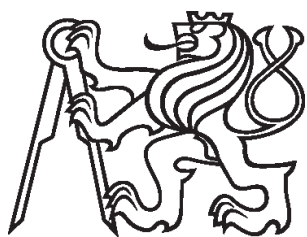


Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická

Vliv modrého světla LED zdrojů na hladinu melatoninu

Bc. Radek STRNAD

Vedoucí práce: doc. RNDr. Zdeňka Bendová, Ph.D
2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Strnad** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **434723**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv modrého světla LED zdrojů na hladinu melatoninu

Název diplomové práce anglicky:

Influence of blue light LED sources on the level of melatonin

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza všech LED zdrojů v místnosti (osvětlenost, obsah modré složky).
- 2) Měření rytmu melatoninu ve slině po týdnu bez používání LED zdrojů.
- 3) Měření rytmu melatoninu ve slině po týdnu s používáním LED zdrojů.
- 4) Zhodnocení vlivu modré složky na pokles hladiny melatoninu ve slině dobrovolníků.

Seznam doporučené literatury:

1. Jiří HABEL, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK, Petr ŽÁK. Světlo a osvětlování. FCC Public. ISBN 978-80-86-53121-3.
2. Andrew J. K. Philips, Parisa Vidafar (ed.), High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, <https://www.pnas.org/content/116/24/12019>
3. Maja Grubisic, Abraham Haim (ed.), Light Pollution, Circadian Photoreception, and Melatonin in Vertebrates, MDPI, https://www.mdpi.com/2071-1050/11/22/6400#framed_div_cited_count

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. RNDr. Zdeňka Bendová, Ph.D., Univerzita Karlova, Katedra fyziologie

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

Datum zadání diplomové práce: **31.08.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.05.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2022**

doc. RNDr. Zdeňka Bendová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 10.5.2021

Bc. Radek Strnad

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucí práce RNDr. Zdeňce Bendové Ph.D z Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat asistenci vedoucí Mgr. Kateřině Skálové za pomoc při zpracování vzorků v laboratoři. Další poděkování patří Ing. Marku Bálskému Ph.D a Ing. arch. Lence Maierové za cenné konzultace a v neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za veškerou podporu při studiu.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem modré spektrální složky a intenzitě světelného záření z LED zdrojů na zpožděný nástup hladiny melatoninu. Melatonin je hormon, který je produkován pouze v noci a pouze ve tmě a jeho hlavním úkolem je regulovat circadiální a sezónní rytmy ve fyziologických procesech.

Teoretická část diplomové práce se skládá ze dvou částí. První se zaměřuje především na technickou oblast, kde je uvedeno, co vlastně světlo je a z jakých spekter se může skládat. Dále jsou definovány základní veličiny, se kterými jsme pracovali a jaké jsme měřili. Druhá část se skládá především z biologické oblasti, která se zabývá tím, jak světlo ovlivňuje lidský organismus obecně, a taky specificky jak tzv. „modré světlo“ způsobuje pokles noční hladiny melatoninu.

Praktická část diplomové práce se také skládá ze dvou částí. První je zaměřena na postup měření modré složky a druhá se zabývá měřením míry potlačení melatoninu.

V poslední, výsledkové části jsou vyhodnocena jednotlivá naměřená spektra, a také jsou zde uvedeny výsledky měření zpožděného vzestupu melatoninu, který byl změřen ve spolupráci s laboratoří školitelky na Přírodovědecké fakultě UK. Kapitola je ukončena diskuzí a závěrem.

Klíčová slova

Modrá spektrální složka světla, melatonin, spektrum, světelný zdroj, LED zdroj

Abstract

This Master's thesis addresses the effect of blue light from LED sources on the delayed rise of melatonin levels. Melatonin is a hormone that is produced only at night and in the darkness. Its main task is to regulate circadian and seasonal rhythms in physiological processes.

The theoretical part of this Master's thesis consists of two parts. The first part focuses mainly on the technical side by stating what light is and what spectra it can consist of. Next, the basic quantities with which we have worked and employed for the measurement are defined. The second part focuses predominantly on the biological part, which deals with how light can affect the human body in general and, specifically, how the so called 'blue light' causes the decrease in night-time levels of melatonin.

The practical part of the thesis consists of two parts as well. The first part focuses on the procedure used to measure the blue component and the second part deals with the measurement of the suppression of melatonin.

The last part presents an evaluation of the individual measurements and the findings regarding the delayed rise of melatonin levels, which was measured in collaboration with the laboratory of supervisor at the Faculty of Science, Charles University. The gathered data are then discussed and, finally, a conclusion is presented.

Keywords

Blue light, melatonin, spectrum, light source, LED source

Obsah

1. ÚVOD.....	21
2. TEORETICKÁ ČÁST	23
2.1. Záření	23
2.1.1. Přijímače záření.....	23
2.1.2. Viditelné záření (světlo)	25
2.1.3. Ultrafialové záření.....	26
2.1.4. Infračervené záření	26
2.1.5. Barvená spektra	26
2.2. Světelně-technické parametry	28
2.2.1. Světelný tok.....	28
2.2.2. Prostorový úhel	29
2.2.3. Svítivost	29
2.2.4. Osvětlenost	30
2.2.5. Ozářenost	30
2.2.6. Index podání barev.....	30
2.2.7. Teplota chromatičnosti	31
2.3. Světelné zdroje	32
2.3.1. Wolframové žárovky	32
2.3.2. Halogenové žárovky	32
2.3.3. Nízkotlaká zářivka.....	33
2.3.4. Kompaktní zářivka	33
2.3.5. Nízkotlaké sodíkové výbojky	33
2.3.6. Vysokotlaké sodíkové výbojky.....	33
2.3.7. LED.....	34
2.3.8. PC-AMBER	37
2.4. Teorie o vlivu modrého světla na spánek a cirkadiánní rytmus.....	38
2.4.1. Cirkadiánní rytmus	38
2.4.2. Cirkadiánní poruchy	41
2.4.3. Vnímání světla lidským okem.....	42
2.4.4. Tyčinky a čípky.....	42
2.4.5. Rozdíly vnímání světla.....	45

2.4.6.	Doba trvání osvětlení, rozložení v prostoru, předchozí světlené prostředí	47
2.4.7.	Melatonin a kortizol	48
2.4.8.	Vliv modrého světla na melatonin	51
2.4.9.	Spánek	53
3.	PRAKTICKÁ ČÁST.....	55
3.1.	Měření světelných podmínek.....	55
3.1.1.	Měření spekter světelných zdrojů.....	56
3.1.2.	Měření spekter a osvětlenosti pohledů	57
3.2.	Harmonogram testování.....	60
3.3.	Odběr vzorků	61
3.4.	Získání hodnoty melatoninu v laboratoři.....	62
3.4.1.	Postup určení koncentrace melatoninu	62
3.4.2.	Analýza vzorků.....	63
3.5.	Osvětlenosti jednotlivých fotoreceptorů α -opic	63
4.	VYHODNOCENÍ	67
4.1.	Naměřená světelná spektra	67
4.1.1.	Naměřená světelná spektra svítidel	67
4.1.2.	Naměřená světelná spektra pohledů	71
4.2.	Vnímání světla jednotlivými fotoreceptory – α -opic.....	83
4.3.	Naměřené hodnoty melatoninu.....	85
4.4.	Časový posun vzestupu hladiny melatoninu relativně k 3. světelnému prostředí.....	93
5.	ZÁVĚR	95
6.	SEZNAM LITERATURY	99

Obrázky

Obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum [2]	26
Obrázek 2 - Znázornění míšení barev [1]	28
Obrázek 3 – Spektrální složení a teplota chromatičnosti z různých zdrojů světla [9]..	31
Obrázek 4 - Závislost teploty chromatičnosti na účinnosti [25]	35
Obrázek 5 - Závislost světelného toku a měrného výkonu na napájecím proudu [4]...	36
Obrázek 6 - Spektrální složení záření v závislosti na velikosti napájecího proudu [4]	37
Obrázek 7 – Schéma organizace cirkadiálního systému [10]	39
Obrázek 8 – Příklad křivky fázové odezvy na vnější světelné podněty [6].....	40
Obrázek 9 – Schéma synchronizace při více časovačích – a) Rytmičké vnější vlivy (černá) ve stejné fázi vytvoří silný rytmus (oranžová), b) Vnější vlivy v různých fázích vytvoří nevýrazný rytmus s nižší amplitudou [9]	41
Obrázek 10 - Osvětlenost, obrazové a neobrazové funkce, příklady možné osvětlenosti (lx), horizontální roviny za různých světelných podmínek, rozsah citlivost lidského oka, režim zraku a aktivita fotoreceptorů [9].....	44
Obrázek 11 - Grafický popis oka a dopadu světelného paprsku na fotoreceptory [9]..	45
Obrázek 12 - Závislost chronotypů na věku a pohlaví [12].....	46
Obrázek 13 - Průběh melatoninu a kortizolu během denního cyklu [11]	50
Obrázek 14 – Křivka závislosti odezvy cirkadiálního systému na osvětlenosti [15]. Horní obrázek ukazuje průměrnou citlivost všech měřených subjektů, jednotlivé křivky na spodním obrázku značí výsledky jednotlivých subjektů.....	51
Obrázek 15 – Průběh REM a NREM spánku během noci [13]	54
Obrázek 16 - Půdorysné zobrazení svítidel	56
Obrázek 17 - Půdorysné zobrazení pohledů	58
Obrázek 18 – Screenshot displeje mobilu, při kterém probíhalo měření.....	59
Obrázek 19 – Zobrazení rozdílu s potlačením spektrální složky a bez potlačení	60
Obrázek 20 – Ukázka vstupních parametrů Toolboxu α -opic	65
Obrázek 21 – Ukázka výstupních dat Toolboxu α -opic	66
Obrázek 22 – Spektrální charakteristika svítidla č.1	68
Obrázek 23 – Spektrální charakteristika svítidla č.2	68
Obrázek 24 – Spektrální charakteristika svítidla č.3	69
Obrázek 25 – Spektrální charakteristika svítidla č.4	69
Obrázek 26 – Spektrální charakteristika svítidla č.5	70

Obrázek 27 – Spektrální charakteristika svítidla č.6.....	70
Obrázek 28 – Spektrální charakteristika pohledu 10.....	72
Obrázek 29 – Spektrální charakteristika pohledu 20.....	72
Obrázek 30 – Spektrální charakteristika pohledu 30.....	73
Obrázek 31 – Spektrální charakteristika pohledu 40.....	73
Obrázek 32 – Spektrální charakteristika pohledu 50.....	74
Obrázek 33 – Spektrální charakteristika pohledu 60.....	74
Obrázek 34 – Spektrální charakteristika pohledu 70.....	75
Obrázek 35 – Spektrální charakteristika pohledu 80.....	75
Obrázek 36 – Spektrální charakteristika pohledu 11.....	76
Obrázek 37 – Spektrální charakteristika pohledu 81.....	76
Obrázek 38 – Spektrální charakteristika 21	77
Obrázek 39 – Spektrální charakteristika pohledu 31_1.....	77
Obrázek 40 – Spektrální charakteristika 31_2	78
Obrázek 41 – Spektrální charakteristika pohledu 22.....	78

Tabulky

Tabulka 1 - Vlnové délky spektrálních barev [1]	27
Tabulka 2 – Tabulka měřených etap	57
Tabulka 3 - Harmonogram měření.....	61
Tabulka 4 – Parametry pevných svítidel umístěných v bytě	67
Tabulka 5 – Popis měřených pohledů	71
Tabulka 6 – Efektivní ozáření fotoreceptorů při různých pohledech	83
Tabulka 7 – Ekvivalent denního osvětlení (D65 standart) při různých pohledech.....	84
Tabulka 8 – Součin naměřené osvětlenosti a ozářenosti ftopigmentu melanopsinu ..	85
Tabulka 9 – Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 1.etapy měření	86
Tabulka 10 - Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 2.etapy měření.....	86
Tabulka 11 – Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 3.etapy měření	87
Tabulka 12 – Posun (zpoždění) syntézy melatoninu u Radka	93
Tabulka 13 – Posun (zpoždění) syntézy melatoninu u Anny	93

Grafy

Graf 1 - Závislost ozáření na vlnové délce v 1.světelném prostředí	80
Graf 2 - Závislost ozáření na vlnové délce vztažené k jednotnému maximu v 1.světelném prostředí	80
Graf 3 - Závislost ozáření na vlnové délce ve 2.světelném prostředí	81
Graf 4 - Závislost ozáření na vlnové délce vztažené k jednotnému maximu ve 2.světelném prostředí	81
Graf 5 - Závislost ozáření na vlnové délce vztažené k jednotnému maximu ve 3.světelném prostředí	82
Graf 6 - Závislost ozáření na vlnové délce vztažené k jednotnému maximu ve 3.světelném prostředí	82
Graf 7 – Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den v 1.světelném prostředí.....	87
Graf 8 – Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den v 1.světelném prostředí – jednotné maximum.....	88
Graf 9 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den ve 2.světelném prostředí.....	88
Graf 10 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den ve 2.světelném prostředí – jednotné maximum.....	89
Graf 11 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den ve 3.světelném prostředí.....	89
Graf 12 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřící den ve 3.světelném prostředí – jednotné maximum.....	90
Graf 13 - Hladiny melatoninu obou účastníků v závislosti na čase s proložením kosinorovou křivkou	91
Graf 14 - Hladiny melatoninu Radka v závislosti na čase – vztažené hodnoty k maximu	92
Graf 15 - Hladiny melatoninu Anny v závislosti na čase – vztažené hodnoty k maximu	92
Graf 16 - Vzájemné grafické porovnání posunu (zpoždění) syntézy melatoninu	93

1. ÚVOD

V poslední době se stále více mluví o vlivu tzv. modrého světla na organismus. Společnost se díky tomu rozdělila na dvě skupiny. Jedna tvrdí, že modré světlo živým organismům pomáhá a druhá, že naopak škodí. Druhá skupina často vystupuje v mediálních prostředcích a snaží se upozorňovat na jeho negativní vliv, zatímco první skupina tato tvrzení popírá a snaží se daný problém zlehčovat.

Tato problematika mě velice zajímá ze tří hlavních důvodů. První je ten, že pracuji jako světelný technik. Druhý důvod je, že mě fascinuje propojení techniky a biologie, se všemi svými důsledky. Posledním důvodem je právě mediální boj podporovatelů a odpůrců modrého světla, proto si tato práce dává za cíl zjistit, kdo je nejbližší pravdě.

Téma vlivu modrého světla na hladinu melatoninu, je také velice důležité v dnešní době, kdy spousta lidí pracuje v kancelářích, které jsou uměle osvětlené po celý rok. Po příchodu domů velké procento z nich stráví zbytek dne sledováním monitorů, či mobilních telefonů. V porovnání s minulou dobou, kdy se naši předkové řídili pouze Sluncem a kdy byl večerním zdrojem světla pouze oheň, to je nesrovnatelná změna. Tento velký pokrok s sebou přinesl samozřejmě nespočetně výhod, ale bohužel i také nějaké nevýhody. Jednou z největších nevýhod může být dysregulace cirkadiálních hodin, které řídí biorytmy. Nejznámějším a nejspíše také nejdůležitějším je spánek. V současnosti zažíváme malý světelný kontrast mezi dnem a nocí, což narušuje mnoho velice důležitých fyziologických procesů, souvisejících s fyzickým i psychickým zdravím. Mezi hlavní výhody působení modrého světla na hladinu melatoninu bych řadil větší efektivitu člověka během dne, a také pocit většího bezpečí ve veřejném prostoru.

Hlavní část práce závisí na experimentu, kdy setrvali dva účastníci ve třech různých světelných prostředí s různými světelnými zdroji, a vždy po týdnu jim byly odebrány vzorky slin na stanovení hladiny melatoninu.

Aby byl výsledek této diplomové práce co nejpřesnější, rozhodl jsem se pro spolupráci s katedrou energetiky na ČVUT, a také s Přírodovědeckou fakultou Univerzity Karlovy, na které probíhalo laboratorní zpracování sebraných vzorků.

Tato předkládaná práce vznikla jako experiment kombinující více vědeckých oborů jako je světelná technika a biologie. Jedním z cílů práce je ukázat důležitou vzájemnou souvislost těchto oborů.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Záření

Záření (radiace) je emise energie, která se šíří prostorem jako elektromagnetické vlny nebo jako hmotné částice. Jakékoliv šířící se záření lze rozdělit na jednotlivé složky se sinusovým průběhem, kde je každá složka charakterizována samostatným kmitočtem (Hz), nebo vlnovou délkou λ . Vlnová délka závisí na rychlosti šíření.

Na obrázku č.1 je zobrazeno celé elektromagnetické spektrum. V naší práci se ale zaměřujeme především na viditelné světlo, které se pohybuje v rozsahu λ mezi 390 nm až 790 nm. Tento rozsah může být u každé osoby mírně odlišný. Např. s věkem se rozsah λ viditelného světla pomalu snižuje. U většiny lidí je ale dolní hranice nejčastěji v rozsahu 360 nm do 400 nm a horní mezi 760 nm až 830 nm. Záření pod spodní hodnotou λ je již ultrafialové a nad horní hodnotu se jedná o infračervené záření [1].

2.1.1. Přijímače záření

Energii lze stanovit jako míru různých forem pohybu hmoty a schopností hmoty vykonávat práci. Proces přeměny hmoty z jedné formy na jinou je doprovázen transformací její energie a všechny tyto změny se řídí zákonem o zachování a přeměně energie. Procesy pohlcování a přeměny fotonů záření je také proces přeměny jedné formy pohybu hmoty (záření) na jinou formu pohybu hmoty. Ke sledování transformací záření stačí nepatrně malá hmotnost fotonů optického záření, a poté již lze sledovat zákonitosti z pohledu energetických vztahů. Podle zákona o zachování a přeměně energie je část energie přenášena zářením pohlcena tělesem, na které dopadá. Následně se energie transformuje na jinou formu energie pohybu hmoty, což lze popsat rovnicí:

$$W_{\alpha} = \alpha * \int_{t_1}^{t_2} \Phi_e(t) * dt = W_p + W_z$$

W_{α} – zářivá energie, která je pohlcena uvažovaným tělesem v době vymezené časy t_1 a t_2 . [J]

α – integrální činitel pohlcení záření danou hmotou.

$\Phi_e(t)$ – funkce popisující časový průběh zářivého toku dopadajícího na ozařované těleso v časovém úseku, který je hodnocen. [W]

W_p – energie pohybu hmoty transformovatelné formy (např. elektrická, tepelná, chemická aj.) [J]

W_t – ztrátová energie, která se číselně rovná energii těch druhů hmoty, které vznikají současně se sledovaným procesem transformace energie; nejčastěji se jedná o transformaci části energie pohlcenou tělesem, která se poté přemění na teplo. [J]

Tělesa, ve kterých probíhá výše popsaná transformace pohlceného záření, se nazývají přijímače zařízení. Mezi nejběžnější přijímače patří oko, fotoelektrické články, luminofory, fotoemulze, listy rostlin aj. a jsou děleny na přijímače fyzikální a biologické. Základní energetickou charakteristikou přijímače je jeho citlivost, která je daná vztahem:

$$s = k_j * \frac{W_{ef}}{W_{dop}} = k_j * \frac{P_{ef} * t}{\Phi_{edop} * t} = k_j * \frac{P_{ef}}{\Phi_{edop}}$$

k_j - součinitel, který je závislý na volbě jednotek, v jakých se udává efektivní energie W_{ef} , popř. efektivní výkon P_{ef} .

t – čas, který se udává v sekundách, po kterých se sleduje energie dopadlá na povrch W_{dop} a získaná efektivní energie W_{ef} .

Přijímače ve většině případů absorbují záření různých vlnových délek různě a odlišná je také reakce na pohlcené záření různých vlnových délek. Z tohoto důvodu je citlivost většiny přijímačů k záření různých vlnových délek odlišná.

Pro přijímač s citlivostí s lze vypočít efektivní tok Φ_{ef} složeného záření charakterizovaného zářivým tokem Φ_e pomocí vztahu:

$$\Phi_{ef} = s * \Phi_e$$

Pro monofrekvenční zářivý tok $\Phi_e(\lambda)$ o vlnové délce λ odpovídá při spektrální citlivosti $s(\lambda)$ efektivní tok Φ_{ef} dle vztahu:

$$\Phi_{ef}(\lambda) = s(\lambda) * \Phi_e(\lambda)$$

Pro výpočet efektivního toku Φ_{ef} záření, který je složen z řady monofrekvenčních zářivých toků $\Phi_e(\lambda)$ lze v případě, že je známá spektrální citlivost $s(\lambda)$ přijímače odvodit rovnici (v případě využití pravidla aditivnosti toků):

$$\Phi_{ef} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} * s(\lambda) * d\lambda = s_m \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} \varphi_e * (\lambda) * s_r(\lambda) * d\lambda$$

Kde je:

$\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} = \varphi_e(\lambda)$ – spektrální hustota zářivého toku $\Phi_e(\lambda)$ pro vlnovou délku λ , tj.

v bodě λ

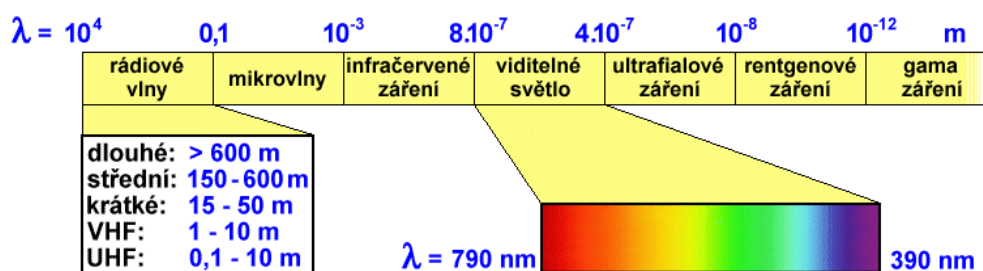
s_m – smluvní referenční hodnota citlivosti záření, např. maximální

$s_r(\lambda)$ – poměrná spektrální citlivost přijímače k záření různých vlnových délek

Rozdíl mezi efektivním tokem a zářivým tokem je, že efektivní tok hodnotí citlivost použitého přijímače na podkladě spektrální citlivosti. Jinak se jedná o analogické veličiny. Jednotky zářivých toků jsou vždy ve watttech (W) [1].

2.1.2. Viditelné záření (světlo)

Samotným pojmem „viditelné světlo“ se rozumí rozsah elektromagnetického záření, které je zhodnoceno zrakovým orgánem pozorovatele. Sítnice lidského oka v sobě má tři fotoreceptory, kterými je schopna vnímat světlo. Prvním fotoreceptorem jsou čípky, které reagují především při dostatečně vysoké hladině osvětlení, tedy spíše ve dne. Druhým fotoreceptorem jsou tyčinky, které především reagují na skotopické rozmezí a slouží tedy spíše k nočnímu vidění. Třetím fotoreceptorem jsou čidla intenzity světla pro neobrazový zrakový systém, důležitý pro regulaci fyziologických procesů přes cirkadiální systém. Citlivost tohoto fotoreceptoru v tzv. vnitřně-senzitivních gangliových buňkách (ipRGC; z angl. intrinsic photoresponsive retinal cells), je velice zvýšená pro světlo v oblasti modrého spektra (460 nm až 465 nm) [1].



Obrázek 1 - Elektromagnetické spektrum [2]

2.1.3. Ultrafialové záření

Spektrální rozsah ultrafialového záření je zhruba od 400 nm až do 1 nm. Rozeznávají se dohromady tři druhy UV záření, a to typ UV-A (315 až 400 nm), UV-B (280 až 315 nm) a UV-C (100 až 280 nm). Umělým zdrojem tohoto záření mohou být, některé světelné zdroje (především výbojky). Přírodním zdrojem ultrafialového záření je Slunce. Při ideálních podmínkách je většina ultrafialového záření ze Slunce pohlcena v atmosféře. Setkat se s ním ale můžeme zejména ve vysokých horách při slunných dnech, kde je velmi snadné opálit si kůži. Má široké využití ve vědeckých a technických oblastech, z důvodu snadného průchodu vodou, organickým sklem a vzduchem. Ultrafialové záření umožňuje sterilizaci, tj. porušuje DNA mikroorganismů a tím zabraňuje jejich množení, popřípadě vede k jejich úplné likvidaci [1].

2.1.4. Infračervené záření

Spektrální rozsah infračerveného záření je přibližně od 780 nm až do 1 mm. Existují tři druhy infračerveného záření a to IR-A (780 až 1400 nm), IR-B (1400 až 3000 nm) a IR-C (3000 až 1 000 000 nm). Toto záření se projevuje především tepelnými účinky. Zdrojem je opět sluneční záření, jakékoliv teplé těleso, a i elektrický oblouk. Infračervené záření snadno prostupuje vzduchem a mlhou. Infračervené záření má také široké zastoupení v komunikaci, kdy se používá pro přenos informací na krátkou vzdálenost. Typickým příkladem jsou mobilní telefony s infračerveným portem, nebo dálkové ovladače. Infračervené záření v nich vysílají LED [1].

2.1.5. Barvená spektra

Barevný vjem ozářené plochy, který je vyvolán zrakovými centry v mozku na základě informace ze sítnice oka, závisí na spektrálním složení dopadajícího světla a na činiteli odrazu jejího povrchu. Největší vliv na rozlišení barev mají fotoreceptory na-

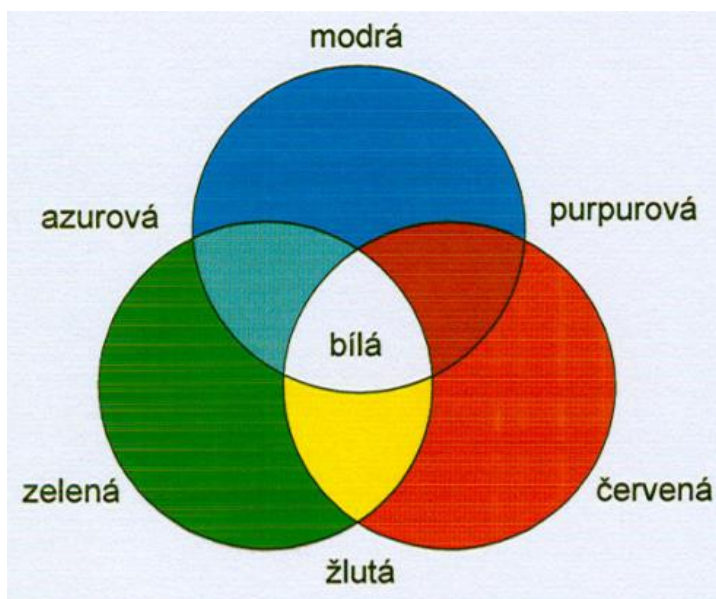
zvané čípky, které jsou vyladěné ke třem mírně odlišným spektrálním rozsahům vlnových délek světla. Zjednodušeně o nich mluvíme jako o čípcích pro červenou, zelenou a modrou „barvu“. Pojem „barva“ se využívá při popisu vlastností světla a předmětů. Běžně se také hovoří o barvě světla, nebo předmětů. Přesnější název barevných vlastností svítidla je však chromaticnost, nebo kolorita předmětů. Chromaticnost je dána spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího sledovaný předmět. Kolorita je určena spektrálním složením odrazu záření daného pigmentem povrchu sledovaného záření. Tyto vlastnosti lze přesně vyhodnotit podle spektrálního složení, které lze změřit pomocí spektrometru. Veškeré barvy se skládají jak ze spektrálních (tabulka č.1), tak i nespektrálních barev. Kvalitativní odlišnost vjemu jednotlivých spektrálních barev se nazývá barvený tón a vyjadřuje se názvy fialová, modrá, zelená atd.

Rozmezí vlnových délek [nm]	Barevný tón
380 až 430	fialová
430 až 465	modrofialová
465 až 490	modrá
490 až 500	modrozelená
500 až 560	zelená
560 až 575	zelenožlutá
575 až 585	žlutá
585 až 650	oranžová
620 až 770	červená

Tabulka 1 - Vlnové délky spektrálních barev [1]

Mezi typické nespektrální barvy patří např. barvy purpurové, které nejsou součástí žádného spektra, ani slunečního světla, a ani žádného jiného zdroje. Vjem purpurové barvy vzniká míšením obou krajních částí spektra viditelného záření.

Barvy se také dělí na pestré a nepestré. Pestrou barvou se rozumí barva, která má barevný tón. To jsou spektrální barvy a barvy, které vzniknou jejich míšením, jak lze vidět na obrázku č.2. Nepestré (achromatické) barvy jsou ty, které nemají žádný barevný tón a tvoří spojitou řadu od bílé přes šedou až po černou. Rozdíl mezi nepestrými barvami je jen v jejich intenzitě (hodnotě světleného toku, nebo jasu) [1]



Obrázek 2 - Znázornění míšení barev [1]

2.2. Světelně-technické parametry

Pro proces vidění není důležitá energie vyzářená zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. V této části jsou popsány ty světelně-technické parametry, které jsou použity v diplomové práci.

2.2.1. Světelný tok

Jedná se o světelně technickou veličinu, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Jednotkou světelného toku je lumen (lm). Světelný tok monochromatického záření vlnové délky λ , jehož zářivý tok je Φ_e (W) se určí ze vztahu:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) * \Phi_e(\lambda) = K_m * V(\lambda) * \Phi_e(\lambda)$$

Veličina $K(\lambda)$ v jednotkách $\text{lm} * \text{W}^{-1}$ je světelný účinek monochromatického záření rovný poměru světelného toku a jemu odpovídajícího zářivého toku. Dle CIE (International Commission on Illumination) a ISO (International Organization for Standardization) je maximum světelné účinnosti $K_m = 683 \text{ lm} * \text{W}^{-1}$. Tato hodnota platí pro normálního fotometrického pozorovatele při monofrekvenčním záření základní vlnové délky $\lambda = 555,155 \text{ nm}$. Veličina $V(\lambda)$ je poměrná světelná účinnost monochromatického záření daná vztahem a její jednotka jsou $\text{lm} * \text{W}^{-1}$:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m}$$

Pro složené záření se světelný tok určí ze vztahu:

$$\Phi = 683 * \int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) * V(\lambda) * d\lambda$$

[1].

2.2.2. Prostorový úhel

Prostorový úhel je důležitou prostorovou jednotkou ve světelně technických výpočtech. Velikost prostorového úhlu je určena velikostí plochy vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Jednotkou prostorového úhlu je steradián, který se značí sr. Steradián je určený jednotkovou plochou 1 m² na povrchu jednotkové koule o poloměru 1 m. Prostorový úhel Ω , pod nímž je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A vyřatá na povrchu této koule se stanoví ze vztahu [1]:

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$

2.2.3. Svítivost

V případě nerovnoměrného rozložení světelného toku zdroje či svítidla do různých směrů je třeba kromě hodnoty úhrnného světelného toku znát ještě prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech, tj. svítivost zdroje, popř. svítidla. Svítivost bodového zdroje v daném směru lze definovat jako podíl světelného toku $d\Phi$ vyzářeného zdrojem v tomto směru do prostorového úhlu $d\Omega$. Jednotkou svítivosti je kandela (cd), která patří k základním jednotkám soustavy SI [1].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

2.2.4. Osvětlenost

Veličina „osvětlenost“ necharakterizuje přímo samotný zdroj světla, ale určuje, jestli je srovnávací plocha správně osvětlena dle normy, nebo dle spokojenosti uživatele. V praxi je definována jako množství světla (světelný tok), který dopadne na určitou plochu. Jednotkou osvětlenosti je lux (lx), který lze vyjádřit jako $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$. Matematicky je osvětlenost definována jako:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

Kde E je osvětlenost (lx) elementární plochy dA (m^2) osvětlena světelným tokem dΦ (lm). Měření osvětlenosti je nejpoužívanějším měřením ve světelné technice. Pro její měření se používá přístroj zvaný luxmetr. Kromě základních měření osvětleností se luxmetr také používá pro vyhodnocení svítivosti světelných zdrojů a následně pro sestavení křivek svítivosti. Typickým příkladem je měření světelných zdrojů v goniofotometru. Při takovém měření se využívá vztahu mezi svítivostí I (cd) a kvadrátem vzdálenosti l (m):

$$E_N = \frac{I}{l^2}$$

2.2.5. Ozáření

Ozáření je radiometrická veličina, která se definuje jako měrná veličina světelného toku na jednotku plochy. Jednotkou intenzity záření je Watt na metr čtvereční ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$). Ozáření je definováno níže uvedeným vztahem, kde $d\Phi_S$ je zářivý tok (W) a dS bude osvětlená plocha (m^2):

$$E_E = \frac{d\Phi_S}{dS}$$

2.2.6. Index podání barev

Index podání barev (CRI-color rendering index) charakterizuje vliv spektrálního složení světla na vjem barvy osvětlovaných předmětů. Index podání barev se značí R_a a může nabývat hodnot 0-100. $R_a = 100$ reprezentuje osvětlení, kde je naprosto věrné

podání barev. Typický zástupce takového indexu je například denní světlo. $R_a = 0$ reprezentuje osvětlení, kde není možné rozeznat jakoukoli barvu. Typický zástupce pro tento případ je nízkotlaká sodíková výbojka. Etalony pro určení indexu podání barev jsou dva. Pro světelné zdroje s teplotou chromatičnosti do 5000 K se jako srovnávací zdroj používá teplotní světelný zdroj, který je nejbližší světelnému zářiči. Pro světelné zdroje, které jsou nad tuto mezi se používá normalizované denní světlo typu D. Jedná se o denní světlo o teplotě chromatičnosti 6500 K (D65) [1,4].

2.2.7. Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti je fyzikální veličina, která vyjadřuje barvu záření svítidla. Teplota chromatičnosti je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření. Teplota chromatičnost se vyjadřuje v Kelvinech (K) a obvykle dosahuje hodnot od 1700 K (temně oranžová až červená) až po 15000 K až 27000 K (jasná modrá). U nejčastěji používaných světelných zdrojů se setkáváme s rozsahem od 2700 K, až po 6500 K. Na obrázku č. 3 jsou demonstrovány jednotlivé teploty chromatičnosti světelných zdrojů, a to včetně jejich spektrálního složení a přibližného barevného tónu [1].

CCT [°K]	Zdroj bílého světla	Spektrální složení a přibližný barevný tón
1 700 K	Plamen zápalky	
1 850 K	Plamen svíčky; Východ nebo západ slunce	
2 700 – 3 300 K	Klasická žárovka; "Teplá" bílá kompaktní fluorescenční zářivka	
4 100 K	Měsíc	
5 000 K	Denní světlo na horizontu, (standardizovaná obloha D50 dle CIE) "Studená" bílá, kompaktní fluorescenční zářivka	
5 800 K	Sluneční světlo bez vlivu atmosféry	
6 500 K	Denní světlo při zatažené obloze	
6 500 – 10 500 K	LCD nebo klasická obrazovka	
15 000 – 27 000 K	Jasná modrá obloha bez slunce	

Obrázek 3 – Spektrální složení a teplota chromatičnosti z různých zdrojů světla [9]

2.3. Světelné zdroje

V posledních letech dochází k rychlému vývoji veškeré elektroniky a světelné zdroje nejsou výjimkou. V dnešní době se již v oboru umělého osvětlení nevyrábí téměř nic jiného než LED osvětlení, na které bude tato práce nejvíce zaměřena až na výjimku jedné kompaktní zářivky. Ostatní zdroje osvětlení jsou v této práci popsány pouze ve stručnosti, jelikož nejsou součástí předkládané diplomové práce.

Mezi hlavní parametry osvětlení patří světelný tok a příkon. Z jejich vzájemného poměru se vypočítá měrný výkon svítidla, který vychází v jednotkách lm/W. Mezi další důležité parametry patří index podání barev, který vyjadřuje věrohodnost barveného vjemu osvětleného předmětu a teplota chromatičnosti, která vyjadřuje barvu záření světelného zdroje. Další důležitým parametrem je živostnost svítidla, která se udává v hodinách svícení, a někdy také v cyklech zapnutí (on/off).

2.3.1. Wolframové žárovky

Jedná se o nejstarší světelný zdroj, který byl patentován Thomasem Edisonem v roce 1879. Dlouhá léta se jednalo o nejpoužívanější zdroj ve všech domácnostech. Princip fungování je založený na zahřívání wolframového vodiče, kterým protéká elektrický proud. Při vysoké teplotě začne žárovka zářit především v infračervené oblasti, ale v menší míře i ve viditelném světelném spektru. Z tohoto důvodu má žárovka velmi malý měrný výkon a to pouze 10 lm/W. Mezi hlavní výhody patří kvalitní index podání barev, který může být až $R_a=100$ a také široké spojité spektrum záření. Mezi další výhody patří jednoduchá regulovatelnost (např. triaková) a také velice nízká pořizovací cena, což je jeden z hlavních důvodů, proč se dnes žárovky stále ještě používají [1].

2.3.2. Halogenové žárovky

V dnešní době se již halogenové žárovky téměř nevyrábějí, jelikož byly z trhu vytlačeny LED zdroji. Halogenové žárovky fungují na principu halogenového cyklu, kdy se při vysoké teplotě vypařující wolfram slučuje např. s bromem. Kvůli vyšším teplotám je použito křemenné sklo, jelikož minimální teplota se pohybuje kolem 250°C. Výhodou oproti klasickým wolframovým žárovkám je vyšší teplota vlákna a tím pádem i vyšší měrný výkon svítidla, bělejší světlo a delší životnost [1].

2.3.3. Nízkotlaká zářivka

Jedná se o nízkotlaké rtuťové výbojky, které se v dnešní době používají pouze na při náhradách trubice, pokud investor nechce dělat žádné zásahy do stávajícího svítidla, které jsou pro přechod na LED trubice nezbytné. Hlavní část světla je vyzařována luminoforem buzeným ultrafialovým zářením výboje. V závislosti na typu použitého luminoforu lze dosáhnout různého barveného odstínu a také různého indexu podání barev. K jejich hlavním výhodám patří vysoký měrný výkon svítidla, a to až 104 lm/W. Z hlavních nevýhod jmenujme závislost světelného toku na okolním prostředí a také potřeba předřadných a startovacích obvodů, které částečně snižují měrný výkon osvětlovací soustavy jako celku. Další nevýhodou je pomalý náběh na jmenovitý světelný tok zdroje, který se dostavuje až po několika minutách [1].

2.3.4. Kompaktní zářivka

Jedná se o totožný princip jako u nízkotlaké zářivky jen s rozdílem tvaru. Kompaktní zářivky vznikly z důvodu náhrady klasických wolframových zářivek, kvůli vyšší energetické náročnosti. Z tohoto důvodu bylo nutné veškeré startovací obvody upravit do podoby, aby se vešly do závitu E27.

2.3.5. Nízkotlaké sodíkové výbojky

Světlo v nízkotlakých sodíkových výbojkách je vyzařováno sodíkovými parami s provozním tlakem od 0,1 až po 1,5 Pa. Sodík se vyznačuje intenzivním rezonančním zářením ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589 až 589,6 nm, která se blíží maximu spektrální citlivosti lidského oka při denním vidění. V dnešní době se jedná o nejúčinnější světelný zdroj s hodnotou až 200 lm/W. Jeho hlavní nevýhoda je velice špatné podání barev, jelikož se jedná o monochromatické světlo. Z tohoto důvodu se tento zdroj světla používá pouze pro osvětlení dálnic, či tunelů, protože při daném užití je potřeba velice nízká spotřeba na úkor nízkého indexu podání barev [3].

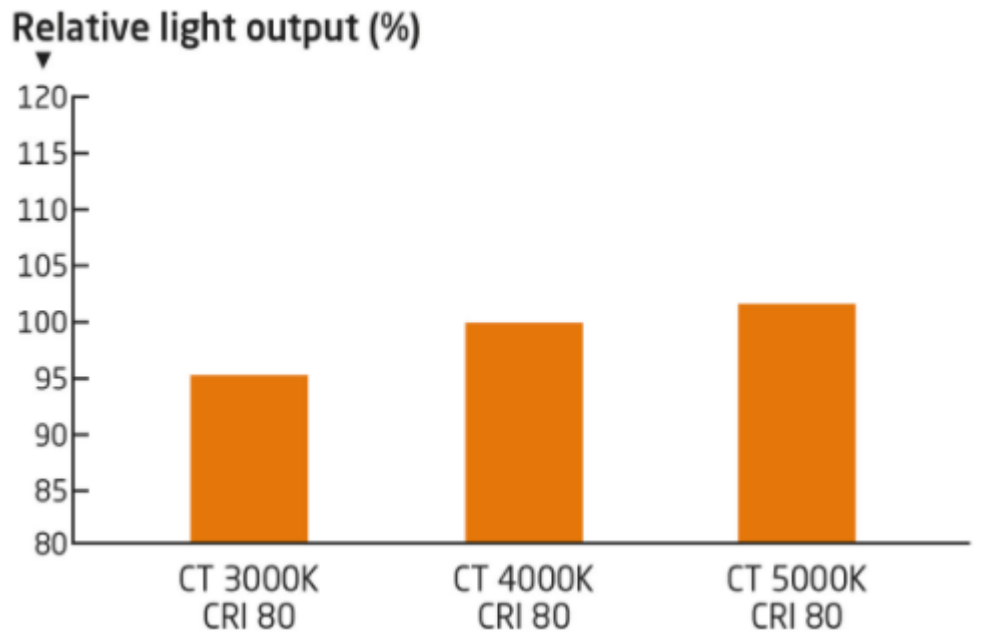
2.3.6. Vysokotlaké sodíkové výbojky

Světlo ve vysokotlakých výbojkách vzniká při rtuťovém výboji při parciálním tlaku převyšujícím 100 kPa a to platí, jak u výbojek pokrytých luminoforem, tak i s vnější čirou baňkou. U výbojek pokrytých luminoforem vzniká část světla přímo ve výboji a část vzniká ve vrstvě luminoforu vybuzeného ultrafialovým zářením výboje. Mezi

hlavní výhody patří vysoký měrný výkon při přijatelném indexu podání barev. Jako hlavní nevýhoda je nemožnost výbojku po vypnutí ihned zapnout – musí se počkat na vychladnutí. V dnešní době je největší využití sodíkových výbojek ve veřejném osvětlení [1].

2.3.7. LED

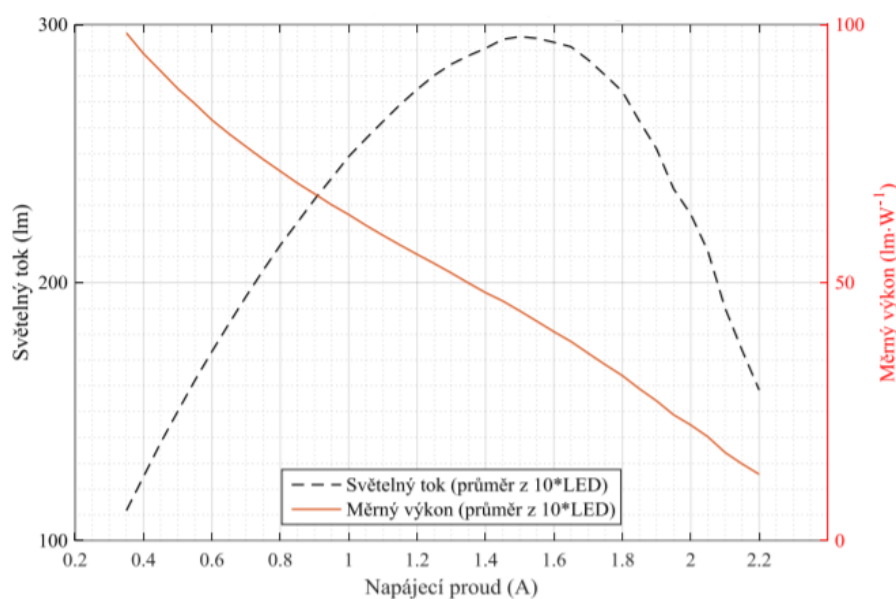
LED (Light-Emitting Diode) patří mezi nejnovější technologie světelných zdrojů, která využívá principu PN přechodu. Světelné záření u této technologie vzniká průchodem volných elektronů z části typu N do části typu P v propustném směru. Při následné rekombinaci (spojení elektronu s iontem) dochází ke vzniku záření různých barev, které jsou určeny šířkou zakázaného pásu. Generované záření má však velmi úzké barvené spektrum a lze ho použít pouze např. při signalizaci. V dnešní době, kdy se LED široce využívají, je nutné dosáhnout bílého vyzařovacího světla, které se používá např. při umělém osvětlení vnitřních prostorů. Dosažení bílé barvy lze dosáhnout dvěma způsoby. První způsob je kombinace červené, zelené a modré barvy, jejichž spojení vytvoří vjem bílé barvy. Nevýhoda tohoto postupu je, že po nějaké době dochází k rozdílnému svícení jednotlivých diod (např. vlivem stáří), a to se samozřejmě projeví na celkovém vjemu bílé barvy. Druhá metoda je založená na použití luminoforu. V případě absence luminoforu by LED svítila téměř fialovou barvou (oblast kolem ultrafialového záření). Při použití luminoforu dojde k přenesení spektra. Nevýhoda druhé metody je pokles měrné hodnoty výkonu v závislosti na teplotě chromatičnosti, takže platí, čím je teplejší barva svítidla, tím je nižší měrný výkon. Z tohoto tvrzení lze odvodit, že LED o teplotě chromatičnosti 3000 K má větší spotřebu, než LED o teplotě chromatičnosti 4000 K (při stejném světleném toku) jak lze vidět na obrázku č. 4. Bílé světlo se vyznačuje širokým barveným spektrem a s indexem podáním barev vyšších než $R_a = 80$. Další výhodou LED je široká možnost teplot chromatičnosti. Teploty začínají od 2500 K a dosahují až 10 000 K [4].



Obrázek 4 - Závislost teploty chromatičnosti na účinnosti [25]

Vliv elektrického proudu na světelný tok

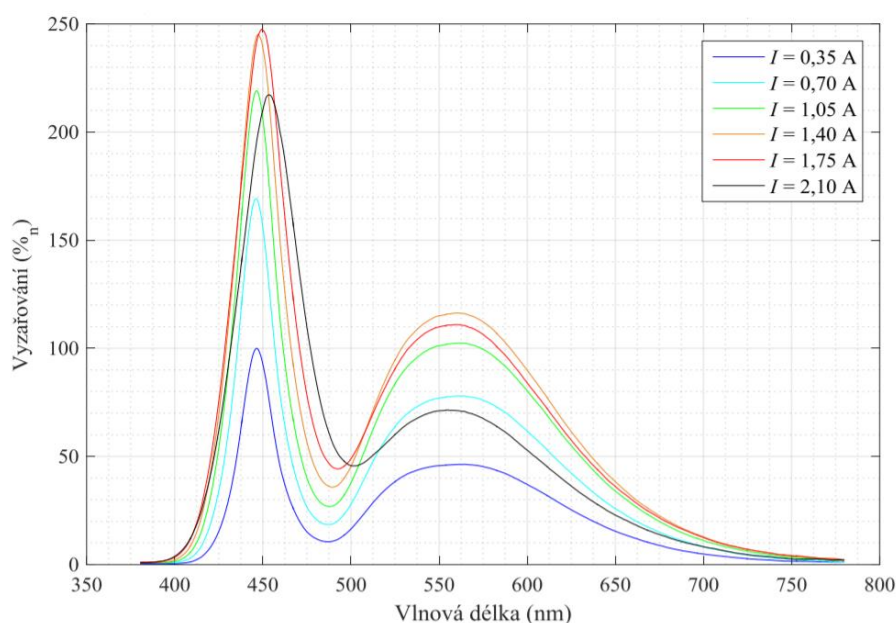
Elektrický proud určuje celkový výkon provozované LED diody. V praxi se můžeme často setkat s hodnotami odlišnými oproti jmenovitému proudu diody. Může to být z důvodu stmívání, či naopak napájení nadproudem kvůli poklesu svítivosti diody – tím pádem se dosáhne původní svítivosti. Jak lze vidět na obrázku č. 5, s rostoucím napájecím proudem roste i světelný tok, ale to samozřejmě neplatí neomezeně. Při větším napájecím proudu, než je jmenovitý, se do určité hodnoty bude světelný tok stále zvětšovat, a to až na tří, nebo čtyřnásobek jmenovitého proudu. Poté začne jmenovitý proud klesat. Pohybovat se za hranici větší, než je jmenovitý proud není doporučeno. Ať již z důvodu brzké poruchovosti LED diod, tak i z důvodu špatné energetické bilance, protože jak lze vidět v obrázku č. 5, s větším proudem měrný výkon lineárně klesá. Další problém při vysokých proudech je nutnost odvést teplo [4].



Obrázek 5 - Závislost světelného toku a měrného výkonu na napájecím proudu [4]

Vliv elektrického proudu na spektrální složení vyzařovaného světla

Spektrální záření emitovaného záření je ovlivněno velikostí napájecího proudu. Se zvyšujícím se napájecím proudem dochází ke zvýšené emisi fotonů v oblasti PN přechodu. Tento proces má za následek změnu velikosti primárního vrcholu vyzařovacího spektra. Sekundární vrchol spektra se také mění v závislosti na napájecím proudu, ale svého maxima dosahují při nižším proudovém zatížení. Na obrázku č. 6 je demonstrováno, že při extrémním přetížení nadproudem dochází k posunu dominantní vlnové délky. [4]



Obrázek 6 - Spektrální složení záření v závislosti na velikosti napájecího proudu [4]

2.3.8. PC-AMBER

Jedná se celkem nový speciální LED světelný zdroj, který má díky své speciálně vyvinuté fosforové vrstvě plně potlačenou modrou spektrální složku. V porovnání s vysokotlakou sodíkovou výbojkou, která má index podání barev 25, má PC-AMBER index podání barev na hodnotě až 50. Měrný výkon této technologie se pohybuje kolem 60-70 lm/W.

2.4. Teorie o vlivu modrého světla na spánek a cirkadiánní rytmus

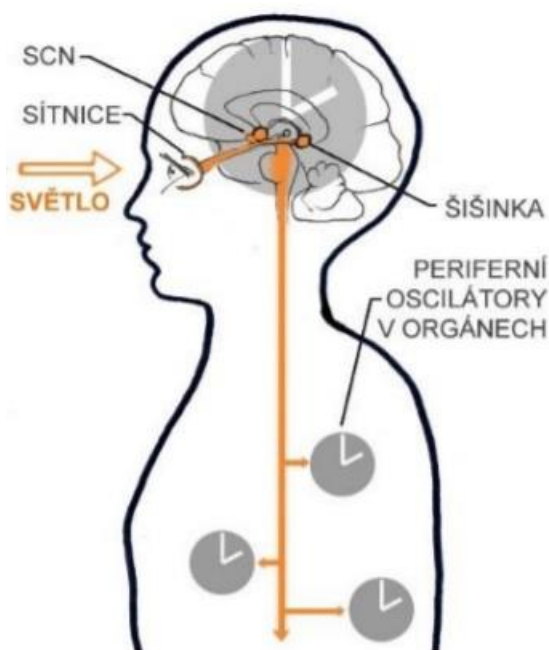
2.4.1. Cirkadiánní rytmus

Život každého organismu na Zemi je řízen pomocí vnitřního endogenního časového systému, který úzce souvisí s rytmickým střídáním dne a noci. Ukázkové příklady rytmické změny jsou: cyklus spánku a bdění, denní změny v hormonální sekci, změny srdeční frekvence, buněčná obnova nebo metabolická a teplená regulace. Všechny tyto změny fyziologických funkcí probíhají zhruba ve 24hodinové periodě, která je nazývána cirkadiánním rytmem. Aby se cirkadiánní rytmy přizpůsobily přesně 24hodinové periodě solárního (slunečního) cyklu, musí být synchronizované s vnějším časem. Hlavním synchronizátorem je střídání světla a tmy během dne a noci.

Cirkadiánní systém člověka je hierarchický. V mozku se nachází shluk neuronů tzv. suprachiasmatické jádro (dále jen SCN), které slouží jako hlavní oscilátor a pacemaker vnitřních cirkadiánních hodin. V prostředí, kde nejsou vnější časové podněty, např. ve stálé tmě, udržuje SCN konstantní periodu rytmu, která se mírně liší 24 hodin, v závislosti na druhu organismu. Jedna perioda cirkadiánního rytmu člověka trvá přibližně v rozmezí 24,2 hodin až 25 hodin. Tento rozdíl mezi jedinci je dán geneticky, takže každý jedinec je charakterizován jiným tzv. chronotypem, o kterém je pojednáno níže. Světlený impulz, který dopadne na sítnici je detekován fotoreceptory ipRGCs. Axony těchto buněk vytváří větev očního nervu, která přenáší informace o světle do SCN a dochází k synchronizaci jejich neuronální a metabolické aktivity s vnějším časem. Z SCN je časová informace vedena neuronálně, nebo humorálně do jiných částí mozku a k periferním orgánům jako jsou srdce, plíce, nebo játra a ledviny, kde synchronizuje periferní cirkadiánní hodiny. Přesné načasování fyziologických funkcí je optimalizováno pro funkčnost úlohy v celém systému. Příbuzné procesy jsou načasovány synergicky a protichůdné funkce jsou nastavené s určitým fázovým posunem. Tyto procesy a funkce jsou tedy synchronizované se solárním cyklem prostřednictvím centrálních hodin v SCN. Díky této organizaci lze synchronizovat časovou posloupnost biologických funkcí a toto zajistit velkou plasticitu a případné přizpůsobení se všem časovým změnám ve vnějším prostředí [9, 14].

Časovače z vnějšího prostředí

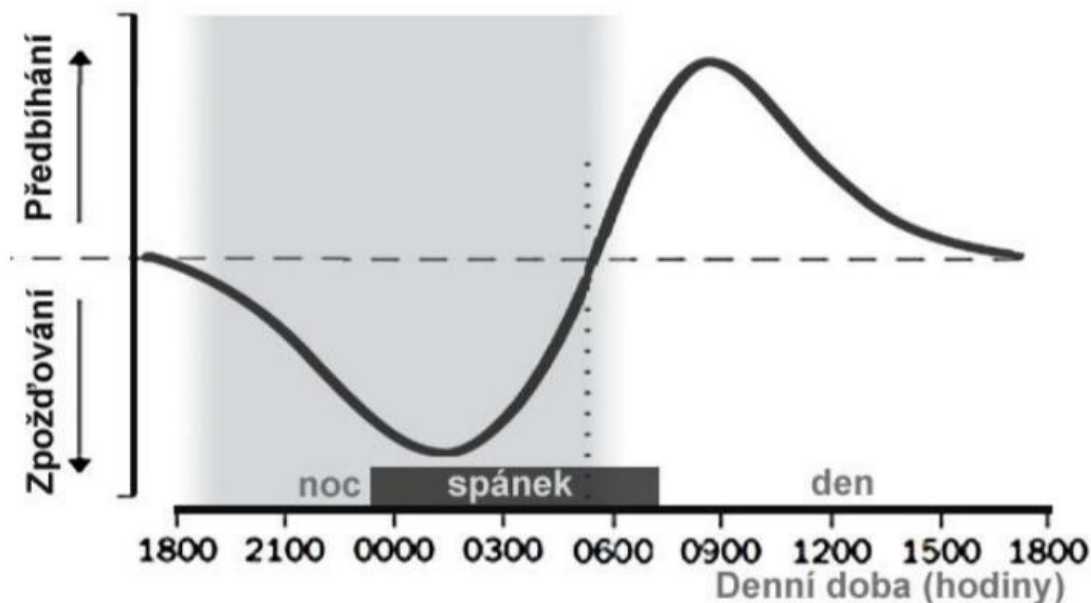
Cirkadiální perioda netrvá stejně dlouho jako solární cyklus daný rotací Země kolem své osy. Pokud bychom nechali naše cirkadiální hodiny volně běžet pouze s geneticky nastavenou periodou, tak se po několika týdnech dostaneme do protifáze s okolním časem. V přírodě je volný běh vnitřního času velmi vzácný. Cirkadiální hodiny velké většiny organismů jsou striktně řízené milníky slunečního cyklu, jako je východ a západ. Endogenní rytmus všech organismů je velmi ovlivněn podněty z biologického prostředí, které nazýváme časovače či synchronizátory. Mezi známé časovače patří: Světlo, změny teploty, sociální interakce, pravidelné cvičení a pravidelné stravování (pití), či pravidelný příjem některých léků. Hlavním synchronizátorem je ovšem střídání světla a tmy během dne a noci. U savců je cirkadiální systém citlivý na světlo dopadající na sítnici. Schéma organizace cirkadiálního systému je zobrazeno na obrázku č. 7.



Obrázek 7 – Schéma organizace cirkadiálního systému [10]

Citlivost cirkadiálních hodin je vyjádřena křivkou fázové odezvy (obrázek č.8), kde je na ose Y znázorněn čas předbíhání či zpoždování v hodinách (maximální hodnota pro předbíhání bývá obvykle 2 hodiny a pro zpoždování 3 hodiny). Z křivky je patrná měnící se velikost a směr fázového posunu cirkadiálního rytmu v závislosti na době, kdy světlo působí. Ranní světlo cirkadiální hodiny zrychluje, a tedy zkracuje

periodu. Světlo ve večerních hodinách má opačný význam a vnitřní hodiny jsou jím zpoždovány a perioda se prodlužuje. Pokud je člověk ve stálé tmě a působí-li na něho pouze krátký světelný puls v průběhu jeho subjektivního dne, nevytváří se žádný posun vnitřních fázových hodin. V případě silných světelných podnětů během noci, či subjektivní noci může nastat výrazný fázový posun, nebo či dokonce úplné resetování vnitřních hodin.



Obrázek 8 – Příklad křivky fázové odezvy na vnější světelné podněty [6]

Cirkadiánní systém reaguje kromě světla také řadu dalších faktorů z vnějšího prostředí jako např. změna teploty, čas, pravidelná konzumace potravy a společenské aktivity. Všechny tyto faktory mají vliv na usměrňování fáze cirkadiánních hodin. Některé periferních oscilátorů v těle mohou být pod přímým vlivem externího časovače, který je pro něj fyziologicky významný. Například cirkadiánní systém zažívacího systému je ovlivněn časem příjmu potravy. Při narušení rytmu řízeného SCN, např. při stálé světlené expozici, tak dojde k uplatnění ostatních časovačů na periferní oscilátory, které pak mohou dostat časové systémy orgánových soustav do rozdílných fází. Vzniká tak riziko tzv. desynchronizace organismu a snížení amplitudy cirkadiánních rytmů (obrázek č.9b). Amplituda je maximální výchylka periodicky se měnící veličiny. Místo výrazu amplituda lze také použít např. výkmit, nebo rozkmit [9].



Obrázek 9 – Schéma synchronizace při více časovačích – a) Rytmičké vnější vlivy (černá) ve stejné fázi vytvoří silný rytmus (oranžová), b) Vnější vlivy v různých fázích vytvoří nevýrazný rytmus s nižší amplitudou [9]

Pravidelné střídání dne a noci ovlivňuje mimo cirkadiánního systému a jemu podřízených fyziologických funkcí i chování každého jednotlivce. Dostatečné denní světlo udržuje organismus soustředěný a v bdělém stavu, připravený provozovat pracovní úkony. Naopak dostatečná tma v noci umožňuje tělu odpočívat a obnovovat síly během spánku.

2.4.2. Cirkadiánní poruchy

Pro kvalitní spánek je důležitá shoda doby reálného spánku včetně jeho délky s vhodnou dobou pro spánek podle cirkadiánního rytmu. Pokud nebude načasování spánku a bdění srovnáno s cirkadiánním časem mohou vzniknout např. spánkové potíže. Typickým příkladem takového nesouladu je změna časových pásem při cestování, změna pracovního režimu (směnný režim), nebo abnormality cirkadiánního rytmu způsobené vrozenými poruchami např. hodinových genů. Zůstaneme-li pouze u poruch spánku, podle mezinárodní klasifikace se mezi cirkadiánní spánkové poruchy počítá celkem sedm nosologických jednotek. Jedná se o zpožděnou fázi spánku, přesunutou fázi spánku, nepravidelný rytmus spánku a bdění, volně běžící rytmus, poruchy spánku při změně časových pásem (jet lag), poruchy spánku a bdění při směnném režimu, poruchy cirkadiánního rytmu jiné příčiny (jiné onemocnění, léky a návykové látky apod.). Nesrovnalosti denního režimu a načasování spánku vyvolává mimo poruch spánku, také zhoršení sociálního, pracovního a jiného výkonu. Dlouhodobé narušování cirkadiánní organizace také zvyšuje riziko vzniku chorob, které nepovažujeme primárně za cirkadiánní poruchy (insomnie, nádorová onemocnění, porucha chování v REM spánku, zánětlivé nemoci, hypertenze, diabetes 2 typu, některé duševní nemoci a další) [7].

2.4.3. Vnímání světla lidským okem

Lidské oko lze rozdělit na dvě části podle jejich zásadních funkcí. První část je optická (čočka, rohovka), která pomáhá nasměrovat paprsek světla na nejcitlivější místo sítnice, minimalizuje jeho pohlcování a rozptyl a zajišťuje kvalitní obrazové vidění založené na vnímání kontrastu. Druhá část je neurální (sítnice) – světlocitlivá část mozku. V sítnici jsou umístěné fotoreceptory obsahující fotopigmenty s proteiny, které jsou citlivé na světlo, tzv. opsiny. Ty zajišťují transformaci světelné energie fotonu na elektrický signál srozumitelný nervovému systému mozku. Celkové schéma dopadu světleného paprsku na oko je zobrazen na obrázku č. 11, kde jsou také graficky zobrazeny jako obrazové, tak neobrazové fotoreceptory [9].

2.4.4. Tyčinky a čípky

Lidské oko umožňuje vnímat světlo v různých světelných prostředích, která se mohou lišit hladinami osvětlenosti, nebo jasovými poměry. Z tohoto důvodu oko obsahuje duální systém fotoreceptorů – tyčinky a čípky. Oba typy se aktivují v závislosti na množství světelného záření dopadajícího na sítnici. V noci, kdy je světla řádově méně, než ve dne jsou informačním zdrojem tyčinky – jedná se o skotopické vidění. Pokud hladina osvětlenosti přesáhne dynamické rozmezí aktivity tyčinek, tak dojde k oslnění a tyčinky jsou tzv. satureované, a již neposkytují gradované reakce odečitatelné mozkovými centry. Obrazové vidění je tedy vedeno čípkami. V tomto případě se jedná o fotopické vidění. V případě přechodné světelné intenzity, která již překračuje práh citlivosti čípků, ale ještě nedosahuje prahu nasycení tyčinek, mluvíme o mezopickém vidění. Signál z tyčinek a čípků je přenášen zrakovým nervem do talamu a poté optickou radiací do zrakové kůry v mozku, kde je signál transformován do vizuálního vjemu.

V sítnici oka se vyskytují celkem tři druhy čípků, které zajišťují vnímání kontur, barev, pohybu a hloubky. Vidění obrazu je složeno z těchto čtyř atributů, které jsou přenášeny ze sítnice do mozkové kůry, kde jsou teprve poskládány. Celkový vjem barev vzniká sloučením informací z jednotlivých typů čípků. Každý z čípků má vrchol citlivosti v různých oblastech světelného spektra. Tzv. modrý čípek má vrchol citlivosti ve 445 nm. Zelený v 535 nm. Červený v 575 nm. Společný vrchol citlivosti čípků ve fotopickém rozmezí intenzit se nachází kolem 555 nm. Čípky se vzájemně liší jak ve

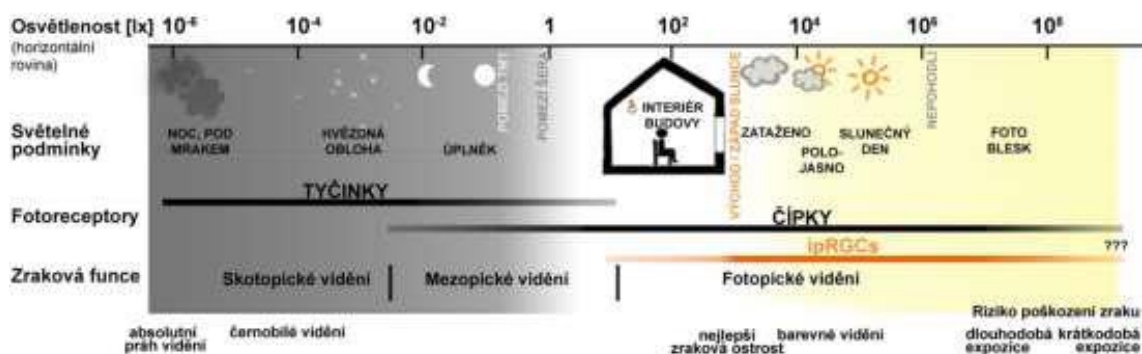
spektrální citlivosti, tak i v rovnoměrnosti distribuce po sítnici oka – zhruba 64 % čípků jsou citlivé na červené vlnové délky, ale pouze 2 % čípků jsou citlivé na modré vlnové délky. Nejvyšší koncentrace čípků je na místě tzv. žluté skvrny. V tomto místě je zajišťováno nejostřejší vidění – obraz, na který člověk kouká zpřímá se promítá právě do tohoto bodu.

Tyčinky, které pracují za nižších intenzit osvětlení, neumožňují vnímat žádné barvy, ale jsou již citlivé při velmi malých světelných intenzitách. Četnost a citlivost tyčinek je dvacetkrát větší než u čípků, a jejich akční spektrum je posunuto směrem ke kratším vlnovým délkám s maximem kolem 505 nm. Tyčinky převládají v periferní sítnici.

IpRGCs a neobrazové vnímání světla

Zrak nám kromě obrazových informací o našem okolí poskytuje také neobrazové informace, které mají vliv na fyziologické a psychologické procesy v našem těle. Toto neobrazové vnímání světla nám sice neposkytuje žádné informace založené na vidění kontrastu intenzit odraženého světla, ale poskytuje informaci o přítomnosti a intenzitě difúzního světla v našem prostředí. V minulosti se tento efekt přikládá pouze činností tyčinek a čípků, ale po mnoha pokusech bylo prokázáno, že ani jeden ze známých receptorů není nenahraditelným čidlem pro tyto procesy. V roce 1998 byl ze sítnice oka savců izolován další typ proteinů citlivých na světlo, a to tzv. melanopsin. Fotopigment melanopsin se nachází v ipRGC buňkách v jiné vrstvě sítnice, než jsou uložené známé fotoreceptory. Ve vrstvě gangliových buněk formují rozptýlenou fotosensitivní síť, která pokrývá téměř celou sítnici. Fotosensitivní ipRGCs tvoří přibližně dvě procenta ze všech gangliových buněk sítnice. Během dalších let byl zjištěn vrchol citlivosti těchto buněk v oblasti v rozmezí mezi 460 nm až 480 nm, které se liší od známé citlivosti tyčinek i čípků, ale odpovídá zhruba citlivosti melanopsinu.

Mezi známé faktory, které ovlivňují neobrazový zrakový systém člověka, patří: denní doba, intenzita, spektrum, doba trvání a rozložení světla, které oko přijímá. Na rozdíl od tyčinek a čípků, pro jejichž funkci je denní doba zanedbatelná, je u neobrazového vnímání světla velice důležitá. V závislosti na denní době se může zcela proměnit intenzita i druh reakce řady fyziologických procesů. Reakce ipRGCs fotoreceptorů je oproti klasickým fotoreceptorům pomalejší. Na obrázku č.10 je graficky zobrazeno schéma reakcí různých fotoreceptorů v závislosti na různých světelných podmínkách. Celkové schéma dopadu světelného paprsku na oko je zobrazeno na obrázku č. 11, kde jsou také graficky zobrazeny jak klasické receptory, tak i ipRGC [9].



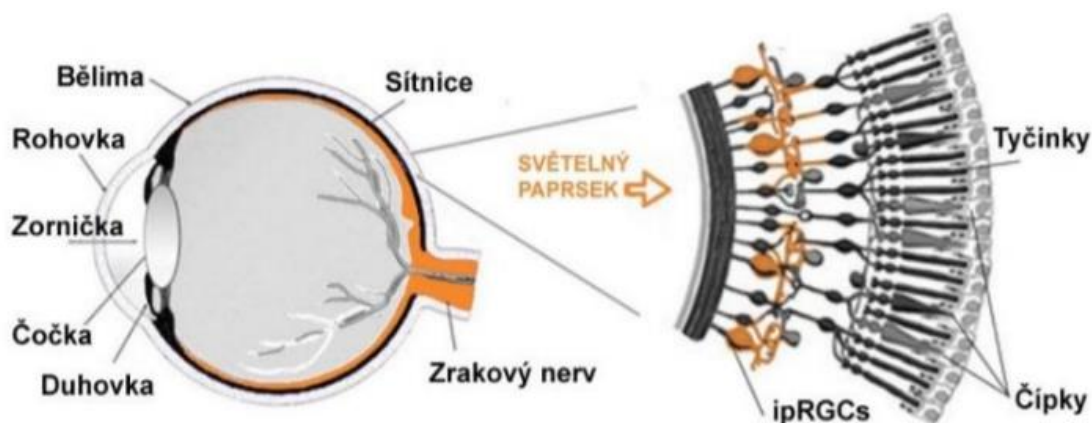
Obrázek 10 - Osvětlenost, obrazové a neobrazové funkce, příklady možné osvětlenosti (lx), horizontální roviny za různých světelných podmínek, rozsah citlivost lidského oka, režim zraku a aktivita fotoreceptorů [9]

Kvantita světla

Díky dvojitému systému fotoreceptorů na sítnici můžeme vnímat světlo ve velmi širokém rozsahu intenzit. Oko je schopno se přizpůsobit jasovým podmínkám v rozsahu přes jedenáct logaritmických řádů, od minima nutného pro základní orientaci díky vidění kontur na základě rozlišení kontrastů (10^{-6} cd.m⁻²), přes rozlišení barev od (1 cd.m⁻²), až po osvětlené plochy přímým slunečním zářením (10^5 cd.m⁻²). Riziko poškození zraku nastává v případě, kdy je oko dlouhodobě vystaveno jasu nad (10^7 cd.m⁻²). Při vyšším jasu nastává oslnění a oko ztrácí schopnost rozeznávat detaily. Z tohoto důvodu je nutná adaptace fotoreceptorů na okamžitou intenzitu světla. Pro adaptaci na vyšší jas obvykle stačí jednotky sekund. V opačném případě trvá adaptace až několik desítek sekund při přechodu do výrazně temnějšího prostředí. Důkladná adaptace na tmu může tyčinkám trvat i 30 minut a více, ale poté jsou již schopny reagovat na minimální podněty na úrovni jednotlivých fotonů.

Neobrazové vnímání světla využívá především signál z fotoreceptorů ipRGCs. V nižších světelných hladinách je aktivita melanopsinu kombinována s informacemi z tyčinek a čípků. Pro přesné měření dopadajícího světla je nutné umístit luxmetr od vertikální roviny do úrovně očí, aby byla co nejlépe nasimulována reálná situace. Reakce neobrazového systému na přítomnost světla na sítnici jsou velmi odlišné v závislosti na denní době. Během dne působí světlo pozitivně na cirkadiánní systém i kognitivní funkce, během nočních hodin je i nízká osvětlenost sítnice převáděna do mylných informací pro fyziologické procesy a tlumí regenerační a spánkové procesy.

V některých experimentech byla změřena suprese melatoninu o síle 50% maximální odezvy při osvětlenosti 100 lx. Je velice obtížné porovnávat výsledky jednotlivých studií, jelikož se v supresi melatoninu vyskytuje mnoho proměnných jako: složení světla, délka trvání osvitu, denní doba, světelná historie a odlišná fyziologická odpověď jedince [9].



Obrázek 11 - Grafický popis oka a dopadu světelného paprsku na fotoreceptory [9]

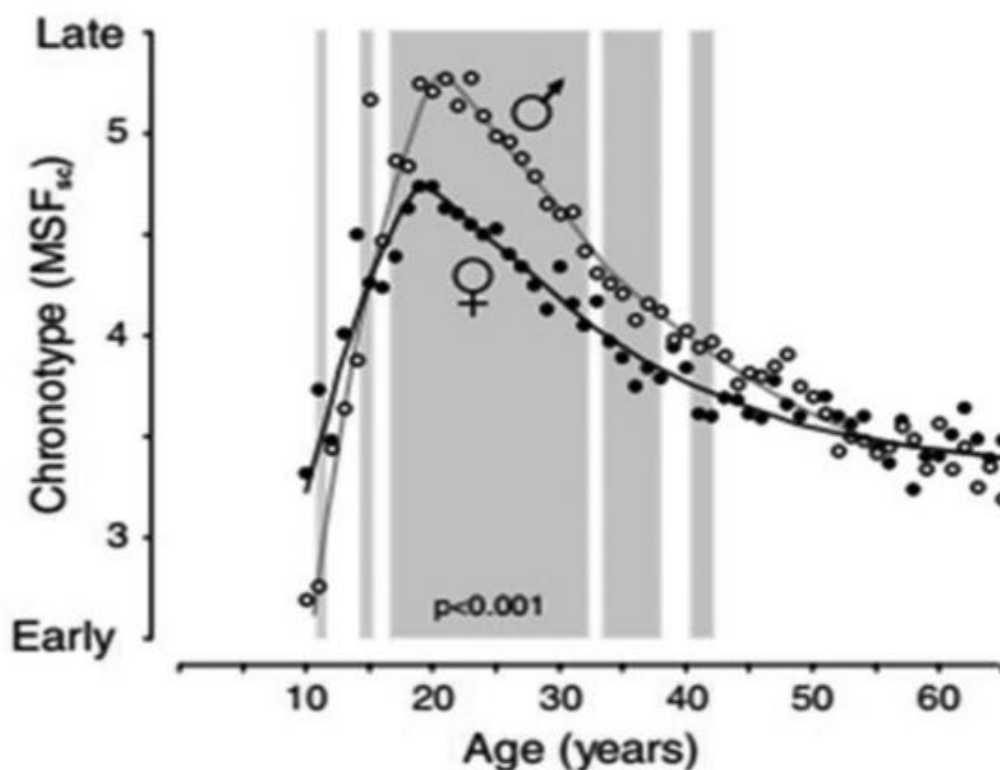
2.4.5. Rozdíly vnímání světla

Kromě rozdílů vnímání obrazu mezi jednotlivci, které je způsobeno různou kvalitou zrakového aparátu, existují také rozdíly v neobrazovém vidění mezi jednotlivci. Známé faktory, které je mohou způsobovat, jsou chronotyp, věk a pohlaví.

Chronotyp člověka vyjadřuje jeho příklon ke spíše ranní, či spíše večerní aktivitě a k fázově posunutému načasování spánku. Tyto odlišnosti vyplývají z mírně rozdílné délky endogenní periody. Extrémní časné chronotypy jsou nazýváni skřivani. Skřivani vsávají brzo ráno a jejich efektivita je největší před polednem a usínají brzo večer. Oproti vnějšimu času jdou vnitřní hodiny skřivanů mírně napřed, jejich vnitřní perioda je tedy téměř rovna 24 hodinám, nebo může být v extrémních případech i kratší než 24 hodin. Výrazně pozdní chronotypy se nazývají sovy. Sovy se probouzejí před polednem a jejich největší efektivita je odpoledne, nebo až večer a obvykle usínají pozdě v noci. Jejich vnitřní čas je oproti vnějšimu času opožděn a jejich endogenní perioda je tedy delší než 24 hodin. Odlišná délka periody rytmů mezi chronotypy je patrná ve všech fyziologických procesech v těle, jako je spánková regulace, regulace tělesné teploty, hormonální sekrece, změny kognitivních schopností, zažívání a dalších. Podle studie Browna z roku 2007 může být chronotyp patrný i na buněčné úrovni a rytmické

procesy v buňkách odebraných extrémním chronotypům vykazují odlišnou délku periody i v *in vitro* podmínkách [23].

Z fázově responsní křivky (obrázek č. 8) vyplývá, že pokud se cirkadiánní hodiny zpožďují, jako je tomu v případě večerního chronotypu, je nezbytné světlo zrána, které indukuje fázově předběhnutí a tím zkrácení vnitřní periody. V běžném životě se však sovy vystavují spíše večernímu světlu a tím svoje hodiny ještě více zpožďují. Skřivani potřebují také ranní světlo, neboť jejich hodiny bývají zřídka kdy přesně srovnané se solárním cyklem, ale večerní světlo jim tolik nevadí. Díky přirozenému nastavení se jim však dostává ranního světla více než sovám, což je v principu výhodnější, jak v mentálním výkonu, tak i ve fyzickém výkonu oproti sovám. Na obrázku č. 12 je graficky znázorněna závislost chronotypu na věku a pohlaví. Na ose Y (MSF_{sc}; Midpoint of Sleep on Freedays-sleep duration corrected) je graficky znázorněn střed subjektivního spánku, korigovaného pro rozdíly mezi volnými a pracovními dny (korigováno pro délku spánku). Tento parametr se používá pro objektivní hodnocení chronotypu člověka. Na ose X je graficky znázorněn daný věk jedince.



Obrázek 12 - Závislost chronotypů na věku a pohlaví [12]

2.4.6. Doba trvání osvětlení, rozložení v prostoru, předchozí světelné prostředí

Rozložení světla v prostoru

Zrak nám umožňuje vnímat okolí pomocí odraženého světla od různých povrchů předmětů a také pomocí světla dopadajícího na sítnici oka. Samotné umístění zdroje světla je velmi důležité pro kvalitu prostorového vnímání. Pokud je světelná distribuce nerovnoměrná, tak mohou vznikat výrazné jasové rozdíly povrchů, které mohou vést k oslnění a omezení vidění.

Neobrazový systém není oproti obrazovému systému tak citlivý k prostorové distribuci světelného záření. ipRGCs jsou rozptýleny rovnoměrně po celé sítnici a díky tomu systém reaguje na globální změny difúzního světla. Rozdíl může být ve fyziologické reakci na osvětlení směrovým světlem a celkovým rozptýleným osvětlením prostoru, které zasahuje větší část sítnice oka. Některé studie naznačují, že světelné záření z horní části zorného pole dopadající na sítnici v její spodní části má výraznější vliv na oddálení přirozeného nástupu spánku, než zařízení směřující světlo vzhůru [9].

Doba trvání osvitu

Obrazový zrakový systém je schopen reagovat na změny světelného prostředí v čase velmi rychle. Častý problém se objevuje již u ustupujících zářivek a nazývá se flicker – jedná se o neustálou změnu jasu světla o síťové frekvenci. Flicker nutí fotoreceptory neustále k rychlé a stále cyklující adaptaci, čímž se energeticky vyčerpávají a mohou mít vliv na zrakový systém jako celek. Z hlediska fyziologie oka je přijatelná frekvence míhání dosažena, je-li opakovaný světelný podnět vnímán jako stabilní, ne jako přerušovaný.

V neobrazovém systému má doba trvání a časové rozložení světelné expozice (kontinuální, pulsní) vliv na velikost a směr fázového posunu vnitřní biologických hodin. Směr fázového posunu je závislý na denní době ozáření (obr. 8).

Předchozí světelné podmínky

Obrazový systém je schopen se velice rychle adaptovat. Vliv přechodního světelného prostředí zpravidla nepřesahuje několik sekund, či minut, potřebných k přizpůsobení fotoreceptorů.

Neobrazový systém může být ovlivněn světelnými podmínkami po dobu následujících hodin a dnů. Výrazné změny osvětlenosti mezi dnem a nocí jsou považovány za

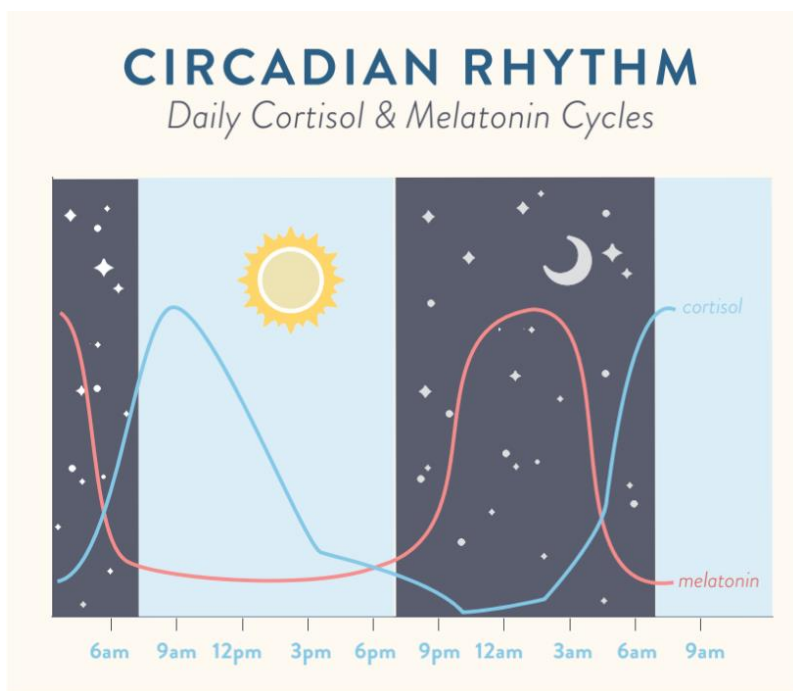
silný faktor stability a citlivosti celého systému. Vystavení slunečnímu svitu během několika dnů výrazně snižuje citlivost na světlo během noci [9].

2.4.7. Melatonin a kortizol

Melatonin je neurohormon, který ovlivňuje procesy imunity, kardiovaskulární systém, spánek a metabolismus, a uplatňuje se jako časový ukazatel cirkadiánní fáze SCN pro synchronizaci cirkadiánních rytmů v periferní orgánech. Jeho hlavní úkol je tedy přenos informace o rytmu světla a tmy z SCN do celého organismu. Melatonin je tvořen z aminokyseliny tryptofanu a jeho syntéza závisí na jeho dostupnosti z potravy. Melatonin je vysoce rozpustný ve vodě i v tucích a je ze 70 % vázán na albumin. Cirkulující melatonin se dostává ke všem tělesným tkáním, protože přestupuje hematoencefalickou bariéru. Po intravenózní aplikaci dosahuje v mozku svého maxima za 6-8 minut. Melatonin je degradován v játrech, jen v minimálním množství se vyloučí v nezměněné formě. Melatonin se tvoří v šišince (epifýze) během tmavé (noční) periody. Hladina melatoninu v běžném denním cyklu je přes den nízká a během nočních hodin výrazně narůstá. Vrchol hladiny melatoninu je přibližně v půlce noční spánkové fáze, kterou může mít každý jedinec v jiné části noci v závislosti na chronotypu a synchronizaci s vnějším časem. Počátek růstu melatoninu začíná ve večerních hodinách. Rytmus sekrece melatoninu je řízen podobně jako ostatní rytmy u savců. Dráha, kterou je přenášena informace z SCN do šišinky, vede nejdříve do paraventriculárních hypotalamických jader, odtud descendentně do krční míchy, kde jsou synapse s pregangliovými buňkami sympatického jádra – ganglion cervicale superius. Neurony z tohoto ganglia projikují do šišinky a působí na její buňky noradrenalinem. Vazba na tmavou (noční) periodu neznámá, že u všech savců musí být sekrece melatoninu spojená se spánkem jako např. u člověka. U nočních živočichů je hladina melatoninu vysoká naopak v době jejich aktivity.

Druhý významný hormon, jehož rytmus je řízený z SCN přes paraventriculární jádro hypotalamu je kortizol. Kortizol dává tělu impuls k probuzení a k aktivitě zvyšováním hladiny cukru v těle, aby tělo mělo dost energie. Hladina kortizolu tedy u člověka prudce roste v ranních hodinách. Kolem dopoledne začíná pomalu klesat až do půlnoci (obrázek č. 13). Hladina kortizolu je v těle ale zvyšována také v závislosti na stresu či příjmu potravy, proto se kortizol nehodí pro posuzování fáze cirkadiánních hodin,

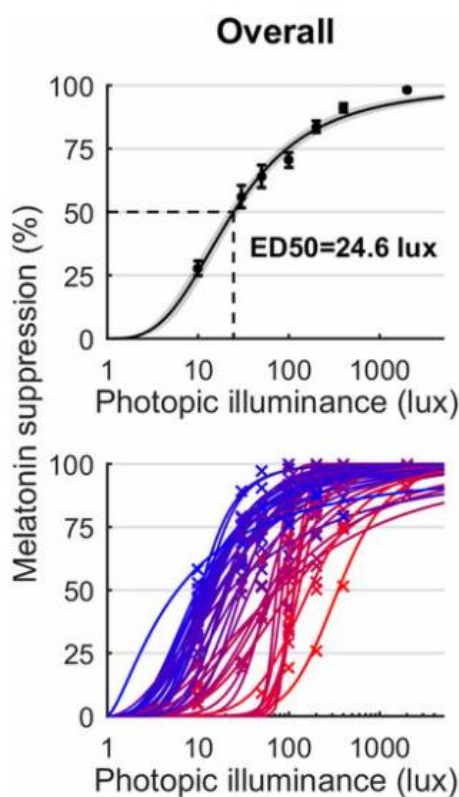
pokud jeho hladinu sledujeme pouze v několika časových bodech. V porovnání s dalšími cirkadiánními ukazateli, které lze u člověka sledovat jako je, kromě kortizolu, např. tělesná teplota, je melatonin nejspolehlivější ukazatel. Jeho hladina může být měřena ve slině, nebo v plazmě, popřípadě mohou být měřeny jeho metabolity v moči. Sledováním rytmické hladiny melatoninu můžeme postihnout dva fyziologické aspekty melatoninu; 1) melatonin je robustní indikátor fáze a periody cirkadiánního rytmu generovaného přímo SCN. Jeho laboratorním vyšetřováním tedy můžeme sledovat desynchronizaci cirkadiánního systému např. při změně světlených podmínek. Jakékoliv změny koncentrace melatoninu tedy fungují jako nepřímý ukazatel změny ve vnitřních biologických hodinách. 2) Melatonin má v organismu řadu funkcí: předává celému organismu informaci, že je noc, a je stabilizátorem biologických rytmů. Prostřednictvím receptorů MT1 tlumí aktivitu neuronů v SCN. Melatonin posiluje u člověka noční pokles centrální teploty, což je facilituje spánek. Pokles centrální teploty je patrně zprostředkován periferní vazodilatací, vyvolanou stimulací melatoninových receptorů v periferních cévách. Melatonin je antioxidant volných radikálů. Moduluje imunitní a metabolické odpovědi organismu a je pravděpodobně jednou ze spojek mezi neuroendokrinním a imunitním systémem. Jeho nízká noční hladina v důsledku deregulace cirkadiánních signálů z SCN, nebo přímým působením světla v noci je tedy varovným signálem zvýšeného rizika vzniku imunitních či metabolických nemocí. V současné době se ví, že silný cirkadiánní rytmus, tedy rytmus s vysokou amplitudou, a vysoká noční hladina melatoninu mají významnou ochranu proti nádorovým onemocněním. Délka noční sekrece melatoninu je navíc v klimatických oblastech mírného a arktického pásu také sezónním signálem, který indukuje fotoperiodické odezvy u sezónních živočichů jako je reprodukce, migrace, či zimní spánek [7, 9].



Obrázek 13 - Průběh melatoninu a kortizolu během denního cyklu [11]

2.4.8. Vliv modrého světla na melatonin

Světlo má kromě synchronizace cirkadiánních rytmů, které se projeví nejdříve v následujícím cirkadiánním cyklu, také okamžité účinky na organismus. Jedním z těchto vlivů je rychlé potlačení produkce melatoninu v průběhu noci, či zpomalení jeho večerního nárůstu. Obrázek č. 14 ukazuje potlačení melatoninu krátkým světelným pulsem v době, kdy je hladina melatoninu vysoká, v závislosti na intenzitě světla. Obrázek č. 14 také demonstruje velké individuální rozdíly v citlivosti k intenzitě světla v populaci člověka, která má rozsah od 6 luxů do 350 luxů.



Obrázek 14 – Křivka závislosti odezvy cirkadiánního systému na osvětlenosti [15]. Horní obrázek ukazuje průměrnou citlivost všech měřených subjektů, jednotlivé křivky na spodním obrázku značí výsledky jednotlivých subjektů.

Přímé světlo se projevuje na aktuálním stavu bdělosti, či ospalosti. Při jasném světle během noci začíná organismus reagovat zvýšenou bdělostí vlivem působení ipRGC na mozková centra regulující náladu a bdělost. V roce 2006 provedl Vandewalle test, při kterém byli jedinci vystaveni světelné intenzitě o hodnotě menší než 5 lx a po dobu celého dne jim nebyl umožněn spánek. Výsledky tohoto testu prokazují, že impulsy bílého světla znemožnily pokles aktivity, který by při nočních podmínkách nastal [16].

Studie od Phipps-Nelson z roku 2003 ukazuje, že při osvětlení jasným světlem (1000 lx) v porovnání se světlem tlumeným (5 lx) během dne zvyšuje výkonnost a snižuje potřebu spánku. Výsledky dané studie byly hodnoceny za pomoci psychomotorického testu udržované pozornosti u jedinců, kterým byla omezena doba spánku při předchozí noci [17]. Dle studie Figueiro z roku 2013 je vliv světla přes den pozitivní na výkonnost nadcházející noci při prodloužení bdění, ale přes den nedochází k velké změně kognitivních funkcí [18]. Opak tvrdí studie Smolders z roku 2012, kde bylo uvedeno, že i při běžném dnu, kdy nejsou nijak ovlivňovány světelné podmínky a délka spánku, může intenzivnější světlo (60 minut 1000 lx oproti 200 lx vertikální osvětlenosti v úrovni oka) zlepšit bdělost a výkonnost [19]. Všechna tato tvrzení potvrzují, že působení světla má významný vliv na povzbuzení mentálních funkcí a zlepšení nálady. S největší pravděpodobností se nejedná pouze o fyziologickou regulaci řízenou SCN, ale nejspíš o přímou aktivaci center regulující bdělost a náladu odbočkami stejné dráhy, která synchronizuje pacemaker v SCN.

Již bylo prokázáno, že světlo má blahodárný vliv i na dlouhodobé zlepšení nálady. Období zimních kratších dnů má oproti letním delším vliv na zvýšení depresivních stavů v celé společnosti. Mezi další příznaky dlouhodobého nedostatku světla patří špatná nálada, nezáměr o okolí, snížená koncentrace, nedostatek energie a celková únava.

Výsledky studie Cajochen z roku 2005 v laboratorních podmínkách potvrdily, že krátkodobé fyziologické reakce, jako je potlačení produkce melatoninu, závisí na vlnové délce světla [20]. Kladný vliv modrého světla byl potvrzen při studii Viola v roce 2008 prováděného v kancelářském prostředí. Jednotlivci byli vystaveni světlu s výraznou modrou složkou v pracovní době po čtyři týdny. Výsledek testu prokázal vyšší kognitivní výkony, lepší spánek, vyšší bdělost a subjektivní pohodu jednotlivců [21]. Není jasné, zdali jsou tyto jevy způsobeny cirkadiánní regulací, nebo se jedná o krátkodobé efekty, protože v dané studii nebyly sledovány cirkadiánní profily. V roce 2015 byla provedena studie autory Leichtfried a kol., ve které byli účastníci vystaveni pracovním světelným podmínkám (6500 K/5000 lx). Výsledek ukázal, že světlené podmínky měly pozitivní vliv na bdělost a náladu jednotlivců, ale negativní vliv na výkonnost – nejspíš došlo ke snížení vizuálního komfortu [22]. Všechny tyto výsledky ukazují, že světlo má v organismu mnoho funkcí. Pozitivní, pokud působí ve dne, kdy zvyšuje míru bdělosti a podporuje kognitivní funkce přímým působením na příslušná

centra v mozku. Pozitivní, pokud působí v době přirozeného soumraku a svítání, kdy synchronizuje cirkadiánní systém se solárním cyklem a informuje jej o měnícím se poměru během dne a noci během roku. Světlo má ale také negativní roli, pokud působí příliš pozdě zvečera, či v noci. Výrazně nižší osvětlenost v noci, než je účinná ve dne, také podporuje bdělost a tím oddaluje spánek, vytváří nepřírozně dlouhé fázově posuny cirkadiánních rytmů, které neodpovídají synchronizačnímu rozmezí, nebo rovnou narušují vzorec aktivity SCN a znemožňují tak funkci samotného hlavního cirkadiánního pacemakeru. Světlo v noci také snižuje hladinu melatoninu a tím např. ohrožuje noční regenerační procesy imunitního systému, či katabolické procesy metabolismu.

2.4.9. Spánek

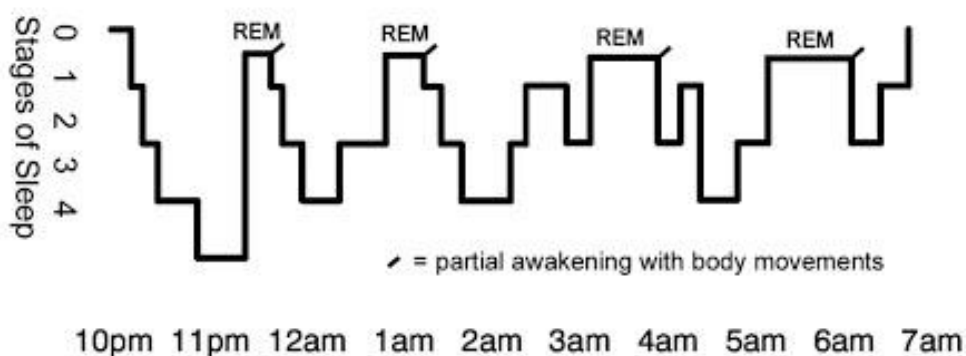
Spánek je neodlučitelná součást života člověka i velké většiny všech organismů určující celkovou kvalitu života. Jedná se o útlumově-relaxační fázi organismu, kdy dochází ke změně činnosti mozku doprovázenou útlumem vědomí a podstatně sníženou citlivostí na vnější podněty. Dochází také k uvolnění svalstva, ke snížení tělesné teploty, ke zpomalenému dýchání a ke snížení krevního tlaku. Spánek je stav snížené mentální a motorické aktivity. Spánková deprivace může vést k psychickým poruchám, kardiovaskulárním onemocněním, zvýšené hladině cukru v krvi, náchylnosti k obezitě, dvojnásobné pravděpodobnosti vzniku rakoviny a také k ospalosti mimo čas určený spánku. Délka spánku u člověka je individuální. U dospělých se uvádí, že optimální délka spánku je sedm až osm hodin. Někteří lidé mají potřebu spánku odlišnou zhruba od čtyř hodin až po dvanáct. Doba spánku se mění s věkem každého jedince. Průměrná doba spánku novorozence je 17 až 18 hodin a do čtyř let se zkracuje až na 10-12 hodin. Od čtyř se let se spánek jedince pozvolna zkracuje na 7-8,5 hodin. U novorozence se spánek rozděluje na 3–4hodinové etapy, ale se zvyšujícím věkem se snižuje počet spánkových fází až do věku, kdy spí jedinec pouze jednou za den, což souvisí se zráním cirkadiánního systému. V průběhu spánku se vyskytují časové úseky, kdy mozek intenzivně pracuje. Spánek probíhá ve dvou odlišných režimech – REM a NREM. Oba tyto režimy se pravidelně střídají.

REM (rapid eye movement – rychlé oční pohyby) je značen rychlými očními pohyby pod zavřenými víčky, živými sny a ztrátou svalového napětí všech ovládaných svalů. Mozková činnost při REM spánku je na úrovni bdělého stavu.

NREM (non-rapid eye movement) je fáze definovaná útlumem mozkové činnosti stejně jako svalovým uvolněním. NREM se dělí na čtyři stádia podle hloubky spánku.

Spánek u dospělého člověka začíná vstupem do prvního stádia NREM spánku a pokračuje až do čtvrtého stádia. Po proběhnutí těchto stádií dochází k tělesným pohybům a částečným probuzením. Zhruba po 70-80 minutách se spící vrací do druhého, nebo třetího stádia NREM spánku, a ihned poté následuje REM spánek, který trvá pouze 5-10 minut. Délka od prvního NREM spánku až po konec prvního REM spánku je 90-110 minut. Tento cyklus se v ideálním případě za jednu noc opakuje čtyřikrát až šestkrát. S každým dalším cyklem se zkracuje NREM spánek na úkor REM spánku, který se stále prodlužuje (obr.15).

Podobně jako délka spánku, i struktura spánku je u každého jedince odlišná a mění se i s věkem. U novorozenců tvoří fáze NREM jen asi 50 % doby celého spánku a liší se tak od spánku dospělého jedince. Fáze REM spánku se v poměru s celým cyklem zkracuje přibližně do věku 4 let, kdy tvoří přibližně 20-25 % celkového spánku, a tak zůstává po celé období, které nazýváme tzv. mladší dospělost. S rostoucím věkem klesá na 15-20 %. [5]



Obrázek 15 – Průběh REM a NREM spánku během noci [13]

3. PRAKTICKÁ ČÁST

Naším cílem bylo zjistit, jaký vliv má osvětlenost a spektrum světla zvečera na vzestup a hladinu nočního hormonu melatoninu. Celkové měření se skládalo ze tří částí (týdnů). V každém týdnu jsem já a má přítelkyně setrvali v době mezi 18 hodinou a 22 hodinou v prostředí osvětleném různými světelnými zdroji. Experimentálním prostředím byl byt o velikosti 35 m². Na konci každé ze tří částí jsme měli měřicí den, kdy bylo nutné odebrat po celý den vzorky slin, ze kterých byly následně v laboratorních podmínkách určeny hladiny melatoninu.

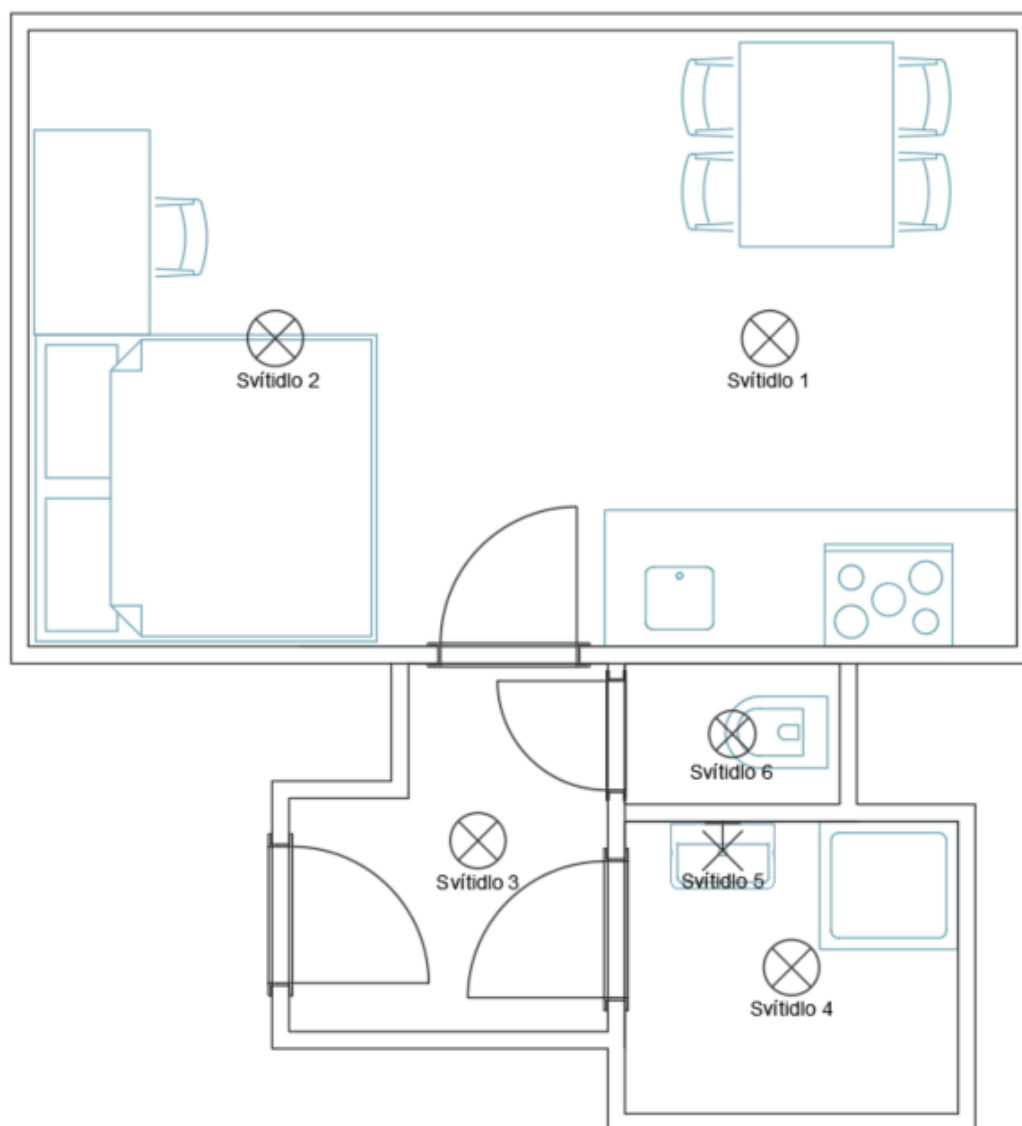
Pro znázornění rozdílů v potlačování melatoninu jsem se rozhodl namodelovat tři různá světelná prostředí. Měření probíhalo pouze ve večerních hodinách v průběhu listopadu a prosince, aby se usnadnilo odstínění slunečního světla ve večerních hodinách a přirozeně se rozšířil noční profil hladiny melatoninu. Při prvním světelném prostředí byly v bytě rozsvíceny všechny zdroje osvětlení, ať se jednalo o přisazená svítidla a nástěnná svítidla s pevnou montáží, tak i LED displeje jako jsou mobily a počítače. Ve druhém světelném prostředí byla svítidla na stropě vypnutá a používali jsme pouze LED displeje. Ve třetím světelném prostředí jsme nepoužívali žádné světelné zdroje, které obsahují modrou spektrální složku, takže jsme svítili pouze svíčkami.

3.1. Měření světelných podmínek

Měření světelných podmínek jsem rozdělil na dvě části. První část se zaměřuje na měření spekter jednotlivých světelných zdrojů umístěných v místnosti. Druhá část měření se zabývá měřením osvětlenosti a spekter uměle nasimulovaných pohledů, které simulují nejčastější pohybování v bytě. Zaměřili jsme se především na místa, kde se tráví nejvíce času, takže se jedná nejčastěji o sedací místa. Pro měření světelných spekter, a i osvětlenosti jsme používali kalibrovaný spektrometr Uprtek MK350S Premium. Výsledná data jsme získali v obrázkovém souboru jpg., tak i v excelovském souboru xls., určenému pro další práci s daty.

3.1.1. Měření spekter světelných zdrojů

Pro znázornění rozmístění světelných zdrojů jsem vypracoval půdorysný náčrtek (obr. 16). Přisazená a nástěnná svítidla se skládají, až na jednu kompaktní zářivku, z LED zdrojů. Některá svítidla jsou osazena pevnými LED moduly, a některá mají patici na žárovku E27, která umožňuje dosazení libovolné žárovky. Pro zajímavost práce jsem se rozhodl na chodbu umístit již zastaralou kompaktní žárovku, která v sobě také obsahuje elektronický předřadník. Přesný soupis světelných zdrojů je v tabulce č.4. U všech pevných svítidel jsem změřil jejich spektra, která odpovídají jejich teplotám chromatičnosti. Měření probíhalo tak, že jsem vždy přiložil spektrometr co nejbližší k danému měřenému světelnému zdroji a všechny ostatní světelné zdroje jsem vypnul, a až poté jsem začal s měřením.



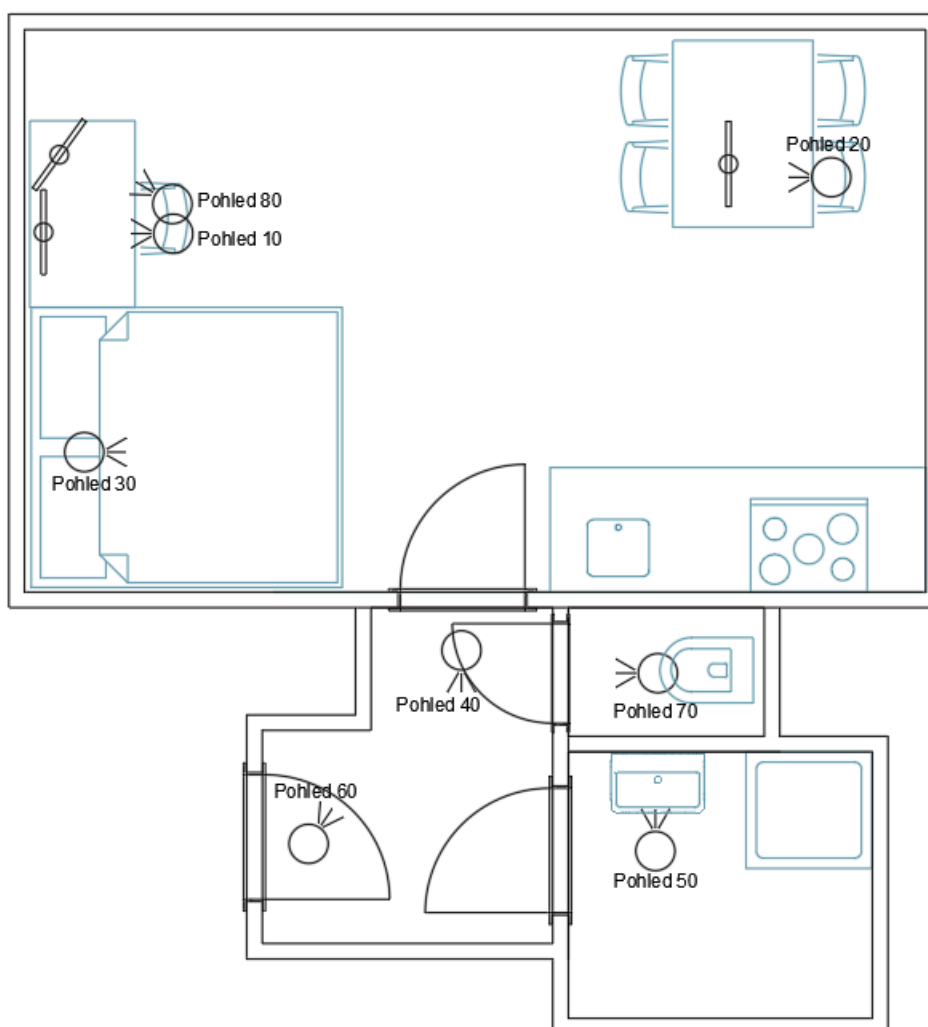
Obrázek 16 - Půdorysné zobrazení svítidel

3.1.2. Měření spekter a osvětlenosti pohledů

Druhá část měření se zabývá měřením jednotlivých pohledů, které simulují reálný život v našem bytě. Veškeré pohledy jsem zakreslil také do půdorysného zobrazení bytu (obrázek č.17). Spektrometr byl vždy umístěn v přesné úrovni očí, aby byl nasimulován reálný dopad světla na sítnici. Kromě měření samotných spekter, která se již skládají z více světelných zdrojů, jsem měřil také osvětlenosti pohledů, se kterými je dále pracováno v programu Toolbox α -opic pro vyhodnocení vnímání světla jednotlivými fotoreceptory. Světelná prostředí se rozdělují na tři různá prostředí (etapy), které jsou popsány v tabulce č.2. Pro orientaci jsem zvolil značení Pohled (XY), kde X značí číslo pohledu (dohromady máme osm 8 pohledů) a Y značí číslo etapy.

Označení	Světelné prostředí	Popis
X0	0	Osvětlení všemi světelnými zdroji – pevná svítidla + displeje
X1	1	Osvětlení pouze přenosnými světelnými zdroji – displeje
X2	2	Osvětlení pouze svíčkami

Tabulka 2 – Tabulka měřených etap



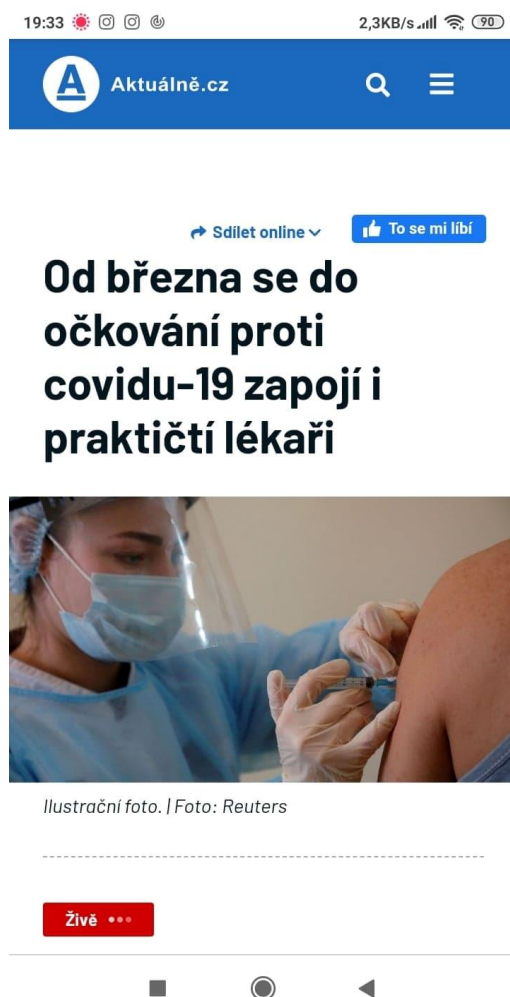
Obrázek 17 - Půdorysné zobrazení pohledů

Měření všech pohledů probíhalo pouze v první etapě, kde byly rozsvícené všechny světelné zdroje.

Při druhém měření byly měřeny pouze pohledy 11, 81, 21 a 31, jelikož v ostatních místnostech byla úplná tma, tj. hladina světla pod úrovní citlivosti měřicího přístroje. Pohled 11 a 81 značí měření spekter pohledu do monitoru a notebooku. Pohled 21 značí pohled do notebooku a pohled 31 značí pohled vleže do displeje mobilu. Na všech monitorech jsem nastavil stejné pozadí (stejně jako na mobilu), a to bílé pro velký obsah modré spektrální složky a jas byl nastaven vždy na polovinu. Měření pohledu mobilu se dělí na dvě části (31_1 a 31_2). Pro zvýšení objektivnosti jsem změřil displeje mobilů Xiaomi a poté iPhone. U obou displejů jsem nastavil stejné pozadí (obrázek č.18). Pro zajímavost při porovnání byl u IPhonu zapnut režim pro potlačení modrého světla a u druhého mobilu nikoli. Vizuální výsledek rozdílu je zobrazen na

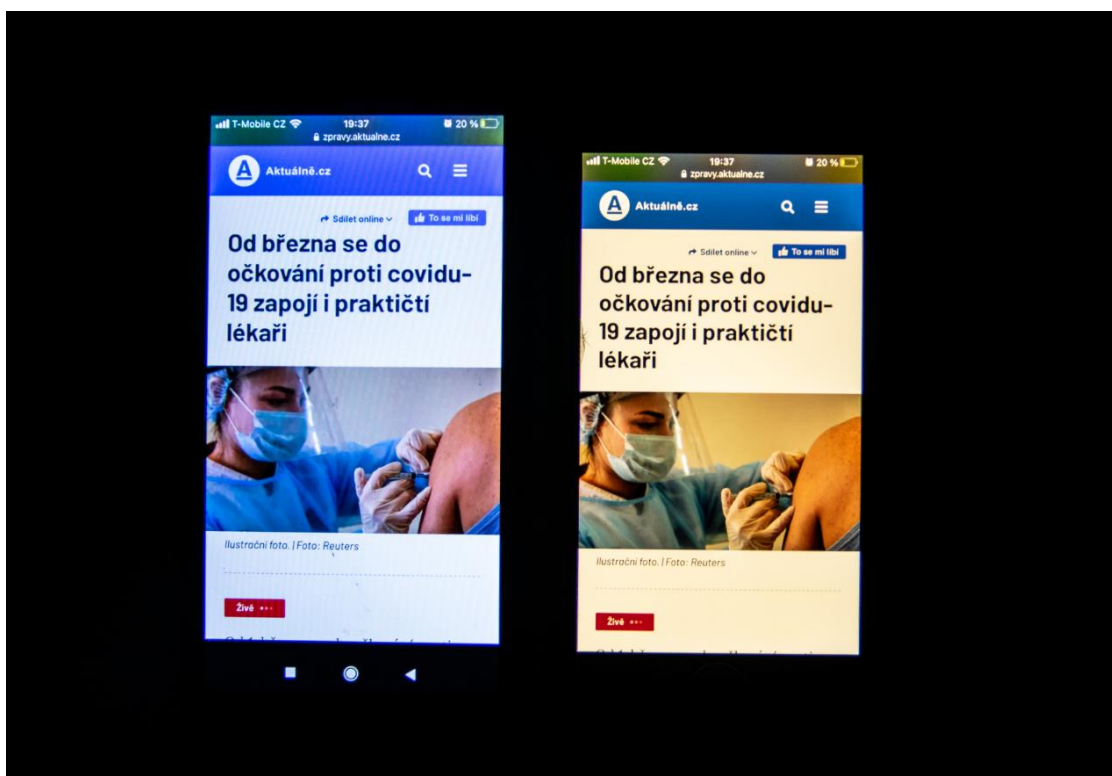
obrázku č.19, kde na pravé straně je mobil značky Xiaomi, u kterého nebyl zapnut žádný filtr. Na pravé straně je mobil značky iPhone, u kterého byl zapnut filtr proti potlačení spektrální modré složky.

Ve třetím světelném prostředí, kdy bylo svíceno pouze svíčkami, byl měřen pouze jeden pohled, a tím je pohled 22. Ve třetím světelném prostředí bylo zapáleno dohromady šest svíček, které byly umístěny hned u sebe.



Obrázek 18 – Screenshot displeje mobilu, při kterém probíhalo měření

Ve druhém a třetím světelném prostředí bylo velice nutné zatemnit všechny nepředvídatelné zdroje, kterými mohly být např. světla v lednici, různé budíky a kontrolky, či světlo z ulice (umělé osvětlení).



Obrázek 19 – Zobrazení rozdílu s potlačením spektrální složky a bez potlačení

3.2. Harmonogram testování

Celkové měření bylo rozděleno do tří částí (týdnů), které následovaly souvisle po sobě. Ze sedmi dnů jsme vždy pět dnů striktně dodržovali světelné podmínky, a to od 18:00 až do 22:00, kdy jsme chodili spát a veškeré osvětlení jsme vypnuli. Poslední pátý den byl odběrový. Odběry probíhaly až do šestého dne do času 12:00, kdy celá část měření byla ukončena. Mezi šestým a sedmým dnem jsme dospávali spánkový deficit z odběrové noci. V průběhu celého týdne jsme vstávali pravidelně v 7:30, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Spánek pravidelně začínal několik minut po 22:00.

Neděle	29.11.2020	Světelné podmínky 1.etapy
Pondělí	30.11.2020	
Úterý	01.12.2020	
Středa	02.12.2020	
Čtvrtek	03.12.2020	
Pátek	04.12.2020	1.Odběrový den
Sobota	05.12.2020	
Neděle	06.12.2020	Světelné podmínky 2.etapy
Pondělí	07.12.2020	
Úterý	08.12.2020	
Středa	09.12.2020	
Čtvrtek	10.12.2020	
Pátek	11.12.2020	2.Odběrový den
Sobota	12.12.2020	
Neděle	13.12.2020	Světelné podmínky 3.etapy
Pondělí	14.12.2020	
Úterý	15.12.2020	
Středa	16.12.2020	
Čtvrtek	17.12.2020	
Pátek	18.12.2020	3.Odběrový den

Tabulka 3 - Harmonogram měření

3.3. Odběr vzorků

V den odběru, který začal pátý den a pokračoval ještě v průběhu šestého dne, jsme pravidelně odebíraly vzorky slin (minimálně 2 ml) do zkumavek. Odebrané vzorky bylo poté nutno uchovávat ve chladném a tmavém prostředí, takže jsme je vždy po odběru umístili do mrazáku. Každý odběrový den jsme dohromady odebrali 15 vzorků pro každou osobu, a to v následující časy: 12:00, 15:00, 17:00, 19:00, 21:00, 22:00, 23:00, 00:00, 02:00, 04:00, 06:00, 07:00, 08:00, 10:00, 12:00. Pro odběry ve spánkových hodinách bylo nutné nařídit si budík, odebrat vzorek a poté jít zase spát. Výběr časů odběrů byl zvolen tak aby byl co nejlépe zachycen večerní vzestup a ranní pokles hladiny melatoninu. Dohromady jsme získali šest celodenních profilů, tj. 90 vzorků, které se při zpracování mohly vejít do dvou melatoninových kitů. Dva dny před odběrovým dnem nebylo možné pít alkohol, a celkově během celého pokusu bylo doporučeno jeho omezení, z důvodu jeho působení na cirkadiální hodiny. V den odběru bylo zakázáno konzumovat kávu, černý čaj, banány, rajčata a čokoládu, jelikož dané potra-

viny interferují s melatoninovou esejí. Stejný zákaz platil o čištění zubů zubní pastou. Na odběr slin ve večerních hodinách bylo možné svítit slabým světlem dlouhých vlnových délek. V našem případě jsme používali svíčku.

3.4. Získání hodnoty melatoninu v laboratoři

3.4.1. Postup určení koncentrace melatoninu

Hladiny melatoninu u všech vzorků byly určeny v laboratorních podmínkách s pomocí zástupce školitele, Mgr. Kateřiny Skálové. Veškeré hladiny byly stanoveny pomocí metody RIA, kdy byl použit kit „Melatonin direct/Serum/Plasma/Saliva RIA“ od firmy IBL International. Jednotlivé vzorky s vyhovujícím množstvím slin a standardy potřebné k vytvoření kalibrační křivky jsme zpracovali ve dvou paralelních vzorcích, tzv. doubletech.

V prvním kroku jsme připravili jednotlivé zkumavky na vzorky slin a standardy A-G. Všechny zkumavky jsme očíslovali dle času odběru a účastníka a zbytek jsme popsali příslušnými zkratkami. Zkumavka označení písmenem T značila maximální množství radioaktivity a zkumavka označená NSB značila nespecifickou vazbu. Mezi tím jsme vyndali a roztřídili vzorky slin, které byly umístěny v mrazáku, a nechali jsme je rozmrazit v pokojové teplotě. Po rozmražení byly vzorky slin umístěny do centrifugy a centrifugovány při pokojové teplotě (2500 x g/10 min), aby byla oddělena sraženina od tekuté fáze.

Poté jsme přidali 20 µl standartu A, jehož koncentrace radioaktivně značeného melatoninu bylo 0 pg/l, do zkumavek s označením B0, NSB, a také do zkumavek pro vzorky slin. Poté jsme do příslušných zkumavek přidali 20 µl od každého standardu (B-G). Koncentrace radioaktivně značeného melatoninu byla v těchto standardech následující: standard B 1 pg/ml, standard C 3 pg/ml, standard D 10 pg/ml, standard E 75 pg/ml, standard F 100 pg/ml a standard G 300 pg/ml.

Do očíslovaných zkumavek jsme přidali vždy po 500 µl daného množství slin. Do ostatních zkumavek, kromě zkumavky označené jako T jsme z důvodu zachování objemu přidali 500 µl deionizované vody, která je zbavená všech iontově rozpustných látek a křemíku. Poté jsme do každé zkumavky přidali (kromě T) 100 µl pufru a všechny promíchali pomocí vortexu. Dále jsme přidali 50 µl ¹²⁵I melatoninu do všech zkumavek a 50 µl melatoninové protilátky do všech zkumavek kromě zkumavky NSB

a T. Všechny zkumavky jsme promíchaly pomocí vortexu a poté jsme je centrifugovali po dobu jedné minuty při přetížení 500 x g. Výsledné vzorky byly zabaleny do alobalu a následně jsme je nechali inkubovat v digestoři po 16-20 hodin.

Následující den po uplynutí této doby jsme vyndali vzorky z digestoře a do každé zkumavky (kromě T) jsme přidali 500 μ l srážející se protilátky a opět jsme všechny zkumavky promíchali za pomoci vortexu. Poté jsme nechali vzorky inkubovat po dobu patnácti minut při pokojové teplotě a následně jsme je stáčeli v předem předchlazené centrifuze (teplota nesměla být nižší než 25 °C) po dobu 15 minut při přetížení 3000 x g. Na dně zkumavky se vytvořil pelet a supernatant v tekuté fázi, který jsme vylili a zkumavky vysušili. Následně jsme pelety rozpustili ve 150 μ l 0,85 % NaOH. Vzorky jsme následně přenesli do scintilačních lahvíček a přidali k nim 7 ml scintilačního roztoku. Již hotové vzorky byly umístěny do gama scintilačního spektrometru a poté byly vyhodnoceny.

3.4.2. Analýza vzorků

Gama scintilační spektrometr vyhodnotil ve vzorcích přesné hodnoty radioaktivního záření v jednotkách cpm (counts per minute). V programu GraphPad Prism 6 jsme vypočetli logaritmovanou koncentraci kalibračních vzorků standardů, ke kterým jsme následně přiřadili jejich naměřené hodnoty v cpm. K příslušným vzorkům jsme přidali naměřené hodnoty cpm.

Za použití nonlineární regrese jsme stanovili interpolované logaritmované hodnoty koncentrací všech vzorků. Odlogaritmováním vypočtených hodnot jsme získali koncentraci melatoninu (pg/ml), který nám zobrazil profil melatoninu v průběhu odběrů.

3.5. Osvětlenosti jednotlivých fotoreceptorů α -opic

Pro vyhodnocení a porovnání výsledků naměřených spekter je nutné získat podrobné informace o tom, jaké je rozdělení vnímání spekter jednotlivými čípkami (S,M,L) a fotopigmentem melanopsinem. Všechny tyto informace jsme získali za pomoci programu Toolbox α -opic, od CIE. Do vstupních hodnot tohoto programu jsme zadali změřené spektrum s rozlišením 1 nm ze souboru xls., který nám spektrometr vyexportoval. Výstupní hodnoty ze spektrometru se uvádí v radiometrických jednotkách a program Toolbox α -opic umožňuje radiometrické jednotky převést na fotometrické, pro-

tože tyto jednotky vyjadřují nejlépe vnímání světla lidským okem. Výstupem z Toolboxu α -opic je poté efektivní ozáření pro níže uvedené fotoreceptory. Efektivní ozáření se uvádí v jednotkách $W.m^{-2}$ a jedná se již o fotometrickou jednotku. Dále je také možné získat hodnoty ekvivalentu denního osvětlení (D65 standard), pro všechny čípky a fotopigment melanopsin. Hodnoty ekvivalentu jsou získány jako podíl ozářenosti sítnice při měřeném spektru a ozářenosti standardem D65 při stejné osvětlenosti jako je měřené spektrum. Výpočet se prováděl pro každý fotoreceptor zvlášť. Spektrum D65 je standardizované světelné spektrum o teplotě chromatičnosti 6504 K, které odpovídá dennímu světlu ve střední a západní Evropě v pravé poledne. Jedná se o zkušební a referenční spektrum. Výsledné hodnoty pro standard D65 se dělí na pět kategorií (A-E). Třídění do daných kategorií probíhá podle toho, jak lze rozeznat barvu vzorku v případě nasvícení spektrem D65 a poté zkoumaným světelným zdrojem. Jednotlivé výstupy standardu D65 značí, jak by působil zdroj D65 na všechny fotoreceptory v případě, že by nahradil původní měřené světelné zdroje. Jednotlivé výstupy jsou uvedeny v luxech. Na obrázku č. 20 je vidět jaká přesná data je nutné zadat, abychom dostali přesné výstupy, které jsou zobrazené na obrázku č. 21.

CIE S 026 α -opic Toolbox - v1.049a - 2020/11

Inputs sheet

Inputs = blue

Pohled 23

1. Select source of spectral data

Spectrum

2. Select measurement details

Spectral quantity, Q

Main SI prefix

Area prefix

3. Skip this step

Clear this input

4. Select wavelength step

Step size, nm

5. Enter spectral irradiance data

nm	mW.m-2.nm-1
380	0
381	0
382	0
383	0
384	0
385	0
386	0
387	0
388	0
389	0
390	0
391	0
392	0
393	0
394	0
395	0
396	0
397	0
398	0
399	0,000003

Instructions

CELL B5: Enter measurement name.

CELL C8: Enter "User" to enter spectrum OR select the built-in spectrum matching the conditions of your measurement value.

CELLS C11-C13: Enter the type of quantity and unit prefixes for your data.

If you selected "User" in CELL C8:

Clear CELL C17.

CELL C20: Enter wavelength step for your data (≤ 5 nm).

CELLS C24:C424: Enter spectral data to match the units and wavelength step.

If you did not select "User" in CELL C8:

CELL C17: Enter the measurement value to match the units.

Clear CELLS C24:C424.

Error messages

No errors detected.

Selected spectral quantity is permitted.

Selected prefixes are permitted.

Results based on spectral data provided.

Details of built in spectra (CIE 015:2018)

A: Range 380 nm to 780 nm, step 1 nm

D65: Range 380 nm to 780 nm, step 1 nm

E: Range 380 nm to 780 nm, step 1 nm

FL11: Range 380 nm to 780 nm, step 1 nm

LED-B3: Range 380 nm to 780 nm, step 1 nm

Obrázek 20 – Ukázka vstupních parametrů Toolboxu α -opic

(unweighted) irradiance = $\int \text{spectral irradiance} * d\lambda$
 (photopic) illuminance = $K_m * \int \text{spectral irradiance} * V(\lambda) * d\lambda$ where $K_m \approx 683 \text{ lm.W}^{-1}$
 (unweighted) photon irradiance = $\int \text{spectral photon irradiance} * d\lambda$

irradiance, W.m-2	illuminance, lx				log photon irradiance/(s-1.m-2)
0,07	6,16				17,403
α-opic irradiance, W.m-2					α-opic irradiance
$\alpha\text{-opic irradiance} = \int \text{spectral irradiance} * \alpha\text{-opic action spectrum} * d\lambda$					
<i>S-cone-opic</i>	<i>M-cone-opic</i>	<i>L-cone-opic</i>	<i>Rhodopic</i>	<i>Melanopic</i>	
0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	
α-opic efficacy of luminous radiation, mW.lm-1					α-opic ELR
$\alpha\text{-opic ELR} = \alpha\text{-opic irradiance} / \text{illuminance}$					
<i>S-cone-opic</i>	<i>M-cone-opic</i>	<i>L-cone-opic</i>	<i>Rhodopic</i>	<i>Melanopic</i>	
0,0652	0,9663	1,7109	0,4909	0,3276	
α-opic equivalent daylight (D65) illuminance, lx					α-opic EDI
$\alpha\text{-opic EDI} = \alpha\text{-opic irradiance} / \alpha\text{-opic ELR for daylight (D65)}$					
<i>S-cone-opic</i>	<i>M-cone-opic</i>	<i>L-cone-opic</i>	<i>Rhodopic</i>	<i>Melanopic</i>	
0,49	4,09	6,47	2,09	1,52	
log α-opic photon irradiance, log Q/(s-1.m-2), where					α-opic photon irradiance
$\alpha\text{-opic photon irradiance} = \int \text{spectral photon irradiance} * \text{photon system } \alpha\text{-opic action spectrum} * d\lambda$					
<i>S-cone-opic</i>	<i>M-cone-opic</i>	<i>L-cone-opic</i>	<i>Rhodopic</i>	<i>Melanopic</i>	
14,957	16,210	16,478	15,887	15,696	
α-opic photon irradiance in standard notation					photon irradiance, s-1.m-2
e.g. $4,970E+15 = 10^{15},696$, with rounding to 3 decimal places					2,527E+17
α-opic photon irradiance, s-1.m-2					
9,054E+14	1,621E+16	3,009E+16	7,701E+15	4,970E+15	

Obrázek 21 – Ukázka výstupních dat Toolboxu α -opic

4. VYHODNOCENÍ

4.1. Naměřená světelná spektra

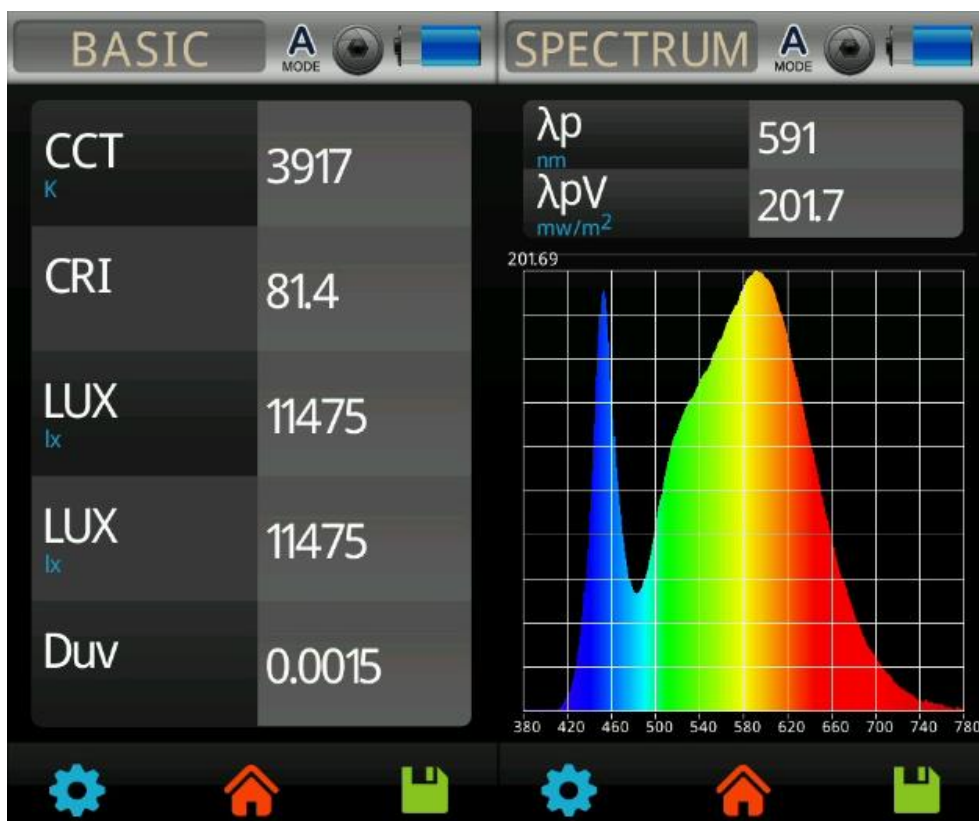
Měření spekter je rozděleno na dvě části. První část (4.1.1) se zabývá měřením spektrálních charakteristik jednotlivých světelných zdrojů. Druhá část (4.1.2) se zabývá měřením pohledů, které simulují přesnou osvětlenost na sítnici.

4.1.1. Naměřená světelná spektra svítidel

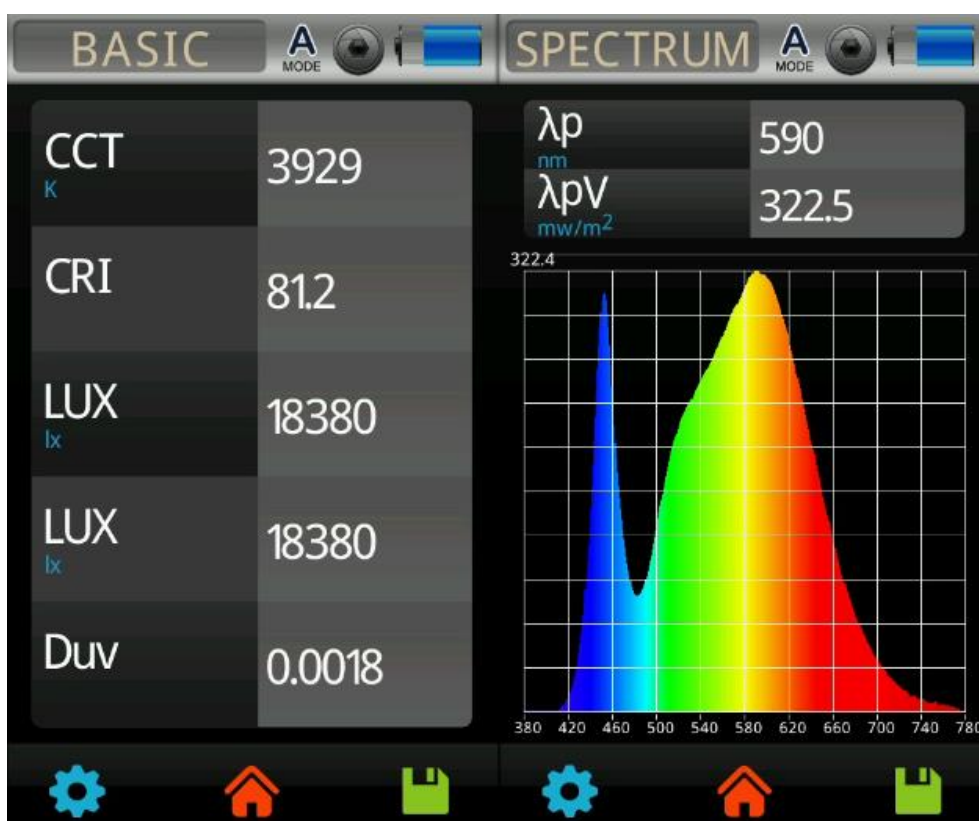
Pro přesnou orientaci v místnosti jsem vytvořil tabulku č.4, kde jsou vypsána jednotlivá označení všech svítidel, která jsou poté zakreslena v půdorysném zobrazení svítidel na obrázku č.14. V tabulce jsou u každého svítidla vypsány jeho hlavní parametry, kterými jsou: výkon, světelný tok a teplota chromatičnosti.

Označení	Místnost	Technologie	Výkon [W]	Světelný tok [lm]	Teplota chromatičnosti [K]
1	Obývací pokoj	LED Svídlo	18W	1500lm	4000
2	Obývací pokoj	LED Svídlo	18W	1500lm	4000
3	Chodba	Kompaktní žárovka	20W	1200lm	4000
4	Koupelna	LED žárovka	7W	520lm	2700
5	Koupelna	LED Svídlo	24W	1800lm	4000
6	WC	LED Svídlo	10W	780lm	3000

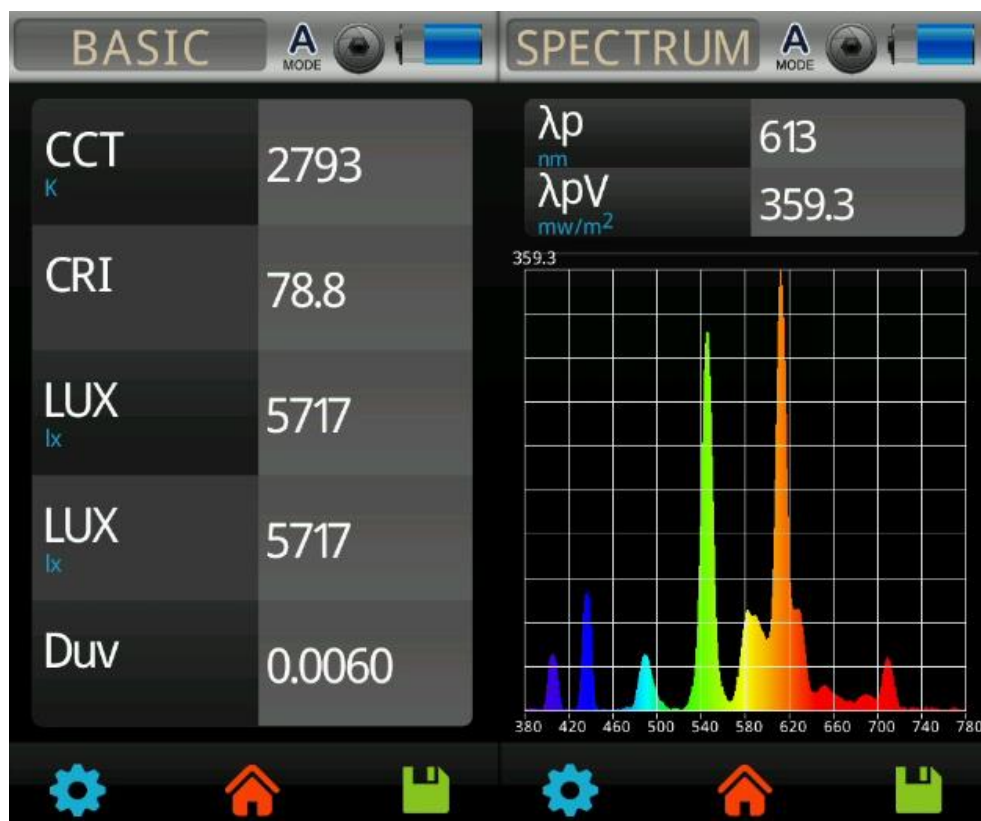
Tabulka 4 – Parametry pevných svítidel umístěných v bytě



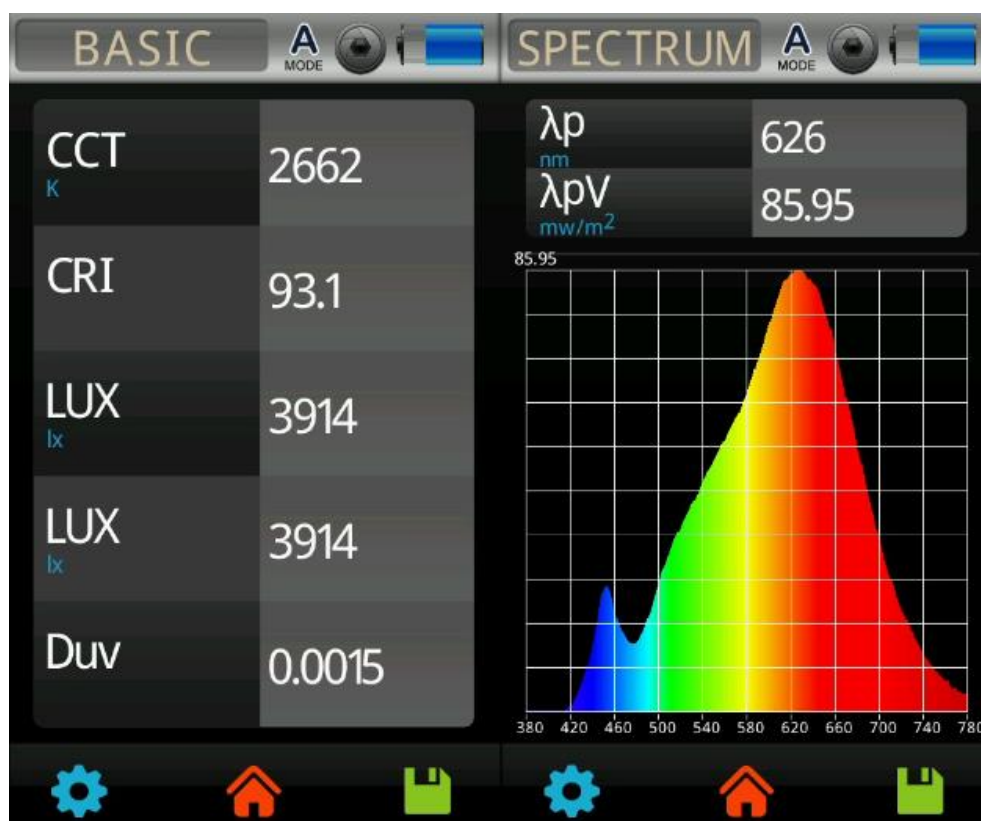
Obrázek 22 – Spektrální charakteristika svítidla č.1



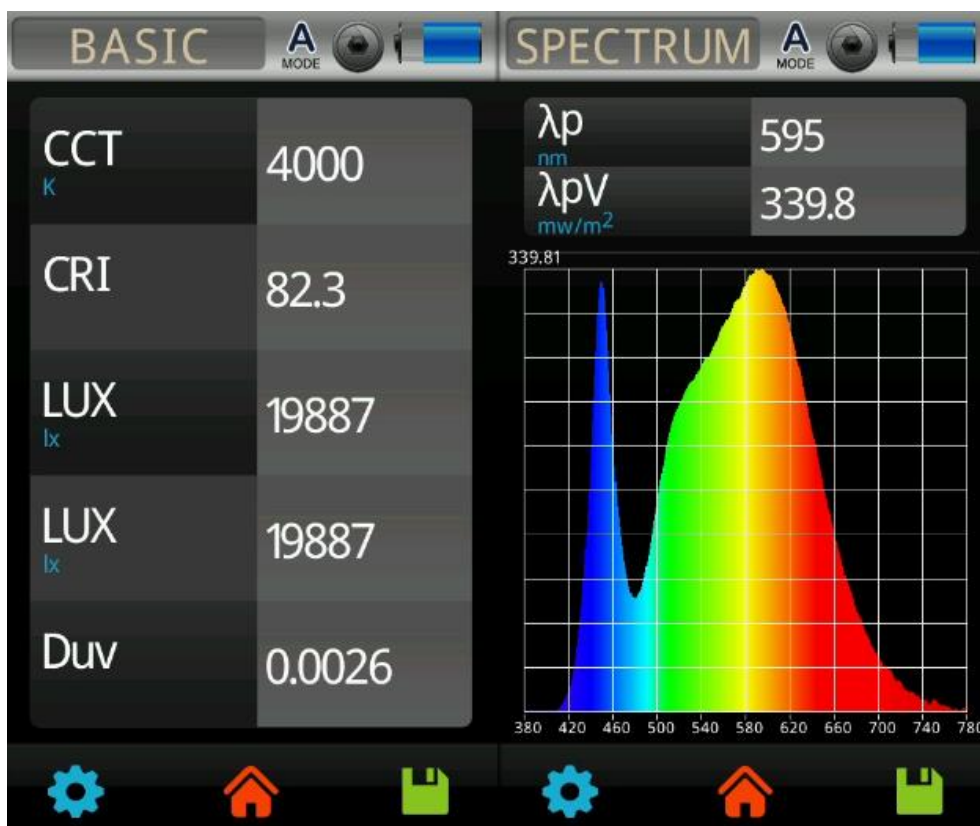
Obrázek 23 – Spektrální charakteristika svítidla č.2



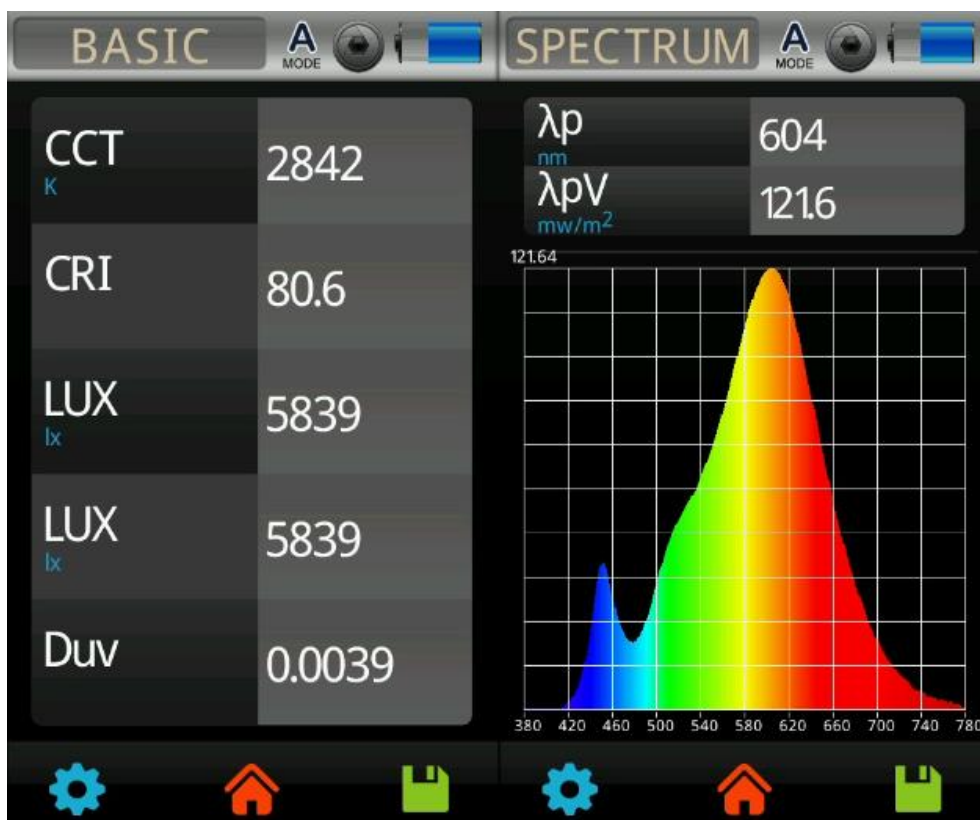
Obrázek 24 – Spektrální charakteristika svítidla č.3



Obrázek 25 – Spektrální charakteristika svítidla č.4



Obrázek 26 – Spektrální charakteristika svítidla č.5



Obrázek 27 – Spektrální charakteristika svítidla č.6

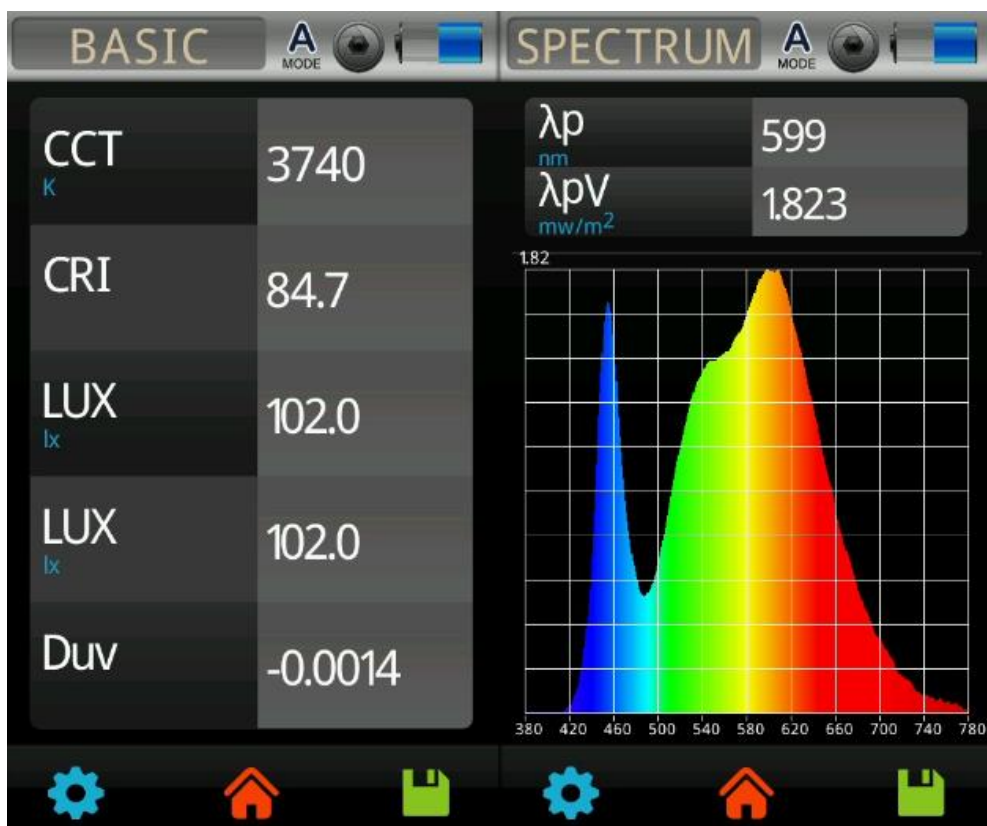
Z naměřených spekter je možné rozlišit, jaký světelný zdroj byl měřen. V případě že se jedná o LED o vyšší teplotě chromatičnosti (cca 4000 K), je obsah krátkých vlnových délek mnohem větší, než u LED o nižší teplotě chromatičnosti (3000 K, nebo 2700 K) – zde je vidět výrazné potlačení modré spektrální složky. Výjimkou je svítidlo č. 3, kde se jedná o kompaktní zářivku, takže spektrum není tak spojitě, což se projeví nižším indexem podání barev CRI. U svítidel 3,4 a 6 lze vidět nepřesnost mezi naměřenou teplotou chromatičnosti a teplotou chromatičnosti udávanou výrobcem, jak je demonstrováno v tabulce č. 4. Tento nesoulad bych přisoudil nepřesnostem ve výrobě.

4.1.2. Naměřená světelná spektra pohledů

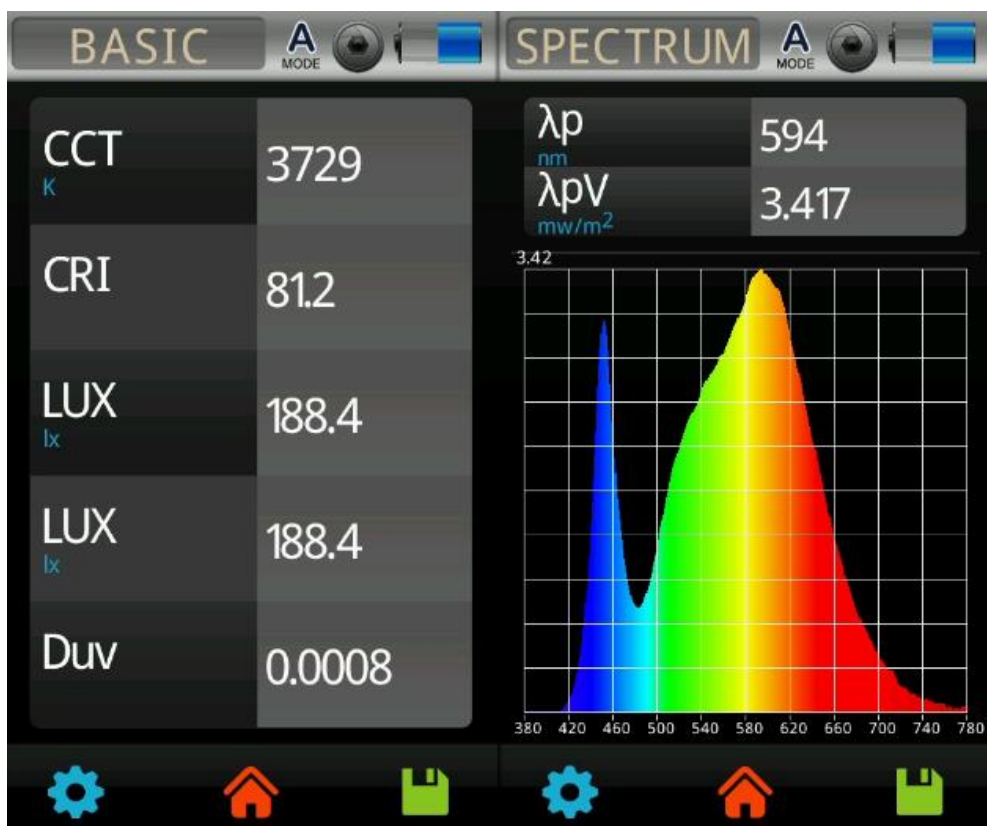
Pro přehlednost jsou v tabulce č. 5 označeny a popsány všechny pohledy, které byly měřeny. V kapitole jsou shrnuty všechny naměřené pohledy ve všech třech etapách. Obrázky spektrálních charakteristik jsou ve stejném pořadí dle tabulky č. 5.

Pohled	Popis
10	Pohled do levého monitoru
20	Pohled do notebooku
30	Pohled do mobilu vleže
40	Pohled z chodby do pokoje
50	Pohled do zrcadla koupelna
60	Pohled do chodby ze vstupních dveří
70	Pohled na toaletě při sezení
80	Pohled do pravého monitoru
11	Pohled do levého monitoru
81	Pohled do pravého monitoru
21	Pohled do notebooku
31_1	Mobil Xiaomi
31_2	Mobil Iphone
32	Svíčka

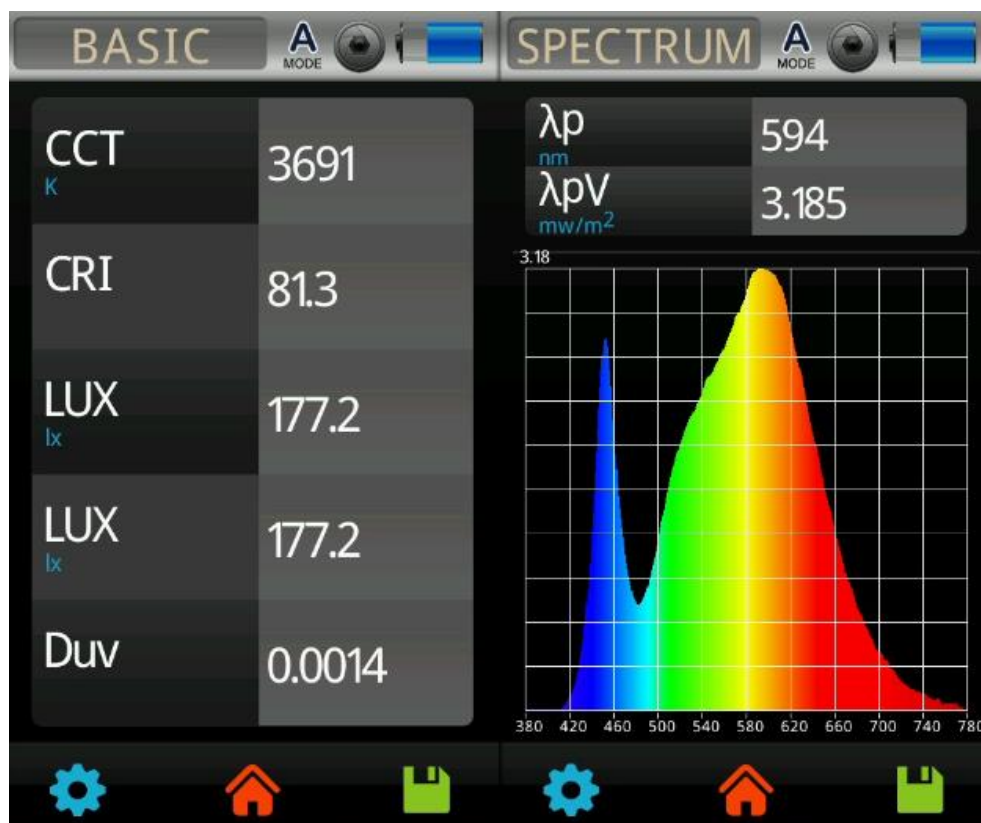
Tabulka 5 – Popis měřených pohledů



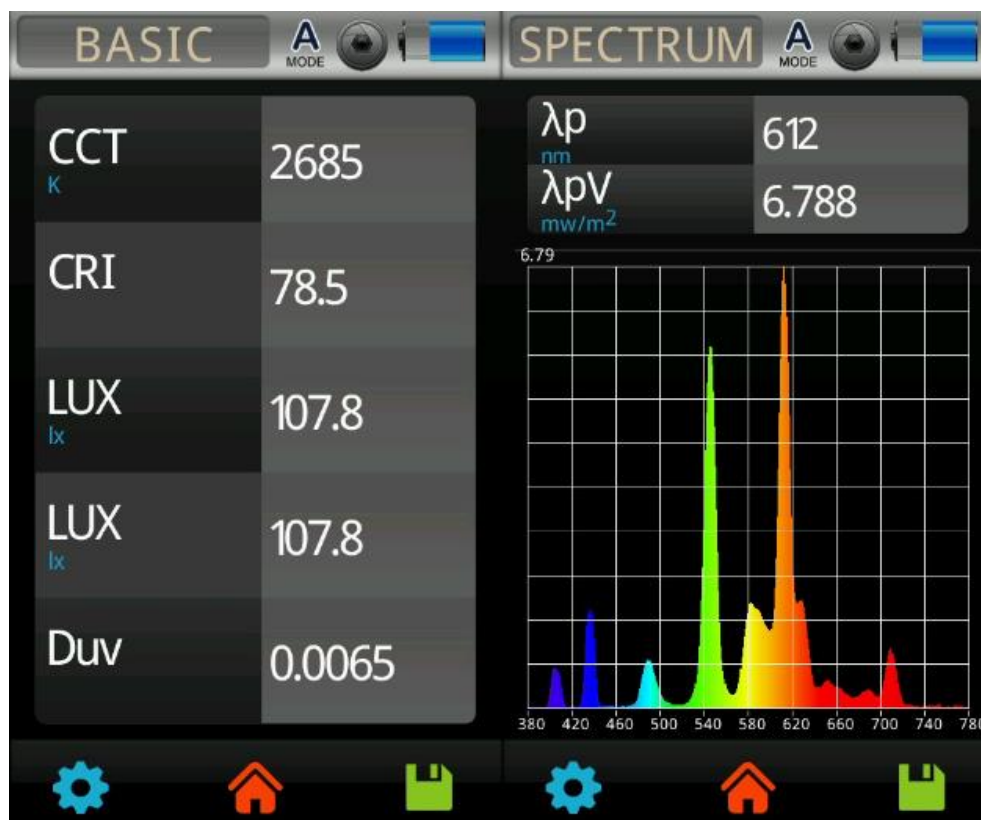
Obrázek 28 – Spektrální charakteristika pohledu 10



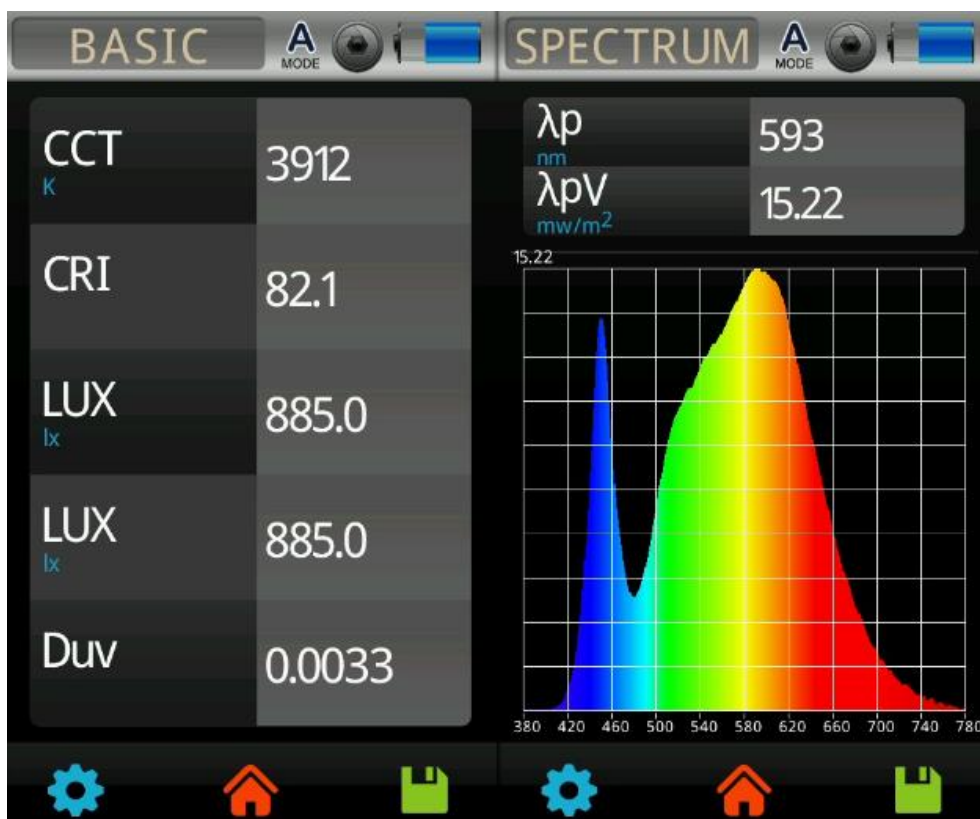
Obrázek 29 – Spektrální charakteristika pohledu 20



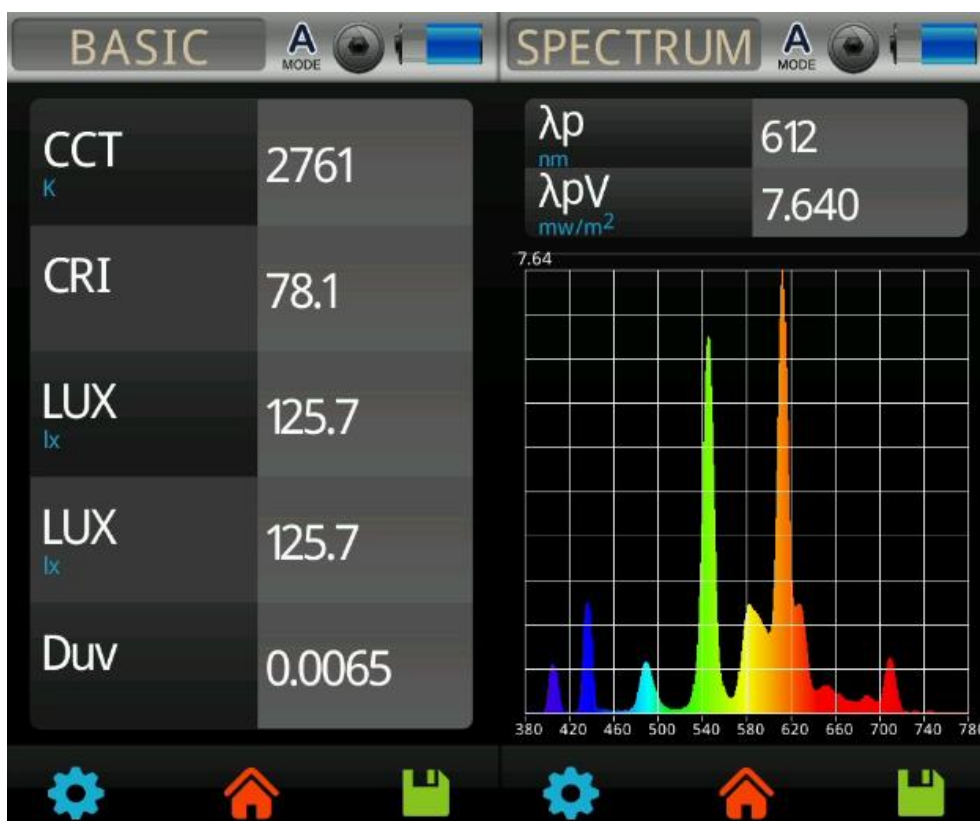
Obrázek 30 – Spektrální charakteristika pohledu 30



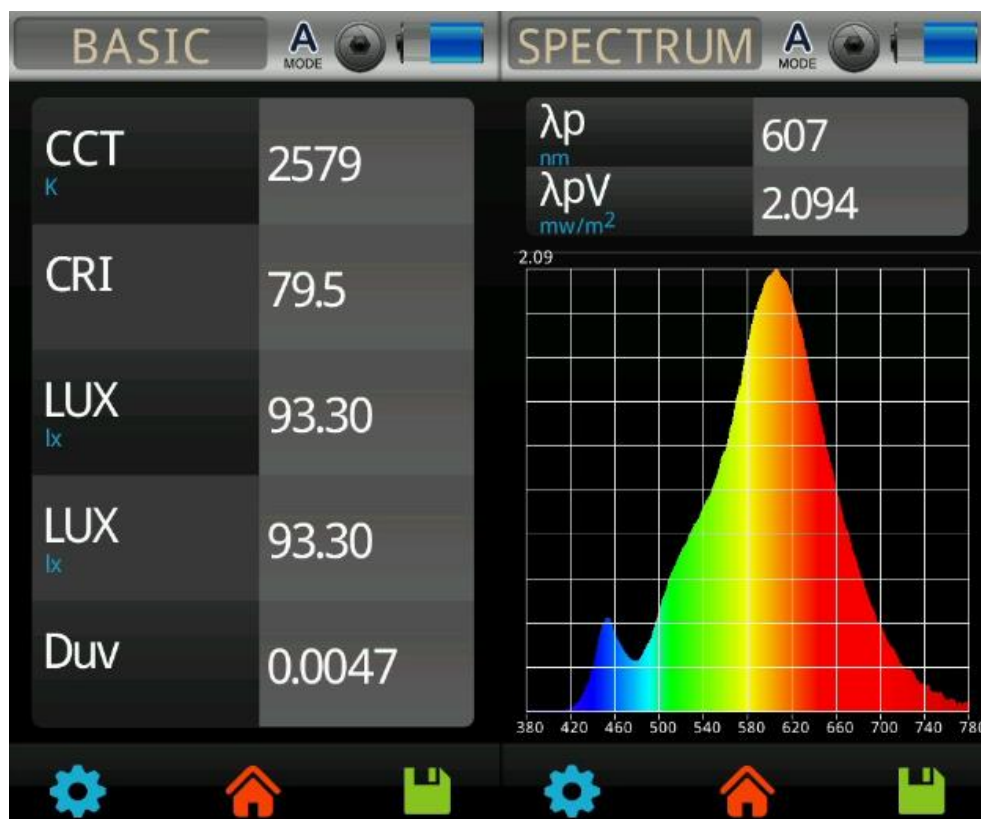
Obrázek 31 – Spektrální charakteristika pohledu 40



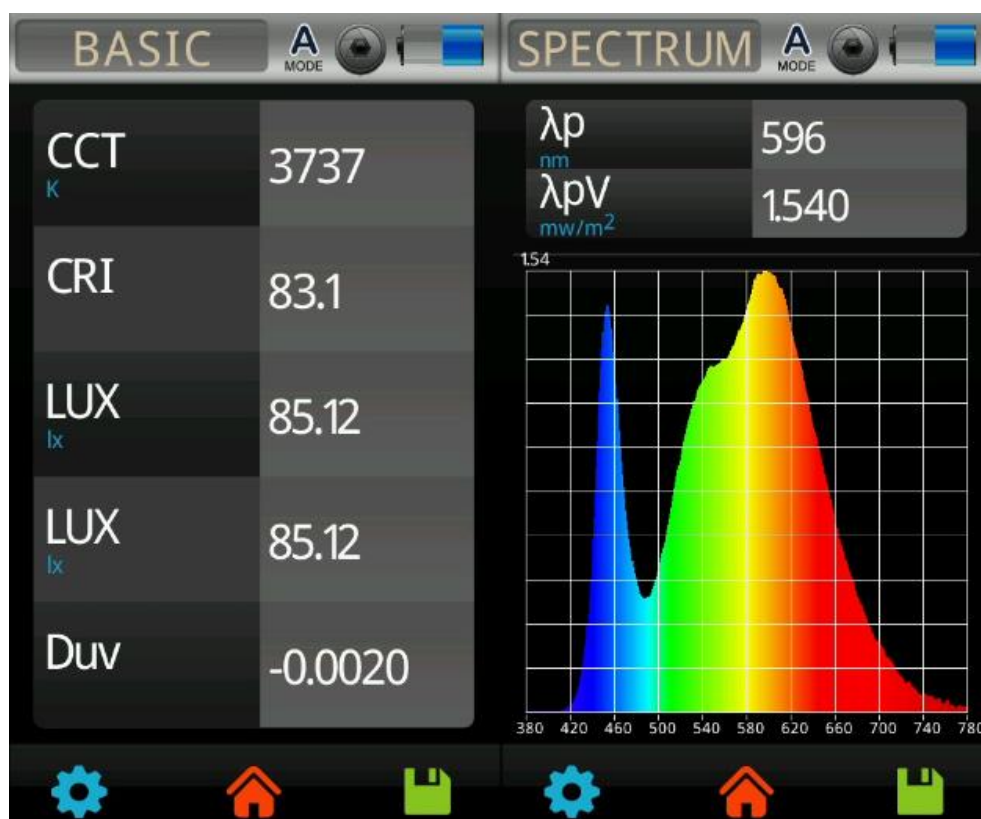
Obrázek 32 – Spektrální charakteristika pohledu 50



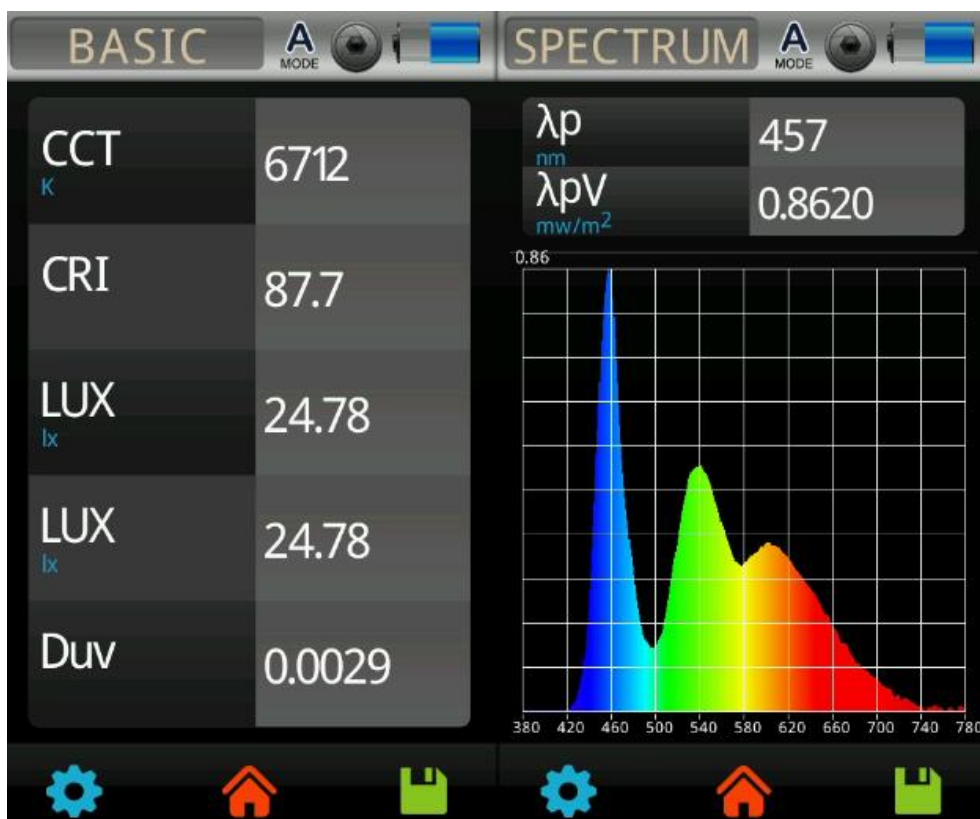
Obrázek 33 – Spektrální charakteristika pohledu 60



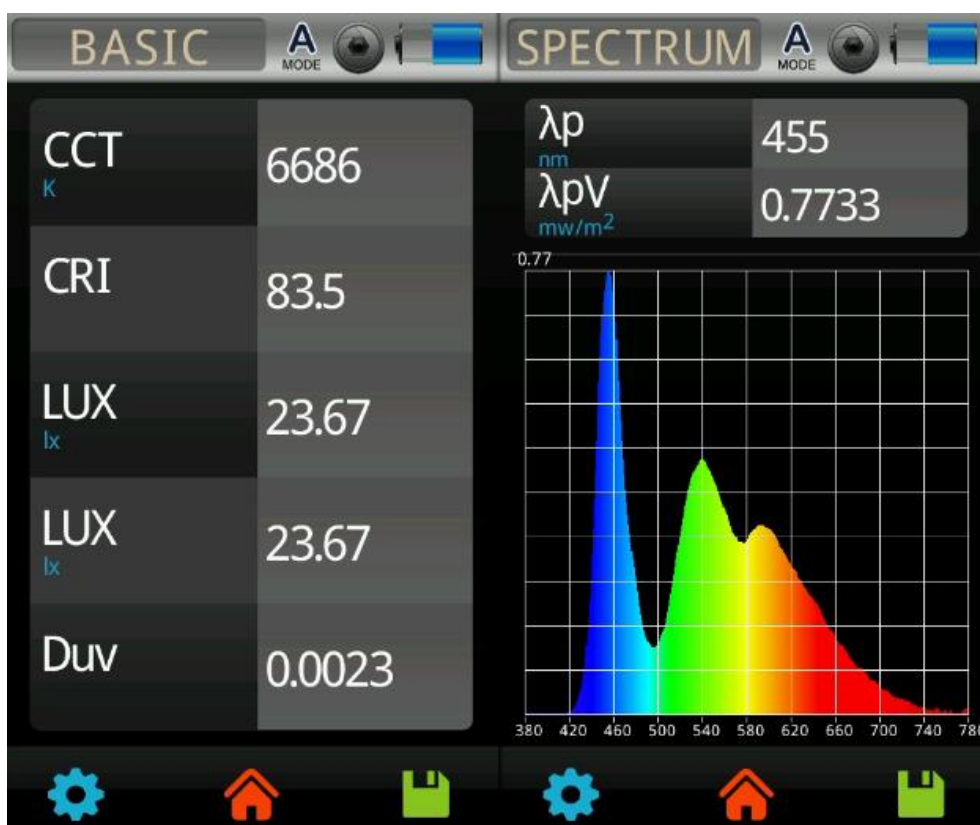
Obrázek 34 – Spektrální charakteristika pohledu 70



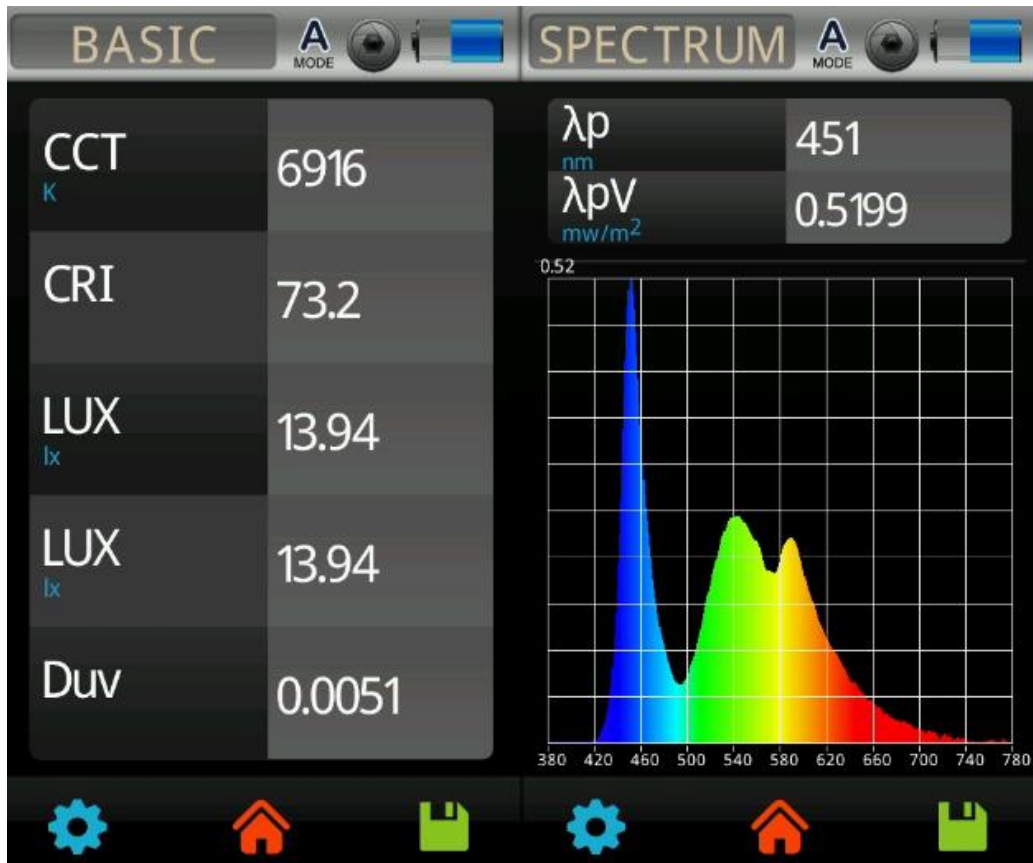
Obrázek 35 – Spektrální charakteristika pohledu 80



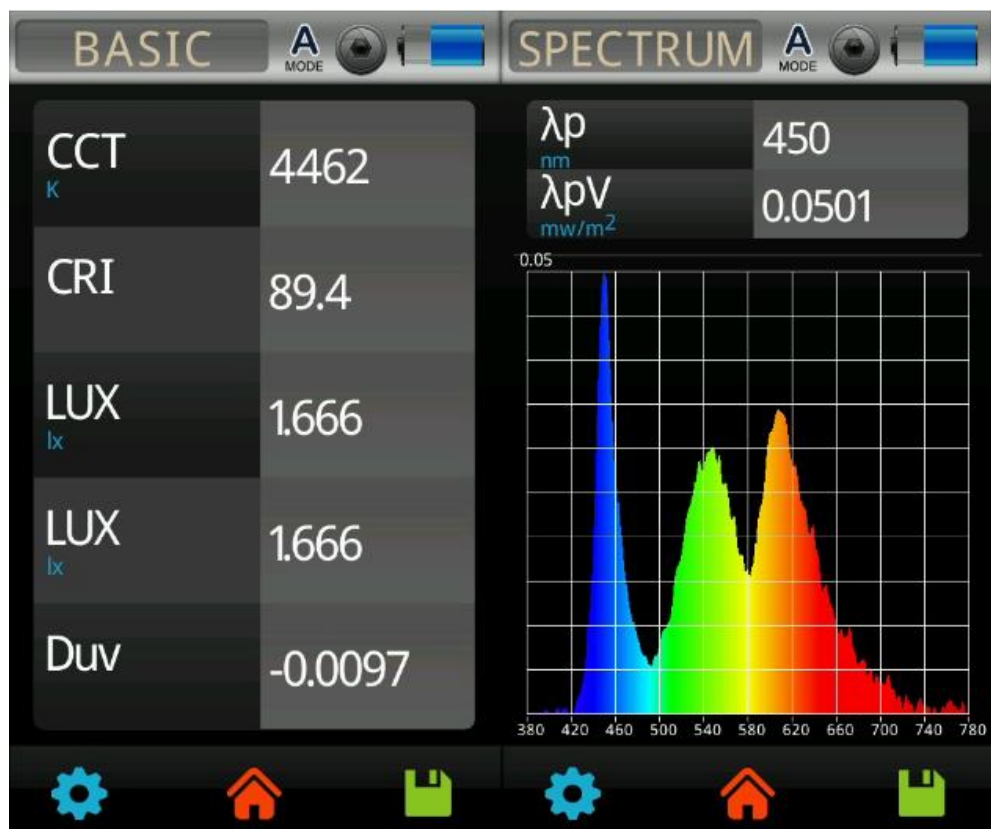
Obrázek 36 – Spektrální charakteristika pohledu 11



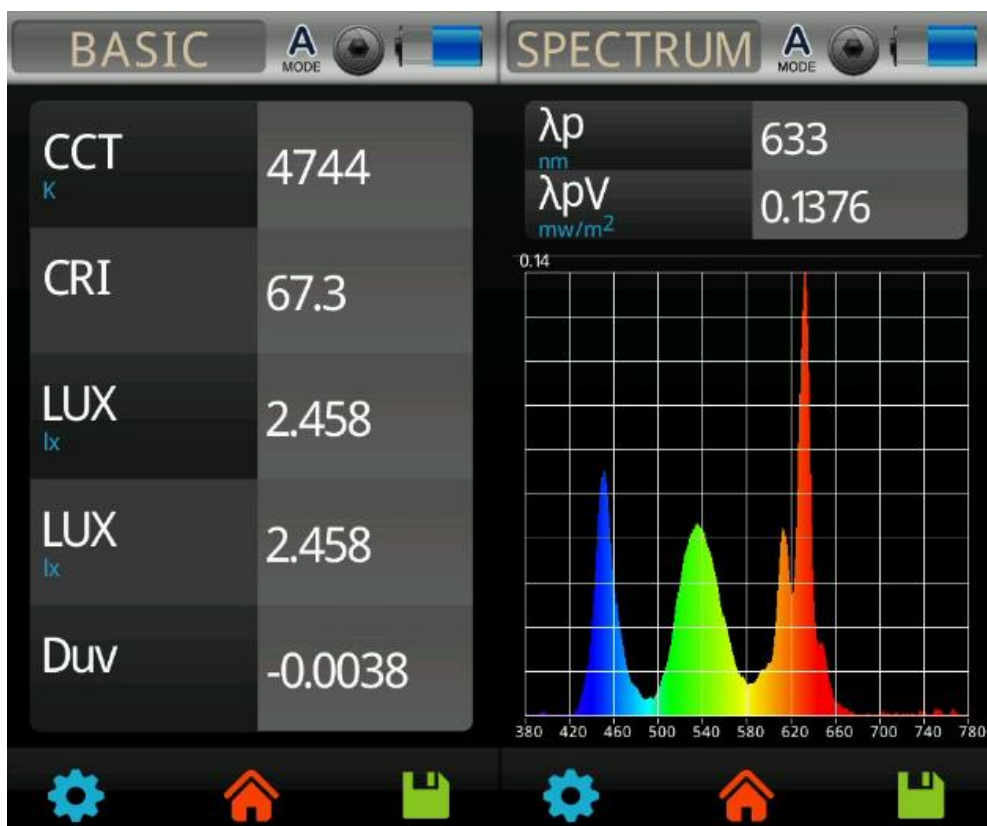
Obrázek 37 – Spektrální charakteristika pohledu 81



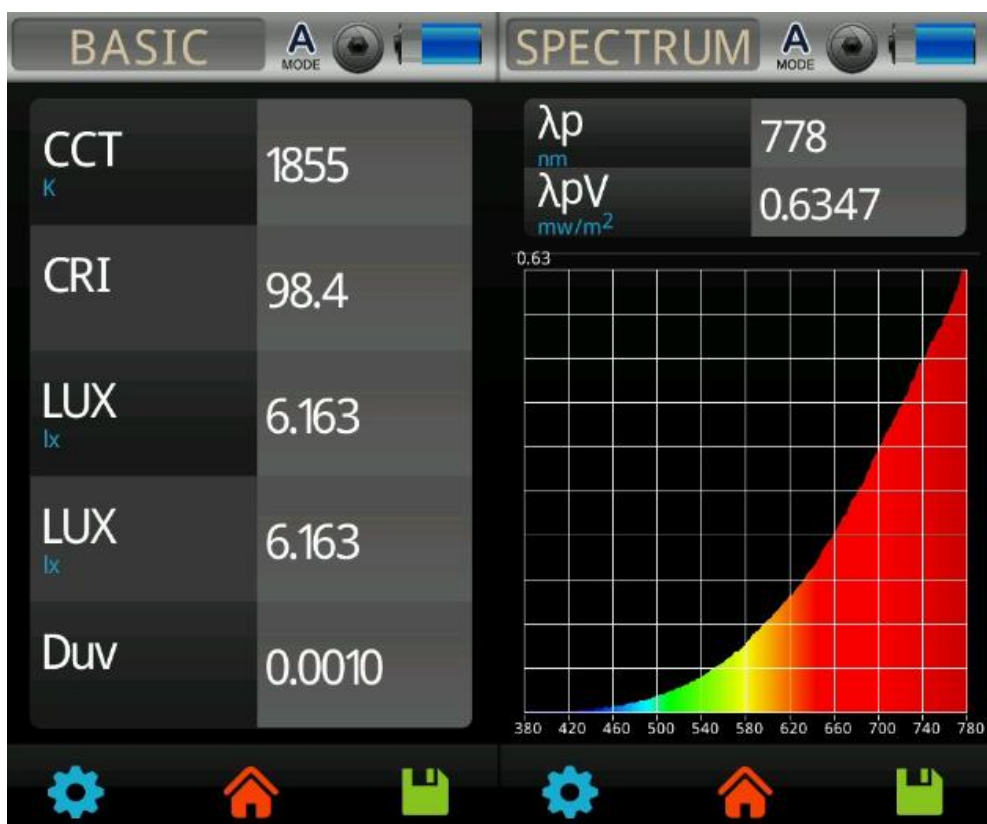
Obrázek 38 – Spektrální charakteristika 21



Obrázek 39 – Spektrální charakteristika pohledu 31_1



Obrázek 40 – Spektrální charakteristika 31_2



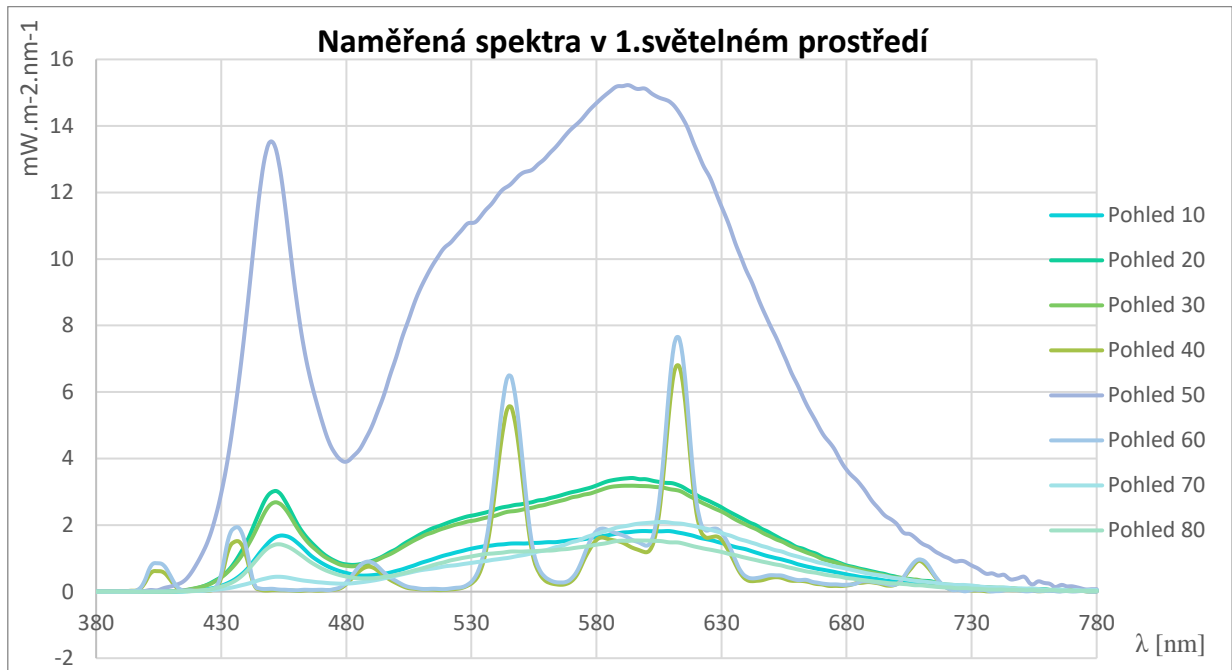
Obrázek 41 – Spektrální charakteristika pohledu 22

Všechny naměřené spektrální charakteristiky z různých pohledů jsem sjednotil dle jednotlivých etap a porovnal jsem je, jak je demonstrováno v níže uvedených grafech. Každé světelné prostředí obsahuje vždy dva grafy. První graf znázorňuje závislost vlnové délky (λ) na ose X na ozáření, která je na ose Y. Druhý graf stejné hodnoty jako první graf, pouze jsou všechny hodnoty ozáření na ose Y vždy vztaženy k maximální hodnotě, takže všechny spektrální charakteristiky mají vždy své maximum v 1 a tudíž lze jejich charakteristiky vzájemně porovnávat. Nevýhodou druhého grafu je nezahrnutí intenzit ozáření.

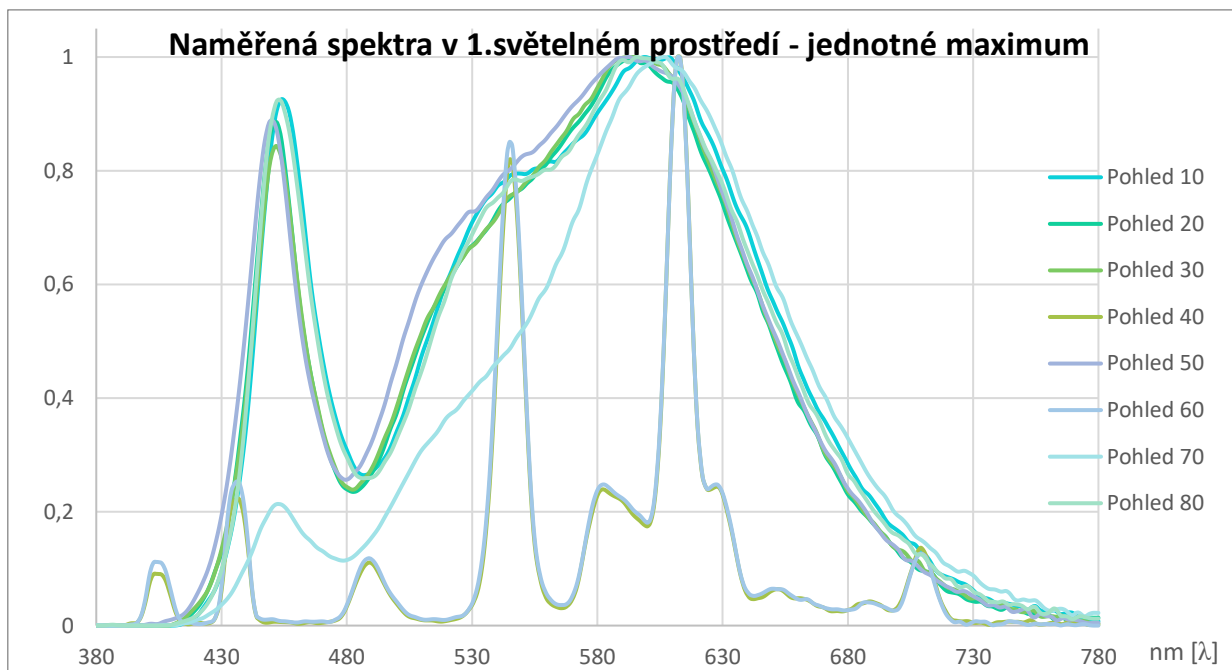
Z naměřených spektrálních charakteristik pohledů zejména z prvního etapy lze snadno poznat, který světelný zdroj převládá. Opět lze snadno rozeznat i typ světelného zdroje (graf 1 a graf 2).

U druhé etapy u měření pohledů 11 a 81 lze vidět, že u monitorů je spektrální modrá složka obsažena v mnohem větším poměru než zelené a červené spektrální složky (graf 3 a graf 4). Nejmenší poměr obsahuje červená spektrální složka. Osvětlenost zhruba 24 luxů odpovídá příspěvkům dvou monitorů. Příspěvek osvětlenosti od jednoho monitoru je přibližně 12 lx. U pohledu 21 je téměř totožné spektrum jako u pohledů 11 a 81, jen naměřená osvětlenost je zhruba poloviční, což odpovídá příspěvku pouze jednoho monitoru. U pohledů 31_1 a 31_2, kde se jedná o dva různé displeje mobilů, se obsah modré spektrální složky liší. U pohledu 31_2 je zřetelně vidět potlačení modré složky oproti pohledu do druhého displeje 31_1. Toto potlačení je způsobeno zapnutím filtru na potlačení modré spektrální složky. S filtrem je zřetelně vidět, jak je energie z modré spektrální složky přesunuta do červené spektrální složky.

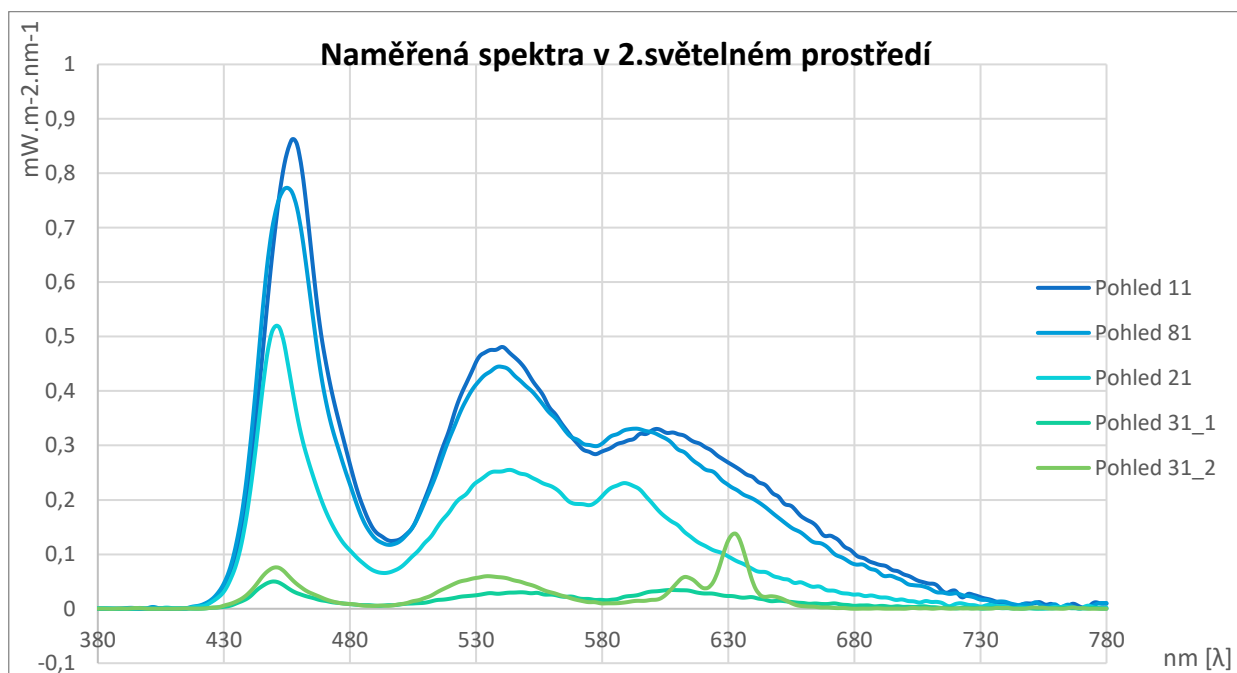
U třetí etapy, kde se používala svíčka jako jediný světelný zdroj je vidět, že modrá spektrální složka téměř nebyla naměřena a téměř veškerá energie se nachází v červené spektrální složce (graf 5 a graf 6).



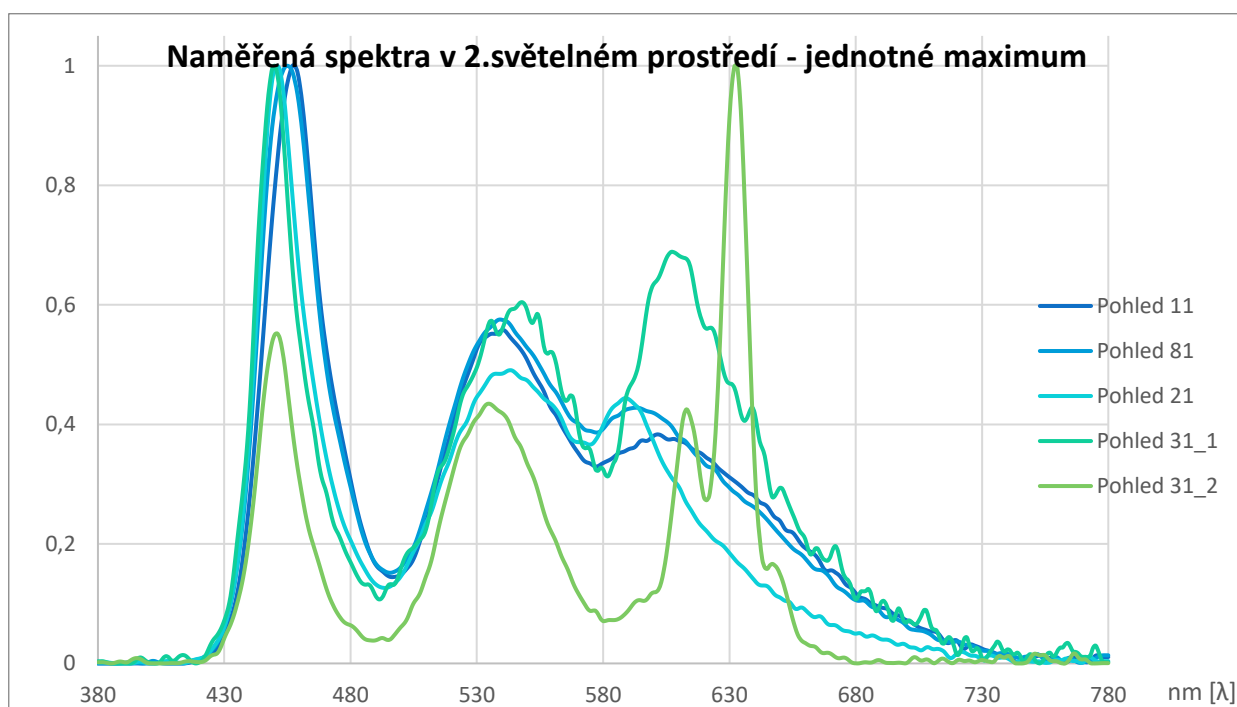
Graf 1 - Závislost ozáření na vlnové délce v 1.světelném prostředí



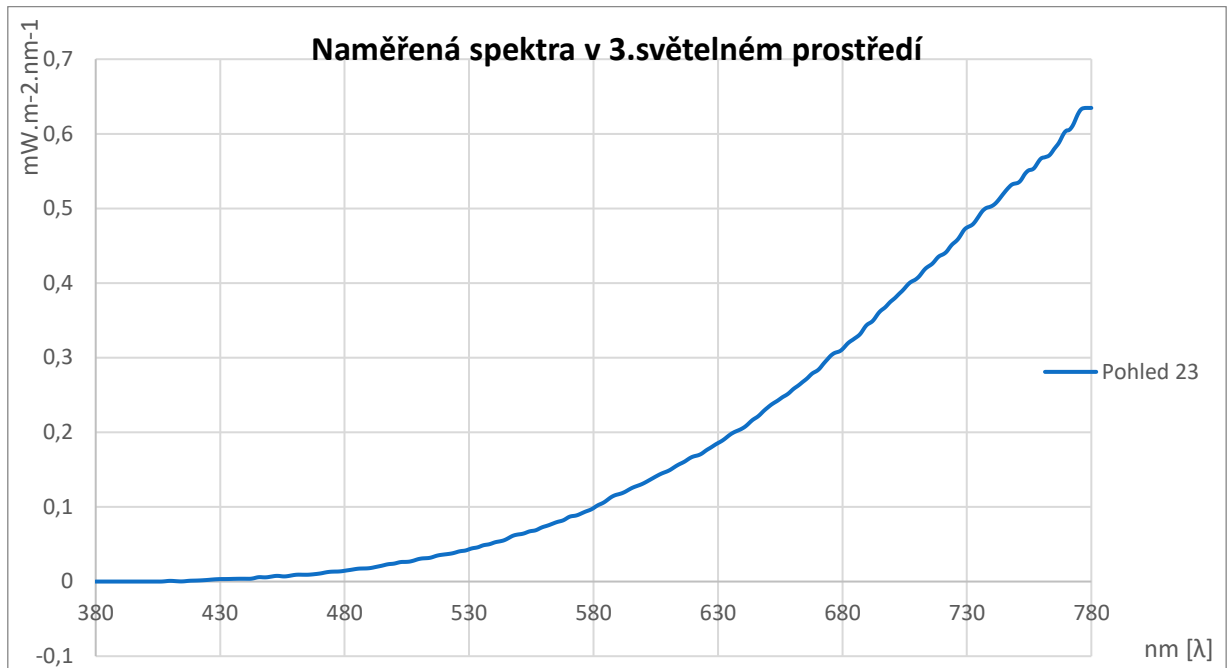
Graf 2 - Závislost ozáření na vlnové délce vztahované k jednotnému maximumu v 1.světelném prostředí



Graf 3 - Závislost ozáření na vlnové délce ve 2.světelném prostředí



Graf 4 - Závislost ozáření na vlnové délce vztahované k jednotnému maximumu ve 2.světelném prostředí



Graf 5 - Závislost ozáření na vlnové délce vztahené k jednotnému maximumu ve 3.světelném prostředí



Graf 6 - Závislost ozáření na vlnové délce vztahené k jednotnému maximumu ve 3.světelném prostředí

4.2. Vnímání světla jednotlivými fotoreceptory – α -opic

Za pomoci programu Toolbox α -opic jsme získali následující dvě tabulky. První tabulka č.6 znázorňuje jednotlivá efektivní ozáření (α -opic irradiance) všech čípků a fotopigmentu melanopsinu v porovnání různých pohledů. Výsledné hodnoty efektivního ozáření jsou v jednotkách $W.m^{-2}$. Druhá tabulka č. 7 znázorňuje jednotlivé ekvivalenty denního osvětlení (α -opic equivalent daylight (D65) illuminance) pro všechny čípky a fotopigment melanopsinu. Výsledné hodnoty jsou v luxech.

Pohled	Popis	Osvětlenost [lx]	α -opic irradiance, $W.m^{-2}$			
			S-Cone	M-Cone	L-cone	Melanopic
10	Pohled do levého monitoru	101,98	0,04	0,13	0,17	0,08
20	Pohled do notebooku	188,84	0,08	0,24	0,31	0,14
30	Pohled do mobilu vleže	177,24	0,07	0,22	0,29	0,13
40	Pohled z chodby do pokoje	107,79	0,02	0,12	0,18	0,04
50	Pohled do zrcadla koupelna	885,03	0,38	1,13	1,44	0,69
60	Pohled do chodby ze vstupních dveří	125,68	0,02	0,14	0,21	0,05
70	Pohled na toaletě při sezení	93,3	0,01	0,1	0,15	0,04
80	Pohled do pravého monitoru	85,12	0,04	0,11	0,14	0,07
11	Pohled do levého monitoru	24,78	0,02	0,04	0,04	0,03
81	Pohled do pravého monitoru	23,67	0,02	0,03	0,04	0,03
21	Pohled do notebooku	13,94	0,01	0,02	0,02	0,02
31_1	Mobil Xiaomi (41)	1,67	0	0	0	0
31_2	Mobil Iphone (51)	2,46	0	0	0	0
22	Svíčka	6,16	0	0,01	0,01	0

Tabulka 6 – Efektivní ozáření fotoreceptorů při různých pohledech

Pohled	Popis	Osvětlenost [lx]	α -opic equivalent daylight (D65) illuminance, lx			
			S-Cone	M-Cone	L-cone	Melanopic
10	Pohled do levého monitoru	101,98	54,83	87,85	102,04	59,85
20	Pohled do notebooku	188,84	96,86	161,97	188,18	105,95
30	Pohled do mobilu vleže	177,24	88,02	152,07	177,05	98,86
40	Pohled z chodby do pokoje	107,79	21,8	82,06	108,28	31,37
50	Pohled do zrcadla koupelna	885,03	464,65	772,8	881,12	518,32
60	Pohled do chodby ze vstupních dveří	125,68	27,78	96,64	125,96	38,06
70	Pohled na toaletě při sezení	93,3	17,48	71,15	94,98	32,5
80	Pohled do pravého monitoru	85,12	46,6	73,18	85,18	49,49
11	Pohled do levého monitoru	24,78	25,05	24,2	24,39	22,43
81	Pohled do pravého monitoru	23,67	24,18	22,99	23,28	20,8
21	Pohled do notebooku	13,94	14,49	13,56	13,64	11,75
31_1	Mobil Xaomi (41)	1,67	1,35	1,48	1,66	1,12
31_2	Mobil Iphone (51)	2,46	1,95	2,23	2,42	1,76
22	Svíčka	6,16	0,49	4,09	6,47	1,52

Tabulka 7 – Ekvivalent denního osvětlení (D65 standart) při různých pohledech

V níže uvedené tabulce 8 jsou zobrazeny součiny naměřené osvětlenosti v jednotlivých pohledech a ozáření fotopigmentu melanopsinu, které byly kvůli lepší přehlednosti vyděleny 10. Jednotlivé součiny značí, který pohled má největší vliv na potlačení melatoninu. Z výsledků lze jasně vyčíst, že největší vliv má 1. prostředí a nejmenší vliv má 3. prostředí, což odpovídá našim předpokladům. Součin zřetelně ukazuje, že největší vliv je při pohledu č.50 (pohled do koupelnového zrcadla) z důvodu řádově vyšší osvětlenosti sítnice (885,03 lx) než je tomu u jiných pohledů. Naopak nejmenší vliv je u druhé a třetí etapy, kdy z výpočtu vyšla nulová hodnota ozáření fotopigmentu melanopsinu, takže je i součin nulový. Dle naměřených spektrálních charakteristik různých pohledů lze uvažovat, že druhé světelné prostředí bude mít určitě větší vliv na potlačení melatoninu než třetí, jelikož spektrální charakteristika pohledu 22 (svíčka) neobsahuje žádnou spektrální složku krátkých délek. U druhého světelného prostředí při měření displejů mobilů byla zjištěna nulová hodnota ozáření fotopigmentu melanopsinu z důvodu malé osvětlenosti sítnice oka.

Pohled	Osvětlenost [lx]	Melanopic irradiance [W.m ⁻²]	Melanopic irradiance*Osvětlenost
10	101,98	0,08	8,158
20	188,84	0,14	26,438
30	177,24	0,13	23,041
40	107,79	0,04	4,312
50	885,03	0,69	610,671
60	125,68	0,05	6,284
70	93,3	0,04	3,732
80	85,12	0,07	5,958
11	24,78	0,03	0,743
81	23,67	0,03	0,710
21	13,94	0,02	0,279
31_1	1,67	0	0,000
31_2	2,46	0	0,000
22	6,16	0	0,000

Tabulka 8 – Součin naměřené osvětlenosti a ozáření fotopigmentu melanopsinu

4.3. Naměřené hodnoty melatoninu

V této kapitole jsou shrnuty veškeré naměřené hodnoty melatoninu, které byly získány z laboratoře Přírodovědecké fakulty UK do tabulek a grafů. V každém světelném prostředí jsou vždy posuzovány dvě řady hodnot. První řadu tvoří naměřené hodnoty hladiny melatoninu, které jsou v jednotkách pg/ml, takže je možné porovnat maximální dosažené úrovně hladin melatoninu. Vzhledem k tomu, že všechny vzorky nemohly být stanoveny v jedné esejí, ale musely být zpracovány dvěma esejemi, není vzájemné porovnání reálných čísel v pg/ml úplně přesné. Každá esej je značená radioizotopem a může být v jiné fázi poločasu rozpadu, proto i hodnota v pg/ml může být, i přes zpřesňování výpočtu kalibrační křivkou, v každé esejí mírně odlišná. To je důvod, proč jsme vypočítali druhou řadu hodnot vztaženou k nejvyšší naměřené hodnotě, kterou lze lépe porovnat s průběhy hladin melatoninu mezi oběma účastníky měření.

1.Světelné prostředí				
	Radek		Anna	
Čas	pg/ml melatonin	vztažná hodnota	pg/ml melatonin	vztažná hodnota
12:00	1,4792	0,0227	9,7362	0,0552
15:00	4,3129	0,0662	12,4107	0,0704
17:00	4,1056	0,0631	12,3181	0,0698
19:00	6,6920	0,1028	12,7838	0,0725
21:00	6,6920	0,1028	10,4954	0,0595
22:00	7,7089	0,1184	12,0934	0,0686
23:00	17,8208	0,2737	15,2261	0,0863
24:00	34,1004	0,5238	45,3414	0,2571
02:00	65,1020	1,0000	121,0899	0,6865
04:00	59,2033	0,9094	176,3839	1,0000
06:00	43,0584	0,6614	73,8079	0,4185
07:00	27,4838	0,4222	53,7217	0,3046
08:00	22,3051	0,3426	18,3994	0,1043
10:00	5,7992	0,0891	4,9121	0,0278
12:00	5,8487	0,0898	3,5880	0,0203

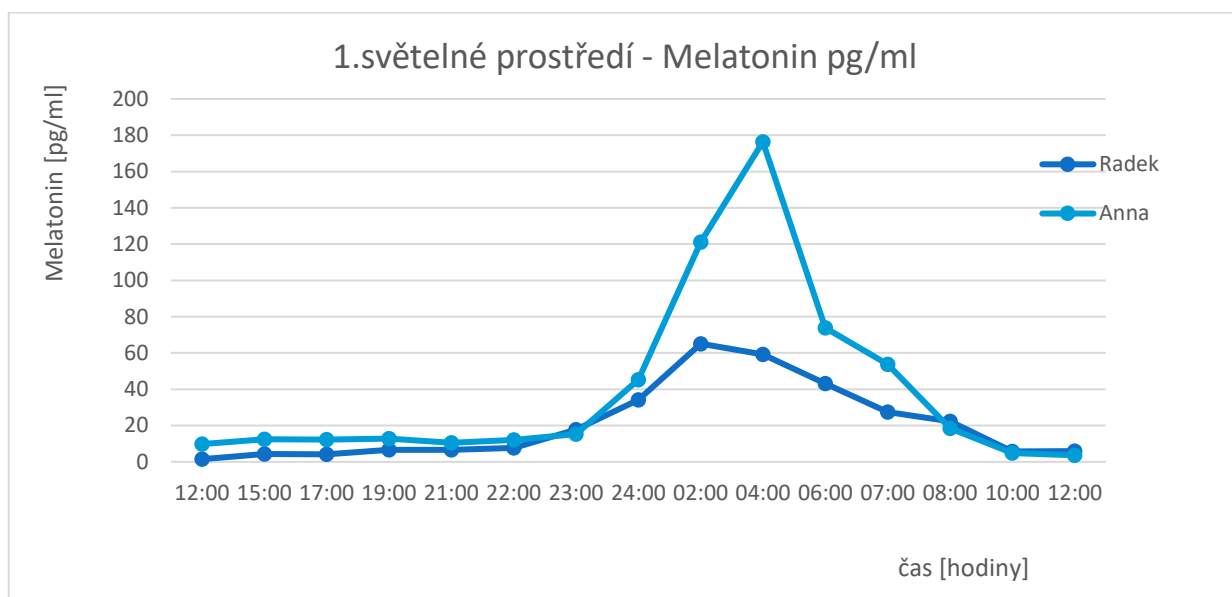
Tabulka 9 – Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 1.etapy měření

2.Světelné prostředí				
	Radek		Anna	
Čas	pg/ml melatonin	vztažná hodnota	pg/ml melatonin	vztažná hodnota
12:00	10,0507	0,1570	10,6381	0,1497
15:00	11,9435	0,1866	9,7808	0,1376
17:00	11,5703	0,1807	12,5661	0,1768
19:00	28,3414	0,4427	8,3606	0,1176
21:00	21,5112	0,3360	14,3734	0,2022
22:00	42,4242	0,6627	33,4598	0,4707
23:00	42,4242	0,6627	28,2613	0,3976
24:00	37,0183	0,5783	52,9359	0,7447
02:00	46,0055	0,7187	34,8836	0,4907
04:00	64,0137	1,0000	71,0863	1,0000
06:00	25,6244	0,4003	17,9612	0,2527
07:00	25,6244	0,4003	17,8960	0,2517
08:00	17,0836	0,2669	13,0779	0,1840
10:00	12,7238	0,1988	16,2464	0,2285
12:00	9,4638	0,1478	11,1745	0,1572

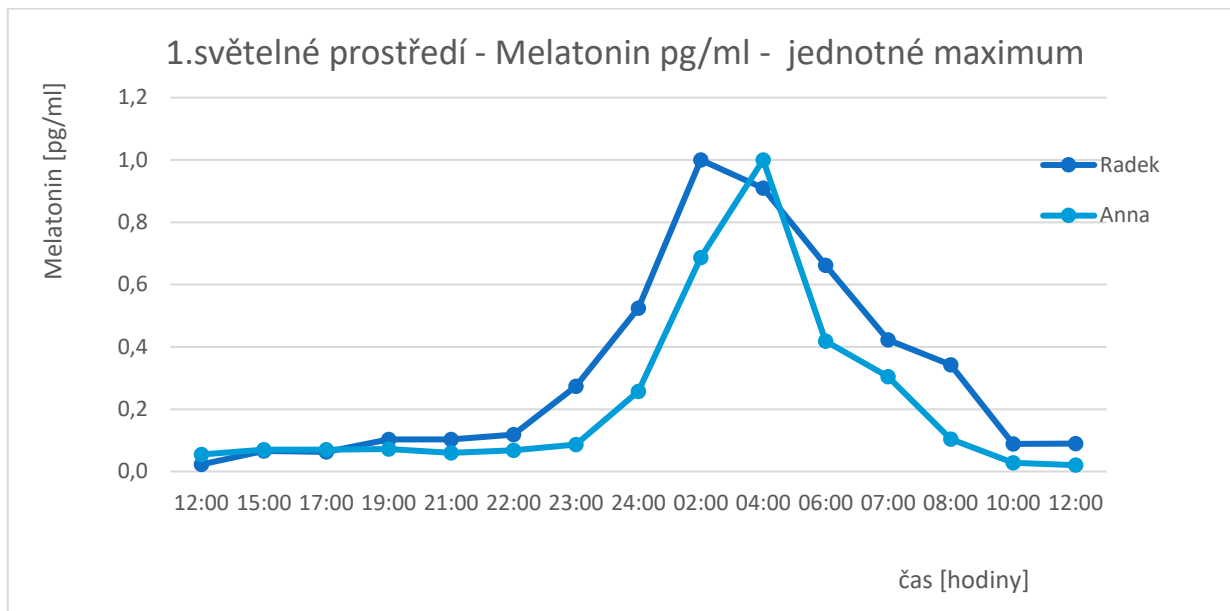
Tabulka 10 - Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 2.etapy měření

3.Světelné prostředí				
	Radek		Anna	
Čas	pg/ml melatonin	vztažná hodnota	pg/ml melatonin	vztažná hodnota
12:00	2,1517	0,0527	7,5364	0,1026
15:00	6,2945	0,1542	3,9608	0,0539
17:00	9,1455	0,2240	3,3013	0,0449
19:00	32,2241	0,7894	3,2821	0,0447
21:00	38,7119	0,9483	59,5317	0,8102
22:00	31,2064	0,7644	73,4820	1,0000
23:00	31,2064	0,7644	62,1238	0,8454
24:00	40,7832	0,9990	62,6944	0,8532
02:00	40,8226	1,0000	70,8195	0,9638
04:00	33,2401	0,8143	69,1021	0,9404
06:00	26,1501	0,6406	38,0122	0,5173
07:00	4,5568	0,1116	26,4874	0,3605
08:00	7,3338	0,1796	19,5157	0,2656
10:00	1,0713	0,0262	6,0648	0,0825
12:00	2,7734	0,0679	7,0203	0,0955

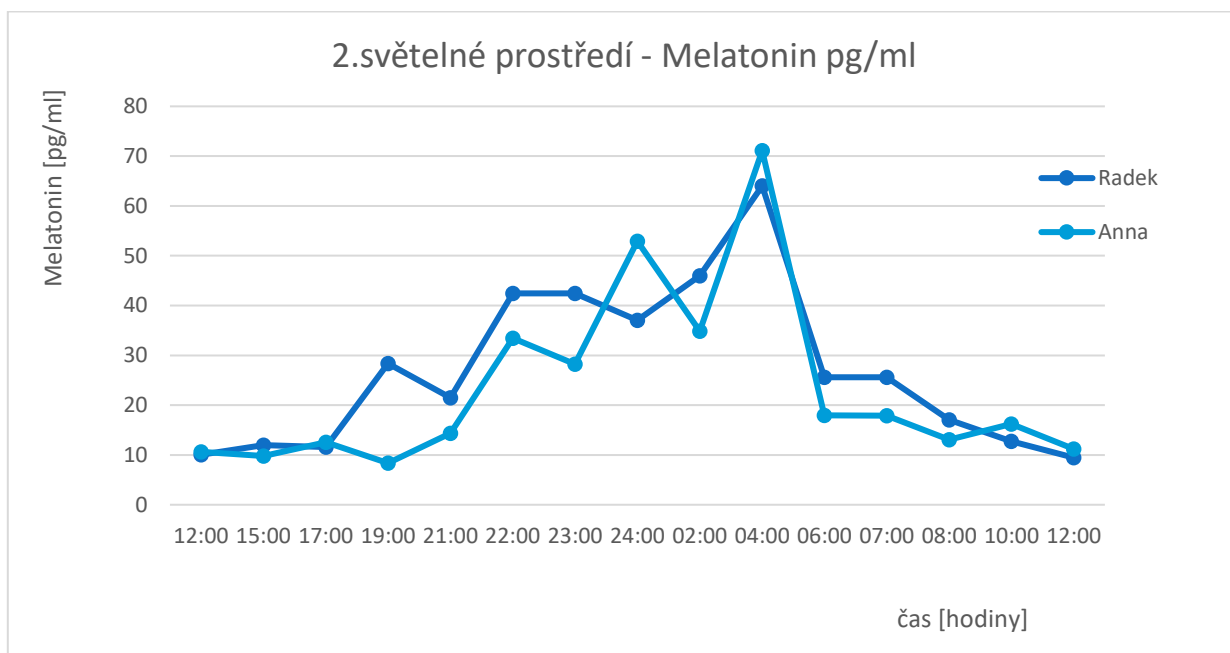
Tabulka 11 – Naměřené a vztažné hodnoty hladiny melatoninu u 3.etapy měření



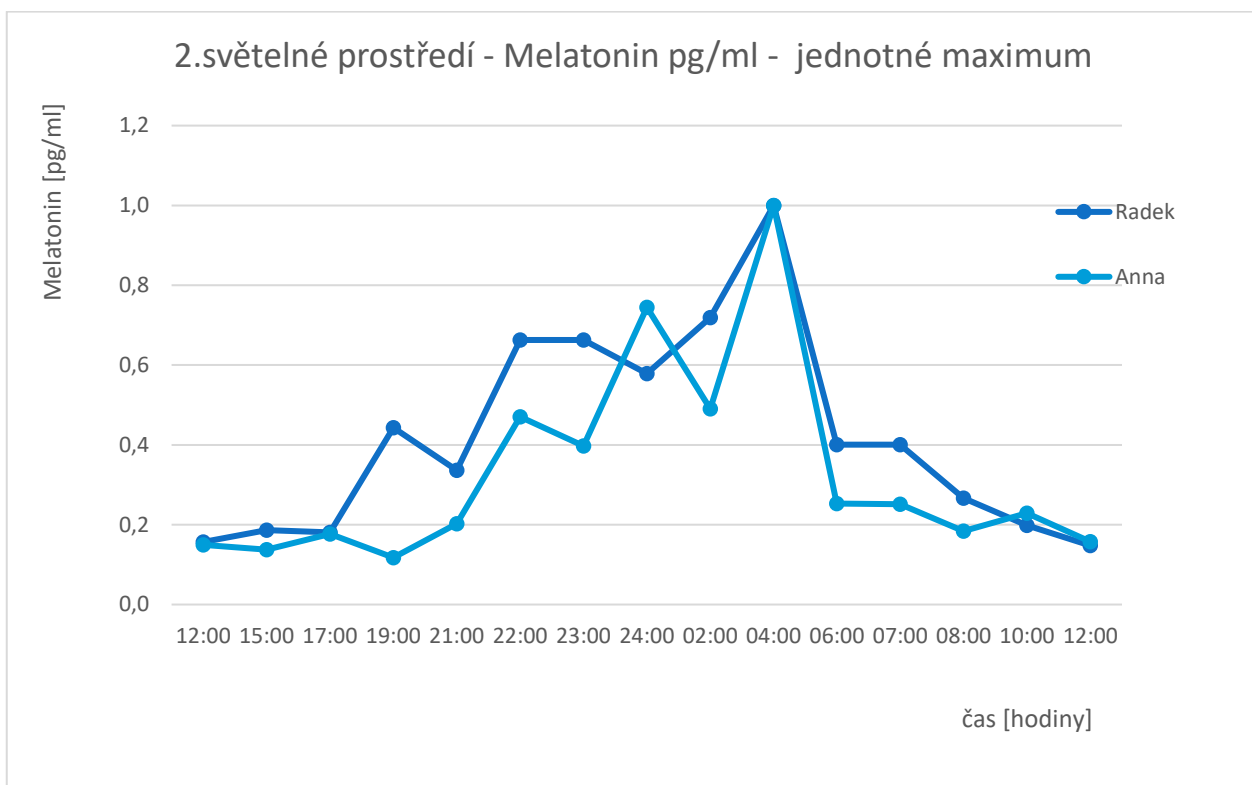
Graf 7 – Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den v 1.světelném prostředí



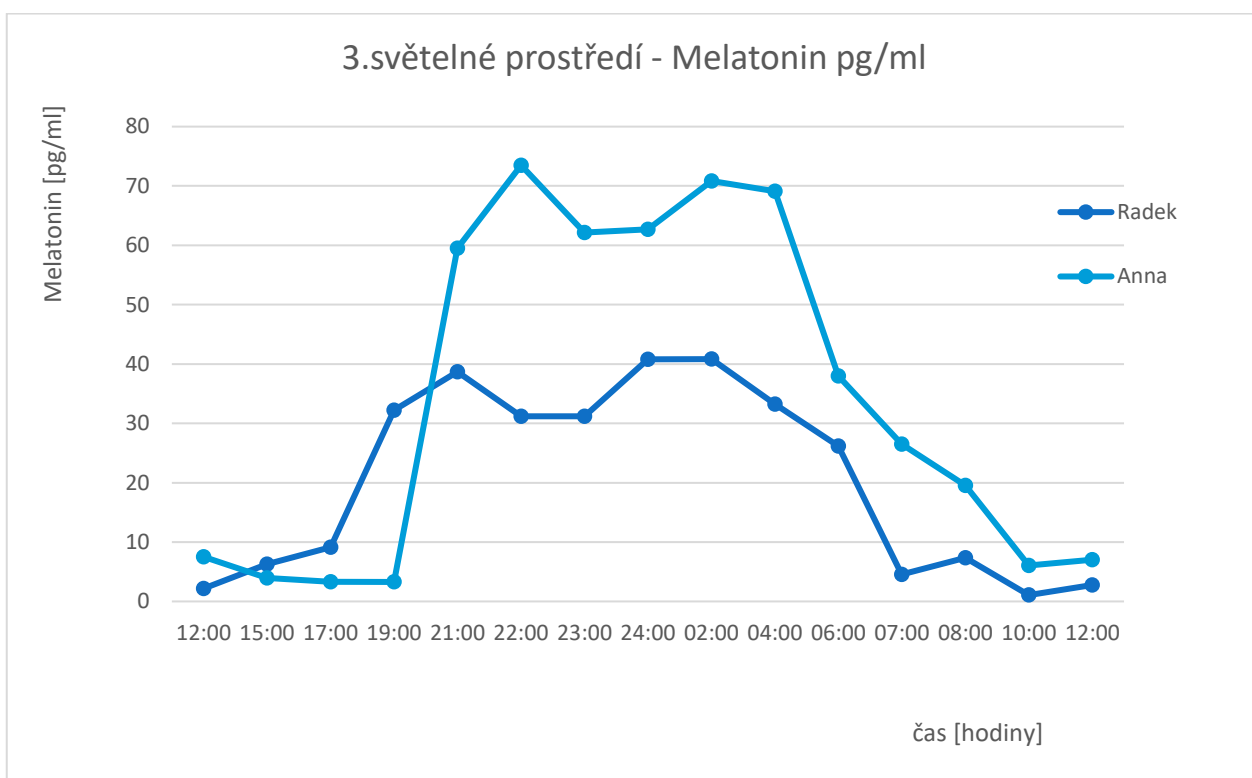
Graf 8 – Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den v 1.světelném prostředí – jednotné maximum



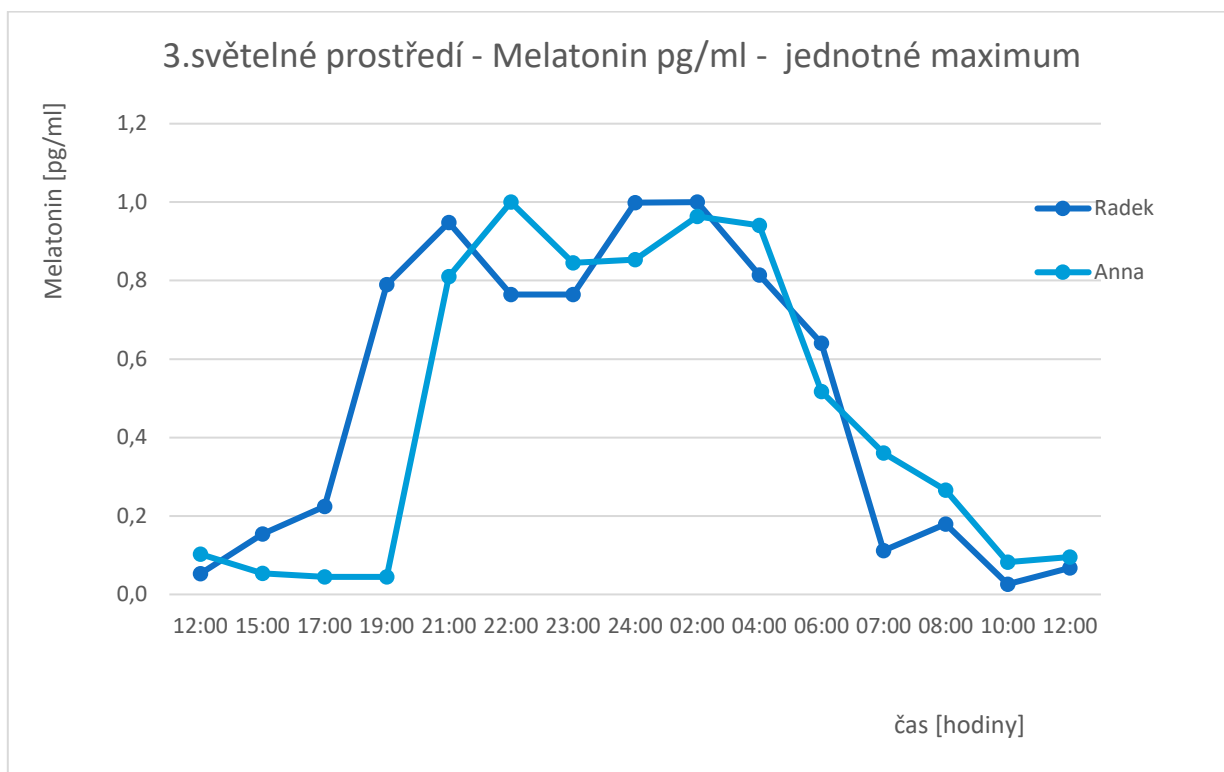
Graf 9 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den ve 2.světelném prostředí



Graf 10 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den ve 2.světelném prostředí – jednotné maximum



Graf 11 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den ve 3.světelném prostředí



Graf 12 - Průběh hladiny melatoninu po celý měřicí den ve 3.světelném prostředí – jednotné maximum

Graf 7 a graf 8 ukazují, že při plném osvětlení v prvním světelném prostředí je úroveň melatoninu u obou účastníků velmi potlačena až do doby (22:00), kdy dojde ke zhasnutí všech světelných zdrojů. Vzestup melatoninu u Radka začíná hned po zhasnutí, zatímco u Anny je ještě o hodinu opožděn a z minimálních hodnot se zvedá až v půlnoci. U Anny je dosaženo maxima 176 pg/ml ve 4:00. U Radka je dosaženo maxima 65 pg/ml ve 2:00.

Ve druhém světelném prostředí (LED displeje) se maximum melatoninu u obou účastníků pohybuje mezi 60 a 70 pg/ml a bylo naměřeno ve stejný čas, ve 4:00 (graf 9). Z porovnání relativních, vztažených hodnot je vidět, že průběhy u obou účastníků jsou podobné a jejich nárůst je velice pomalý od těch nejmenších hodnot, až po maximum (graf 10).

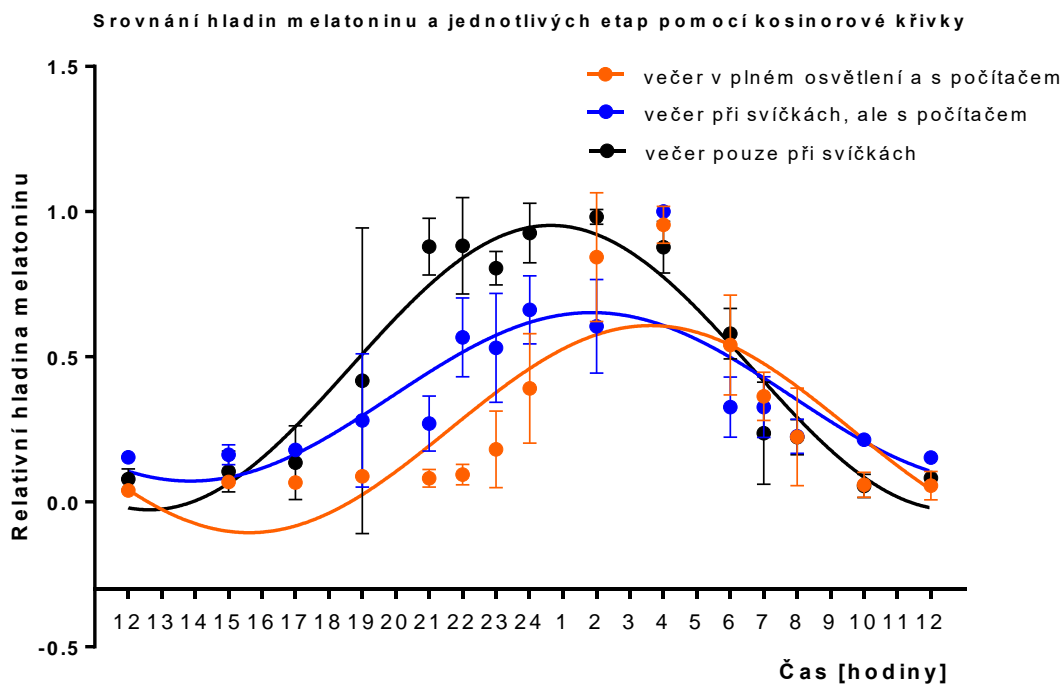
Ve třetím světelném prostředí (svíčka) je maximum hladiny melatoninu u obou účastníků ve 2:00. U Anny bylo naměřeno maximum 70 ml/pg a u Radka 40 ml/pg (graf 11). Z porovnání relativních hodnot (graf 12) je zřejmé, že strmý nárůst probíhá u Radka už v 17:00. U Anny je prudký nárůst opožděn o dvě hodiny, takže růst hladiny melatoninu začíná v 19:00.

Na grafu 13 jsou porovnány hodnoty hladin melatoninu u obou účastníků měření pro všechny tři etapy (světelná prostředí). Analýza jednotlivých hladin melatoninu byla prováděná pomocí kosinorové analýzy. Data byla fitována na dva alternativní

regresní modely, a to buď na horizontální čáru (nulová hypotéza), nebo na jednoduchou kosinorovou křivku (alternativní hypotéza) definovanou rovnicí:

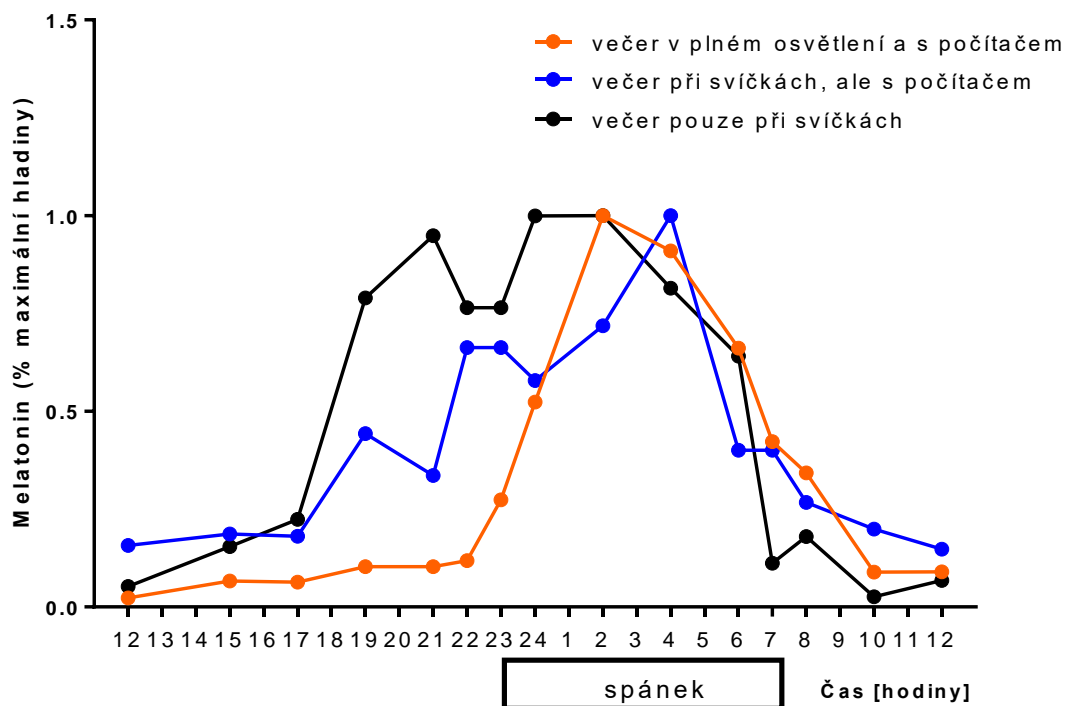
$$Y = measor * \left[amplitude * \cos \left(\frac{2 * \pi * (X - akrofáze)}{24 \text{ hodinová perioda}} \right) \right]$$

Na grafe 14 a 15 jsou zobrazeny závislosti hladiny melatoninu u obou účastníků v závislosti na čase. Hodnoty jsou vztaženy k maximálním hodnotám.



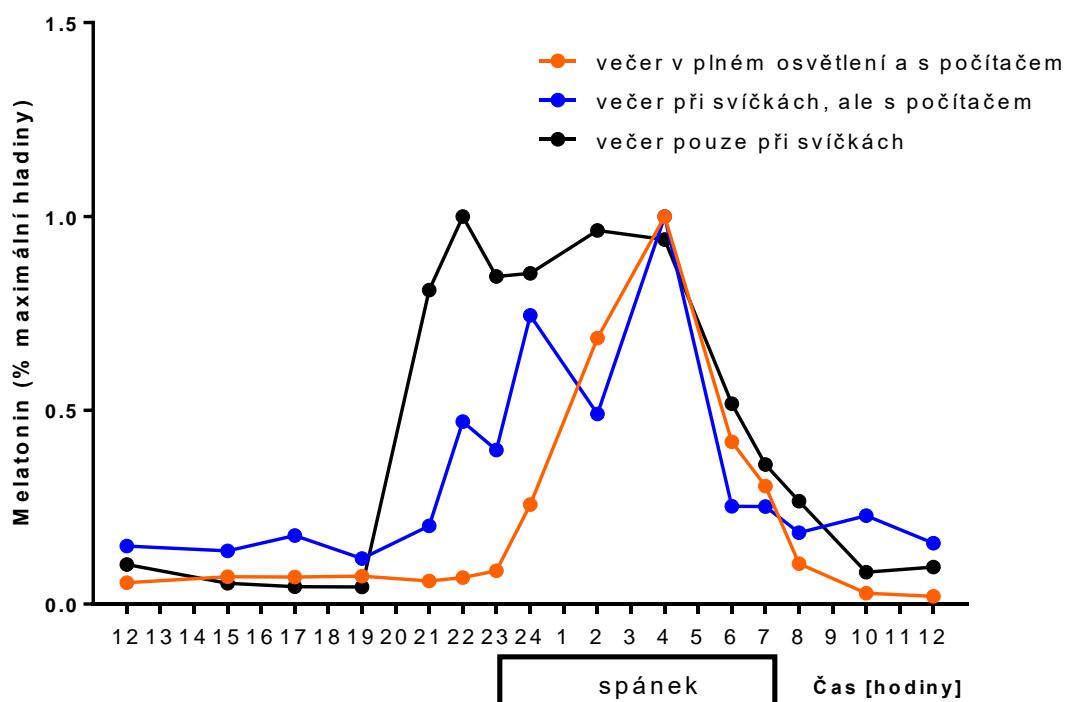
Graf 13 - Hladiny melatoninu obou účastníků v závislosti na čase s proložením kosinorovou křivkou

Srovnání hladin melatoninu u jednotlivých etap - Radek



Graf 14 - Hladiny melatoninu Radka v závislosti na čase – vztažné hodnoty k maximum

Srovnání hladin melatoninu u jednotlivých etap - Anna



Graf 15 - Hladiny melatoninu Anny v závislosti na čase – vztažné hodnoty k maximum

4.4. Časový posun vzestupu hladiny melatoninu relativně k 3. světelnému prostředí

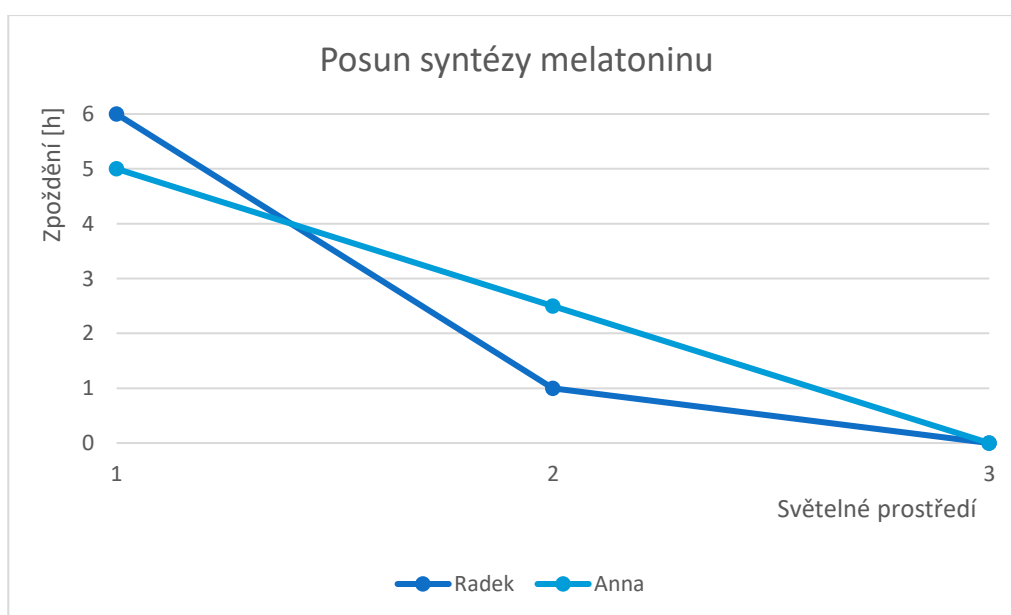
V následujících tabulkách (č.12 a č.13) je zobrazen časový posun syntézy melatoninu ve světelných prostředích 1 a 2. Zpoždění bylo vypočítáno jako rozdíl v hodinách, kdy bylo dosaženo 25% maximální hladiny melatoninu v 1. a 2. prostředí a kdy bylo dosaženo 25% maxima melatoninu ve 3. prostředí, bez modré spektrální složky, tj. u Radka v 17:00 a u Anny v 19:00. Z grafu vyplývá, že zpoždění nárůstu melatoninu mezi 1. a 3. prostředím může být 5 – 6 hodin.

Čas nárůstu	1. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu	2. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu	3. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu
17:00	23:00	18:00	17:00
Zpoždění	6:00	1:00	0:00

Tabulka 12 – Posun (zpoždění) syntézy melatoninu u Radka

Čas nárůstu	1. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu	2. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu	3. světelné prostředí - 25% maximální hodnoty hladiny melatoninu
19:00	0:00	21:30	19:00
Zpoždění	5:00	2:30	0:00

Tabulka 13 – Posun (zpoždění) syntézy melatoninu u Anny



Graf 16 - Vzájemné grafické porovnání posunu (zpoždění) syntézy melatoninu

5. ZÁVĚR

Úkolem této diplomové práce bylo potvrdit supresivní vliv modré spektrální složky ve světelném spektru na hladinu melatoninu. Nejprve bylo nutné změřit spektrální charakteristiky všech světelných zdrojů v místnosti a poté spektrální charakteristiky a osvětlenosti všech pohledů, které stimulují sítnici oka při běžném pohybování v místnosti. Celkové měření probíhalo ve třech různých světelných prostředích (časových etapách), aby byl co nejvíce vidět rozdíl v hladinách melatoninu.

Veškeré výsledky týkající se měření jsou obsaženy v kapitole Vyhodnocení (část č.4). Z naměřených hodnot lze vidět, že světelné prostředí má zásadní vliv na vzestup hladiny melatoninu u obou účastníků. Ať už uvažujeme samotnou konstantní intenzitu osvětlení v prvním prostředí, tak i změny, kdy sítnice účastníků byly osvětlovány nespojitě s krátkými přestávkami (druhé světelné prostředí).

V prvním světelném prostředí, kdy byly rozsvíceny všechny světelné zdroje je vidět, že u obou účastníků začala hladina melatoninu narůstat ještě později než kolem desáté večerní hodiny, kdy byly zhasnuty všechny světelné zdroje. U Radka byl první měřitelný vzestup zaznamenán ve 23 h, u Anny až ve 24 h. Maximální naměřena hodnota hladiny melatoninu byla u Anny 176 pg/ml a u Radka pouze 65 pg/ml. Tento rozdíl bývá v lidské populaci obvyklý a je přisuzován genetickému nastavení syntetické dráhy melatoninu. Lze také vidět, že nástup melatoninu je u Radka dřívější než u Anny, a to je dané kvůli rozdílným chronotypům u obou účastníků, jelikož Anna je typický chronotyp sovy, zatímco Radek je spíš skřivan. Při zaměření na obsah modré spektrální složky v souvislosti s ozářeností lze vidět, že většina hodnot ozářenosti v daném spektru vychází více než $1,5 \text{ mW/m}^2$. V extrému dosahuje hodnota až téměř 14 mW/m^2 . Tento případ nastal v koupelně, kde je svítidlo velmi blízko sítnice a osvětlenost na úrovni sítnice dosáhla 885 lx.

V druhém světelném prostředí byly rozsvíceny pouze displeje monitorů, notebooků a mobilů. Z výsledků lze vyčíst, že nárůst hladiny melatoninu nebyl tak strmý jako v prvním světelném prostředí, ale byl spíše pozvolný s různými propady, které bych přisoudil změnám světelného prostředí. Osvětlování sítnice bylo často přerušované z důvodu vykonávání více aktivit kromě sledování displejů a v okolním prostředí nebyly již žádné světelné zdroje. Nárůst syntézy melatoninu nastal mezi 17 h a 19 h u Radka, a po 21 h u Anny a zastavil se až ve 4 h. Maximální naměřená hodnota hladiny melatoninu byla u obou účastníků podobná a pohybovala se mezi 60 až 70 pg/ml. Při

zaměření na obsah modré spektrální složky v souvislosti s ozářeností lze vidět, že největší ozářenost sítnice modrou spektrální složkou je při pohledech do monitorů. Maximální hodnota ozářenosti dosahuje hodnoty vyšší než $0,8 \text{ mW/m}^2$. Téměř při všech měření v daném světelném prostředí je v porovnání s ostatními spektrálními složkami podíl modré největší. Výjimkou je displej mobilu, kdy byl zapnutý filtr modré spektrální složky. V tomto případě převažuje červená spektrální složka.

U třetího světelného prostředí byl použit pouze jediný světelný zdroj, a tím byly svíčky, které téměř neobsahují žádnou modrou spektrální složku. Nárůst hladiny melatoninu u obou účastníků byl v tomto měření velmi strmý, a to hned začátkem noci mezi 17:00 až 19:00. U Radka začal nárůst dříve, z důvodu chronotypu skřivana. Maximální hodnota melatoninu byla větší u Anny, a to 73 pg/ml . U Radka byla maximální hodnota hladiny melatoninu 40 pg/ml . Tvar křivky nárůstu a poklesu u obou účastníků byl v tomto světelném prostředí (etapě) velmi podobný, až na fázové rozdíly mezi nástupem a poklesem způsobené vlivem chronotypu. Při zaměření na obsah modré spektrální složky v souvislosti s ozářeností lze vidět, že ozářenost v modré spektrální složce je nulová, zatímco maxima nabývá v červené spektrální složce a hodnota ozářenosti je vyšší než $0,6 \text{ mW/m}^2$.

Z posouzení časového posunu začátku syntézy melatoninu, nebo také zpoždění nástupu jeho měřitelné hladiny ve slině mezi prvním a druhým prostředím vůči třetímu prostředí, je u obou účastníků patrný nejvyšší posun v prvním světelném prostředí. U Radka bylo dosaženo zpoždění o 6 hodin a u Anny o 5 hodin. Ve druhém světelném prostředí bylo zpoždění u Radka 1 hodinu a u Anny 2,5 hodiny. Třetí světelné prostředí sloužilo jako referenční, tudíž se od něj vypočítaly zbylé hodnoty.

Naměřené výsledky jasně prokazují vliv modrého světla a světelné intenzity na časové oddálení růstu hladiny melatoninu. Oddálení nárůstu hladiny melatoninu u obou účastníků nastal již při hodnotách nižších než 25 lx . V budoucnu bych určitě doporučil další experimenty s nižšími hodnotami osvětlenosti se stejnou spektrální charakteristikou pro přesnější zjištění hranice oddálení růstu hladiny melatoninu.

Z našich dat je jasně patrné, že při svícení všemi světelnými zdroji, které byly použity, je růst téměř potlačen, a naopak při svícení pouze svíčkami nastává růst velmi brzo. Svícení pouze displeji je zhruba kompromis mezi dvěma předchozími světelnými prostředími.

Z pohledu spánku, který je pro život nutný a který je úzce závislý na melatoninu lze doporučit omezit svícení světelnými zdroji s modrou spektrální složkou ve večerních hodinách. Mezi světelné zdroje lze zařadit i samotné displeje zařízení, jejichž

svícení ve večerních hodinách také zpožďuje růst hladiny melatoninu, jak tato diplomová práce prokázala. V případě nutného použití např. mobilního displeje je vhodné alespoň zapnout filtr na potlačení modré spektrální složky.

Kromě měření ve vnitřních interiérech lze výsledek této diplomové práce také aplikovat na venkovní prostředí. V dnešní době stále častěji probíhají náhrady sodíkových světelných zdrojů veřejného osvětlení o nízké teplotě chromatičnosti LED světelnými zdroji o vysoké teplotě chromatičnosti (4000 K). Tato poměrně vysoká teplota chromatičnosti (z pohledu biologické noci) je zvolena jak z důvodu lepší orientace, tak i z důvodu větší energetické úspory jako je uvedeno v teoretické části. Ze závěrů této práce stojí určitě za zvážení, zdali se spíše zaměřovat na lepší energetickou bilanci venkovního osvětlení, anebo zvolit teplejší světelné LED zdroje, které mají zásadně pozitivnější environmentální vliv, ať už to může být teplota chromatičnosti 2700 K, nebo speciálně vyvinutá technologii LED PC-AMBER, jejíž teplota chromatičnosti se pohybuje kolem 1800 K a modrá spektrální složka je zcela potlačena.

6. SEZNAM LITERATURY

- [1] Jiří HABEL, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK, Petr ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. FCC Public. ISBN 978-80-86-53121-3.
- [2] Spssvsetin.cz, <http://www.spssvsetin.cz/assets/05/el-16.htm>, vyhledáno dne 19.10.2020 [online]
- [3] Odbornecasopisy.cz/svetlo,
<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-nizkotlake-sodikove-vybojky--15758>, vyhledáno dne 22.10.2020 [online]
- [4] PAVELKA, Tomáš. Provozní vlastnosti LED a jejich modelování [online]. Brno, 2016, Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=139843. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií
- [5] Cs.wikipedia.org, <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A1nek> , vyhledáno dne 18.2.2021 [online]
- [6] MAIEROVÁ Lenka. Světelné prostředí v budovách z pohledu nevizuálního vnímání světla [online]. Praha, 2015, Dostupné z:
https://www.uceeb.cz/system/files/souboryredakce/maierova_svetelne_prostredi_v_budovach.pdf, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
- [7] Úloha melatoninu u cirkadiánních poruch,
<http://www.edukafarm.cz/data/soubory/casopisy/2/094-098-sonka-3inz.pdf>,
vyhledáno dne 18.2.2021 [online]
- [8] Světelné znečištění a vliv na lidské zdraví, <https://svetelneznecesteni.cz/co-je-svetelne-znecesteni/lidske-zdravi/>, vyhledáno dne 18.2.2021 [online]

- [9] MAIEROVÁ Lenka. Světelné prostředí v budovách [online]. Praha, 2015, Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/76/dis-svetelne-prostredi-v-budovach.pdf>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
- [10] Mzp.cz, [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_170724_SZ/\\$FILE/ma_SZ.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/news_170724_SZ/$FILE/ma_SZ.pdf), vyhledáno dne 24.2.2021 [online]
- [11] EliHealth, <https://www.elihealth.cz/cirkadianni-rytmy-a-spanek/>, vyhledáno dne 25.2.2021 [online]
- [12] BAILEY Matthew, SILVER Rae, Sex Differences in Circadian Timing Systems: Implications for Disease [online] 2014. Dostupné z: <https://europepmc.org/article/pmc/pmc4041593>, vyhledáno dne 4.3.2021
- [13] Uspychiatra.cz, <http://www.uspsychiatra.cz/faze-rem-a-nrem/>, vyhledáno dne 29.3.2021 [online]
- [14] MYSLIVEČEK Jaromír, Základy neurověd. 2.vydání. Praha : Triton, 2009. ISBN 978-80-7387-088-1
- [15] Andrew J.K.Phillips, Parisa Vidafar, Angus C. Burns, Elise M. McGlashan, High sensitivity and interindividual variability in the response of the human circadian system to evening light 2019. Dostupné z : <https://www.pnas.org/content/116/24/12019>, vyhledáno dne 15.4.2021 [online]
- [16] Vandewalle G, et al. (2006). Daytime light exposure dynamically enhances brain responses. *Current Biology*. 16(16): p. 1616 - 1621.
- [17] Phipps-Nelson J, Redman JR, Dijk DJ, Rajaratnam SM. (2003). Daytime exposure to bright light, as compared to dim light, decreases sleepiness and improves psychomotor vigilance performance. *Sleep*. 26(6):695-700.

- [18] Figueiro M, et al. (2013). Comparisons of three practical field devices used to measure personal light exposures and activity levels. *Lighting Research and Technology*, 45(4): p. 421-434
- [19] Smolders KC, de Kort YA, Cluitmans PJ (2012). A higher illuminance induces alertness even during office hours: findings on subjective measures, task performance and heart rate measures. *Physiology and Behaviour*, 107(1): p. 7–16.
- [20] Cajochen C, et al. (2005). High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90, 1311-6.
- [21] Viola AU, et al. (2008). Blue-enriched white light in the workplace improves self-reported alertness, performance and sleep quality. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*. 34(4): p. 297-306.
- [22] Leichtfried V, et al. (2015). Intense illumination in the morning hours improved mood and alertness but not mental performance. *Applied Ergonomics* 46, p. 54-59.
- [23] Brown TM, Allen AE, al-Enezi J, Wynne J, Schlangen L, Hommes V, et al. (2013) The melanopic sensitivity function accounts for melanopsin-driven responses in mice under diverse lighting conditions. *PLoS ONE* 8(1): e53583. doi:10.1371/journal.pone.0053583.
- [24] Lumega.eu, <https://lumega.eu/blog/what-makes-led-efficientvy>, hledáno dne 23.4.2021 [online]