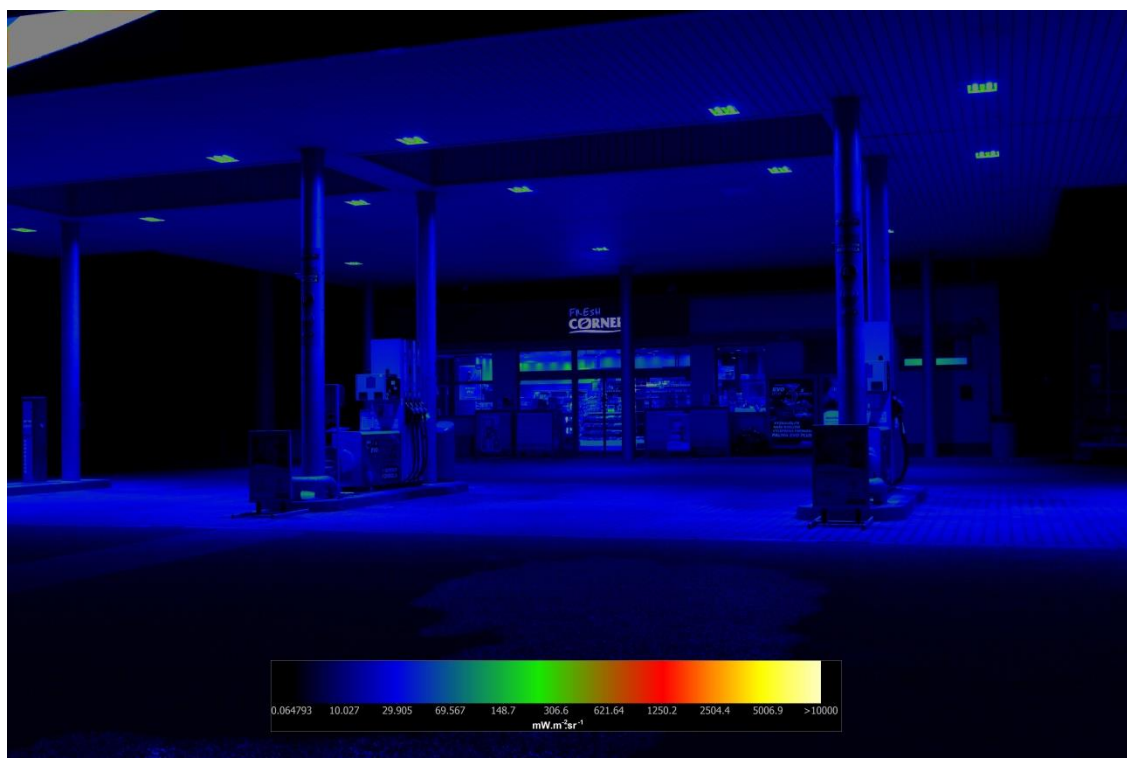


Obrázek 7.3 Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #1

Tabulka 7.1 Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #1

Detektor	L_{mel} mW.m ⁻² .sr ⁻¹	EDL cd.m ⁻²	E_{α} mW.m ⁻²	$E_{\alpha}/E_{\alpha_sc\u00e9na}$ %
Celá sc\u00e9na	13,1	9,9	0,5444	100%
Sv\u00edtidla – st\u00e9cha vlevo	1742,7	1314,1	0,0104	1,9%
Sv\u00edtidla – st\u00e9cha st\u00e9d vlevo	2873,9	2167,0	0,0155	2,8%
Sv\u00edtidla – st\u00e9cha st\u00e9d vpravo	2722,9	2053,1	0,0203	3,7%
Sv\u00edtidla – st\u00e9cha vpravo	3358,6	2532,5	0,0203	3,7%
N\u00e1pis Shell	649,7	489,9	0,0105	1,9%
N\u00e1pis caf\u00e9	1027,1	774,4	0,0062	1,1%
Osv\u00e9tlen\u00e9 interieru	2237,9	1687,4	0,0104	1,9%
Ostatn\u00ed n\u00e1pisy v interieru	887,5	669,2	0,0036	0,7%
Σ Sv\u00edtidel				17,9%

Další snímek čerpací stanice u hlavní silnice za Brnem pořízený okolo 21:00. Opět jsou zde dominantními světelné zdroje na střeše čerpací stanice.



Obrázek 7.4 Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #2

Tabulka 7.2 Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #2

Detektor	L_{mel}	EDL	E_{α}	$E_{\alpha}/E_{\alpha_scéna}$
	$mW.m^{-2}.sr^{-1}$	$cd.m^{-2}$	$mW.m^{-2}$	%
Celá scéna	14,7	11,1	0,6125	100%
Panel z čela střechy	494,2	372,7	0,0989	16,1%
Osvětlení na střeše	9107,3	6867,2	0,1988	32,5%
Nápis nad vchodem	507,9	383,0	0,0110	1,8%
Osvětlení chladicího boxu v interiéru	1063,8	802,2	0,0008	0,1%
Osvětlení interiéru	504,5	380,4	0,0010	0,2%
Σ Svítidel				50,7%

Čerpací stanice v centru Brna krátce po astronomickém soumraku v 20:20. Opět příspěvek hlavních svítidel ve velikosti 1/3 celé intenzity melanopického ozáření.



Obrázek 7.5 Pohled na měřenou scénu čerpací stanice #3

Tabulka 7.3 Změřené veličiny pro scénu čerpací stanice #3

Detektor	L_{mel} $\text{mW.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$	EDL cd.m^{-2}	E_{α} mW.m^{-2}	$E_{\alpha}/E_{\alpha_sc\u00e9na}$ %
Celá sc\u00e9na	28,7	21,6	1,1038	100%
Osv\u00e9tlen\u00ed na st\u0159e\u0161e	12641,1	9531,8	0,3789	34,3%
N\u00e1pis caf\u00e9	810,7	611,3	0,0239	2,2%
N\u00e1pis caf\u00e9 v interi\u00e9ru	1685,9	1271,3	0,0112	1,0%
Osv\u00e9tlen\u00ed v interi\u00e9ru - vlevo	1435,3	1082,3	0,0074	0,7%
Osv\u00e9tlen\u00ed v interi\u00e9ru - vpravo	1171,1	883,1	0,0030	0,3%
Osv\u00e9tlen\u00ed chladic\u00edho boxu v interi\u00e9ru	3961,4	2987,0	0,0135	1,2%
Σ Sv\u00edtel				39,7%

7.4 Občerstvení

Vnitřní prostor se stánky rychlého občerstvení u obchodního centra v Brně. Snímek byl pořízen krátce před zavírací dobou v 19:50.

Osvětlení interiéru navozovalo uživatelům pocit pravého poledne i ve večerních hodinách.

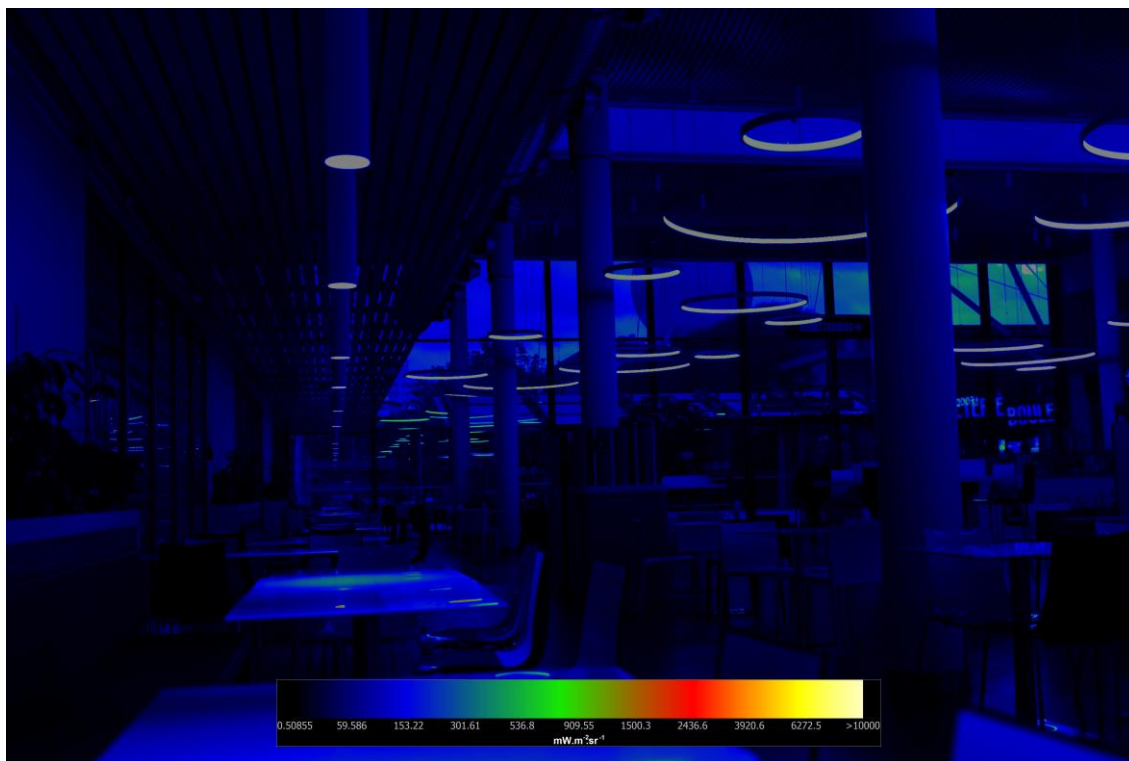


Obrázek 7.6 Pohled na měřenou scénu občerstvení #1

Tabulka 7.4 Změřené veličiny pro scénu občerstvení #1

Detektor	L_{mel} mW.m ⁻² .sr ⁻¹	EDL cd.m ⁻²	E_{α} mW.m ⁻²	$E_{\alpha}/E_{\alpha_sc\u00e9na}$ %
Cel\u00e1 sc\u00e9na	114,1	86,0	4,7440	100%
N\u00e1pis Burger	461,8	348,2	0,0053	0,1%
N\u00e1pis Sushi	774,7	584,2	0,0091	0,2%
Lev\u00e1 \u0159ada sv\u00edtel	7930,0	5979,5	1,0131	21,4%
Prav\u00e1 \u0159ada sv\u00edtel	9805,8	7393,9	1,9084	40,2%
Zadn\u00ed \u0159ada sv\u00edtel	4123,5	3109,3	0,1318	2,8%
\u03a3 Sv\u00edtel				64,7%

Pohled ve stejném interiéru z míst k sezení a konzumace občerstvení. V tomto případě bylo osvětlení nad stoly zvoleno vhodně se ztlumenou intenzitou.



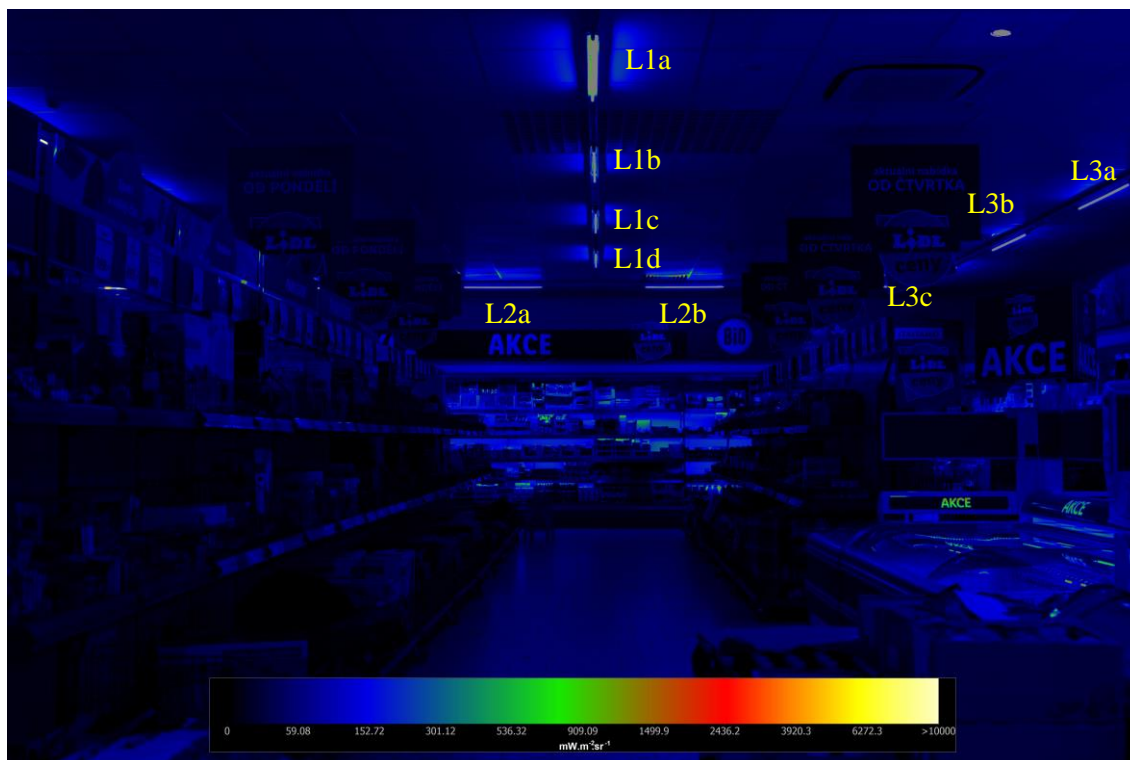
Obrázek 7.7 Pohled na měřenou scénu občerstvení #2

Tabulka 7.5 Změřené veličiny pro scénu občerstvení #2

Detektor	L_{me1} mW.m ⁻² .sr ⁻¹	EDL cd.m ⁻²	E_{α} mW.m ⁻²	$E_{\alpha}/E_{\alpha_sc\u00e9na}$ %
Cel\u00e1 sc\u00e9na	73,8	55,6	3,0678	100%
Osv\u00e9tlen\u00ed nad stoly	1330,3	1003,1	0,0467	1,5%
Prost\u00e9dn\u00ed \u0159ada sv\u00edtel	6626,1	4996,3	1,0044	32,7%
Prav\u00e1 \u0159ada sv\u00edtel	5943,6	4481,6	0,5150	16,8%
\u03a3 Sv\u00edtel				51,0%

7.5 Obchod

Poslední měřeným prostorem, který je navštěvován lidmi i ve večerních hodinách, jsou obchody s prodlouženou otevírací dobou. Pohled uličkou obchodu po zavírací době v 22:30.



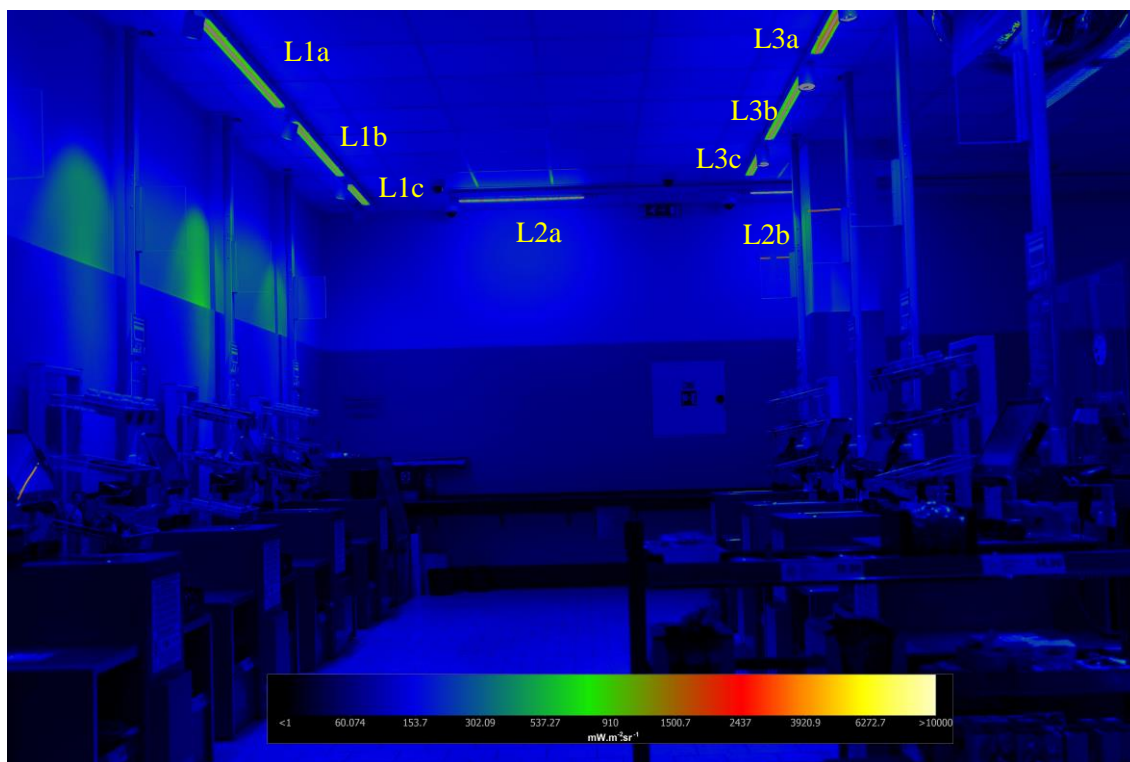
Obrázek 7.8 Pohled na měřenou scénu v obchodě #1

Tabulka 7.6 Změřené veličiny pro scénu v obchodě #1

Detektor	L_{mel} $mW.m^{-2}.sr^{-1}$	EDL $cd.m^{-2}$	E_{α} $mW.m^{-2}$	$E_{\alpha}/E_{\alpha_{scéna}}$ %
Celá scéna	47,7	35,9	1,9819	100%
L1a	5164,5	3894,2	0,1590	8,0%
L1b	21513,8	16222,2	0,0732	3,7%
L1c	18835,7	14202,7	0,0325	1,6%
L1d	22511,5	16974,4	0,0226	1,1%
L2a	14838,9	11189,0	0,0819	4,1%
L2b	14757,9	11127,9	0,0822	4,1%
L3a	16831,8	12691,8	0,1011	5,1%
L3b	13254,7	9994,5	0,0532	2,7%
L3c	7573,9	5711,0	0,0027	0,1%
Σ svítidel				30,7%

Pohled na pokladny, při východu z obchodu, snímáno po zavírací době v 22:30. Opět typ osvětlení návštěvníkům navozoval světelnou pohodu jako za slunného dne i skutečném západu slunce.

V této scéně bylo mnoho lesklých povrchů, tím pádem se světelné zdroje přímo nepodílely vyšším podílem k celkové intenzitě melanopického ozáření.



Obrázek 7.9 Pohled na měřenou scénu v obchodě #2

Tabulka 7.7 Změřené veličiny pro scénu v obchodě #2

Detektor	L_{mel} $mW \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	EDL $cd \cdot m^{-2}$	E_{α} $mW \cdot m^{-2}$	$E_{\alpha} / E_{\alpha_sc\u00e9na}$ %
Celá sc\u00e9na	104,8	79,0	4,0355	100%
L1a	5338,2	4025,2	0,0818	2,0%
L1a	4207,2	3172,4	0,0305	0,8%
L1c	4641,7	3500,0	0,0110	0,3%
L2a	32098,4	24203,3	0,2391	5,9%
L2b	26732,6	20157,3	0,0595	1,5%
L3a	8556,2	6451,7	0,0481	1,2%
L3b	5323,7	4014,2	0,0387	1,0%
L3c	5587,2	4212,9	0,0088	0,2%
Σ sv\u00edtel				12,9%

8. ZÁVĚR

Tato práce měla za cíl poukázat na nevizuální účinky světla na člověka. Popsat biologickou podstatu vnímání světla, kvalifikování melanopických veličin a také i jejich možné způsoby měření.

V úvodní části byly popsány rytmy, které doprovází člověka po celý život a společně se s ním vyvíjejí a ukotvují. Pro tuto práci jsou podstatné cirkadiální rytmy, které jsou synchronizovány, i mimo jejich vlastní rytmus, vnějšími impulsy pomocí našeho zrakového orgánu. To se děje pomocí nedávno popsaných gangliových buněk nacházejících se v oku, které způsobují melanopické odezvy.

V další části byly popsány melanopické veličiny definované normou CIE S026-2018 Systém pro metrologii optického záření pro odezvy na světlo ovlivněné ipRGC.

Dále byly rozděleny přístroje schopny měřit melanopické veličiny do základních skupin. Blíže byly zkoumány a popsány jasové kamery, které jsou aktuálně dostupné na trhu, včetně uvedení základních parametrů.

V první praktické části byl navržen měřicí postup pro hodnocení melanopických veličin pro různé typy obrazovek. U moderních zařízení obvykle nalezneme možnost úpravy barevného schématu obrazovky vedoucí k snížení melanopické záře a tím i k pozitivnímu dopadu na naše cirkadiální rytmy.

Nejvyšší účinnost nastavení intenzity nočního osvětlení obrazovek nabízí osobní počítače, následují mobilní telefony a tablety s přibližně polovičním účinkem, u televizí má změna obrazových režimů pouze malý vliv na melanopickou zář.

Mimo jednotlivé možnosti nastavení zařízení, na melanopickou zář, má také vliv technologie použitého zobrazovacího panelu.

Z měření lze konstatovat, že displeje typu OLED/AMOLED mají v průměru o 30 % vyšší *ELR*, než klasické panely TN/IPS/VA s LED podsvícením, avšak dosahují lepších výsledků během použití nočního osvětlení. Do kategorie s vyšším *ELR*, s hodnotami srovnatelnými s OLED displeji, patří také monitory z doby minulé podsvícené výbojkami.

Dále bylo zjištěno, že v základním nastavení mají nejvyšší teplotu chromatičnosti obrazovky telefonů a tabletů v rozmezí 7000 – 8000 K, následují je notebooky s hodnotami 5000 – 6000 K, u monitorů je tato hodnota závislá na uživatelském nastavení.

K měření byl použit radiospektrometr JETI jako zdroj referenčních hodnot měřených veličin a jasový analyzátor LDA LumiDISP, odchylky měřených veličin se až na jeden případ pohybovaly do 8 %, z čehož lze konstatovat, že jasový analyzátor je vhodné zařízení pro měření melanopických veličin.

Druhá část měření byla zaměřena na vyhodnocení melanopické záře aktuálně dostupných světelných zdrojů. Pro zpřesnění výsledků byla navržena korekce

parazitního osvětlení. Z výsledků vyplývá, že většina světelných zdrojů (44 %) vyzařuje světelný tok s vhodnější teplotou chromatičnosti do 3000 K (teple bílá).

Z výsledků lze také vyčíslit korelaci mezi velikostí melanopické záře a teplotou chromatičnosti. Měřením bylo zjištěno, že svítidla do 3000 K mají v průměru melanopickou záři L_{mel} 2620 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$, svítidla v rozsahu 3000 – 4000 K mají v průměru L_{mel} 4586 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ a svítidla nad v průměru L_{mel} 10347 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$

V závěru byly posouzeny vybrané veřejné interiéry. Zatím není stanovena žádná metodika, jak tyto prostory hodnotit z pohledu melanopických veličin a vlivu na pozorovatele. Ale jako vhodná metoda se jeví porovnávat melanopickou intenzitu ozáření vyvolanou danou scénou na sítnici pozorovatele. Není také vědecky podloženo přesné rozložení ipRGC ve zrakovém orgánu, pouze se předpokládá, že většina ipRGC se nachází v dolní části oka, z čehož vyplývá, že ozáření oka z horní poloviny scény má větší váhu než ozáření ze spodní.

K dalším úvahám k tématu se nabízí, zda aktuálně používání jednotky melanopických veličin jsou vhodné, například melanopický zářivý tok Φ_a jednotku mW , na rozdíl od světelného toku Φ_v se speciálně zavedenou jednotkou lm . Obě tyto veličiny vychází z celkové zářivé energie Φ_e s jednotkou W , při čemž je každá veličina váhovaná pomocí jiné křivky.

Jsem rád, že mi bylo umožněno pracovat s jasovým analyzátozem LDA LumiDISP, seznámit se s jeho obsluhou i postupem zpracování snímků.

Téma hodnotím jako přínosné po technické i osobní stránce, dovedlo mě k zamyšlení nad používanými světelnými zdroji a obecně o světelné hygieně. Nabité vědomosti a poznatky o „neviditelném“ světle budu určitě rád předávat své rodině, mým dětem, známým a kolegům ke zlepšení kvality jejich života.

V této problematice spatřuji potenciál, který v budoucnu může přispět k obecnému zlepšení kvality cirkadiánních rytmů obyvatel a případně i ke snížení výskytu civilizačních nemocí.

LITERATURA

- [1] KONEČNÁ, KATEŘINA. *Mechanismy regulace cirkadiálních rytů u člověka* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/rfm3h/Mechanismy_regulace_cirkadiálních_rytmů_u_clovek_a.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [2] *Co je cirkadiální rytmus a jak funguje?* [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://ispanek.cz/cirkadiální-rytmus/>
- [3] Hirshkowitz M, Whiton K, Albert SM, Alessi C, Bruni O, DonCarlos L, Hazen N, Herman J, Katz ES, Kheirandish-Gozal L, Neubauer DN, O'Donnell AE, Ohayon M, Peever J, Rawding R, Sachdeva RC, Setters B, Vitiello MV, Ware JC, Adams Hillard PJ. National Sleep Foundation's sleep time duration recommendations: methodology and results summary. *Sleep Health*. 2015 Mar;1(1):40-43. doi: 10.1016/j.sleh.2014.12.010. Epub 2015 Jan 8. PMID: 29073412.
- [4] *Oči* [online]. [cit. 2022-12-01]. Dostupné z: <https://www.symptomy.cz/anatomie/oci>
- [5] WEBEROVÁ, Petronela. *RECEPTIVNÍ POLE ZRAKOVÉ DRÁHY A NEURONŮ VIZUÁLNÍHO KORTEXU* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/hr5ai/Bakalarska_prace_Weberova_2019.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- [6] *Poruchy cirkadiálního systému u Huntingtonovy choroby – implikace pro terapii světlem* [online]. 289– 294 [cit. 2022-12-20]. Dostupné z: <https://www.csnn.eu/casopisy/ceska-slovenska-neurologie/2019-3-3/poruchy-cirkadiálního-systemu-u-huntingtonovy-choroby-implikace-pro-terapii-svetlem-112777/download?hl=cs>
- [7] CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical, Radiation for ipRGC-Influenced, Responses to Light. 2018
- [8] *Vnitřně fotosenzitivní gangliové buňky sítnice* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://www.prolekare.cz/casopisy/ceska-slovenska-ofthalmologie/2015-3/vnitřne-fotosenzitivni-gangliove-bunky-sitnice-52688>
- [9] *CIE SYSTEM FOR METROLOGY OF OPTICAL RADIATION FOR IPRGC-INFLUENCED RESPONSES TO LIGHT* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: <https://cie.co.at/publications/cie-system-metrology-optical-radiation-iprgc-influenced-responses-light-0>
- [10] HABEL, Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. 1. vyd. Praha: FCC Public, 1995, 437 s. ISBN 80-901-9850-3.
- [11] PLCH Jiří. *Světelná technika v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 210 s. ISBN 80-862-3009-0.
- [12] WÜLLER, Dietmar a Helke GABELE. *The usage of digital cameras as luminance meters* [online]. [cit. 2023-01-10]. Dostupné z: https://www.image-engineering.de/content/library/conference_papers/before_2009/luminance_meters.pdf

- [13] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Digitální fotoaparát* [online]. c2022 [cit. 2023-01-10]. Dostupný z WWW: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Digit%C3%A1ln%C3%AD_fotoapar%C3%A1t&oldid=21241623>
- [14] *LumiCam 4000B / 2400B* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.instrumentsystems.com/en/products/imaging-colorimeters-ir-testing-cameras/lumicam-4000b-2400b>
- [15] *Brochure LumiCam 4000B/2400B* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/Downloads/Brochures_Datasheets/LumiCam4000B_2400B_EN_V2-0.pdf
- [16] *Technical Sheet GL OPTICAM 3.0 4K TEC* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: https://gloptic.com/wp-content/uploads/2021/09/GL-OPTICAM-3.0_Karta-techniczna_210x297ex3_D_15092021.pdf
- [17] *GL OPTICAM 3.0 4K TEC* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://gloptic.com/products/gl-opticam-3-0-4k-tec/>
- [18] *LumiDISP – LDA ML6* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://lumidisp.eu/technical-specifications/>
- [19] *Neistota merania osvetlenia – Část 1* [online]. [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/neistota-merania-osvetlenia-cast-1--882>
- [20] WALKER, Matthew P. *Proč spíme: odhalte sílu spánku a snění*. Druhé, aktualizované vydání. Přeložil Filip DRLÍK. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2021. Pod povrchem. ISBN 978-80-7555-122-1.
- [21] PANDA, Satchin. *Cirkadiánní kód: využijte přirozený rytmus svého těla pro zdraví, výkon a zhubnutí*. Přeložil Bianca BELLOVÁ. V Brně: Jan Melvil Publishing, 2020. Fit & food. ISBN 978-80-7555-117-7.
- [22] Most common website colors. WebFX [online]. [cit. 2023-03-21]. Dostupné z: <https://www.webfx.com/blog/web-design/most-common-website-colors/>
- [23] The Colors Used by the Ten Most Popular Sites [online]. [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: http://paulhebertdesigns.com/web_colors/index.php
- [24] *Gemius Audience* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://rating.gemius.com/cz/tree/2>
- [25] *Similarweb* [online]. [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.similarweb.com/top-websites/>
- [26] ONDRA, Jaromír. *Měření cirkadiánních veličin pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142414>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AMOLED	active-matrix OLED
CL	Circadian light
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
ČSN	Česká technická norma
EEG	Elektroencefalogram
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
FOV	Field of view
HDR	High Dynamic Range SCN Suprachiasmatic nuclei
CCD	Charged coupled device
ISO	International organization for standardization
ipRGC	Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells
IPS	In-Plane Switching
LumiDISP	luminance distribution processing
LMK	Luminance measuring camera
OLED	organic light-emitting diode
RGB	red, green, blue
CIE	The international commission of illumination
VA	Vertical Alignment
VUT	Vysoké učení technické v Brně
TN	Twisted Nematic

Symboly:

f	frekvence	(Hz)
A	amplituda	(-)
T	perioda	(s)
t	čas	(s)
λ	vlnová délka	(nm)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
L	jas	(cd/m ²)
ELR	světelná účinnost záření	(mW/lm)
EDL	ekvivalentní jas denního světla D65	(cd/m ²)
Φ_{α}	α -opic zářivý tok	(W)
E_{α}	α -opic intenzita ozáření	(W/m ²)
L_{α}	α -opic zář	(mW/m ² .sr)
L_{mel}	melanopická zář	(mW/m ² .sr)
$K_{\alpha,V}$	α -opic světelná účinnost záření	(W/lm)
$K_{\alpha,V}^{D65}$	α -opic světelná účinnost světla D65	(W/lm)