



Modelování citlivosti lidského oka k optickému záření

Diplomová práce

Studijní program:

N3963 Biomedicínské inženýrství

Studijní obor:

Biomedicínské inženýrství

Autor práce:

Bc. Dominik Dušek

Vedoucí práce:

prof. Ing. Michal Vík, Ph.D.

Katedra materiálového inženýrství



Zadání diplomové práce

Modelování citlivosti lidského oka k optickému záření

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Dušek**
Osobní číslo: D18000093
Studijní program: N3963 Biomedicínské inženýrství
Studijní obor: Biomedicínské inženýrství
Zadávací katedra: Fakulta zdravotnických studií
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

CÍLE PRÁCE:

Cílem práce je vytvoření jednoduchého analytického software umožňujícího vyhodnocení vlivu světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému. Systém bude zahrnovat CIE systém metrologie optického záření tak, aby bylo možné vzájemně porovnávat data z různých experimentů z hlediska jejich reálného působení na lidský organismus.

TEORETICKÁ VÝCHODISKA (VČETNĚ VÝSTUPU Z KVALIFIKAČNÍ PRÁCE):

Světlo významně ovlivňuje biologické hodiny člověka. Je známo, že v případě nevhodných světelných instalací může být negativně ovlivněn cirkadiánní rytmus člověka. Světlo může způsobit významný pokles tvorby melatoninu. Některé práce ukazují, že světlo rovněž může zvyšovat srdeční tep, přispívat k nespavosti, depresím, ovlivňovat termoregulaci a spektrum EEG. Mezinárodní Komise pro Osvětlování CIE přijala v roce 2018 nový mezinárodní standard CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light (CIE S 026/E:2018). Vzhledem k tomu, že současné měřicí systémy poskytují uživateli pouze dílčí světelně technické parametry bude jedním z výstupů této práce analytický program poskytující informace o odezvách jednotlivých fotoreceptorů, úrovni cirkadiánního světla, cirkadiánního podnětu a dalších indexech hodnotících vliv měřeného světelného zdroje na lidský organismus.

VÝZKUMNÉ PŘEDPOKLADY / VÝZKUMNÉ OTÁZKY:

1. Vliv světla a jeho spektra na kvalitu spánku člověka z pohledu biofyziky, kolorimetrie atd. - řešerše
2. Fyziologické rozdíly
3. Porovnání světelných spekter jednotlivých světelných zdrojů - rozbor spektrálních složek
4. Spektra světla v různých denních režimech - umělá/přírodní

METODA: Kvantitativní

TECHNIKA PRÁCE, VYHODNOCENÍ DAT:

Měření pomocí digitálního spektrofotometru a spektroradiometru. Zpracování naměřených dat, vyhodnocení měření, analýza nejistot.

MÍSTO A ČAS REALIZACE VÝZKUMU:

Výzkum diplomové práce bude realizován v Laboratoři měření barevnosti a vzhledu (LCAM) na Fakultě textilní TU Liberec.

VZOREK:

Zdroje světla.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

1. HABEL, Jiří. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
2. VIK, Michal. Colorimetry in textile industry. Liberec: VÚTS, 2017. ISBN 978-80-87184-65-3.
3. VIK, Michal. Měření barevnosti a vzhledu v průmyslové praxi. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-64-6.
4. SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. Fyziologie oka a vidění. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN isbn978-80-247-3992-2
5. SOKANSKÝ, Karel. Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
6. ČSN 73 6110 (736110) Projektování místních komunikací
7. ČSN EN 13201-2 Osvětlení pozemních komunikací - Část 2: Výkonnostní požadavky
8. ČSN CEN/TR 13201-1. Osvětlení pozemních komunikací – Část 1. : *Návod pro výběr osvětlení*. ÚNMZ, 2016.
9. ČSN CEN/TR 13201-2. Osvětlení pozemních komunikací – Část 2. : *Návod pro výběr osvětlení*. ÚNMZ, 2016.
10. MAIEROVÁ, Lenka. Světelné prostředí a jeho vliv na společnost v průběhu historie. *SVĚTLO: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha 8: FCC Public, 2018, 21(1). ISSN 1212-0812.
11. FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *SVĚTLO: časopis pro světlo a osvětlování*. Praha 8: FCC Public, 2010, 13(1). ISSN 1212-0812.
12. AUTRATA, Rudolf. *Nauka o zraku*. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 2002. ISBN 80-7013-362-7.

Vedoucí práce:

prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání práce:

2. září 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. června 2020

L.S.

prof. MUDr. Karel Cvachovec, CSc., MBA
děkan

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

19. července 2021

Bc. Dominik Dušek

Vážený pan
Dominik Dušek, Bc.

Vyřizuje/linka: Čermáková/485 353 194

V Liberci dne 15. června 2020
č. j.: TUL - 20/8511/020579-001

Vyjádření k žádosti o ponechání zadání a prodloužení odevzdání diplomové práce

Vážený pane Dušku,

na základě Vaší žádosti ze dne 10. 06. 2020, zaevidované pod č. j.: TUL - 20/8511/020579 Vám sděluji, že **souhlasím** s ponecháním zadání diplomové práce a s prodloužením termínu odevzdání do 30. 06. 2021.

S pozdravem

prof. MUDr. Karel Čvachovec, CSc., MBA
děkan



Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Michalu Víkovi, Ph.D. za přínosné rady, připomínky, odborné vedení a zapůjčení veškerého technického vybavení pro realizaci diplomové práce.

Abstrakt

Jméno a příjmení autora: Bc. Dominik Dušek

Instituce: Technická univerzita v Liberci,
Fakulta zdravotnických studií

Název práce: Modelování citlivosti lidského oka k optickému záření

Vedoucí práce: prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Počet stran: 94

Počet příloh: 3

Rok obhajoby: 2021

Anotace: Cílem práce je vytvoření jednoduchého analytického software umožňujícího vyhodnocení vlivu světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému. System bude zahrnovat CIE systém metrologie optického záření tak, aby bylo možné vzájemně porovnávat data z různých experimentů z hlediska jejich reálného působení na lidský organismus.

Klíčová slova: světlo, cirkadiánní rytmus, spektrální charakteristiky, veřejné osvětlení, LED zdroj

Abstract

Name and surname: Bc. Dominik Dušek

Institution: Technical university of Liberec,
Faculty of Health Studies

Title: Modeling of human eye sensitivity to optical radiation

Supervisor: prof. Ing. Michal Vik, Ph.D.

Pages: 94

Apendix: 3

Year: 2021

Annotation: The aim of this work is to create a simple analytical software enabling the evaluation of the influence of light sources on the visual and non-visual response of the human visual system. The system will include a CIE system of optical radiation metrology. Due to this system will be possible to compare data from different experiments in terms of their real effect on the human body.

Key words: light, circadian rhythm, spectral characteristics, public lighting, LED source

Obsah

Seznam použitých zkratk	13
Přehled fyzikálních jednotek ve fotometrii	14
1 Úvod	15
2 Teoretická část	16
2.1 Anatomie zrakového systému	16
2.1.1 Sítnice	17
2.1.2 Světlolomná prostředí oka	17
2.1.3 Čočka	18
2.1.4 Zraková dráha	18
2.1.5 Zornice	18
2.1.6 Vývoj zrakového ústrojí	19
2.1.7 Nervový systém oka	19
2.1.8 Cévní zásobení oka	19
2.2 Fyziologie zrakového systému	20
2.2.1 Princip vidění	20
2.2.2 Zrak	21
2.2.3 Rozlišování barev – teorie barevného vidění	22
2.2.4 Funkce tyčinek	22
2.2.5 Funkce čípků	22
2.2.6 Poruchy barvocitu	23
2.2.7 Retinální gangliové buňky ipRGC	25
2.2.8 Cirkadiánní rytmus člověka	25
2.2.9 Koncept α -opických odezev dle normy CIE S 026/E:2018	28
2.3 Účinky světla na člověka	32
2.3.1 Rušivé světlo v životním prostředí člověka	33

2.4	Základní pojmy světelné techniky	34
2.4.1	Světelný tok	34
2.4.2	Prostorový úhel	34
2.4.3	Svítivost	35
2.4.4	Osvětlenost (intenzita osvětlení).....	35
2.4.5	Jas	35
2.4.6	Intenzita světlení	35
2.4.7	Náhradní teplota chromatičnosti T_{CP} (K).....	36
2.5	Světelné zdroje.....	36
2.5.1	Halogenidové zdroje	36
2.5.2	Vysokotlaké sodíkové výbojky	37
2.5.3	LED.....	38
2.6	Svítidla veřejného osvětlení.....	44
2.6.1	Konstrukce	44
2.6.2	Ovládání veřejného osvětlení.....	45
2.6.3	Využití LED diod pro veřejné osvětlení	47
2.7	Legislativa.....	49
2.7.1	Požadavky	50
3	Výzkumná část.....	51
3.1	Cíle a výzkumné předpoklady	51
3.2	Metodika výzkumu	51
3.2.1	Experiment 1 - Měření světelných zdrojů ve fotometrické rovině C- γ ..	51
3.2.2	Experiment 2 - Měření světelně-technických parametrů v pěší zóně.....	63
3.2.3	Experiment 3 - Vývoj analytického software	68
4	Diskuse	75
5	Návrh doporučení pro praxi	77
6	Závěr	78

Seznam použité literatury	79
Seznam příloh	83

Seznam použitých zkratek

T _{CP}	náhradní teplota chromatičnosti
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
R _a	index podání barev
event.	eventuálně
FOV	zorné pole
FZS	Fakulta zdravotnických studií
HDR	High Dynamic Range
ipRGC	vnitřně fotocitlivé gangliové buňky sítnice
LED	svítivé diody
NIF	non-image-forming
TUL	Technická univerzita v Liberci
VO	Veřejné osvětlení

Přehled fyzikálních jednotek ve fotometrii

Tab.1 Ukázka fyzikálních jednotek ve fotometrii

veličina	symbol	jednotka SI	označení
Intenzita osvětlení	E_V	lux	$\text{lx} = (\text{lm} \cdot \text{m}^{-2})$
Jas	L, L_V	kandela na metr čtverečný	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$
Měrný světelný výkon	K	lumen z wattu	$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$
Světelný tok	Φ, F	lumen	$\text{lm} = (\text{cd} \cdot \text{sr})$
Svítivost	I, I_V	kandela	$\text{cd} = (\text{lm} \cdot \text{sr}^{-1})$
Vlnová délka	λ	metr	

1 Úvod

Díky velkému rozmachu světelných zdrojů či nevhodných světelných instalací dochází velmi často k negativnímu ovlivnění cirkadiánního rytmu člověka. Příkladem mohou být např. podsvícené reklamní plochy, billboardy či nevhodně umístěné výložníky svítidel veřejného osvětlení, jejichž světlo může procházet okny do místností budov. Rušivé světlo může ve večerních a nočních hodinách narušovat spánek, způsobovat deprese, zvyšovat srdeční tep, ovlivňovat termoregulaci či způsobit akutní potlačení uvolňování spánkového hormonu melatoninu. Většina norem a předpisů se v oblasti osvětlení zaměřuje především na vizuální a energetické aspekty, ale neřeší reakce na světlo, které nevytváří obraz.

Klasické fotoreceptory pro vidění, čípky a tyčinky jsou známy již dlouho. Díky rozsáhlému výzkumu bylo zjištěno, že oko disponuje jiným druhem fotoreceptoru. Jde o tzv. vnitřně fotocitlivé gangliové buňky sítnice - ipRGC. Tyto receptory mají vynikající citlivost zejména v oblasti viditelného spektra s kratšími vlnovými délkami.

Teoretická část popisuje anatomii i fyziologii zrakového systému včetně účinků světla na člověka. Následně jsou popsány základní fotometrické veličiny a jednotlivé světelné zdroje, které jsou využívány ve veřejném osvětlení. Na závěr teoretické práce je shrnuta legislativa týkající se požadavků na veřejné osvětlení.

Primárním cílem výzkumné části práce je vytvoření analytického software, který by na základě vstupních dat dokázal vyhodnotit vliv světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského oka. Díky tomuto programu bude snazší analyzovat a porovnávat výsledky z jednotlivých měření a různých světelných zdrojů. Dalším cílem je naměření osvětlenosti svítidel veřejného osvětlení ve veřejném prostoru. Dále v této části práce bude patřičně poukázáno na nevhodnou instalaci veřejného osvětlení ve veřejném prostoru. Dalším cílem práce je sestavení speciálního temného boxu, který by umožnil měřit jednotlivé světelné zdroje ve fotometrické rovině C- γ .

2 Teoretická část

2.1 Anatomie zrakového systému

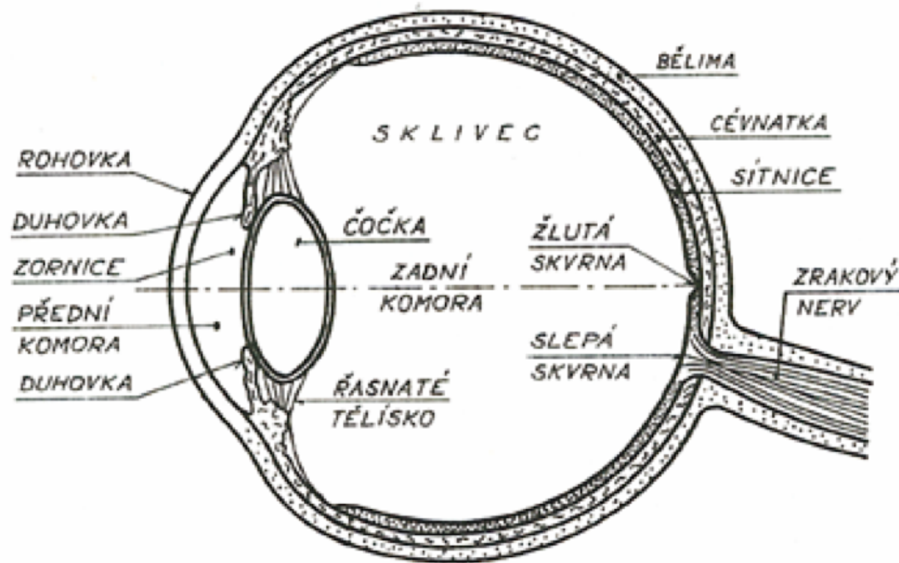
Lidské oko je párový orgán uložený v očnici na tukovém polštáři. Má tvar koule (bulbus oculi), jehož průměr dosahuje přibližně 24 mm. Stěna oční koule se skládá ze tří vrstev – rohovka a bělima, žloutka (duhovka, řasnaté tělísko a cévnatka) a sítnice. Pohyby oka jsou zajištěny pomocí šesti okohybných svalů, které jsou upnuté k bělimě. Tyto svaly jsou inervovány III., IV. a VI. hlavovým nervem. Celé zrakové ústrojí se skládá z oční koule, zrakového nervu a z pomocných ústrojích oka, k nimž patří nervy, cévy oka, víčka, slzný aparát a okohybné svaly. (1) (2)

Koule oční má tvar nepravidelné koule. Z vnějšku je možné vidět pouze přední část, která je nejvíce vyklenutá menší část koule oční. Jde o rohovku, ke které přiléhají části bělimy. Větší část koule se nachází v hloubce očnice. Nejmhutnější hmota oční koule se nachází v jejím nitru. Jedná se o sklivec, komorový mok a čočku. Stěna koule je tvořena vnitřní, střední a zevní vrstvou, která je nejpevnější z vrstev koule oční. Její pevnost udržuje tvar koule oční. (2)(3)

Přední a menší část zevní vrstvy koule oční se nazývá rohovka (cornea). Tvoří 1/6 z celé stěny koule oční. Jedná se o nejvypouklější část koule oční. Má vzhled dutovypouklé čočky. Tkáň rohovky je zcela homogenní, což znamená, že neobsahuje lymfatické ani krevní cévy. Je tedy zcela průhledná. (2) (3)

Zadní a zároveň větší část zevní vrstvy oční koule tvoří bělima (5/6 stěny koule oční). Tvoří ji tuhá vazivová a elastická vlákna. Je neprůhledná. Na hranici mezi rohovkou a bělimou se nachází polopropustný proužek. Bělima je v přední části oční koule pokryta spojivkou a v zadní části přechází do prostoru řídkého. Střední vrstva koule oční je tvořena z cévnatky, řasnatého tělesa a duhovkou, která je viditelná skrze rohovku. (2)(3)

Řasnaté těleso obsahuje akomodační svaly, které pomáhají při akomodaci čočky. Cévnatka je tvořena hustou sítí silných cév, mezi kterými se nachází vazivová vlákna a pigmentové buňky. Nachází se v přední části oka a přechází v řasnaté tělísko a duhovku s kruhovým otvorem – zornicí. Celkový popis oka je možné vidět na Obr. 1. (2) (3)



Obr. 1 Popis oka (4)

2.1.1 Sítnice

Sítnice neboli vnitřní vrstva stěny koule oční má velmi složité uspořádání. Můžeme ji rozdělit na dvě části. Část přední (často nazývána slepou částí sítnice) je menší a neobsahuje světločivné elementy. Zadní část je větší a obsahuje světločivné elementy. Dále se v sítnici nachází skvrna (macula lutea). Jde o místo, kde je nejostřejší vidění. Tato skvrna je někdy nazývána jako žlutá a nachází se zde pouze číčky. Sítnice obsahuje světločivné buňky, mezi které patří tyčinky (120 milionů) a číčky (6 milionů). Za tzv. slepou skvrnu se považuje místo výstupu nervových vláken zrakového nervu z bulbu, kde se nenachází žádné světločivné elementy. (2) (3) (5)

2.1.2 Světlolomná prostředí oka

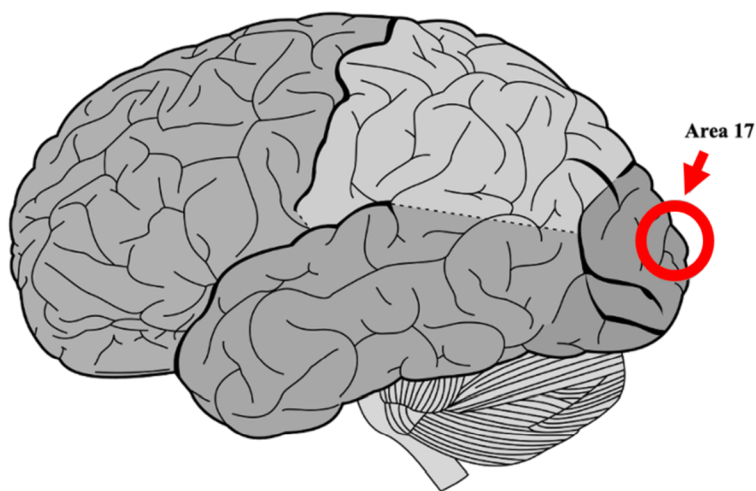
Světlolomná prostředí koule oční se kromě rohovky skládají také ze sklivce, čočky a komorového moku. Sklivec je pokrytý průzračnou membránou a zaujímá většinu obsahu koule oční. Skládá se z rosolovité hmoty, která není tvořena cévami ani nervy. Samotná čočka má tvar bikonvexní čočky. Tvoří ji přední a zadní plocha. Zadní plocha čočky je vypouklejší než přední a zároveň na ni naléhá sklivec. Přední plocha čočky je obrácena k duhovce. Na povrchu čočky se nachází obal. Čočka je uložena mezi duhovkou a sklivcem. (2) (3)

2.1.3 Čočka

Čočka umožňuje díky své pružnosti měnit svoji dioptrickou mohutnost. Tomuto jevu se říká akomodace. V případě, že by se dioptrická mohutnost oka nezvýšila, paprsky by se neprotínaly na sítnici a člověk by neviděl ostře. Schopnost akomodace čočky je posuzována pomocí tzv. blízkého bodu. Jedná se o nejkratší vzdálenost bodu (či předmětu) od oka, kdy tento předmět vidíme ještě ostře. S přibývajícím věkem se tato vzdálenost prodlužuje, což je zapříčiněno klesající pružností čočky. Průměr čočky je přibližně 9 mm a tloušťka 3,7mm. (1) (5) (6)

2.1.4 Zraková dráha

Jedná se o dráhu, která je tvořena přibližně 1 milionem nervových vláken gangliových buněk sítnice o oka (očního bulbu). Vjem vidění vzniká, když informace ze sítnice dorazí do oblasti mozkové kůry. Tato oblast se nazývá Area 17 a nachází se v primární projekční oblasti v okcipitálním laloku (viz Obr. 2). V oblasti Area 17 je analyzována barva. (5)



Obr. 2 Area 17 (Zdroj: Autor)

2.1.5 Zornice

Zornice také nazývána pupila tvoří otvor v duhovce. V závislosti na intenzitě osvětlení se mění její průsvit. V případě velkého osvětlení dochází k zúžení zornice (mióze). V opačném případě dochází k rozšíření zornice (mydriáza). Zornice lidského oka funguje na podobném principu jako například fotografická clona. Průměr zornice se mění pomocí vegetativního nervového systému. (2) (5)

Prostor mezi duhovkou a rohovkou je nazýván přední oční komora. Jako zadní oční komora je označován prostor mezi přední plochou čočky a zadní plochou duhovky. Celé oko je uloženo v komoře oční, která se dělí na dvě části – přední a zadní. Obě tyto části komory jsou vyplněné očním komorovým mokem (bezbarvá tekutina). Komunikace obou částí komory je zajištěna pomocí pupily. Celé oko je kryté horním a dolním víčkem. Dále slzní ústrojí je tvořeno ze slzných žláz a vývodných cest slzných. Pohyb celého oka je zajištěn pomocí okohybných svalů, které pohybují oční koulí. Mezi tyto svaly patří čtyři přímé svaly a dva svaly šikmé. Každý ze čtyř přímých svalů jde dopředu podél příslušné očnice, ve které proráží vazivové pouzdro oční koule a dostává se ke kouli oční. (2) (3) (5)

2.1.6 Vývoj zrakového ústrojí

Zrakové ústrojí člověka se vyvíjí již od třetího týdne nitroděložního života. Jeho rozvoj je ukončen až v začátku školních let. Každý zrakový orgán se vyvíjí z různých embryonálních složek. (2)

2.1.7 Nervový systém oka

Nervová vlákna sítnice se sbíhají do oblasti zadního pólu oka, z něhož vystupuje jejich svazek jako zrakový nerv (nervus opticus). K oční kouli přiházejí nervy n. ciliares longi a n. breves. Nervy se dostávají k zadnímu okraji oční koule. Zde proráží bělimu (skléru) a k oběma vrstvám stěny oční koule připojují tenké větévky. Oční víčka jsou inervována sensitivně pomocí první větve trojklaného nervu (horní víčko) a druhé větve (dolní víčko). (2) (3)

2.1.8 Cévní zásobení oka

Oční koule je cévně zásobena pomocí větví a. ophthalmica. Tato arterie vede ke kouli oční a. ciliares posteriores longae (duhovka) a a. ciliares anteriores (spojivka). Cévní zásobování sítnice je zabezpečeno pomocí a. centralis retinae, která vstupuje do nervus optického nervu přibližně 10 mm za okem a spolu s nervem pokračuje do jeho papily. (2) (7)

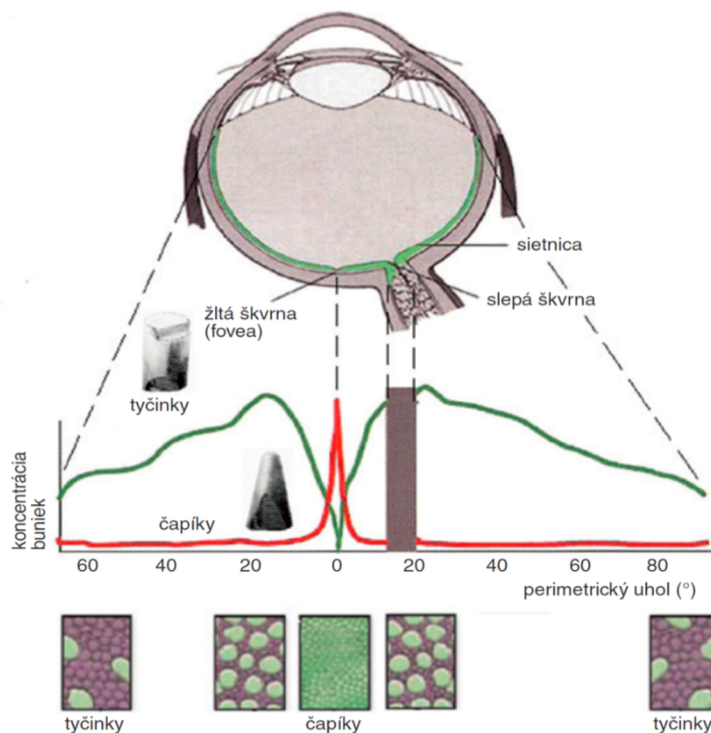
Veškerá krev z lidského oka je odváděna pomocí v. centralis retinae, která spolu se stejnojmennou tepnou probíhá uvnitř n. opticus. Z ostatních částí oční koule odtéká do vén ciliares a vorticosae (4-6 cév). (2)

2.2 Fyziologie zrakového systému

2.2.1 Princip vidění

V sítnici lidského oka se nachází receptory, které jsou odpovědné za vizuální a nevizuální odezvy. Vizuální odezvu mají na starosti tyčinky a čípky. Jedná se o zrakové receptory, ke kterým se světlo dostává skrze optický (lomivý) aparát oka, který je tvořen rohovkou a čočkou. Odezvu nevizuální zabezpečují melanopsinové receptory, které jsou odpovědné např. za řízení biologických hodin v lidském těle. (1) (5)

Lidské oko se dokáže adaptovat na široký rozsah jasu od 10^{-6} (plamen svíčky) do 10^8 $\text{cd}\cdot\text{m}^2$ (Slunce). Dále je schopné rozlišit přibližně až 7500 individuálních odstínů barvy. Rozložení světlocitlivých receptorů je možné vidět na Obr. 3. (8)



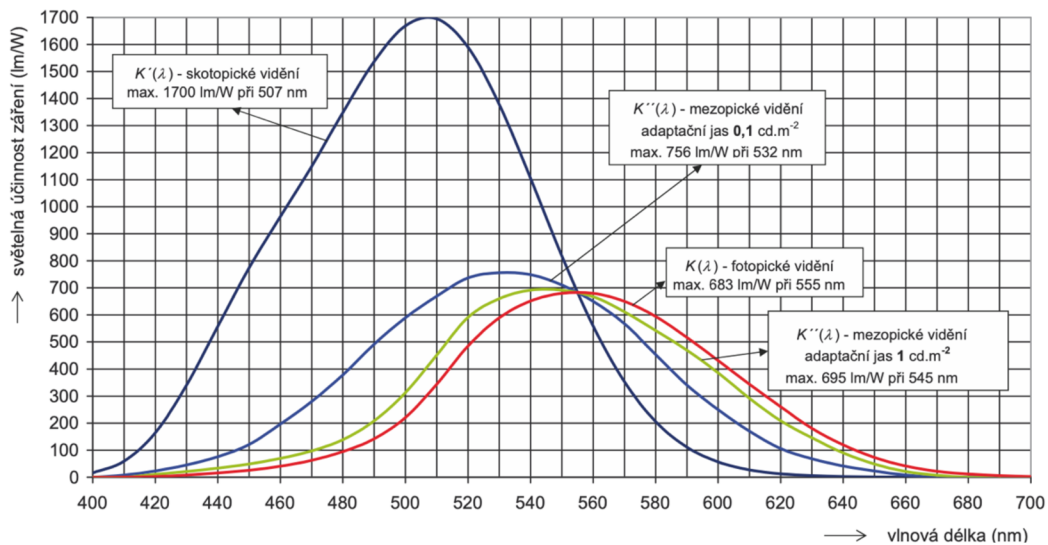
Obr. 3 Rozložení tyčinek a čípků na sítnici oka (11)

Tyčinky se uplatňují ve vidění večer a v noci (skotopické vidění). Jedná se o citlivé receptory, které však díky svému napojení na nervovou soustavu neumožňují ostré vidění. Na druhou stranu jsou tyto receptory přibližně 2,5krát citlivější na světelné záření než čípky. Je třeba zmínit, že tyčinky nejsou citlivé na červenou barvu (650-750 nm). Z tohoto důvodu např. červené brýle propouštějí pouze tu část světla, na kterou reagují pouze čípky a tyčinky zůstávají adaptovány na tmu. Tato vlastnost je aktivně používána například při

nočních vojenských operacích či v rentgenologii, kde je potřeba, aby se zrak rychle adaptoval tmě. (1) (8) (11)

Naopak pro vidění barevné se využívají čípky, které k tomu vyžadují určitou hladinu osvětlení. Toto vidění je nazýváno jako fotopické. V lidském oku se nachází 3 čípkové pigmenty s různým absorpčním maximem. Jde o modré čípky (S-445 nm), zelené (M-535nm) a červené (L-570nm). Lidské oko člověka má různou citlivost na světlo při různých vlnových délkách. Ve dne při fotopickém vidění je oko nejcitlivější na žlutozelenou barvu (555 nm). Naopak za šera při skotopickém lidské oko nejcitlivější na modrozelenou barvu (500 nm). V případě, že dojde k zapojení tyčinek a čípků současně, hovoříme o tzv. mezopickém (soumračném) pásmu vidění (viz Obr. 4). (1) (8) (9) (11)

Skotopické vidění je používané při hladině jasu menší než $0,005 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. V případě mezopického vidění se tato hodnota pohybuje mezi $0,005$ až $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. Nad $5 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ je používané fotopické vidění. (10)



Obr. 4 Porovnání hodnot světelných účinků záření (13)

2.2.2 Zrak

Zrak člověka je považován za nejvýznamnější lidský smysl. Pomocí zraku jsme schopni vnímat světlo či tmu, ale také rychlost světla, směr či pohyb. Dále díky zraku dokážeme identifikovat předměty v okolí či se orientovat v prostoru. Lidský zrak předává přibližně 60-65 % veškerých informací. Lidské oko umožňuje člověku vnímat světlo v rozsahu od 380 do 760 nm elektromagnetického vlnění. (5) (8)

2.2.3 Rozlišování barev – teorie barevného vidění

Barevné vidění je složitý fyziologický proces. Pomocí lidského oka dochází k rozeznávání různých barev. Jde o zrakový vjem, který je podmíněn vlnovou délkou světla. Světelná spektra dopadají do oka, kde dochází k podráždění světločivných elementů, které reagují na barvu – čípků. (5) (14)

Jak již bylo zmíněno, na sítnici lidského oka se nachází receptory, které jsou citlivé na světlo (viz Obr. 5). Zde dochází k procesům absorpce světla na fotoreceptorech sítnice a převádí se zde akční potenciály ze sítnice do zrakových korových ústředí nacházejících se v mozku. Receptory umístěné na sítnici se nazývají tyčinky a čípky, na které navazují horizontální a bipolární buňky. Dále se zde nachází amakrinní buňky, které paralelně propojují bipolární a gangliové buňky. Gangliové buňky poté vedou vzruch do podkorových center a zároveň vytváří vlákna II. Hlavového nervu n. opticus (oční nerv). Další neuron spojuje podkoří se zrakovou kůrou. (5) (8) (14)

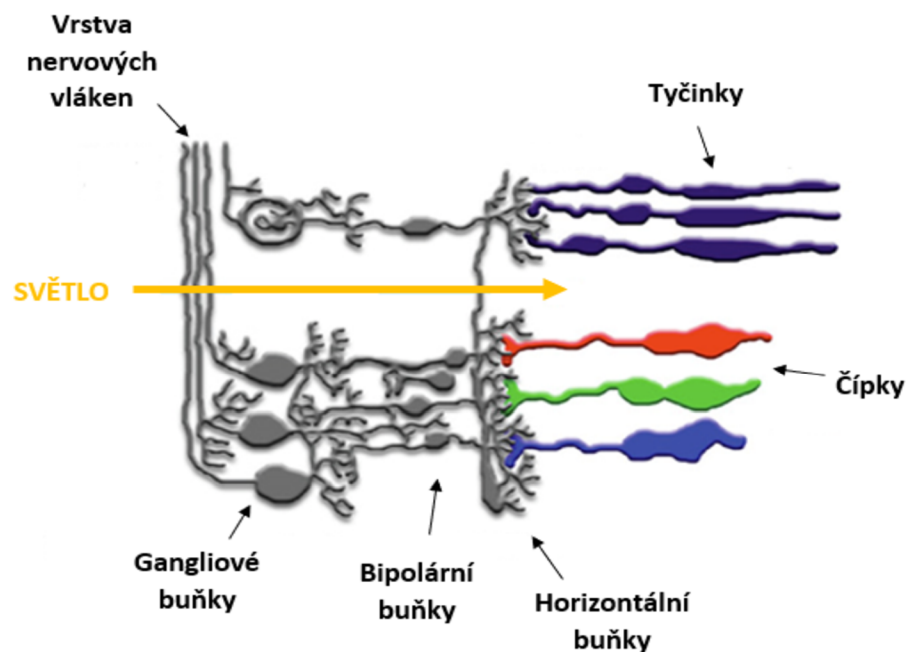
2.2.4 Funkce tyčinek

Tyčinky mají charakteristický tvar, který je stejný ve všech částech sítnice. Obsahují pigment zvaný rodopsin. Při působení světla se rodopsin rozkládá na opsin a retinal a mění svou barvu na žlutou. Jedná se o velmi rychlou a reverzibilní reakci. Pokud dojde k velmi silnému osvětlení, začne se měnit retinal na retinol a jeho barva se začne měnit na bílou. Jde o reverzibilní pomalý proces. K tomu, aby došlo k podráždění tyčinky, stačí energie 1 fotonu. Zcela výjimečně dochází k podráždění čípků, kdy je zapotřebí několik stovek fotonů. Můžeme tedy říct, že tyčinky jsou citlivější (mají nižší práh) než čípky. Jejich průměr je 0,0002 mm (4) (5) (14)

2.2.5 Funkce čípků

Na rozdíl od tyčinek jsou čípky mnohem tlustší a jejich tvar je lahvovitý. Skládají se ze dvou částí – zevního a vnitřního segmentu. Zevní segment je užší a fotosenzitivní. Naopak vnitřní segment je širší. Největší koncentrace čípků se nachází v tzv. žluté skvrně, v níž se nachází malá jamka (fovea centralis). Jedná se o místo, kde dochází k nejostřejšímu vnímání předmětů. V tomto místě se na 1 čípek napojuje 1 neuron. Od středu centrální jamky směrem k periférii postupně klesá hustota čípků. Čípky umožňují rozeznávání barev, intenzity světla a jejich sytosti. Barva světla je závislá na vlnové délce.

Pro celý proces vidění je důležitý výkon (zářivý tok zdrojů a jeho prostorové rozdělení světla), nikoliv vyzářená energie na zdroji za čas. V případě hodnocení kvality osvětlení se posuzuje, do jaké míry osvětlení napomáhá zpracování informace přinášeném světlem a jak usnadňuje proces vidění a vznik zrakového vjemu. Z tohoto důvodu se ve světelné technice neposuzují energetické veličiny (zářivost, zářivý tok atd.), ale pracuje se především s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují různé citlivosti lidského oka pozorovatele o různých vlnových délkách. Celkový průměr čípků činí přibližně 0,005-0,006 mm. (4) (5) (16)



Obr. 5 Rozložení jednotlivých receptorů na sítnici oka (Zdroj: Autor)

2.2.6 Poruchy barvocitu

Poruchy barvocitu můžeme rozdělit na dvě skupiny - získané a vrozené. Dále se dělí dle stupně postižení barevného vidění a také podle toho, jaká barva je vnímána chybně. Je třeba říct, že existují lidé, kteří nemají schopnost barevného vidění. Tito lidé mají poruchy čípků, které nemusí být v sítnici přítomny. Jedná se o tzv. monochromazii. (13) (17)

Dále je třeba zmínit vady anomalické a dichromatické. Anomalické vady se vyznačují sníženou citlivostí čípků (protanomálie, deuteromálie a tritanomálie). Naopak dichromatické vady můžeme rozdělit na 3 typy. Jedná se o protanopii – chybí L (červené) čípky, deuteranopii – chybí M (zelené) čípky barvy a tritanopii – chybí S (modré) čípky. Protanopie či deuteranopie častěji postihuje muže a tritanopie naopak ženy. Těmito

vadami v Evropě trpí přibližně 8 % obyvatelstva, přičemž 7 % je mužského pohlaví. (8)
(17)

K vyšetření barvocitu se nejčastěji používají pseudoizochromatické tabulky, u kterých jsou z barevných skvrn sestavena písmena, číslice nebo geometrické obrazce. Pro přesnější stanovení poruchy barvocitu se velmi často používá Nagelův anomaloskop. Jde o přístroj, kde je v okuláru rozdělené pole na 2 poloviny. Jedna polovina obsahuje spektrální žlutou barvu a ve druhé polovině vyšetřovaný pacient míchá z červené a zelené barvy stejnou barvu. Celkový výsledek je uváděn ve kvocientu anomálie. Nagelův anomaloskop je velmi často využíván k diagnostice poruchy vnímání červené a zelené barvy. Mezi přesnější vyšetření poruchy barvocitu patří Farnsworth-Munsell 100 – hue test (viz Obr. 6). (17)



Obr. 6 Ukázka Farnsworth-Munsell 100 testu v laboratoři LCAM TUL (Zdroj: Autor)

Jedná se o vyšetření, kde pacient s pomocí 85 terčů sestavuje kompletní barevné spektrum. Výhodou tohoto typu vyšetření je možnost diagnostiky získaných poruch barvocitu, která je úzce spojena onemocněním sítnice či zrakové dráhy. Zkrácenou verzí tohoto testu je Farnsworth-Munsell D15 test (viz Obr. 7). (17)



Obr. 7 Ukázka Farnsworth-Munsell D15 testu v laboratoři LCAM TUL (Zdroj: Autor)

2.2.7 Retinální gangliové buňky ipRGC

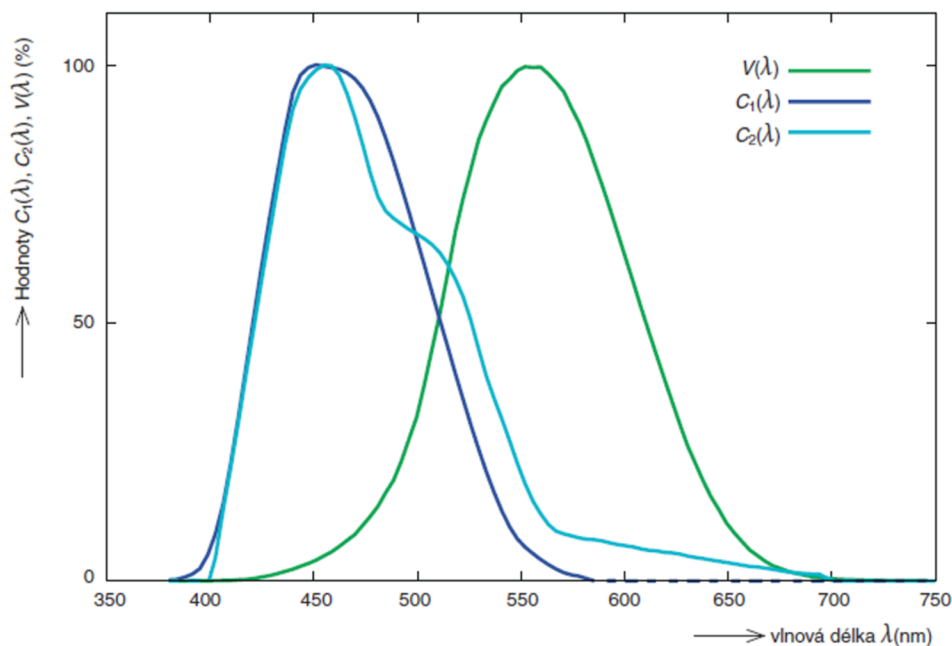
V posledních letech bylo zjištěno, že se v oku kromě tyčinek a čípků nachází také další receptory, mezi které patří sítnicové gangliové buňky ipRGC. Tento fotoreceptor hraje velmi důležitou roli v nevizuálních účincích světla. Fotocitlivost těchto receptorů je založena na fotopigmentu zvaném melanopsin, který je v těchto buňkách obsažen. Gangliové buňky jsou fotocitlivé a přispívají k vidění jen velmi málo. Hlavním přínosem těchto buněk je pupilární světelný reflex (změna velikosti zornice) a činnost cirkadiánního rytmu. (8) (21)

Sítnicové gangliové buňky se nachází po obvodu celé sítnice. Odlišují se od tyčinek a čípků, které slouží jako vizuální buňky. Sítnicové retinální buňky jsou nejcitlivější na světlo při krátkých vlnových délkách okolo 480 nm (modrá) a naopak nejméně jsou citlivé na dlouhé vlnové délky v rozsahu 595-660 nm (červená). (8)

2.2.8 Cirkadiánní rytmus člověka

Jde o soubor behaviorálních a fyzických procesů rozvržených do 24 hodin. Dále tento rytmus výrazně ovlivňuje cykly spánku-bdění, krevní tlak, tělesnou teplotu, uvolňování hormonů či aktivitu trávicího traktu. Pojem cirkadiánní byl v padesátých letech minulého století zaveden americkým vědcem Franzem Halbergem. Je považován za jednoho ze zakladatelů chronobiologie. Za nejznámější české chronobiology patří prof. Helena Illnerová, která jako první se svými kolegy prokázala, jakým způsobem změna délky osvětlení během střídání ročních období ovlivňuje rytmus v tvorbě melatoninu v epifýze. (9) (14) (18)

Dále byly účinky světla na živé organismy zkoumány německým očním lékařem a profesorem Fritzem Hollwichem. Profesor Hollwich je mimo jiné autorem učebnice oftalmologie a mnoha dalších léčebných postupů. Následně zjistil, že některé druhy světla, jeho nedostatek, nadbytek případně dlouhodobá neměnnost mají na živočichy nežádoucí účinky. Možné průběhy citlivostí cirkadiánního čidla se nachází na Obr. 8. (9) (14)



Obr. 8 Možné průběhy poměrné citlivosti (účinnosti) cirkadiálního čidla $C(\lambda)$ a křivka spektrální citlivosti lidského zraku $V(\lambda)$ (18)

Je všeobecně prokázáno, že světlo může ovlivnit vizuální cirkadiální systém, výkon, kognitivní výkon nebo náladu člověka. Některé studie se zabývají například vlivem různých hodnot CS (cirkadiálního stimulu) a CCT v různých časových obdobích. Data ukazují, že existují významné účinky světla (délka trvání expozice, spektrum atd.), na noční potlačení melatoninu. Ve některých studiích bylo prokázáno, že osvětlení s vysokým CCT vede k vyššímu pracovnímu výkonu. (19)

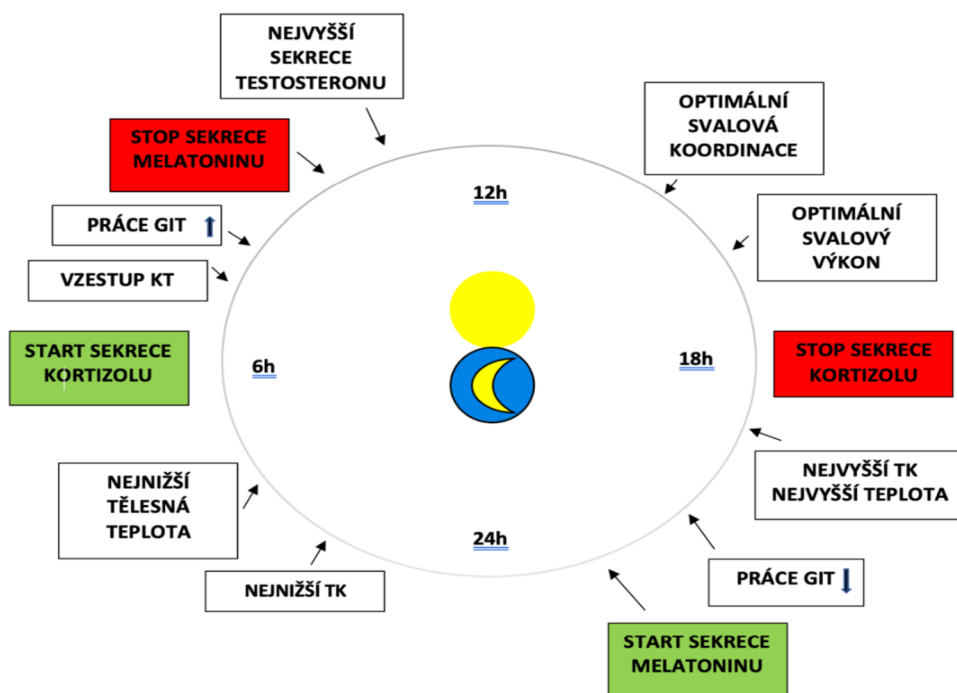
V lidském organismu dochází k maximálnímu výkonu mezi 8-11 a 20-23 hodinou. Výkonnostní poklesy člověka nastávají v době mezi 3-7 a 13-16 hodinou. Celý cyklus je řízen suprachiasmatickým jádrem (SCN) předního hypotalamu. Ten řídí 24hodinový rytmus (viz Obr. 9) elektrické aktivity i při absenci podnětů ze zevního prostředí. Tato cyklická aktivita je odrazem rytmické exprese genů SCN jádra nazvaných "clock genes". Ty jsou následně autoregulovány prostřednictvím mnoha zpětnovazebních smyček. Mezi dva hlavní synchronizátory SCN patří melatonin a světlo, které způsobují fázový posun v cyklu a změnu bdělosti. (9) (14)

Celkově platí, že světlo patří mezi hlavní synchronizátor biologických hodin člověka lidského organismu. Vyzařované modré světlo (například LED diody) stimuluje aktivitu, neboť podporuje hormonální stimulaci. Dále způsobuje akutní potlačení nočního uvolňování melatoninu. V současné době také existují publikace, které říkají, že světlo

může zvyšovat srdeční frekvenci, ovlivnit termoregulaci, zlepšit bdělost či ovlivnit spektrum elektroencefalogramu (EEG). Žárovky jsou jako jediný umělý zdroj světla plnospektrální. Dle odborníků by se měly LED diody používat ráno k nastartování organismu a přes den k udržení kondice. Naopak před spaním by se měl člověk vrátit k žárovkám (s reostatem), aby tělo mohlo dodržet normální denní rytmus a začít s produkcí melatoninu. (9) (14) (18)

Cirkadiánní rytmus výrazně ovlivňuje práce v nočních hodinách. Po noční směně je spánek u člověka obvykle o 1-4 hodiny kratší oproti denní směně a má nižší kvalitu s méně spánkovými stadii 2. NREM a REM fáze. 3. a 4. NREM fáze spánku zůstávají do značné míry nedotčeny. Přibližně po 4-6 hodinách spánku se člověk obvykle probouzí, ale již nemůže znovu usnout. Cirkadiánní rytmus neumožňuje správnou adaptaci na noční práci, protože cyklus světelné tmy zůstává mimo fázi cyklu spánku-bdění. Přibližně 70 % pracovníků si stěžuje na špatný spánek nebo denní ospalost. (9) (14)

V porovnání s pracovníky, kteří pracují ve dne, si lidé pracující v noci stěžují na ospalost v zaměstnání. Ve výsledku jsou tyto lidé méně ochotní a méně dobře pracují na úkolech, nejsou ostražití a jsou podráždění. V dnešní době patří problémy se spánkem mezi běžné tzv. civilizační choroby. (9) (14)



Obr. 9 Průběh cirkadiánního rytmu člověka (Zdroj: Autor)

Dle některých publikací mohou až 3 % jedinců trpět poruchou cirkadiánním rytmu (spánek / bdění), nicméně toto číslo může být až 10 % u dospělých a 16 % adolescenti kvůli zmeškané diagnóze nebo chybné diagnóze podle některé studie. Podle mezinárodní klasifikace spánkových poruch 3. vydání (ICSD-3) rozděluje 6 hlavních typů cirkadiánního rytmu poruch spánku/bdění. Patří mezi ně pokročilý typ spánkové fáze, typ fáze zpožděného spánku, typ nepravidelného spánku/ bdění, jet lag či typ práce na směny. (20)

2.2.9 Koncept α -opických odezev dle normy CIE S 026/E:2018

V současné době existují přesvědčivé vědecké důkazy, že světlo není nezbytné pouze pro vidění, ale je také důležité pro biologické účinky hrající zásadní roli pro lidské zdraví, výkonnost a celkovou pohodu. Jedná se o tzv. nevizuální efekty světla (NIF). Ty jsou odlišné od kožních reakcí na optické záření (produkce vitamínu D, solární dermatitida či rakovina kůže). (21)

Tato norma se nezaměřuje na účinky světla, které netvoří obraz zprostředkovaný očima. Jde o efekty závisící na rozdělení spektrálního výkonu, prostorovém rozdělení či době expozice světla. Dále závisí na konkrétních parametrech jednotlivých osob (cirkadiánní fáze či historie vystavení světlu). Ve vědách zkoumajících světlo je také důležité definovat standardní fyzikální veličiny založených na akčním spektru (průměrná citlivost na světlo). Jak již bylo zmíněno, světlo je hlavním synchronizátorem biologických hodin člověka. Díky němu lze posunout fázi cirkadiánního rytmu či určit načasování cyklu spánku/bdění. Dále může způsobit akutní potlačení uvolňování melatoninu. Vystavení světlu vyvolává rychlé reakce (v rozmezí milisekund a sekund) v pupilárním reflexu či v mozkové aktivitě. (21)

Je nutné říct, že veškeré normy, předpisy či jiné v oblasti osvětlení se velmi často zaměřují na vizuální a energetickou účinnost, a naopak nezabývají se nevizuálními účinky na světlo. Tento problém může vést k podmínkám, které mohou ohrožovat pohodu, zdraví a celkovou funkčnost člověka. Tyto biologické účinky jsou vyvolávány stimulací oka fotoreceptory. Klasické receptory pro vidění (tyčinky a čípky) jsou již dostatečně charakterizovány ve stávajících publikacích CIE a jiných zdrojích. (21)

Díky rozsáhlému výzkumu bylo odhaleno, že lidské oko disponuje jiným druhem fotoreceptoru. Tento fotoreceptor hraje důležitou roli v nevizuálních účincích světla a

jeho maximální citlivost se pohybuje v oblasti kratších vlnových délek viditelného spektra. Jde o již zmíněné gangliové buňky (ipRGC), jejichž citlivost je založena na fotopigmentu melanopsin, který je v nich obsažen. (21)

Je třeba říct, že u nevizuálních účinků, které nevytváří obraz, popis optického záření pouze podle spektra fotopické akce není dostatečné, neboť zatím neexistuje jednotné akční spektrum pro nevizuální odezvy. Skutečné účinky NIF v důsledku vystavení očnímu světlu závisí na kombinované odpovědi všech fotoreceptorů a existují dobré důkazy o potenciálu pro všechny typy receptorů, které přispívají k těmto reakcím. (21)

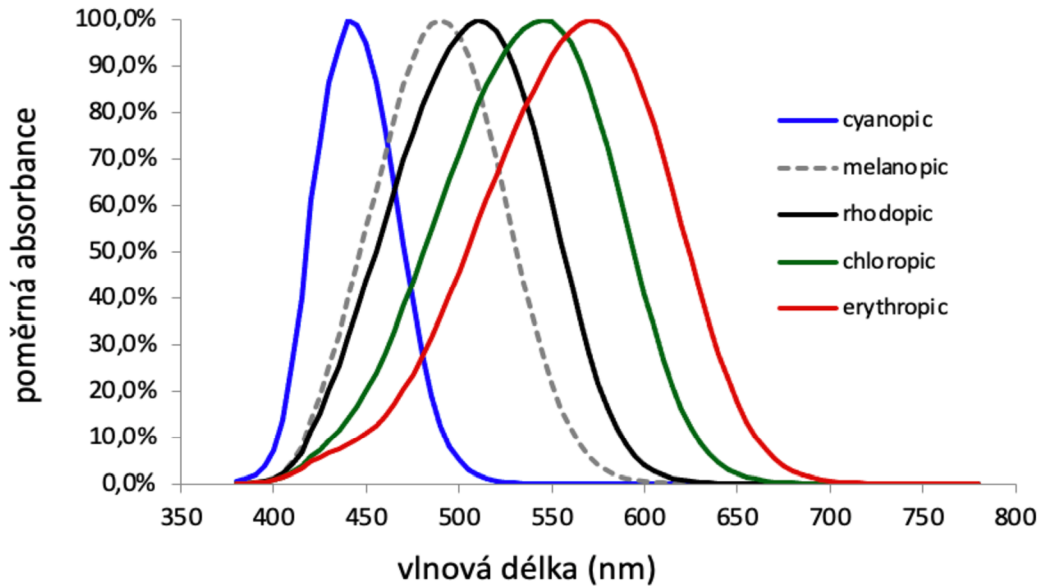
Celkově tato norma poskytuje základní definici pro 5 typů receptorů, které přispívají k ovlivnění ipRGC reakcí. Dále lze tyto odezvy charakterizovat a použít ve vztahu k osvětlení a jeho účinkům, zdraví a celkové pohodě lidí. (21)

Tato mezinárodní norma definuje relativní spektrální citlivost fotoreceptorů v lidském oku. Dále obsahuje informace týkající se vlivu věku či zorného pole (FOV) na stimulaci gangliových buněk sítnice obsahující fotopigment zvaný melanopsin. V sítnici lidského oka se nachází pět typů fotoreceptorů (S, M, L čípky, tyčinky a gangliové buňky). Každý z těchto pěti fotoreceptorů se může měnit v závislosti na expozičních vlastnostech, mezi které patří například směr světelného záření, čas expozice nebo intenzita osvětlení sítnice. K aktivaci fotosensitivních gangliových buněk je vyžadováno vyšší intenzity světla, než je tomu u tyčinek a čípků. (21)

Mezinárodní standard normy CIE S 026/E:2018 definuje spektrální sensitivitu či schopnosti optického záření stimulujícího každý z pěti typů fotoreceptorů. Tyto fotoreceptory mohou přispívat prostřednictvím vnitřně fotocitlivých gangliových buněk sítnice obsahujících melanopsin (ipRGCs) k nevizuálním účinkům světla u lidí. (21)

Je nutné říct, že tato mezinárodní norma je použitelná pro viditelné optické záření v rozsahu vlnových délek od 380 do 780 nm. Mimo jiné norma obsahuje účinky věku či zorného pole (FOV) při kvantifikaci stimulace fotoreceptorů sítnice díky reakci na světlo ovlivněné ipRGC. V neposlední řadě norma zahrnuje tabulky obsahující hodnoty α - optických akčních spekter jednotlivých fotoreceptorů pro každou hodnotu vlnové délky v rozsahu od 380 do 780 nm. (21)

Dále je třeba zmínit, že předpona α charakterizuje specifické reakce 5 typů odlišných typů fotoreceptorů (čípků S, M, L, tyčinek a sítnicových gangliových buněk). Průběhy jednotlivých typů receptorů je možné vidět na Grafu 1. (21)



Graf 1 Průběh α -opických akčních spekter fotoreceptorů

Odezva S čípků

Tyto odezvy se týkají S-čípků díky jejich fotopigmentu a charakteristice v kontextu ipRGC ovlivněné odezvy na světlo. Reakce, při které jsou aktivovány S-čípky je nazývána cyanopická. (21)

Odezva M čípků

Jedná se o vztah odezvy M-čípků díky jejich fotopigmentu a charakteristice v kontextu ipRGC ovlivněné odezvy na světlo. Reakce M-čípků je nazývána jako chloropická. (21)

Odezva L čípků

Reakce L-čípků vzhledem k jejich fotopigmentu a jejich charakteristikám v kontextu ipRGC ovlivňují reakci na světlo. Reakce, při které jsou aktivovány L-čípky je nazývána erytropická. (21)

Rodopická odezva

Jde o reakci fotopigmentu (rhodopsinu) obsaženém v tyčinkách a jeho charakteristiky v kontextu ipRGC ovlivněného reakcí. (21)

Melanopická odezva

Týkají se lidské reakce ipRGC v důsledku fotopigmentu (melanopsinu) a jeho charakteristiky v kontextu ipRGC ovlivňování odezvy na světlo. (21)

α -opická spektrální váhová funkce - $s_\alpha(\lambda)$

Jedná se o funkci, která reprezentuje relativní spektrální citlivost α -opických fotoreceptorů k optickému záření dopadající na rohovku, které je normalizované na maximální hodnotu 1. (21)

α -opický zářivý tok - ϕ_α

Jde o efektivní fotobiologický radiační tok se spektrálním zářivým tokem ϕ_c , spektrálně vážený s α -opickým akčním spektrem $s_\alpha(\lambda)$. α -opický zářivý tok je vyjádřen ve wattech. (21)

α -opická účinnost světelného záření - $K_{\alpha, V}$

Jde o poměr α -opického zářivého toku - ϕ_α ke světelnému toku ϕ_V , který je vyjádřen vztahem $K_{\alpha, V} = \frac{\phi_\alpha}{\phi_V}$. (21)

α -opická intenzita ozáření E_α

Vyjadřuje poměr intenzity ozáření efektivní fotobiologické ozáření se spektrálním ozářením $L_{e, \lambda}$, dále α -opickým akčním spektrem $s_\alpha(\lambda)$ vyjádřené pomocí vztahu $L_{e, \alpha} = \int L_{e, \alpha}(\lambda) s_\alpha(\lambda) d\lambda$. Jednotkou jsou $W \cdot m^{-2}$. (21)

α -opická účinnost světelného záření pro denní světlo (D65)

Vyjadřuje vztah mezi alfa opickým zářivým tokem standardizovaného zdroje světla (D65) a světelného toku standard. světla (D65). (21) Je vyjádřena vztahem:

$$K_{\alpha, V}^{D65} = \frac{\phi_\alpha}{\phi_V} \quad \text{Rovnice 1}$$

Akční spektra lidského oka

V současné době známe pět druhů receptorů v sítnici oka citlivých na světlo, z toho 4 se podílejí na vizuálních i nevizuálních účincích a jeden pouze na nevizuálních účincích. Lucas a další vytvořili pět akčních spekter pro pět fotoreceptorů a jejich příslušné fotopigmenty pomocí opsinové šablony a přizpůsobené propustnosti čočky. Jedná se o spektrum, které je nejčastěji používáno výzkumnými pracovníky a světelnými techniky. Cílem této CIE normy je poskytnout standardní akční spektra pro všech pět známých fotoreceptorů uložených v sítnici lidského oka. (21) (22)

2.3 Účinky světla na člověka

Nutno podotknout, že účinky světla na zdraví nejsou oproti účinkům hluku prověřeny natolik důkladně, aby mohlo dojít k regulaci legislativy kvůli ohrožení lidského zdraví. V současné době existuje velké množství protirečících studií, které prokazují či neprokazují negativní vliv světla na lidský organismus. Na druhou stranu jediným vlivem světla, který je nezpochybnitelný, je synchronizace cirkadiálního rytmu u organismů savců. (23)

Se synchronizací biologických hodin tedy cirkadiálním rytmem úzce souvisí tzv. modré světlo, které je přirozenou složkou denního světla. Vlnová délka modrého světla se pohybuje okolo 480 nm. Nejvíce modré složky světla je obsaženo v brzkých ranních hodinách a k jejímu poklesu dochází při západu slunce, kdy naopak převládá červená složka. (23)

Dále je potřeba zmínit, že změna světla a tmy má zásadní vliv na biologické hodiny člověka tzv. 24hodinovém cirkadiálním rytmu, který synchronizuje organismus savců s vnějším světlem. Vystavování se přirozenému dennímu světlu je pro člověka velmi důležité. Viditelné světlo působí zejména na psychiku člověka. Díky přítomnosti modré složky světla v umělém osvětlení v čase, kdy se již nevyskytuje (večer a noc) dochází k oklamání lidského těla že je den, díky čemuž se mění „noční fyziologické funkce“. Tvorba melatoninu v lidském těle začíná ve večerních hodinách po soumraku a s blížícím se rozedněním se zastavuje. V případě, že je člověk vystaven modrému světlu ve večerních a nočních hodinách, dojde k prodloužení startu tvorby melatoninu k oddálení nebo nemusí vůbec nastat. Je nutné zmínit, že k potlačení tvorby melatoninu dochází při vyzařování světelného záření obsahující vyšší míru modré složky. Nejčastěji se jedná

o zdroje s náhradní teplotou chromatičnosti (T_{CP}), která je velmi často označována jako studená bílá či daylight white. (23) (24)

Různé vlnové délky světla mohou způsobit poškození zrakového orgánu. V případě intenzivního světla může dojít nevratnému fotochemickému poškození sítnice, které je nazývané fotoretinitida. Je způsobeno například dlouhým díváním do slunce nebo svařovacího oblouku po dobu několik desítek sekund. Na sítnici se projevuje bílými skvrnami a otoky. Člověk mající fotoretinitidu má rozmazané vidění a nevidí ostře. V případě intenzivního působení UV záření může dojít k erytému kůže. Projevem erytému je svědění a zčervenání kůže v místě ozáření. Je způsoben zejména nadměrnému vystavování slunečních paprsků bez patřičné ochrany (slunečního krém). V případě intenzivního záření IR může docházet k popáleninám kůže či poškození oka. Nejčastěji se vyskytuje u pracovníků hutí, sklářů či tavičů kovů. (25)

2.3.1 Rušivé světlo v životním prostředí člověka

Člověk žije v životním prostředí, které se dělí na venkovní (outdoor) a vnitřní (indoor) prostředí. Jeho složkou je také umělé osvětlení nahrazující přirozené denní světlo v čase, kdy přirozené denní světlo nedosahuje potřebné úrovně. Problémy spojené s obtěžováním a rušením se zabývá občanský zákoník, který v §1013 odstavci 1 stanovuje: *Vlastník se zdrží všeho, co působí, že odpad, voda, kouř, prach, plyn, pach, světlo, stín, hluk, otřesy a jiné podobné účinky (imise) vnikají na pozemek jiného vlastníka (souseda) v míře nepřiměřené místním poměrům a podstatně omezují obvyklé užívání pozemku; to platí i o vnikání zvířat. Zakazuje se přímo přivádět imise na pozemek jiného vlastníka bez ohledu na míru takových vlivů a na stupeň obtěžování souseda, ledaže se to opírá o zvláštní právní důvod.*“ (23)

Celkově lze venkovní osvětlení jednoduše rozdělit na dvě skupiny - nezbytné a zbytné osvětlení. Jako nezbytné osvětlení je považováno to osvětlení, které vykonává bezpečnostní funkci jako například (osvětlení v pracovním prostředí, osvětlení komunikací a další). Zde je hlavní prioritou bezpečnost. (23)

Dále jako zbytné osvětlení se z pohledu bezpečnosti považuje osvětlení, které plní estetickou funkci. Nejčastěji se jedná o svítidla pro osvětlení venkovních ploch v době, kdy nejsou používány (billboardy a další.). Ukázka vhodného a nevhodného veřejného osvětlení je možná vidět na Obr. 10. Je tedy nutné respektovat zmíněné ustanovení

občanského zákoníku. Dále by nezbytné osvětlení mělo být umístováno tak, aby nedocházelo k přímému svícení do oken interiérů domů. (23)



Obr. 10 Ukázka vhodného a nevhodného osvětlení veřejným osvětlením (26)

2.4 Základní pojmy světelné techniky

2.4.1 Světelný tok

Jedná se o světelně-technickou veličinu odpovídající zářivému toku. Vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit vjem (zrakový počitek). Dále jde o světelnou energii, která je světelným zdrojem vyzářena za 1 sekundu. Jako jednotka světelného toku je označován lumen (lm). Světelný tok lze vypočítat dle vzorce v Rovnici 2. (27)

$$\phi = lm [cd \cdot sr] \quad \text{Rovnice 2}$$

2.4.2 Prostorový úhel

Jedná se o důležitou geometrickou veličinu, která se používá ve světelně-technických výpočtech. Jednotkou je steradián (sr), který je určený jednotkovou plochou ($1m^2$) na povrchu jednotkové koule o poloměru 1m. Velikost prostorového úhlu se určuje pomocí určení velikostí plochy, která je vyřata obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž vrchol prostorového úhlu (střed) je stejný jako vrchol kuželové plochy. Celá koule má velikost 12,6 sr (4π). Vzorec pro výpočet prostorového úhlu je popsán ve vztahu níže viz. Rovnice 3. (27)

$$\Omega = \frac{A}{r^2} [sr] \quad \text{Rovnice 3}$$

2.4.3 Svítivost

Svítivost je důležitou geometrickou veličinou. Jedná se o základní fotometrickou veličinu, která má jednotku kandela. Charakterizuje se jako podíl světelného toku vyzařeného zdrojem v určitém směru do malého prostorového úhlu a velikostí tohoto prostorového úhlu viz. Rovnice 4. Jednotka svítivosti (1 kandela) odpovídá svítivosti obyčejné žárovky. (27) (28)

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} [\text{cd}] \quad \text{Rovnice 4}$$

2.4.4 Osvětlenost (intenzita osvětlení)

Jde o fotometrickou veličinu, která vyjadřuje hodnotu světelného toku dopadajícího na plochu dA . Jednotkou osvětlenosti je lux (lx). Rozměr jednotky 1 lux činí $1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$. Osvětlenost plochy dA je velmi často nazývána jako osvětlenost v bodě. Vzorec pro výpočet osvětlení je vyjádřen v Rovnici 5. (27) (29)

$$E = \frac{d\phi}{dA} [\text{lx}] \quad \text{Rovnice 5}$$

2.4.5 Jas

Jedná se o světelně-technickou veličinu, na kterou reaguje bezprostředně zrakový orgán. Jednotkou je kandela $\text{cd} \cdot \text{lm}^{-2}$. Jas je obecně určený plošnou a prostorovou hustotou světelného toku, který je přenášen paprsky viz. Rovnice 6. (27)

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA} [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \quad \text{Rovnice 6}$$

L = jas svazku paprsků ve směru osy svazku

$d\Omega$ = prostorový úhel ve kterém se šíří paprsky

dA = plocha, která je kolmá k ose svazku paprsků

2.4.6 Intenzita světlení

Intenzita světlení nebo také světlení je veličina, která se definuje jako plošná hustota světelného toku. Jednotkou je $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$. Dále se dá definovat také jako plošná hustota svět. toku, který je vyzařován z plochy dA viz. Rovnice 7. (27)

$$M = \frac{d\phi}{dA} [\text{lx}, \text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$$

Rovnice 7

2.4.7 Náhradní teplota chromatičnosti T_{CP} (K)

Jedná se o parametr, který se používá pro popis barevných vlastností světla. V případě teplotních světelných zdrojů jako například žárovka odpovídá teplotě vlákna. Dále výbojové světelné zdroje odpovídají náhradní teplotě chromatičnosti zdrojům s blízkým spektrálním složením, který má výbojový světelný zdroj. Souhrn teplot chromatičnosti pro jednotlivé typy světelných zdrojů lze nalézt na Obr. 11. (29)



Obr. 11 Ukázka náhradních teplot chromatičnosti zdrojů světla (Zdroj: Autor)

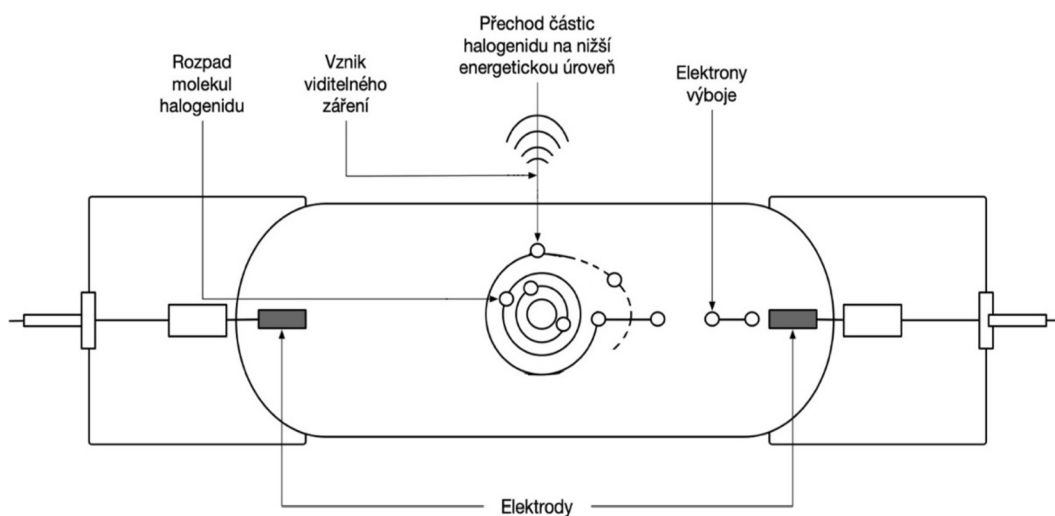
2.5 Světelné zdroje

2.5.1 Halogenidové zdroje

U halogenidových zdrojů světla dochází ke vzniku viditelného záření v parách rtuti, ale také díky záření produktů halogenidů - sloučeniny halových prvků (fluor, brom, chlór apod.). Díky tomu index podání barev se pohybuje okolo $R_a = 90$. Měrný výkon může dosahovat až hodnot 130 lm/W^{-1} . Halogenidová výbojka se skládá z několika částí, které je možné vidět na Obr. 12. (27) (29)

Halogenidové výbojky potřebují ke své práci vnější zapalovací zařízení, které zajišťuje vysokonapěťový impuls v rozmezí 1,8 až 5 kV. Výkony těchto světelných zdrojů se pohybují v širokém rozmezí mezi 35W – 3500 W. Halogenidové výbojky nabíhají na jmenovité parametry za 10 min. Záleží na podle příkonu a velikosti halogenidového zdroje. Používají se zejména tam, kde jsou kladené velké nároky na barevné podání. Halogenidové výbojky s nižšími příkony se používají k osvětlování obchodních prostor, muzeí, výkladů atd. Výbojky s většími příkony najdou své využití například při osvětlení dopravních uzlů, osvětlování sportovišť, výstavišť či v průmyslu. (27) (29)

Je třeba říct, že na vnitřní stěnu venkovní baňky musí být nanesen luminofor. Ten se používá ke transformaci zbylého UV záření do červené oblasti spektra. Životnost výbojek činí přibližně až 15 hodin. Měrný výkon výbojek dosahuje $50-80 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. (27) (29)

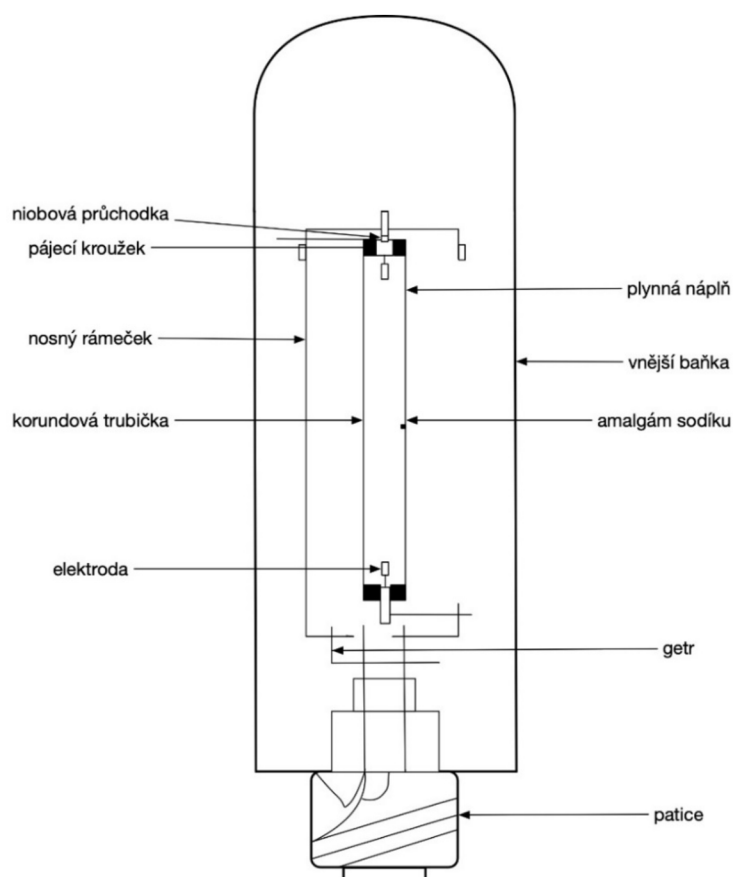


Obr. 12 Konstrukce halogenidové výbojky (Zdroj: Autor)

2.5.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky

Jedná se o světelné zdroje, u kterých je světlo vyzařováno pomocí sodíkových par s provozním parciálním tlakem mezi 3-60 kPa. Výboj v parách sodíku za nízkého tlaku se používá přibližně od 30.let minulého století. Díky dlouholetému vývoji se většina nízkotlakých výbojek vyznačuje vysokou účinností (až 200 lm/W). (27)

Dochází ke zvýšení tlaku par sodíku kdy světelná účinnost klesá. Dále projde minimem a opět roste. Při tlaku cca. 10kPa dojde k dosahu druhého maxima a v závislosti na ostatních parametrech např. kvalitě použitého materiálu (ze kterého je hořák vyroben), tlaku plnicího plynu, příkonu výbojky či složení amalgámu sodíku lze dosáhnout až hodnoty 150 lm/W . Pokud dochází k rostoucímu tlaku par sodíku, následně dochází k rozšíření spektrálních čar a následně dojde ke vzniku silného spojitého záření při růstu absorpce rezonančního záření. Z tohoto důvodu musí být výbojový prostor zdroje vyroben z polykrystalického či monokrystalického oxidu hlinitého. Čím více roste tlak, tím jsou zřetelnější asymetrie rozšiřování rezonančních čarů na obou koncích spektra. Výsledkem je lepší podání barev osvětlených předmětů díky bohatšímu spektru záření. (27) (29)



Obr. 13 Konstrukce vysokotlaké sodíkové výbojky (Zdroj: Autor)

Při použití výboje v parách sodíku můžeme získat světelné zdroje, jejichž kvalita světla se pohybuje v širokém spektru (např. nízkotlakové výbojky s činitelem $R_a=0$). Na jmenovitý světelný tok výbojka naběhne až po přibližně 5 minutách. Vysokotlaké sodíkové zářivky jsou nabízeny v mnoha provedeních příkonů – od 50 do 1000 W. Konstrukce vysokotlaké sodíkové výbojky je možné vidět na Obr. 13. (29)

Dále je nutné říct, že klasické sodíkové výbojky jsou i přes jejich technickou vyspělost čím dál častěji nahrazovány halogenidovými výbojkami s keramickým hořákem, které disponují vyšším měrným výkonem při stejných i lepších vlastnostech z pohledu podání barev. (29)

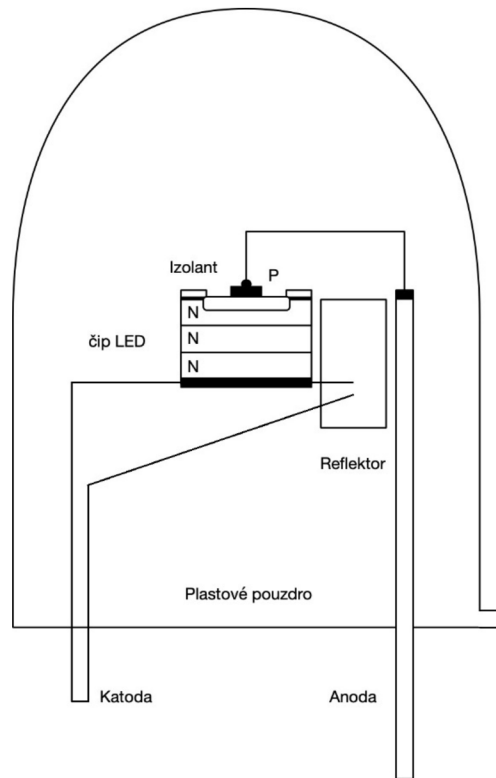
2.5.3 LED

V posledních letech se v osvětlovacích soustavách hojně používají LED diody. Díky svým malým rozměrům a technickým parametrům je lze použít téměř kdekoliv. Nejčastěji se používají k osvětlení interiérů, svítidel veřejného osvětlení, v displejích

mobilních telefonů a jiné elektroniky či ve svítidlech osobních automobilů, kde dnes nahradily předchozí halogenové a xenonové světelné zdroje. (30) (31)

Světelné diody (LED) se začaly využívat ve veřejném osvětlení mezi lety 2007 a 2008. Tehdy se začaly realizovat pilotní projekty v Kanadě a Spojených státech amerických (Ontario, Ann Arbor, Anchorage). U nás v České republice začal první pilotní projekt v červenci roku 2009 v Písku a dále projekt osvětlení LED na Smíchově v Praze v listopadu téhož roku. S neustálým vylepšováním a rozvojem světelných diod se začalo probírat mnoho témat, která souvisí s vlastnostmi a charakteristikami těchto světelných zdrojů, které se dost často odlišují od vysokotlakých sodíkových výbojek, jež jsou stále nejrozšířenější světelný zdroj ve VO u nás. Za posledních deset let došlo k rychlému vývoji technických parametrů především měrného výkonu, doby života a dalších parametrů. (32) (33)

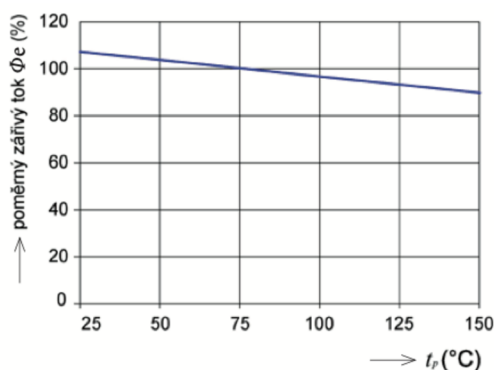
V současné době se ve VO používají výkonové diody HP LED (High Power LED), které oproti výbojkám mají poměrně široký rozsah jmenovitých proudů (přibližně 350-700 mA), čemuž odpovídají jmenovité světelné toky v rozmezí 150-300 lm. K dosažení potřebného světelného toku bylo zapotřebí použít několik desítek světelných diod. Jmenovitý světelný tok LED svítidel závisí zejména na provozním proudu a počtu LED diod ve svítidle. V případě, že je provozní proud větší, dochází k nárůstu pracovní teploty a proudové hustoty, což značně zkracuje dobu života svítidla. Na druhou stranu větší provozní proud poskytuje větší světelný tok z každé LED diody, čímž může dojít ke značné úspoře místa, neboť LED diod bude potřeba méně k dosažení požadovaného světelného toku a dojde k nižším nákladům na výrobu svítidla. Popis konstrukce LED diody je možné vidět na Obr. 14. (32)



Obr. 14 Konstrukce LED diody (Zdroj: Autor)

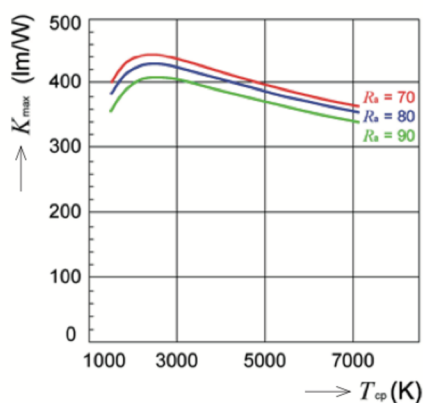
Díky tzv. skládání svítidel z jednotlivých LED diod je možné vytvořit svítidlo s požadovaným světelným tokem, což u sodíkových výbojek nebylo možné. Jedná se o ohromný benefit, neboť soustavy nejsou tolik předdimenzované tak, jako v minulosti. LED svítidla si můžeme díky širokému rozsahu jmenovitých proudů pomocí stmívatelných LED předřadných přístrojů přizpůsobit dle konkrétních požadavků. (32)

V dnešní době se rozsah příkonů LED svítidel u VO pohybuje v rozpětí 10-300 W. Rozsah světelných toků je v rozmezí 1 000 až 30 000 lm. Je nutné zdůraznit, že u použití svítidel z LED diod dochází k postupnému poklesu světelného toku. V případě sodíkových výbojek se díky zdokonalování výrobních postupů podařilo dosáhnout relativně malého poklesu světelného toku v průběhu života svítidla. U LED svítidel závisí pokles světelného toku zejména na kvalitě světelných diod a kvalitě jejich provozních podmínek, zejména teploty a chlazením svítidel. Předpokládaná doba života svítidel s LED činí přibližně 25-60 000 h. Moderní LED svítidla jsou vybavována předřadnými přístroji s funkcí konstantního světelného toku CLO (Constant Light Output), kde je již zmiňovaný pokles světelného toku vykompenzován postupným zvyšováním příkonu resp. jmenovitého proudu, čímž dojde k uspoření části energie, která by se za normálních okolností spotřebovala na předdimenzování optické soustavy. (32) (34)



Obr. 15 Graf závislosti poměrného zářivého toku LED na teplotě přechodu p-n (32)

Dalším důležitým parametrem u LED svítidel je světelná účinnost neboli měrný výkon K ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$). Jedná se o přeměnu elektrické energie na světelnou. V případě LED diod závisí na čtyřech parametrech: teplotě chromatičnosti T_{cp} (K) (viz Obr. 19), proudové hustotě J ($\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$), indexu podání barev R_a (viz Obr. 16) a teplotě přechodu p-n ($^{\circ}\text{C}$). Závislost poměrného zářivého toku LED na teplotě přechodu p-n je možné vidět na Obr. 15. Zde je zajímavá závislost měrného výkonu na teplotě chromatičnosti. Ve veřejném osvětlení se používají LED diody vytvářející bílé světlo a jeho barevné tóny jsou transformovány částí modrého spektra pomocí luminoforu ostatních částí spektra (červená, žlutá, zelená). Následně je vytvořen požadovaný barevný tón světla na základě podílu záření v jednotlivých oblastech. (32)



Obr. 16 Závislost měrného výkonu záření (lm/W) pro LED s různým indexem podání barev na T_{cp} (32)

V počáteční fázi vývoje LED svítidel se hojně využívaly světelné diody s vysokým podílem v modré oblasti kvůli nízkým energetickým ztrátám při transformaci záření do jiných oblastí. Z tohoto důvodu do prvních LED svítidel veřejného osvětlení začaly

používat LED diody s chladně barevným tónem světla (6000 K) neboť se jejich měrný výkon začal postupně přibližovat měrnému výkonu výbojkových svítidel. (32)

V současné době se používají svítidla pro VO s teplotou chromatičnosti 4000 K měrným výkonem okolo 130 lm/W. V budoucnosti se očekává zvýšení účinnosti převodu (transformace) modré části spektra do oblasti červené, díky čemuž by měly mít teplé bílé LED diody větší měrný výkon než chladné bílé LED diody. Dále je nutné říci, že s nástupem LED svítidel došlo k omezení světelného znečištění, neboť veškeré typy silničních svítidel mají ploché kryty a vyzářují jen do dolního poloprostoru. (32)

Mezi další vlastnosti, které odlišují LED diody od vysokotlakých sodíkových výbojek patří náhradní teplota chromatičnosti (CCT) neboli barevný tón. Pokud nezapočítáme speciální typy sodíkových vysokotlakých výbojek se zvýšením indexem podání barev, teplota chromatičnosti se pohybuje pod hladinou teploty chromatičnosti 2000 K. Naopak LED diody jsou vyráběny v širokém rozsahu teplot chromatičnosti 3000, 4000 a 5000 K. Požadavky na teplotu chromatičnosti nejsou v technické normě stanoveny, nicméně existují 4 aspekty, které je nutné při volbě v návrhu veřejného osvětlení brát v potaz. Jeden z těchto aspektů se týká biologických účinků světla. Další tři souvisí s vizuálními účinky světla. (32)

Díky celkově malým rozměrům LED diod je možné pomocí optických systémů lépe usměrnit světelný tok do požadovaných směrů, což v případě sodíkových výbojek nebylo možné. V počátku použití LED svítidel se používaly dva základní typy optických systémů, ve kterých se používaly světelné diody HP LED. První systém byl složený z jednotlivých LED diod, kde každá dioda byla osazena optickou čočkou vytvářející požadované rozložení svítivosti (křivku svítivosti) a výsledný světelný tok svítidla byl závislý na počtu použití LED diod. V případě, že došlo k výpadku jedné LED diody, došlo k poklesu světelného toku svítidla, což nemělo zásadní vliv na ostatní parametry osvětlení. (32) (34)

Druhý systém byl tvořen opět jednotlivými optickými čočkami či reflektory, které měly za cíl usměrnit světelný tok do relativně malého prostorového úhlu. Jednotlivé LED diody byly natočeny do určitého směru a vytvářela dílčí část křivky svítivosti. Mezi nevýhody tohoto systému patřilo složitější vytváření příkonových řad a také deformace křivky svítivosti, změny parametrů osvětlení či oslnění, které byly často způsobovány výpadkem

jedné z LED diod u svítidla. Jak mohou vypadat současná svítidla s LED technologií je možné vidět na Obr. 17, 18. (32) (34)

Jako další optický systém, který se v průběhu vývoje LED svítidel objevil je systém s moduly s malými reflektory, které byly osazeny minimálním počtem LED. Většinou se používaly 3 LED k dosažení celé křivky svítivosti. V případě, že došlo k výpadku jednoho modulu, došlo k automatickému poklesu světelného toku svítidla, což neovlivňovalo další parametry. (32)



Obr. 17 Ukázka svítidla s optickým systémem LED (32)

Pokud bychom měli porovnat jednotlivé systémy, je třeba říct, že optické čočky dokáží lépe kontrolovat světelný tok vyzařovaný LED diodami, naopak optické systémy s reflektory kontrolují pouze část světelného toku, který odrážejí. (32)

V současné době se používají nové typy LED diod zvané COB LED, u kterých je koncentrován velký světelný tok na velmi malé ploše. Díky konstrukci tohoto systému došlo k rychlému rozšíření do svítidel pro vnitřní i venkovní osvětlení. Bohužel u venkovního osvětlení je použití tohoto systému problematické kvůli křivce svítivosti, která je při porovnání s běžnými svítidly značně tvarově složitější. Není jednoduché pro COB LED navrhnout optický systém, který vytvořil zcela optimální rozložení svítivosti pro osvětlení veřejných komunikací. (32)



Obr. 18 Ukázka optického systému svítidla LED s reflektory (32)

2.6 Svítidla veřejného osvětlení

2.6.1 Konstrukce

Svítidla veřejného osvětlení se skládají z několika částí. Nejčastěji jsou složeny z vlastního tělesa (mechanické části) pomocí které se upevňují na nosné prvky. Dále se skládají z optické části, která upravuje vyzařování světla do okolního prostoru. Poslední částí je nosná část světelného zdroje a dílu, která zajišťuje napájení svítidla (předřadník). (30)

Velmi důležité pro svítidla veřejného osvětlení (dále jen VO) jsou také použité materiály, ze kterých jsou svítidla vyrobena. V současné době se používají plastová, hliníková či polykarbonátová tělesa. Plastová tělesa jsou nejčastěji vyztužena skelnými vlákny. Jejich benefitem je nižší hmotnost než u těles kovových. Naopak nevýhodou je horší chlazení než u těles hliníkových. Hliníková tělesa se používají nejčastěji u svítidel s LED diodami, neboť ty při svícení vydávají velké množství tepelné energie a vyžadují proto pasivní chlazení. (30)

Další část VO je takzvaný difuzor (mísa), který je vyroben z plexiskla (PMMA – Polymethylmethakrylát). Tento materiál je levnější než skleněný, na druhou stranu jeho odolnost proti vysokým teplotám a nárazům je menší. Polykarbonátové mísy jsou velmi odolné, na druhou stranu se musí dobře stabilizovat kvůli účinkům UV, jinak časem začnou žloutnout a degradovat. Naopak skleněné mísy jsou pevnější a náročnější na výrobu. Dále je důležité zmínit index IK, který určuje pevnost konstrukce a odolnost namáhání svítidla. (30)

Dalším kritériem pro výběr materiálů pro VO je aplikace použití. V případě, že budeme chtít instalovat svítidlo např. do podchodu, kde je svítidlo v dosahu chodců, budeme muset zvolit typ svítidla s vysokou mechanickou odolností (např. polykarbonátová mísa). Naopak při umísťování svítidla na stožár o výšce 12 m můžeme použít jiný materiál, neboť zde nedochází k interakci člověka s VO. (30)

V současné době můžeme z hlediska užitku, charakteristiky vyzařování, vzhledu rozlišovat různé tvary a typy svítidel. Některá svítidla jsou vhodná k osvětlení dlouhých vozovek, popř. chodníků, jiná svítidla jsou používána k přisvětlení chodců na přechodu, sportovišť, historických budov, náměstí či k slavnostnímu osvětlování budov. U VO hraje také velkou roli tvar a velikost optické části, přítomnost reflektorů a dalších optických členů. Dále záleží, zda je použita průzračná mísa nebo difuzor, který světlo rozptyluje. Veškeré tyto záležitosti musí být velmi dobře navrženy pro jeden konkrétní zdroj. Je zřejmé, že jinak bude optická část vypadat pro trubkovou výbojku, jinak pro eliptickou event. LED zdroj. (30)

Dále se dají svítidla dělit na technická, u kterých jsou jejich světelně-technické parametry upřednostněny před vzhledem. Tato svítidla jsou tvarově jednodušší a nejčastěji se používají k osvětlení veřejných komunikací. Pro osvětlení např. obchodních a společenských prostor či historických center měst se volí svítidla, která jsou tvarově zajímavá, aby se vzhledově hodila k architektuře daného města. Někdy jsou tato svítidla označována jako historizující či architektonická. (30)

Svítidla jsou umísťována dle potřeby na stěnu budov, fasádu, do země, na dřík stožáru či převěs. Dále je nutné zvolit správné rozložení svítivosti tak, aby byla co nejlépe a efektivně osvětlena daná plocha event. objekt, který chceme osvětlit. Používají se svítidla s různým symetrickým a asymetrickým rozložením svítivosti. (30)

Mezi nejdůležitější údaje pro svítidla veřejného osvětlení patří světelný tok vycházejícího ze světelného zdroje, příkon svítidla, dále měrný výkon (podíl příkonu a světelného toku), věrnost podání barev (Ra), teplota chromatičnosti (CCT) či předpokládaná doba životnosti světelného zdroje. (30)

2.6.2 Ovládání veřejného osvětlení

V současné době je VO ovládané pomocí několika možných způsobů. Může mít různé podoby např. jednoduché zapínání a vypínání VO pomocí signálu HDO (Hromadné

dálkové ovládání) nebo pokročilejší systémy umožňující reagovat na měnící se podmínky okolního prostředí, klimatických změn a podmínek provozu. U ovládání veřejného osvětlení můžeme rozlišit 3 základní stupně (spínání, řízení a monitoring). (35)

Jako základní úroveň ovládání VO patří spínání, které je nutné pro veškerou soustavu VO. Ostatní úrovně jsou jakousi nadstavbou tudíž nejsou pro provozování osvětlovací soustavy potřebné. Pomocí řízení se mění parametry osvětlovací soustavy dle přednastaveného provozního režimu. Díky monitoringu máme k dispozici informace o osvětlovací soustavě jako např. spotřeba elektrické energie, aktuální provozní stavy či poruchové stavy ad. Ovládání VO je možné zajistit třemi různými způsoby: individuálně (světelná místa), lokálně (zapínací místa) a centrálně (z dispečinku). (35)

Spínání VO

VO může být spínané pomocí několika způsobů. První způsob je označován jako časový a je závislý na časech východů a západů slunce v dané lokalitě. Nevýhodou tohoto typu spínání je, že nedokáže reagovat na lokální geografické podmínky jako např. kopec, který může clonit přístupu denního světla při východu. Dále není schopný reagovat na klimatické podmínky (bouřka, sněžení, déšť, mlha apod.). (35)

Dále může být VO spínané pomocí fotobuněk v závislosti na světelných podmínkách. VO je tedy spínané díky fotobuňce reagující na dané úrovně osvětlení. K tomu, aby byla zajištěna správná funkce fotobuněk je zapotřebí je pravidelně kontrolovat a čistit. (35)

Jako poslední způsob spínání VO je kombinace předchozích dvou typů spínání. Jedná se o způsob spínání, který je hojně využíván pro skupinové řízení mnoha celků kvůli bezpečnosti zapnutí a vypnutí osvětlovací soustavy či místní přechody pro chodce, které je nutné spínat v předstihu. Jako hlavní spínací prvek je fotobuňka, která je zálohována. V případě, že by došlo k poruše fotobuňky, je použito časové spínání. (35)

Řízení VO

Z pohledu parametrů osvětlovací soustavy VO může být řízeno podle tří základních parametrů: spektrálních vlastností (spektrálního složení), světelného toku a směrových vlastností. (35)

1) Řízení světelného toku

Řízení světelného toku je velmi úzce spjata s nastavením hladiny osvětlení (jas, osvětlenost). Úroveň hladiny osvětlení závisí na účelu osvětlované komunikace (obslužná či sběrná), parametry dopravy (intenzita či rychlost dopravy), uspořádáním dopravního prostoru (směrové rozdělení komunikace či hustota křižovatek) či parametry okolního prostředí (jasnost okolí atd.) Pro nejnepříznivější hodnoty z těchto parametrů je určena tzv. normální třída osvětlení, která má definované světelně-technické parametry. Některé z parametrů se v průběhu noci mění, jako například hustota dopravy. Z tohoto důvodu dochází ke změně požadavků na hladinu osvětlení (tzv. adaptivní třídy osvětlení). Dochází tedy ke snižování požadavků na úroveň osvětlení v noci. S řízením světelného toku velmi úzce souvisí také příkon a doba stáří svítidla. Při vyšším stáří svítidla dochází k poklesu světelného toku. V případě použití výbojových světelných zdrojů se tento problém řešil předimenzováním osvětlovacích soustav. Naopak benefitem LED zdrojů je snadná regulace světelného toku při známém průběhu poklesu světelného toku lze udržovat požadovanou úroveň osvětlení bez předimenzování. (35)

2) Řízení směrových vlastností

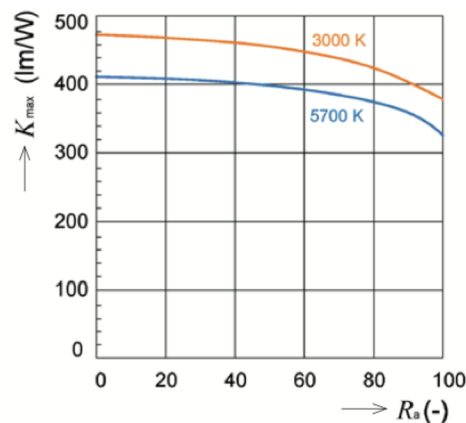
Řízení směrových vlastností svítidel se používá v různých případech. Využívá se například na osvětlení pozemních komunikacích kdy např. při změně klimatických podmínek (déšť) dochází velmi často ke zhoršení vizuálních podmínek řidičů. Povrch mokré vozovky se chová jako zrcadlo a dochází k rapidnímu zhoršení vizuálních podmínek řidičů. V případě změny charakteru vyzařování svítidel na mokré vozovce lze tento nepříjemný účinek omezit. (35)

2.6.3 Využití LED diod pro veřejné osvětlení

V dnešní době se svítidla veřejného osvětlení dostávají do přelomové fáze z toho důvodu, že dochází k nástupu zcela nových technologií. Za posledních pár let došlo k prudkému rozvoji LED diod, komunikačních systémů, internetu věcí (IoT), mobilní sítě 5G či průmyslu 4.0. Díky této kombinaci je možné dosáhnout lepších barevných vlastností světelného toku a jeho lepší možnosti směrování na prostor komunikace. Dalším benefitem je možnost ovládnutí každého svítidla, díky čemuž můžeme takto koncipovanou napájecí soustavu používat po dobu 24 hodin a můžeme díky tomu napájet ostatní

koncové aktivní prvky, které spadají do kategorie smart city, jako např. IP kamerové systémy, free Wi-Fi, techniku zajišťující komunikaci mezi vozidly WAVEp, dynamické řízení dopravy a další. (36)

Mezi ohromnou výhodou propojení topologie VO s moderními komunikačními systémy je zajištění datové konektivity na všech pozemních komunikacích měst a obcí. Sítě veřejného osvětlení mají z tohoto pohledu dva ohromné benefity. Díky strategické poloze sítě veřejného osvětlení je zajištěno pokrytí plochy všech obcí a měst. Dále sítě veřejného osvětlení jsou vlastněny municipalitou (městskou samosprávou). Díky těmto benefitům lze použít síť veřejného osvětlení jako nositele pro přenos a získávání informací z intravilánů obcí a měst. (36)



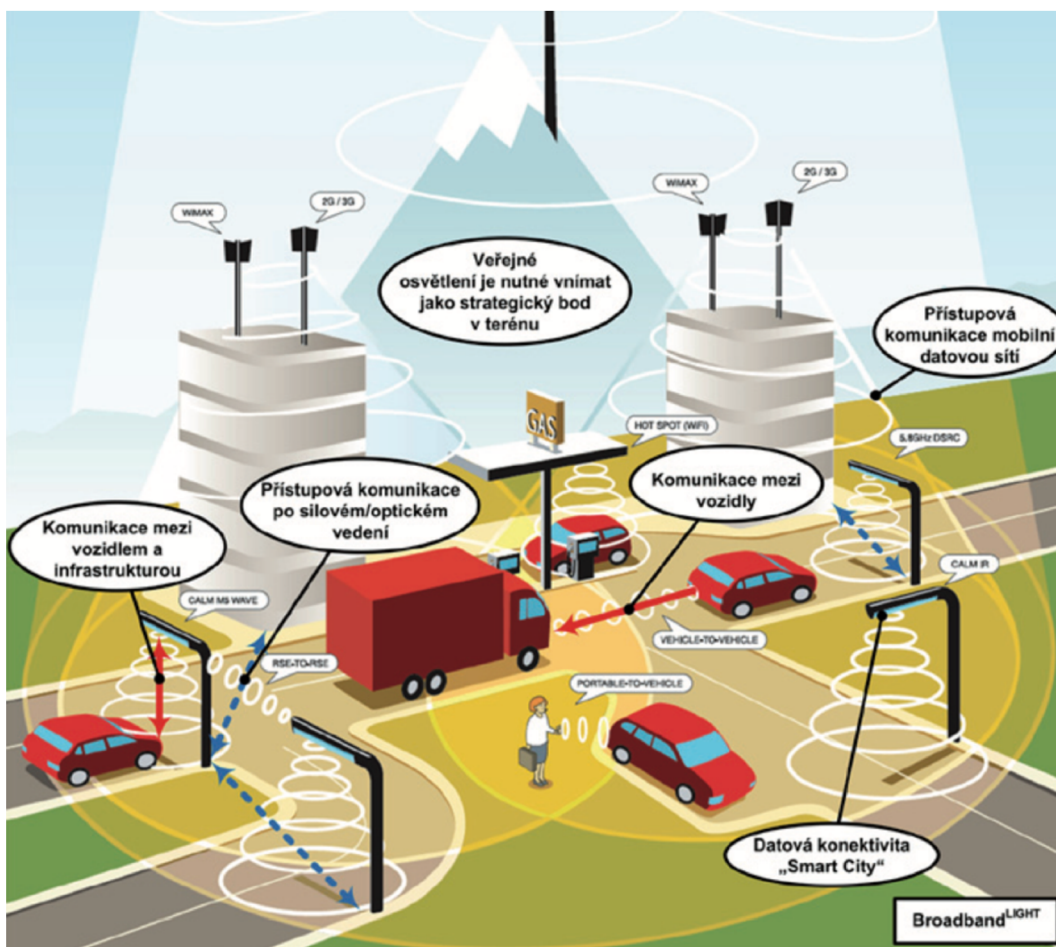
Obr. 19 Závislost měrného výkonu záření LED na index podání barev pro zdroje s různou T_{CP} (32)

Tato infrastruktura se dá použít nejen pro ovládání veřejného osvětlení, ale také pro přenos informací (free Wi-Fi, komunikace mezi infrastrukturou a vozidly, informace o hustotě provozu, obsazenost parkovišť atd.). Z bezpečnostního hlediska lze použít topologii VO k využití dopravních IP kamerových systémů. (36)

K tomu, aby bylo možné veškeré tyto benefity čerpat, je třeba zajistit konektivitu sítě VO pomocí instalace optických kabelů při realizaci nových staveb v rámci veřejného osvětlení, přenosu signálu po napájecí síti VO a v neposlední řadě použít současnou mobilní síť operátorů (LTE, v budoucnu 5G síť). Ukázka možného potenciálu využití VO lze vidět na Obr. 20. (36)

S rozvojem elektromobility lze v budoucnu počítat s nasazením VO, které budou obsahovat nabíječky pro dobíjení elektromobilů či plug-in hybridních vozidel. V roce 2020

se toto řešení začalo testovat v pilotním projektu například v Praze. Další možností využití VO je použití QR kódů, které by se nacházely na sloupech VO. Pomocí těchto kódů by lidé mohli nahlásit nefunkční VO případně nahlásit poškození atd. (37) (38)



Obr. 20 Ukázka potenciálu sítě VO (36)

2.7 Legislativa

Svítlidla pro VO se nacházejí na veřejných prostranstvích, v místech, kde se pohybují chodci a motorová vozidla. Díky tomuto důvodu je pro návrh, výstavbu a provozování VO nezbytné znát široké spektrum technických a legislativních norem. (29)

Mezi základní technické normy pro návrh VO patří tyto normy:

Třída osvětlení ČSN CEN/TR 13201-1 (Výběr tříd osvětlení)

Třída osvětlení ČSN CEN/TR 13201-2 (Požadavky kladené na třídy osvětlení)

Třída osvětlení ČSN CEN/TR 13201-3 (Výpočet)

Třída osvětlení ČSN CEN/TR 13201-4 (Metody měření)

Pro realizaci VO jsou nejdůležitější první dvě části norem. Třetí část normy je primárně určena pro dodavatele a výrobce svítidel a čtvrtá část stanovuje metody a postupy pro měření vypočtených a navržených parametrů dle projektových dokumentací staveb. (29) (39)

2.7.1 Požadavky

Požadavky na VO jsou určeny normou a je důležité postupovat podle přesně stanovených kroků, aby byl zaručený objektivní výsledek tzn. správné zařazení z hlediska vnějších vlivů a veškerých nastavených parametrů. Pro správný výběr třídy osvětlení je nutné postupovat dle normy ČSN EN 13201-1. (29) (39)

V první řadě je nutné stanovit úseky veřejné pozemní komunikace a následně vybrat příslušné modelové situace podle následujících parametrů.

- typická rychlost hl. uživatele (km/h)
- hlavní uživatel (chodci, cyklisté, motorová doprava, velmi pomalá doprava)
- jiný povolený uživatel (cyklisté, chodci, velmi pomalý uživatel)
- nepovolený uživatel (cyklisté, chodci, velmi pomalý uživatel)

Dále je potřebné vyhodnotit parametry a definovat důležité oblasti z těchto parametrů:

- vliv okolí (počasí, jas okolí, složitost zorného pole)
- vliv dopravy (velikost silničního, cyklistického a pěšího provozu, parkující vozidla, riziko kriminality atd.)
- prostorové uspořádání (druhy a hustota křižovatek, kolizní oblasti a směrové rozdělení komunikace).

V posledním kroku dochází k výběru vhodné třídy osvětlení pro zvolenou komunikaci. (29)

3 Výzkumná část

3.1 Cíle a výzkumné předpoklady

Výzkumná část diplomové práce se skládá ze tří jednotlivých experimentů. **První experiment** byl proveden v laboratoři Měření Barevnosti a Vzhledu (LCAM) na Katedře Materiálového Inženýrství na TU v Liberci a jeho cílem bylo naměření jednotlivých světelných zdrojů ve fotometrické rovině C- γ .

Druhý experiment byl zaměřen na problematiku rušivého světla ve veřejném prostoru v areálu Technické Univerzity v Liberci. Cílem bylo poukázat na nevhodné otočení výložníků svítidel VO a vyzařování rušivého světla do oken budov.

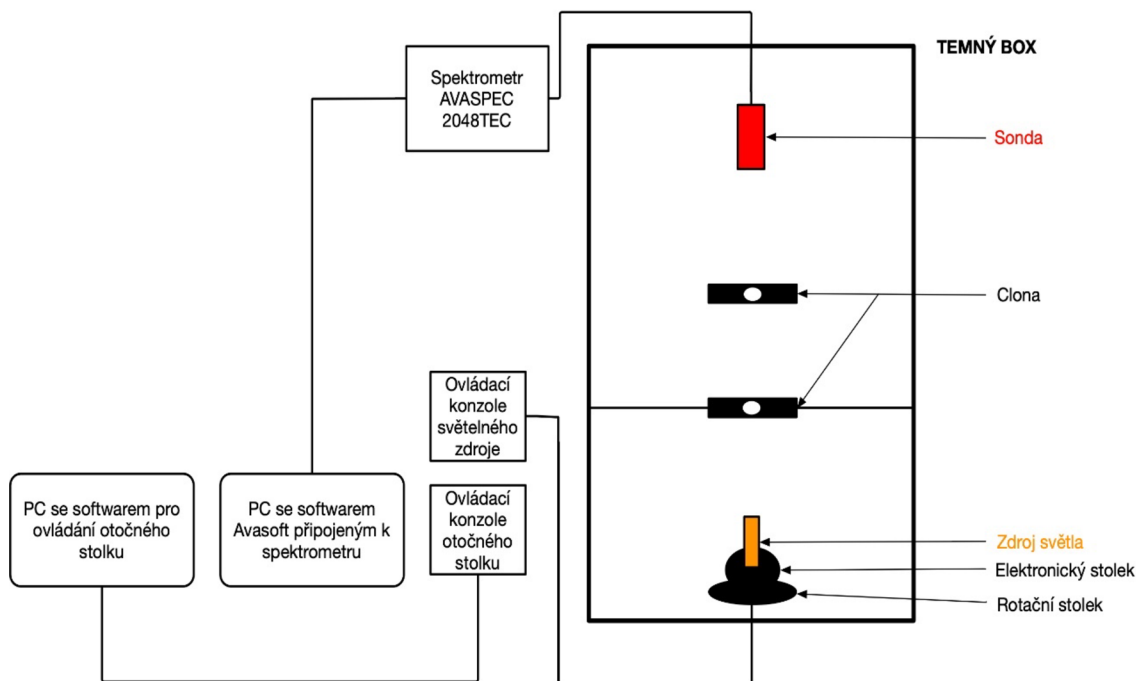
Cílem **třetího experimentu** bylo vytvoření jednoduchého analytického software, který by umožňoval vyhodnocení vlivu světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému.

3.2 Metodika výzkumu

3.2.1 Experiment 1 - Měření světelných zdrojů ve fotometrické rovině C- γ

Měření prvního experimentu výzkumné části probíhalo v laboratoři Měření Barevnosti a Vzhledu (LCAM) na Katedře Materiálového Inženýrství na TU v Liberci. Pro realizaci experimentu bylo zapotřebí vytvořit speciální zatemněný box, který by nepropouštěl světlo. Box byl vyroben z kartonových desek a vnitřní stěny včetně kovové podlahy byly vystlány z černých kreslicích kartonů (Obr. 22). Rozměry boxu činí 90x52x50 cm.

Jednotlivé kartonové desky byly vloženy do předem připravených hliníkových sloupků, které byly uchycené do kovové podlahy pomocí imbusových šroubů. Samotná střecha boxu byla použita jako odnímatelné víko, které bylo vhodné pro snazší manipulaci při jednotlivých měřeních.



Obr. 21 Schéma zapojení jednotlivých komponent měření (Zdroj: Autor)

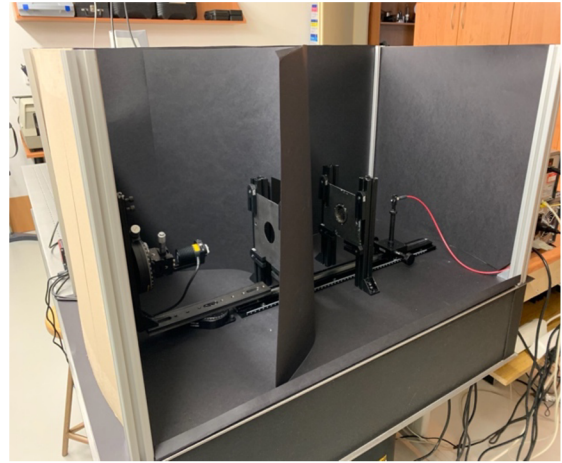
Celá soustava se skládala z patřičného světelného zdroje, který byl upevněn na goniometrickém stolku, která bylo možné polohovat a pootáčet po libovolných stupních (viz Obr. 47). Tato konstrukce byla umístěna na rotačním stolku THORLABS (viz Obr. 48), který mohl být ovládán dvěma způsoby: pomocí programu Kinesis v počítači či pomocí ovladače, který se nacházel v blízkosti temného boxu (viz Obr. 50). Technická specifikace rotačního stolku je k dispozici na webových stránkách. (40) Světelný zdroj byl dále ovládán pomocí otočného potenciometru nacházejícího se vedle ovladače elektronického stolku (viz Obr. 51).

Původně byly komponenty temného boxu (imbusové šrouby, kovové držáky clon a držáku sondy) ve standardní kovové barvě. Vzhledem k tomu, že odrážející světlo od kovových komponent by mohlo způsobovat nepřesnost v měření, byly již zmíněné komponenty po pár měřeních přestříkány černou barvou.

Soustava dále zahrnuje 2 clony, přičemž cloně, která je dále od světelného zdroje je možné měnit velikost apertury (Obr. 23). Poslední prvek této soustavy tvoří držák na kosinový korektor (viz Obr. 49), který kryje sondu vedoucí do spektrometru Avantes 2048. Průměr sondy měl průměr o velikosti 3,9 mm. Zapojení jednotlivých komponent je možné vidět na Obr. 21.



Obr. 22 Temný box
(Zdroj: Autor)



Obr. 23 Rozdělení světelné skříně na zdrojovou a detekční část (Zdroj: Autor)

3.2.1.1 Technické parametry spektrometru

Pro měření prvního experimentu byl použit spektrometr Avantes řady AVASPEC – 2048TEC. Spektrometr disponuje CCD čipem s rozlišením 2048 pixelů. Dále obsahuje optické vlákno vstupního konektoru, zaostřovací a kolimační zrcadlo a difrakční mřížku. Spektrometr je dodáván buď s rozhraním USB 1.1 či 2.0. Přístroj je vhodný pro měření aplikací s nízkou úrovní osvětlení a vysokým rozlišením.

V našem případě byla použita speciální verze spektrometru 2048TEC. Jedná se o spektrometr, který je speciální verzí řady Avaspec-2048. U tohoto spektrometru je CCD detektor namontován na jednostupňovém Peltierově chladičím čipu. Tento prvek je zde použit ke snížení teploty samotného CCD čipu až o 30 stupňů °C a zároveň snižuje šum. Tyto zmíněné funkce umožňují používat spektrometr pro měření v aplikacích s nízkou úrovní osvětlení, mezi které patří měření fluorescence a Ramanových spekter. Všechny ostatní parametry jsou stejné, jako v případě verze AVASPEC 2048. Veškerá technická data jsou popsána v tabulce níže (viz Tab. 2). Spektrometr tohoto typu je dodáván jako jednokanálový či dvoukanálový nástroj. Připojení je k počítači je možné buď pomocí RS-232 rozhraní či USB 1.1 s přenosovou rychlostí 12 Mbit/s (1,5 MB/s).

Kalibrace spektrometru byla provedena pomocí kalibračního světelného zdroje AvaLight-DHS (obsahujícím deuteriový halogenový zdroj), dále AvaLight-DH-CAL UV-VIS s rozsahem spektra (200-1100 nm) a v neposlední řadě kalibračním nástrojem AvaLight-HAL.

Tab. 2 Technické parametry spektrometru (41)

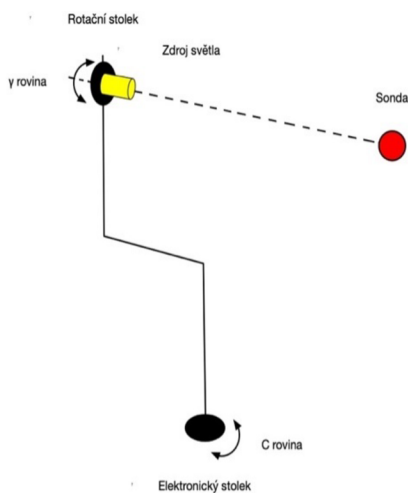
Optika	Symmetrical Czerny-Turner, 75 mm ohnisková vzdálenost
Rozpětí vlnové délky	200-1100 nm
Rozlišení	0.04-20 nm
Rozptýlené světlo	> 0.1 %
Citlivost	5000 impulzů/μW
Detektor	CCD
Signál/šum	250/1

3.2.1.2 Průběh měření

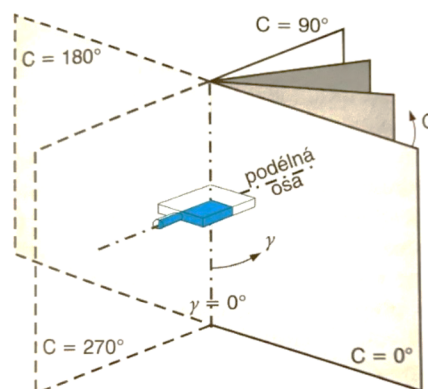
K měření experimentu byly zapotřebí dva počítače. První počítač byl použit k ovládání elektronického stolku pomocí software Kinesis. Druhý počítač byl připojen pomocí USB kabelu ke spektrometru Avantes AVASPEC – 2048TEC. S pomocí programu AvaSoft bylo možné měřit a ukládat jednotlivá data.

Měření bylo prováděno v několika krocích. Prvním krokem bylo spuštění počítače obsahující program Kinesis pro ovládání elektronického stolku (viz Obr. 52). Dále byl spuštěn program AvaSoft, kde byl následně načten patřičný program obsahující kalibraci spektrometru. Od této chvíle bylo možné provádět jednotlivá měření.

Při měření každého světelného LED zdroje docházelo k posunu elektronického stolku v rozsahu od -90° do $+90^\circ$ po 5 stupních (Obr. 48). Pro každý úhel tento bylo provedeno 5 dílčích měření. Po doměření byl rotační stolek otočen vždy o 30° (0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 210° , 240° , 270° , 300° , 330°). U kombinovaného LED zdroje byl elektronický stolek posouván v rozsahu od -110° do $+110^\circ$ po 5 stupních. Následně byl rotační stolek pootočen vždy po 90° (0° , 90° , 180° , 270°). Schéma měřící a fotometrické roviny C- γ je možné vidět na Obr. 24. a Obr. 25. Princip roviny C- γ je podrobněji popsán v normě CIE. (42)



Obr. 24 Schéma měřicí roviny C- γ
(Zdroj: Autor)

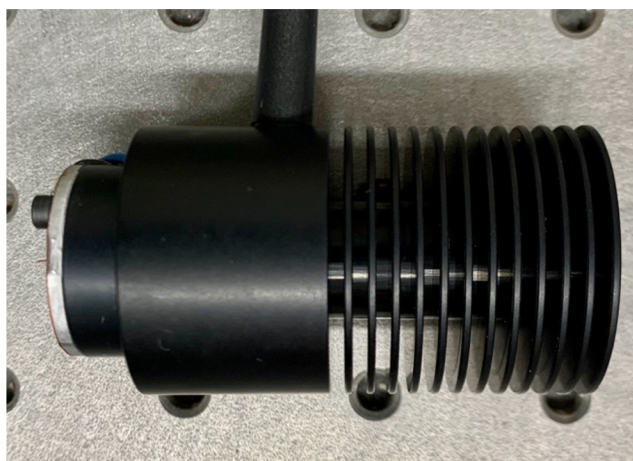


Obr. 25 Schéma fotometrické roviny C- γ
(27)

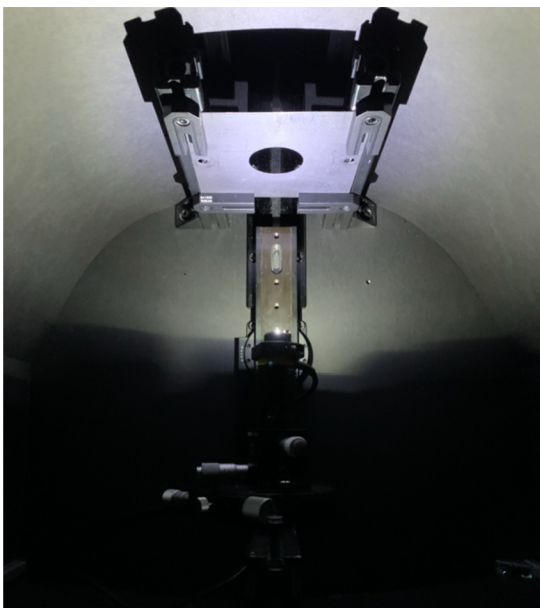
Celkově bylo k experimentu použito 5 světelných zdrojů. 4 LED světelné zdroje disponovaly odlišnými vlnovými délkami. Jednalo se o bílou (Obr. 28), červenou (Obr. 29), žlutozelenou (Obr. 30) a zelenou barvu (Obr. 31). Detailní pohled na LED zdroj možné vidět na Obr. 26 a Obr. 27. Pátým světelným zdrojem byl kombinovaný LED zdroj, který umožňoval přepínání mezi 3 různými teplotami chromatičnosti (Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34). Dále vzdálenost světelného zdroje a držáku sondy činila 50 cm, v případě kombinovaného LED zdroje byla vzdálenost 40 cm. Výška zdroje světla, clon a cosinového korektoru činila 15 cm.



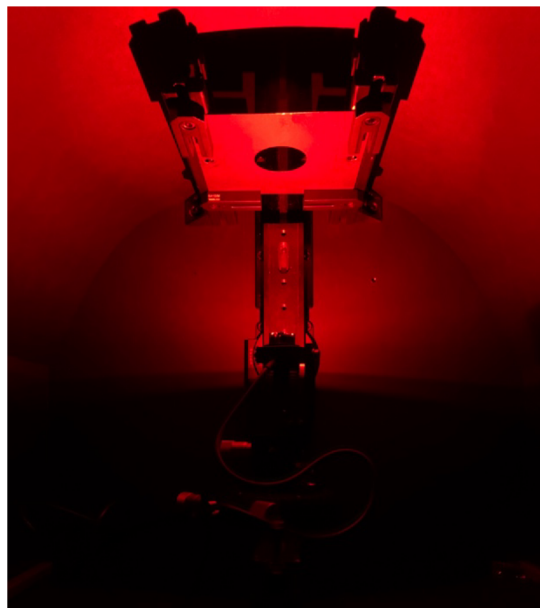
Obr. 26 LED zdroj
(Zdroj: Autor)



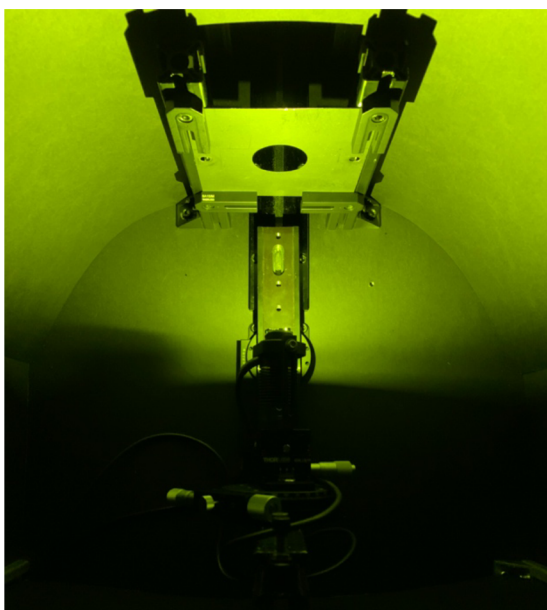
Obr. 27 Boční pohled na chladič LED zdroje
(Zdroj: Autor)



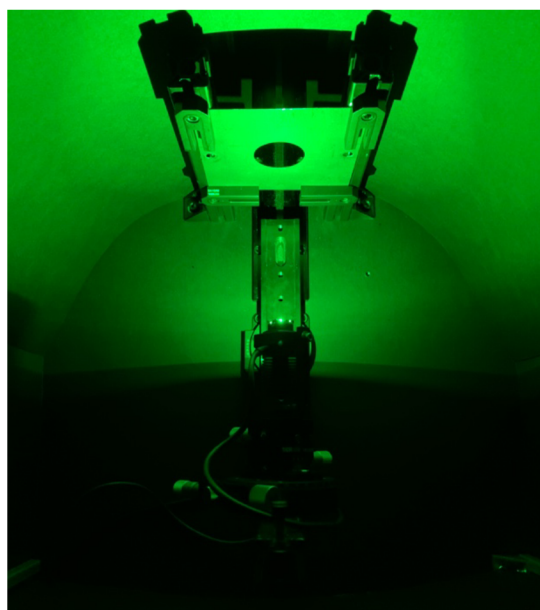
Obr. 28 Bílý LED zdroj
(Zdroj: Autor)



Obr. 29 Červený LED zdroj
(Zdroj: Autor)



Obr. 30 Žlutozelený LED zdroj
(Zdroj: Autor)



Obr. 31 Zelený LED zdroj
(Zdroj: Autor)



Obr. 32 Kombinovaný LED zdroj – 1 poloha (Zdroj: Autor) Obr. 33 Kombinovaný LED zdroj – 2 poloha (Zdroj: Autor) Obr. 34 Kombinovaný LED zdroj – 3 poloha (Zdroj: Autor)

Po naměření veškerých hodnot byla veškerá data vyexportována pomocí softwaru Avasoft ve formátu txt. Vzhledem k tomu, že použitá verze programu Avasoft neumožňovala export přímo do tabulkového kalkulátoru Excel, bylo nutné hodnoty ve formátu txt vyexportovat nejdříve do programu Matlab a následně hodnoty otevřít v programu Excel. Zde byly jednotlivé hodnoty seřazeny do sloupců dle popisků (úhly, posunutí apod.).

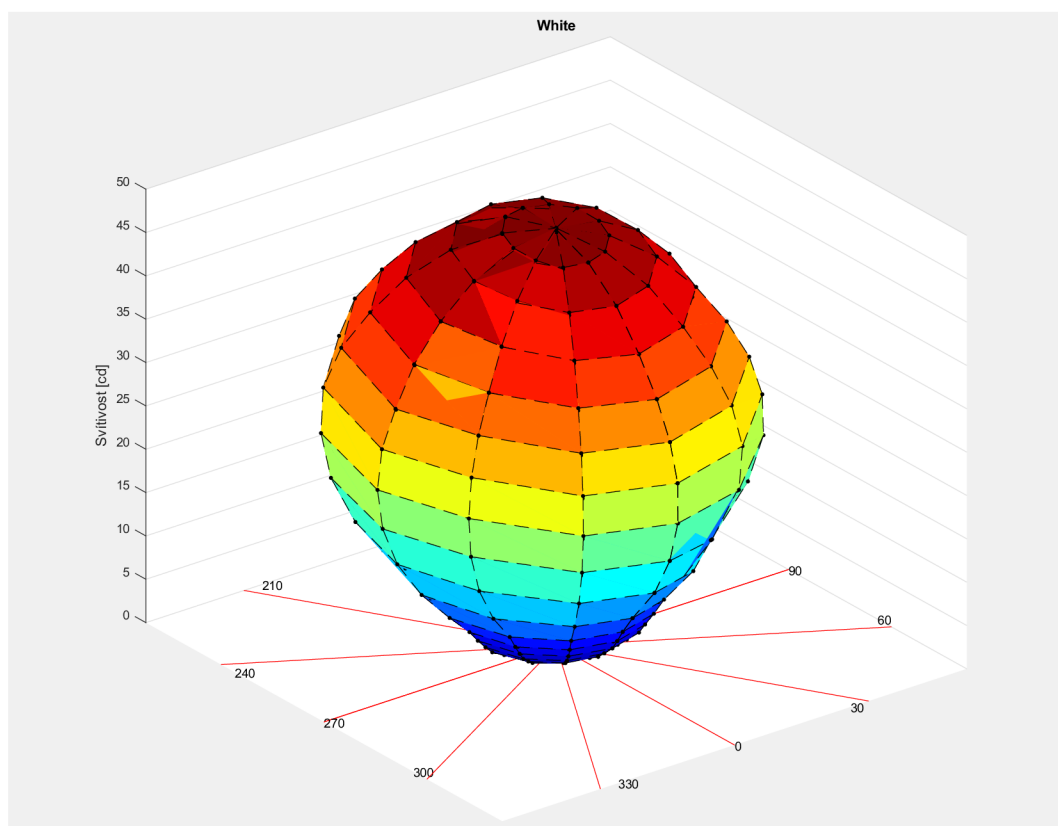
V programu Excel bylo pro každé pootočení (5 dílčích měření) nutné spočítat průměr hodnot a nejistotu měření. Zde nás zajímala zprůměrovaná hodnota Illuminance (intenzita osvětlení). Tato hodnota byla vložena do předem připravené tabulky C- γ , ve které řádky vyznačují posun elektronického stolku a sloupce znázorňují otočení rotačního stolku.

Následně bylo nutné veškeré hodnoty přepočítat z hodnot intenzity osvětlení (lux) na světelný tok (lumen). Přepočítané hodnoty byly dále importovány do programu Matlab, kde došlo k vytvoření vyzařovací charakteristik všech světelných zdrojů.

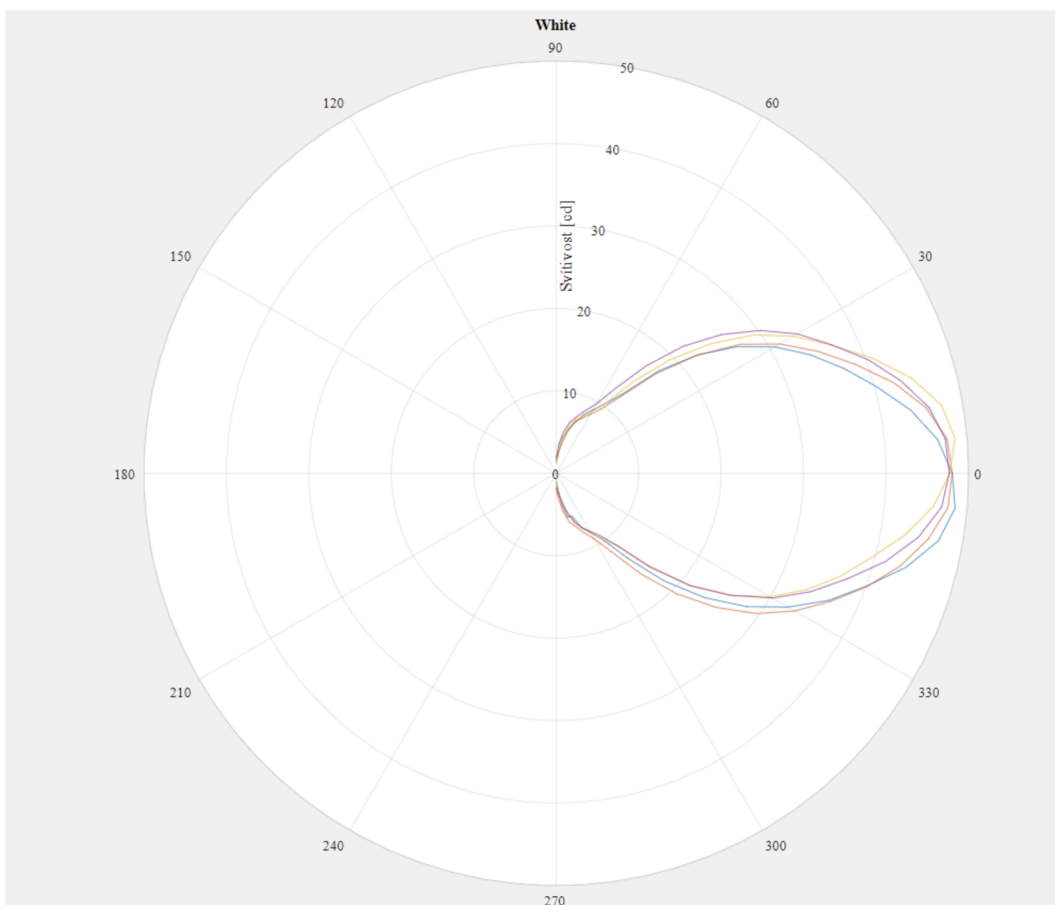
3.2.1.3 Analýza výzkumných dat

Na základě naměřených hodnot lze říct, že LED zdroje a kombinované zdroje mají odlišné světelně-technické parametry. Pomocí měření v rovině C- γ lze lépe znázornit svítivosti jednotlivých svítidel. Pro vyhodnocení experimentu byly ze 7 měřených zdrojů světla vybrány pouze ty zdroje, které disponovaly podobnou teplotou chromatičnosti. Konkrétně se jednalo o bílý LED zdroj a kombinovaný zdroj světla.

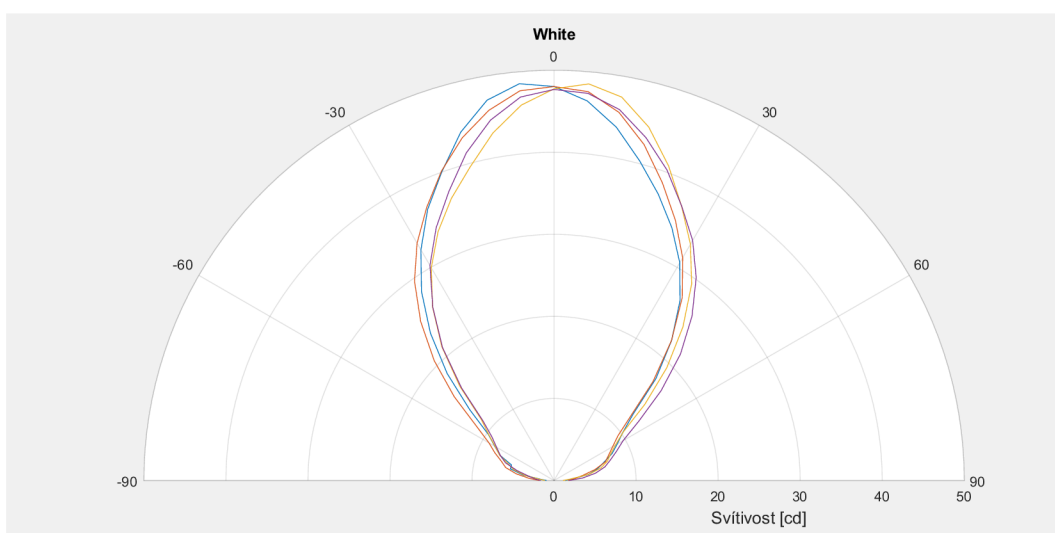
Bílý LED zdroj je vybaven čipem, který vyzařované světlo distribuuje zcela odlišně (asymetricky) než konvenční zdroje (žárovka). Lze říct, že křivka svítivosti bílé LED diody je koncentrována do úzkého světelného svazku, což je zapříčiněno použitím čočky (viz. Graf 2). Světelné zdroje tohoto typu se používají například v úzkouhlých světlometech, kde není nutné vyzařovat světlo do velkých úhlů. Při použití tohoto světelného zdroje dochází k fokusaci jasu přímo na sítnici. Světelné zdroje s podobnou vyzařovací charakteristikou mohou být například svítilny pro cyklisty. Zdroje tohoto typu jsou někdy nazývány jako spotlight. Maximální svítivost bílého zdroje činí přibližně 48 cd (viz. Graf 3, 4).



Graf 2 Vyzařovací charakteristika svítivosti bílého LED zdroje

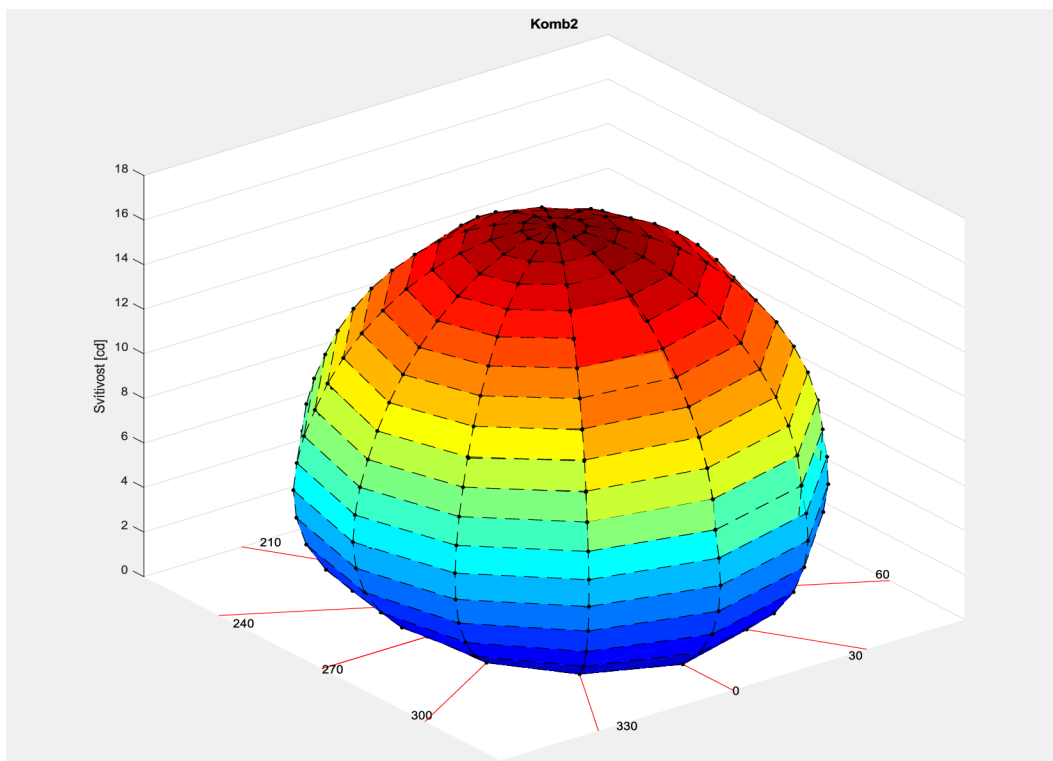


Graf 3 Křivky svítivosti bílého LED zdroje

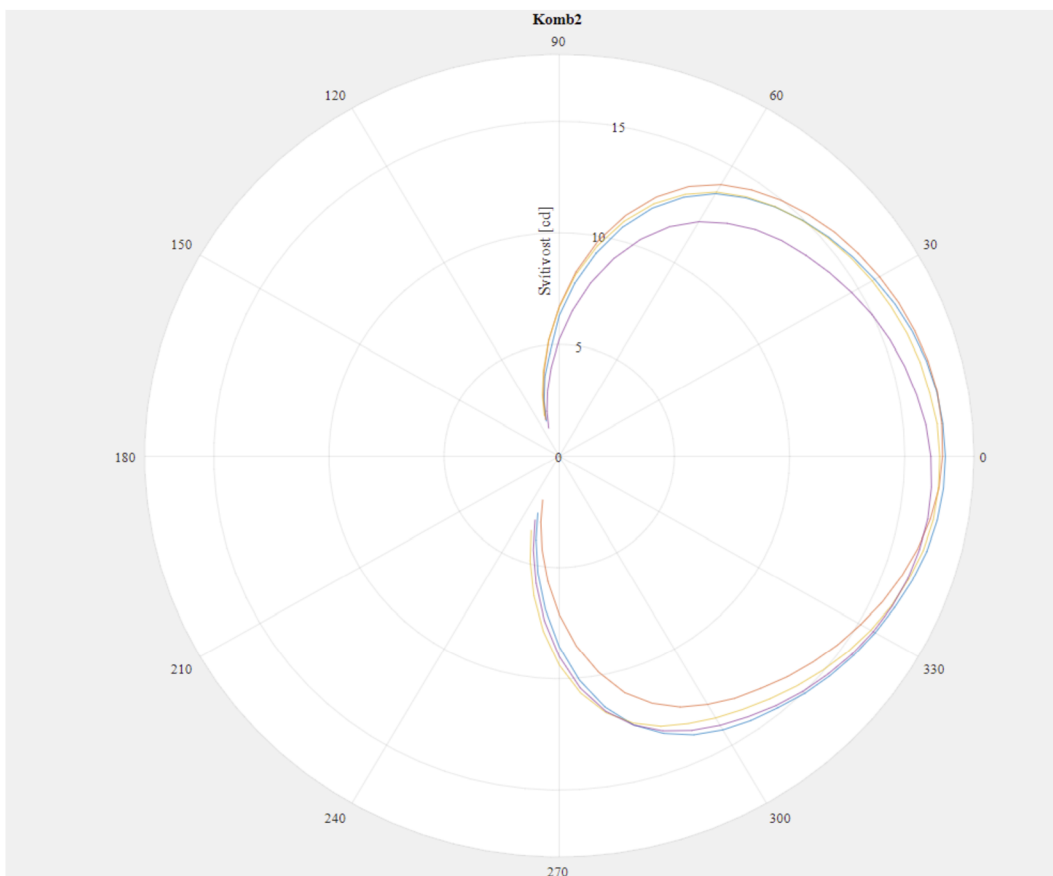


Graf 4 Křivky svítivosti bílého LED zdroje

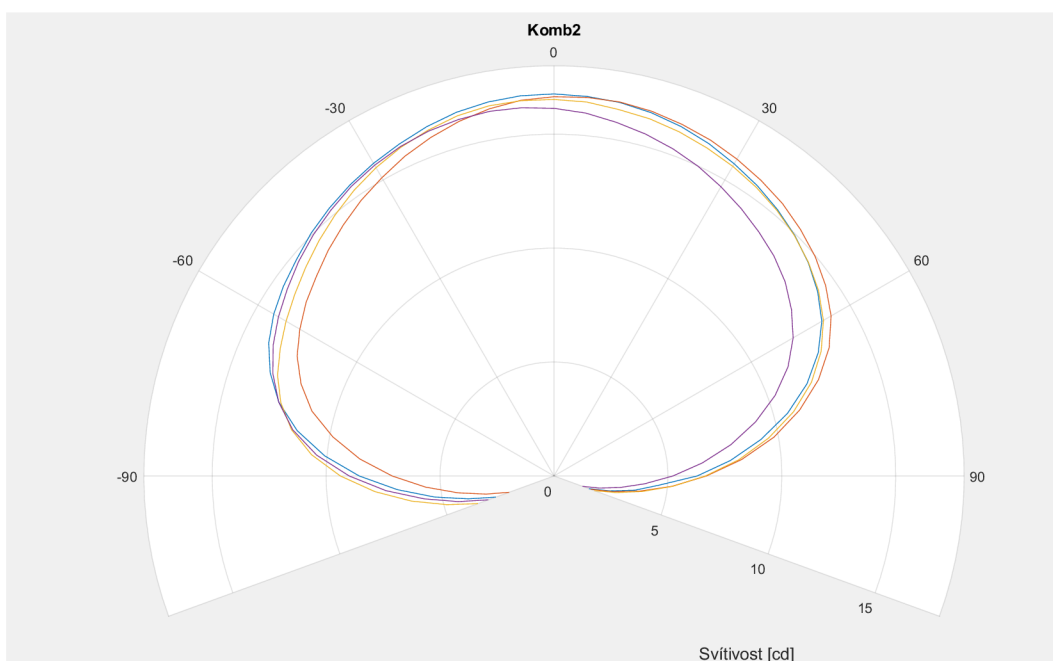
Na rozdíl od LED je vyzařované světlo z kombinovaného světelného zdroje distribuováno více symetricky a svým tvarem připomíná kouli (viz. Graf 5). Tento efekt je způsoben použitím difuzoru, který světelný tok rozptyluje do podstatně větších úhlů než v případě bílého LED zdroje. Při použití tohoto světelného zdroje dochází k osvětlení stínicí v celé ploše. Podobné světelné zdroje se používají v případě osvětlení veřejných komunikací, kde je dbáno na rovnoměrnou distribuci světla ve všech směrech. Maximální svítivost tohoto zdroje činí přibližně 18 cd (viz. Graf 6, 7).



Graf 5 Vyzařovací charakteristika svítivosti kombinovaného zdroje



Graf 6 Křivky svítivosti kombinovaného zdroje

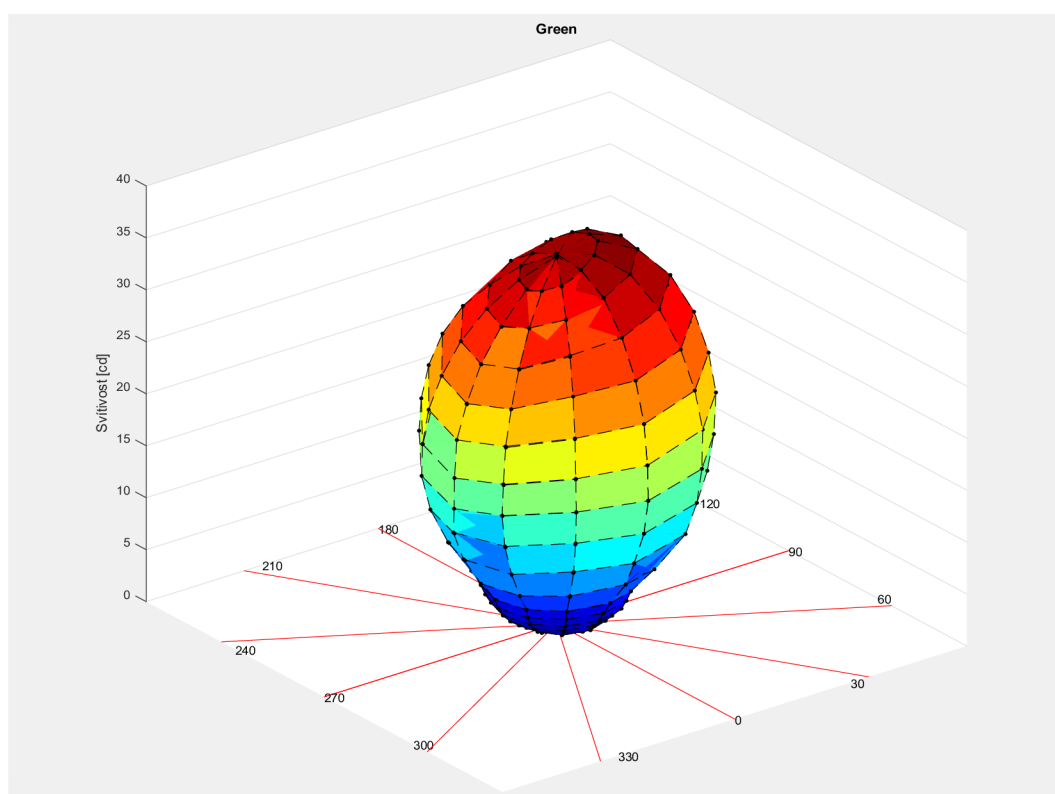


Graf 7 Křivky svítivosti kombinovaného zdroje

Ostatní vyzařovací charakteristiky naměřených LED zdrojů je možné vidět v příloze diplomové práce. Je třeba zmínit, že vyzařovací charakteristika zelené LED diody (viz. Graf 8) se mírně odlišuje od ostatních zdrojů, neboť není dostatečně symetrická. To může být zapříčiněno např. konstrukční vadou. Na konkrétní LED zelené diodě se nachází drobný útvar, který může měnit vyzařovací charakteristiku viz. Obr. 35.



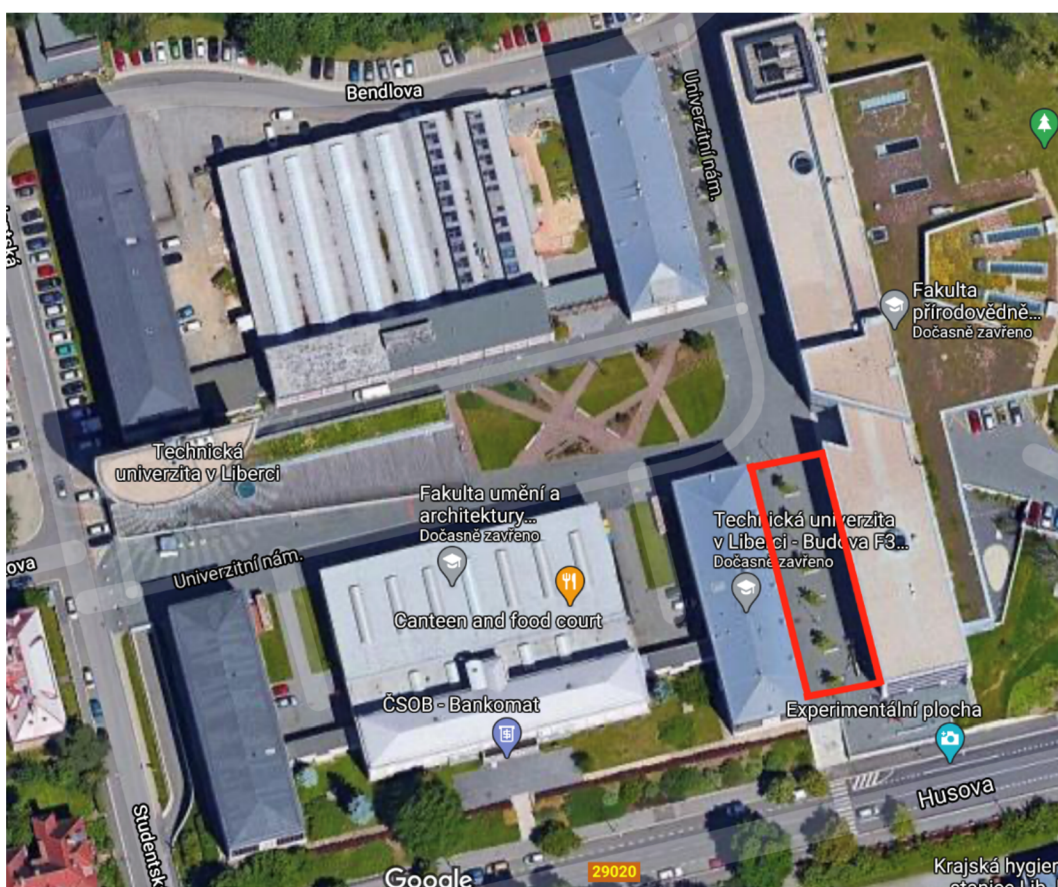
Obr. 35 Detail čipu zelené LED diody (Zdroj: Autor)



Graf 8 Vyzařovací charakteristika svítivosti zeleného LED zdroje

3.2.2 Experiment 2 - Měření světelně-technických parametrů v pěší zóně

Dalším experimentem této diplomové části bylo naměření osvětlenosti ve veřejném prostoru. Experiment byl proveden v areálu Technické Univerzity v Liberci mezi budovami G a budovou FZS (viz Obr. 36). Jedná se o pěší zónu, která je tvořena čtyřmi svítidly veřejného osvětlení, mezi kterými se nachází lavičky a stromy (viz Obr. 37). Cílem bylo poukázat na důsledky nevhodného otočení výložníků svítidel VO. Výložníky svítidel byly nainstalovány o 90°, čímž dochází vlivem asymetrie k nasvětlení stěn budov místo rovnoměrné osvětlenosti plochy pěší zóny. Na druhou stranu je třeba říct, že tyto budovy fungují pouze pro vědecko-technickou činnost a neslouží jako obytné budovy.



Obr. 36 Mapa areálu TUL včetně označeného místa měření (Zdroj: Autor)



Obr. 37 Pěší zóna mezi budovami G a FZS (Zdroj: Autor)

3.2.2.1 Průběh měření

Experimentální měření zahrnovala několik fází. První fáze započala prostudováním mapových podkladů na webových portálech iKatastr a map Google Maps. Dále byla provedena fotodokumentace místa experimentu pomocí digitální zrcadlovky Nikon v režimu HDR.

Následně byla na zemi mezi oběma budovami G a FZS vytvořena síť bodů, která byla označena písmeny od A-H. Jednotlivé body byly od sebe vzdáleny 2 metry a označovaly se pomocí pásmového metru na povrch (dlažební kostky) pomocí bílé školní křídly. Pro větší přesnost měření byl použit laserový měřák, který zaručil, že zakreslené body budou v rovině. Pro další znázornění problematiky byly další body vytvořeny virtuálně na fasádě budov G a FZS, a to ve výškách 2.5, 2 a 1 metr. Celkem bylo takto vytvořeno 16 úrovní, které byly od sebe vzdáleny 3 metry a jednotlivých měřících bodů čítalo 224.

Poslední částí experimentu bylo naměření intenzity osvětlení v každém bodě. Měření bylo prováděno pomocí luxmetru Krochmann RadioLux 111, který se skládal z detektoru připojeného kabelem k samotnému přístroji. Pro přesnější měření byl vytvořen teleskopický hliníkový držák, který byl připevněn k detektoru přístroje (viz Obr. 38). Držák byl zhotoven proto, aby experimentátor nezastiňoval detektor a neovlivňoval

měření. Jednotlivé hodnoty v každém bodě byly okamžitě hlášeny druhé osobě, která je zapisovala do předem připravené tabulky.



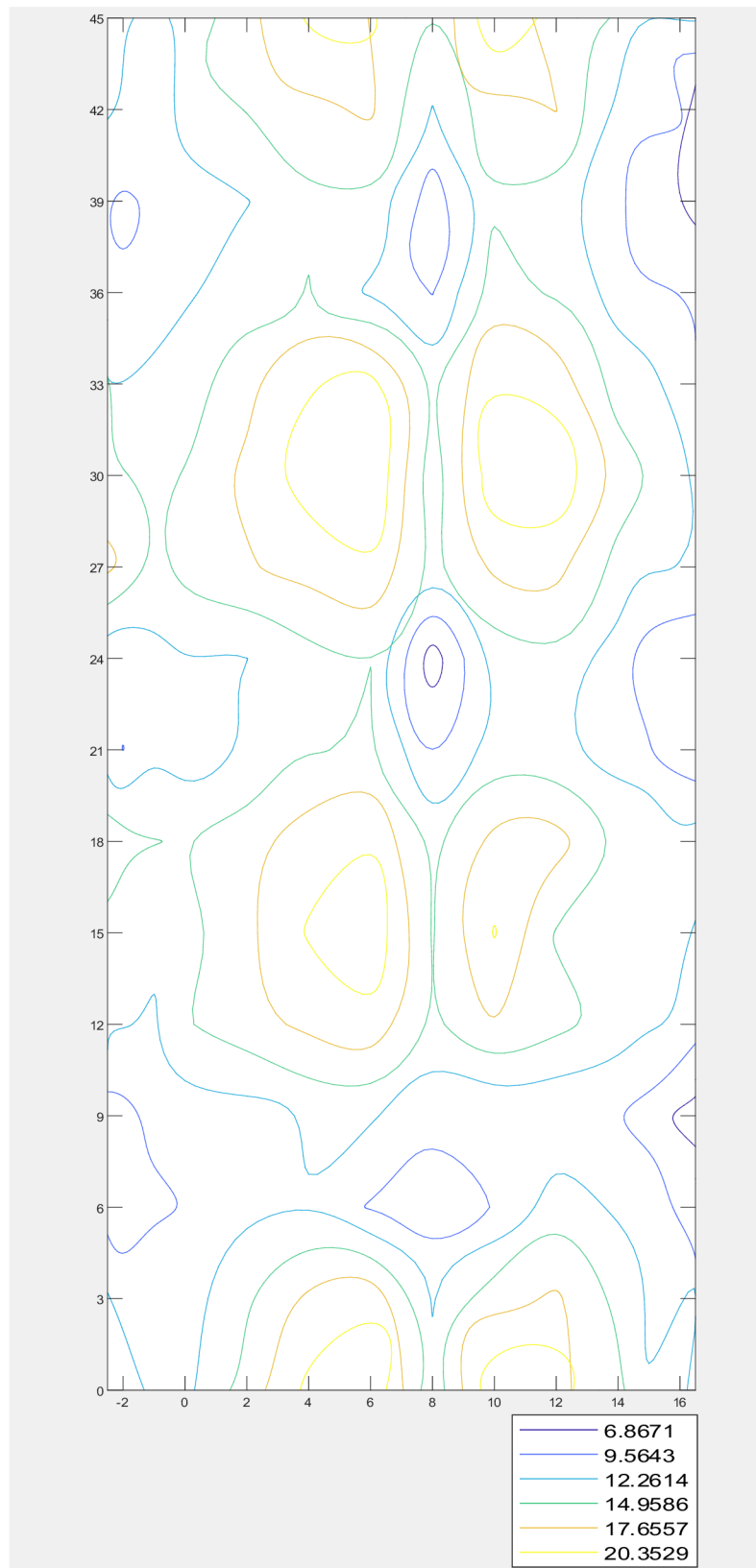
Obr. 38 Ukázka měření osvětlenosti pomocí luxmetru (Zdroj: Autor)

Součástí tohoto experimentu bylo také naměření světelných spekter v ulici Husova pomocí spektrometru Photo Research SpectraScan PR740. Technické specifikace použitého spektrometru se nachází na webových stránkách výrobce. (43)

3.2.2.2 Analýza výzkumných dat

Po naměření veškerých hodnot osvětlenosti byly zapsané hodnoty převedeny do elektronické formy tabulkového kalkulátoru MS Excel. Následně byly tyto hodnoty importovány do programu Matlab. Zde byla vytvořena mapa osvětlenosti, která pomocí isoluxů znázorňuje rozdělení osvětleností v měřících bodech (viz. Obr. 39).

Vzhledem k tomu, že se v pěší zóně nacházely stromy, byly pod nimi naměřené hodnoty osvětlenosti značně ovlivněny, což je možné vidět v příložené intenzitní mapě ve sloupci E viz. Obr. 56.



Obr. 39 Mapa osvětlenosti v luxech

Jak již bylo zmíněno, pro osvětlení konkrétní pěší zóny byla použita asymetrická svítidla, která směřují světlo od stožáru do prostoru. Díky software Fiji ImageJ bylo možné za pomoci funkcionality RGB to Luminance převést obraz do jasové mapy a lépe tak poukázat na tuto problematiku (viz Obr. 40). Pro vytvoření škály jasové mapy bylo zapotřebí změřit spektrální odraznost, resp. spektrální činitel odrazu (reflektanci) na fasádě budov G a FZS pomocí digitálního spektrofotometru X-Rite i1. Technické parametry tohoto přístroje lze nalézt na webových stránkách. (44)

Spektrální odrazivost byla vypočtena díky datům (spektra), která byla naměřena prostřednictvím digitálního spektroradiometru. Následně za pomoci digitálního spektrofotometru X-Rite i1 byly naměřeny hodnoty spektrální odrazivosti na obou budovách. Tyto hodnoty byly následně zprůměrovány a dosazeny s daty digitálního spektroradiometru do vzorce (viz. Rovnice 8). Z výsledných hodnot lze říct, že odrazivost budovy G (bílá fasáda) činí přibližně 50 % a budova FZS (hnědá fasáda) okolo 37%.

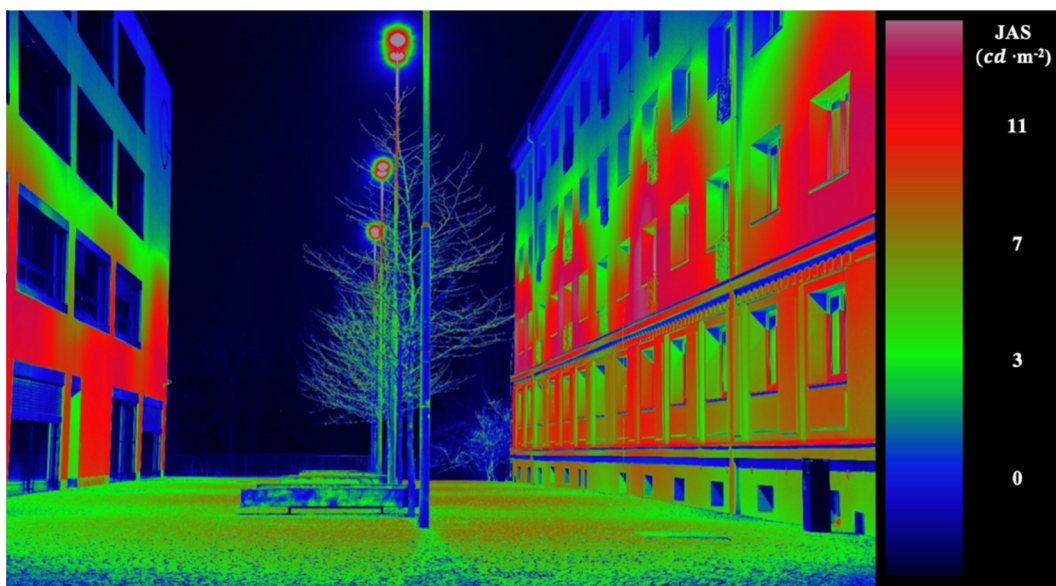
$$\phi_V = 693,002 \frac{lm}{W} \cdot \int_0^{\infty} V(\lambda) \phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda \quad \text{Rovnice 8}$$

Φ_V – světelný tok

$V(\lambda)$ – fotoskopická citlivost-denní vidění

$\Phi_{e,\lambda}$ - spektrální zářivý tok

λ - vlnová délka



Obr. 40 Jasová mapa měřeného místa (Zdroj: Autor)

Z přiloženého obrázku je možné říct, že díky nevhodnému umístění výložníků svítidla dochází k osvětlení fasády a oken budov. K tomu, aby došlo k rovnoměrné distribuci světla by bylo zapotřebí otočit výložníky svítidla o 90°. Díky otočení výložníků by nedocházelo k vyzařování rušivého světla do budov a docházelo by k lepšímu osvětlení pěší zóny. Jedná se o chybnou instalaci, která by měla být v budoucnu opravena.

Další ukázky VO osvětlení a jejich jasů se nachází v příloze diplomové práce.

3.2.3 Experiment 3 - Vývoj analytického software

Cílem **třetího experimentu** bylo vytvoření jednoduchého analytického software, který by umožňoval vyhodnocení vlivu světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému.

Analytický software byl vytvořen pomocí programu Matlab. Software zahrnuje CIE systém metrologie optického záření, díky čemuž lze snadněji porovnávat data z různých experimentů. V rámci tohoto experimentu byly naměřené zdroje porovnány s referenčním zdrojem (denním spektrem D65).

3.2.3.1 Popis analytického software

Analytický software se skládá ze tří jednotlivých částí – části určené pro import dat, části vyhodnocených dat a 3 grafy. Ukázka zdrojového kódu analytického software je možné vidět v příloze práce. Zjednodušené schéma analytického software se nachází na Obr. 41.



Obr. 41 Zjednodušený vývojový diagram analytického software

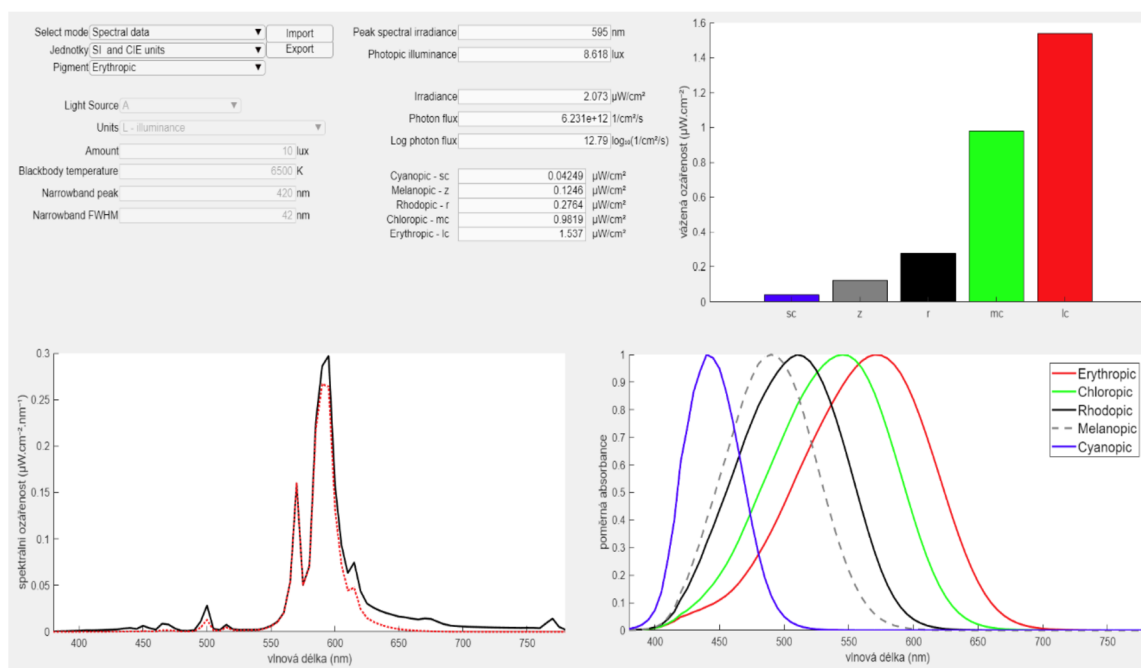
V prvním sloupci v záložce Select mode lze zvolit, zda se vloží spektrální data z experimentu či se počítá s referenčními hodnotami. Pro import dat je třeba označit data spekter (např. v programu Excel), zkopírovat je do schránky a následně stisknout tlačítko Import (naměřená data mohou být po 1nm či 5 nm). Následně dojde k vložení dat do analytického software a automaticky se přepočítají veškeré hodnoty a vykreslí se grafy. Program umožňuje vybrat jednotky v soustavě SI či IWCNP. Jednotky IWCNP využívají v programu ta data, která jsou referenční. Data v SI soustavě jsou data normalizovaná k maximu. Dále je možné vybrat, který pigment se bude v grafu vykreslovat.

V případě, že je program v módu Approximate, vypočítávají se hodnoty dle referenčních hodnot. Na výběr je 8 světelných zdrojů. Dále je možné spočítat osvětlenost, intenzitu záření či fotonový tok. Do pole Amount vkládáme požadovanou hodnotu, díky čemu lze nastavit požadovanou energii zdroje. Při nastaveném zdroji B lze nastavit teplotu ideálně černého zářiče. V případě zvoleného zdroje N (monochromatický zdroj), lze nastavit Narrowband peak (úzkopásmovou špičku) a pomocí Narrowband FWHM měníme šířku peaku v grafu. Dále se automaticky vypočítávají hodnoty Peak Irradiance (vrchol spektra), Photopic Illuminance (Osvětlenost), Irradiance (Ozáření), Photon flux (tok fotonů) a dekadický logaritmus toku fotonů.

Dále analytický software zahrnuje tři grafy. V pravém horním grafu jsou vykresleny dané α -opické odezvy jednotlivých fopigmentů. Každý sloupec tohoto grafu znázorňuje dílčí α -opickou odezvu. Pro větší přehlednost je sloupec každé odezvy popsán a označen stejnou barvou, jako na grafu pod ním. Celkově tento graf popisuje váženou ozáření a přehledně znázorňuje, jaký fotoreceptor reaguje na daný zdroj světla nejvíce.

V levém dolním grafu se prokládají křivky vložených či referenčních spekter (černá křivka) spolu se zkoumaným pigmentem. Barva druhé křivky se mění vždy podle zvoleného pigmentu.

Pravý spodní graf zobrazuje průběhy křivek α -opických akčních spekter jednotlivých fotoreceptorů. Křivky jednotlivých fotoreceptorů jsou normalizovány k hodnotě 1. Pro větší přehlednost jsou jednotlivé křivky znázorněny dle barev jednotlivých fotoreceptorů a přiložené legendy. Tyto křivky jsou stanoveny dle normy CIE S 026. Celkově lze data vyexportovat v podobě Excel tabulky pomocí tlačítka Export. Uživatelské prostředí programu je možné vidět na Obr. 42.

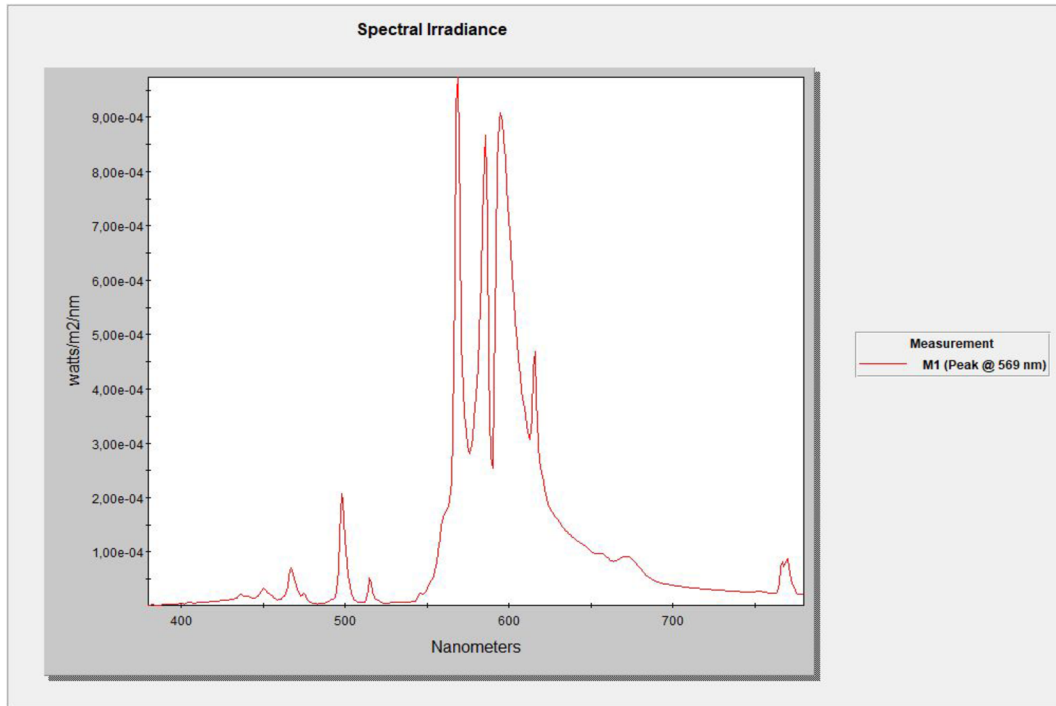


Obr. 42 Ukázka uživatelského prostředí analytického software (Zdroj: Autor)

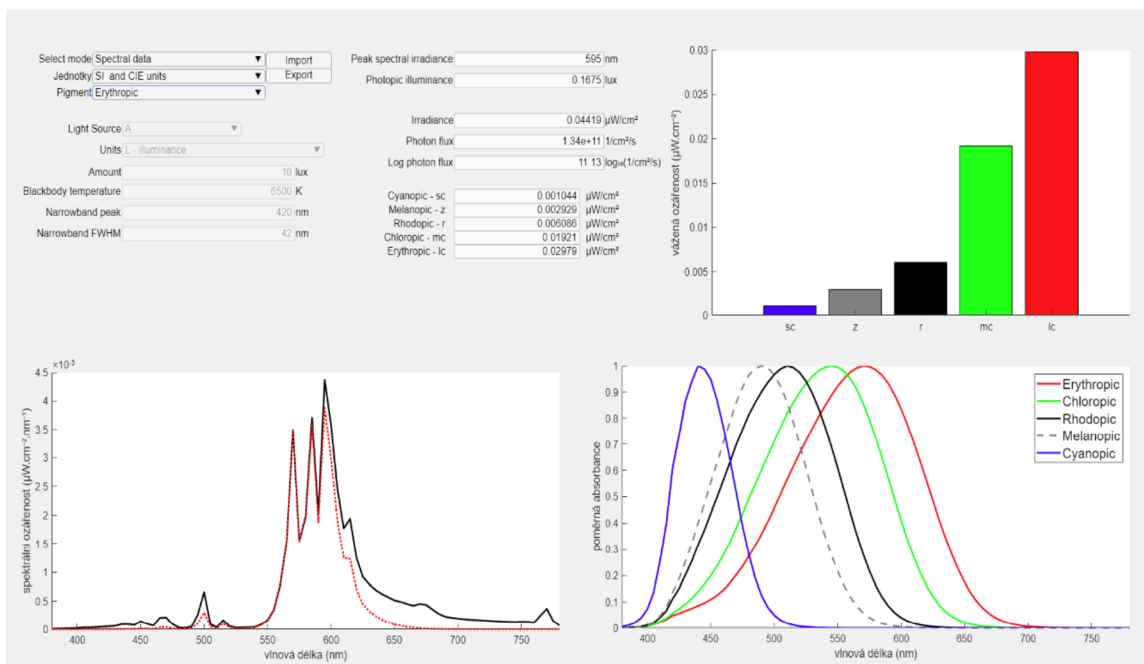
V následující části práce jsou znázorněny jednotlivé grafy a spektra naměřených zdrojů. Světelná spektra byla naměřena pomocí spektrometru Photo Research SpectraScan PR740.

HPS Husova

Jedná se o svítidlo vysokotlakou sodíkovou výbojku, která se používá pro osvětlení veřejné komunikace v Husově ulici v Liberci. Průběh spektra sodíkové výbojky z ulice Husova je možné vidět na Grafu 9. Výsledné hodnoty se nachází na Obr. 43.



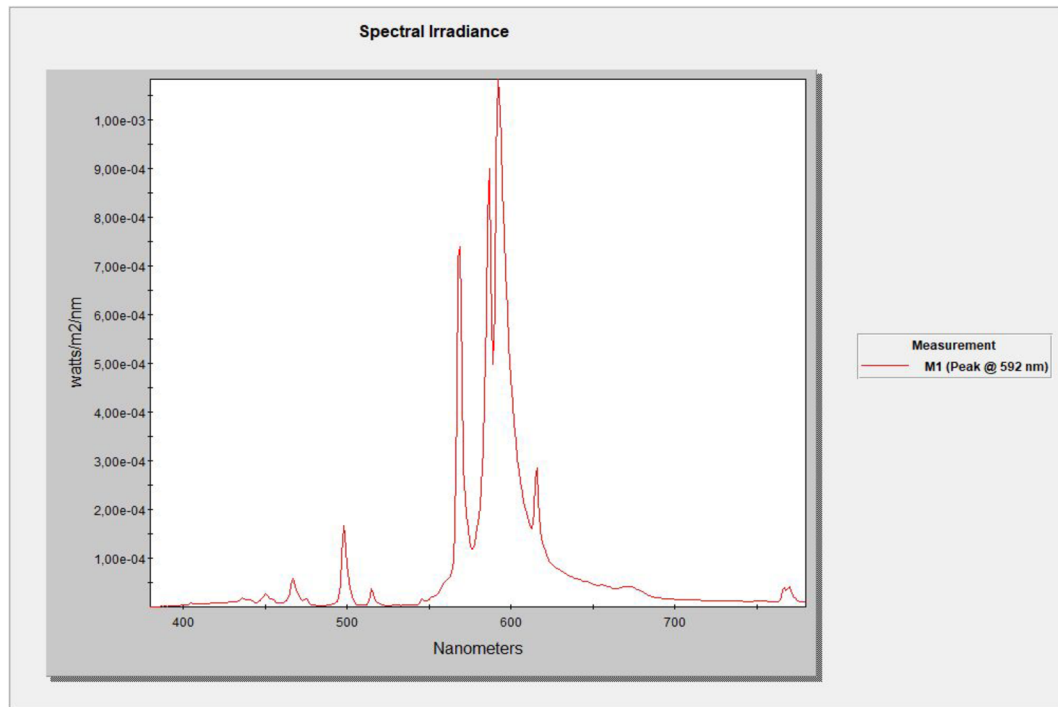
Graf 9 Průběh spektra intenzity záření svítidla HPS v Husově ulici



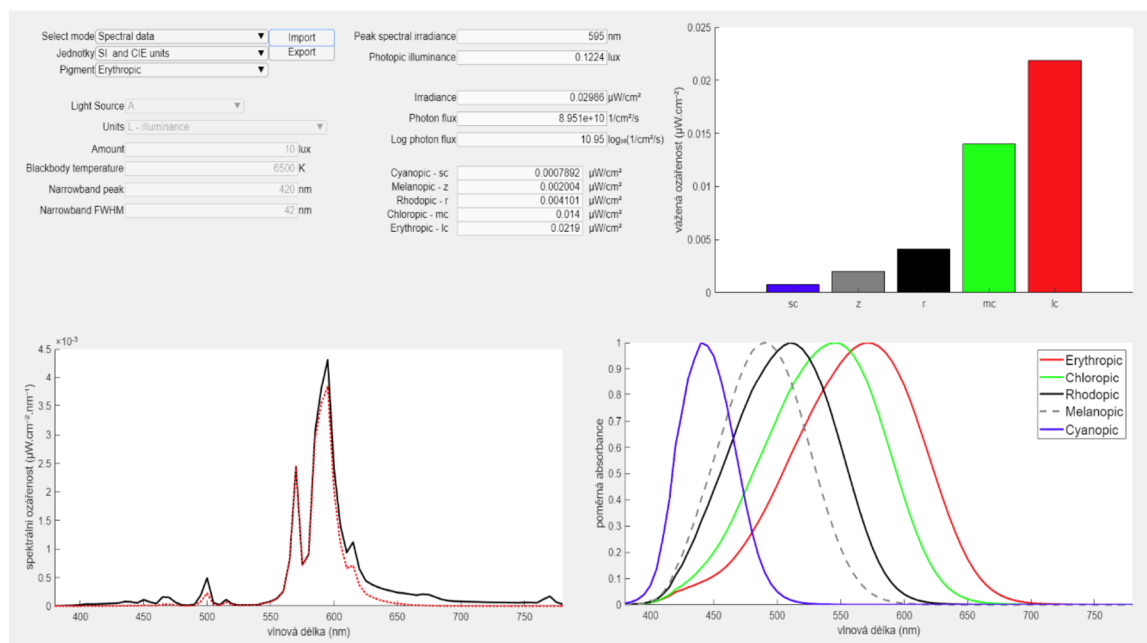
Obr. 43 Výsledné hodnoty svítidla HPS Husova

HPS TUL

Jedná se o svítidlo vybavené vysokotlakou sodíkovou výbojkou, která se používá pro osvětlení pěší zóny v areálu Technické Univerzity v Liberci. Konkrétně se jedná o prostor mezi budovou FZS a G. Průběh spektra konkrétní sodíkové výbojky je možné vidět na Grafu 10. Výsledné hodnoty se nachází na Obr. 44.



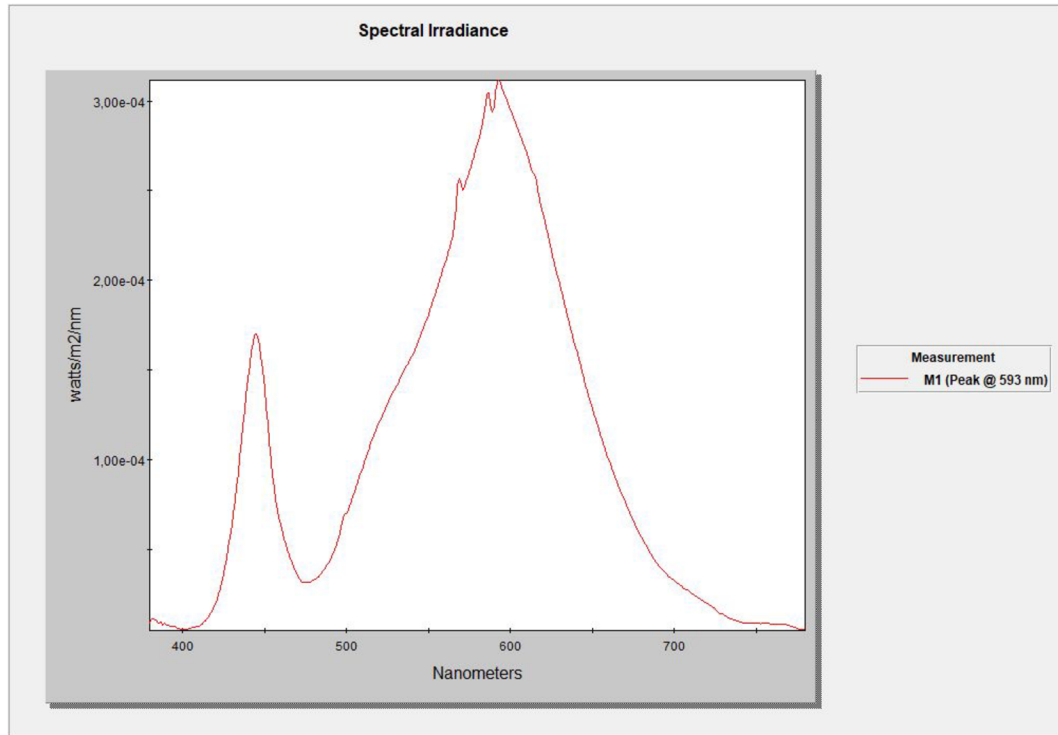
Graf 10 Průběh spektra intenzity záření svítidla HPS v areálu TUL



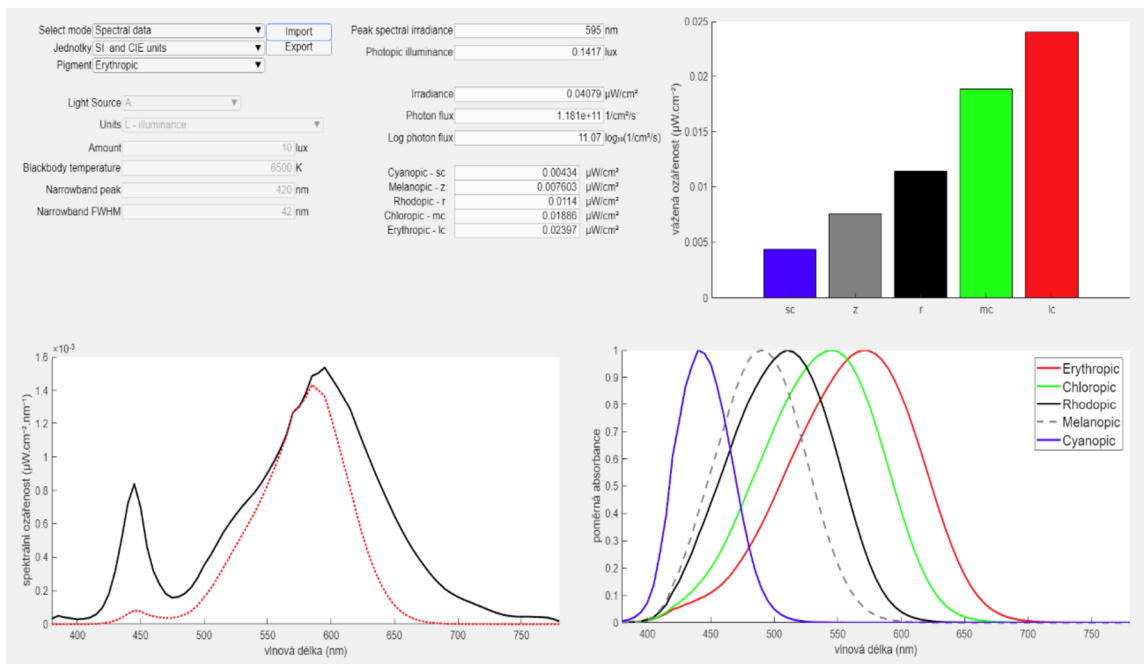
Obr. 44 Výsledné hodnoty svítidla HPS TUL

LED Husova

Jedná se o svítidlo s LED zdrojem, které se používá pro osvětlení přechodu pro chodce v ulici Husova. Průběh spektra LED svítidla z ulice Husova je možné vidět na Grafu 11. Výsledné hodnoty se nachází na Obr. 45.



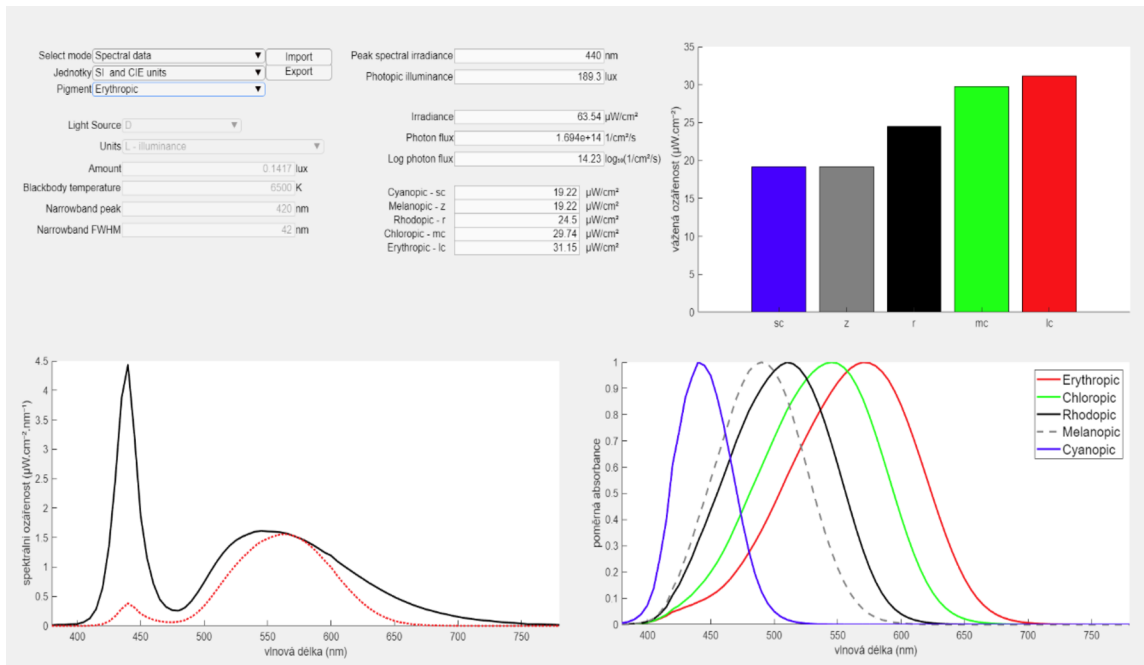
Graf 11 Průběh spektra intenzity záření LED svítidla v ulici Husova



Obr. 45 Výsledné hodnoty svítidla HPS LED

Bílá LED

Jedná se o zdroj světla, který byl použit při měření v temném boxu v prvním experimentu diplomové práce. Výsledné hodnoty tohoto LED zdroje jsou podrobně znázorněny na Obr. 46.



Obr. 46 Výsledné hodnoty bílého LED zdroje

4 Diskuse

Stěžejním cílem diplomové práce bylo vytvoření analytického programu, který díky importovaným datům (světelná spektra) umí vyhodnotit vliv světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému. Principiálně program vychází z dat Mezinárodní komise pro Osvětlování, která již v roce 2018 přijala nový mezinárodní standard CIE (S 026/E:2018). Je třeba říct, že program CIE je zhotoven v tabulkovém kalkulátoru Excel a disponuje odlišným grafickým rozhraním. Analytický software v diplomové práci byl naprogramován pomocí programu Matlab a k jeho instalaci stačí pouze instalační balíček. Tento program lze vygenerovat jako přenosnou aplikaci pro stolní počítač.

Naměřená spektra svítidel VO mají velmi podobný peak – 569, 592 a 593 nm. Je však otázkou, proč světelná spektra sodíkových výbojek v ulici Husova a Studentská (TUL) mají odlišná spektra. Důvodem může být pravděpodobně jiný výrobce svítidla.

Z výsledků lze usoudit, že svítidlo s vysokotlakou sodíkovou výbojkou použité v ulici Husova nevyzařuje téměř žádné modré světlo. Můžeme tedy říct, že při působení tohoto světla nedochází k aktivaci S-čípků, které jsou citlivé na krátké vlnové délky. Nejvíce jsou v tomto směru aktivovány M a L čípků. V případě svítidla sodíkového svítidla použitého v areálu TUL jsou výsledky velmi podobné vzhledem ke svítidlu HPS v ulici Husova. Naopak svítidlo s LED zdrojem světla použitého na přechodu ulice Husova obsahuje podstatně více modré složky než předchozí dvě svítidla. Pomocí analytického programu bylo zjištěno, že všechny fotoreceptory jsou na toto světlo podstatně více citlivé. Jde zejména o S-čípků, které jsou nejcitlivější na kratší vlnové délky, dále tyčinky a v neposlední řadě retinální gangliové buňky.

Následně byly změřeny odezvy jednotlivých fotoreceptorů na bílý LED zdroj, který byl měřen v temném boxu. Z výsledků je patrné, že vážená ozáření dosahuje několikanásobně vyšších hodnot než u předchozích zdrojů světla. Zatímco v případě svítidel VO byly hodnoty vážené ozáření v tisícinách, zde jsou v řádech desetin.

Dále byl proveden experiment, který pomocí měřicí techniky a moderního software umí poukázat na nevhodnou distribuci světla. Tento případ byl objeven v areálu TUL mezi budovami FZS a G. Zde dochází k distribuci rušivého světla do fasády a oken budov. Jak již bylo řečeno, tomu, aby došlo k rovnoměrné distribuci světla, je nutné otočit výložníky

svítidla o 90°. Je složité říct, proč jsou výložníky svítidel tímto směrem zejména v době, kdy jsou veškeré stavební realizace svázány normami a vyhláškami. Na druhou stranu tyto budovy slouží pouze pro vědecko-technické účely a nelouží jako budovy obytné. V případě, že by tyto budovy byly použity jako obytné, je použití tohoto VO s takto nastavenými výložníky krajně nevhodné a docházelo by k distribuci rušivého světla, které by mělo negativní vliv na cirkadiánní rytmus lidí žijících uvnitř této budovy.

Experiment, který byl prováděn v temném boxu prokázal, že naměřené LED zdroje a kombinované zdroje mají odlišné světelně-technické parametry. Pomocí roviny C- γ dle normy CIE 070-1987 byly zjištěny jednotlivé vyzařovací charakteristiky a křivky svítivosti zdrojů. Dále je třeba říct, že norma CIE 070-1987 obsahuje také jiné roviny měření. Nastává otázka, jaké by byly výsledky při měření v jiných fotometrických rovinách (např. B- γ). Cílem tohoto experimentu tedy bylo znázornění vyzařovacích charakteristik různých LED zdrojů a možného osvitu na sítnici lidského oka. Dále experiment prokázal, že vyzařované světlo z kombinovaného LED zdroje rozptyluje světlo do podstatně větších úhlů a dosahuje podstatně menších hodnot svítivosti než bílý LED zdroj. Dá se tedy říct, že kombinovaný LED zdroj je podstatně vhodnější pro používání ve večerních hodinách.

Celkovým výstupem práce je tedy analytický software. Lze říct, že vytvořený analytický software by bylo možné v budoucnu použít také pro naměřená jednotlivá světelná spektra různých elektronických zařízení (smartphone, tablety, počítače atd.).

5 Návrh doporučení pro praxi

V rámci výzkumné části diplomové práce byl vytvořen analytický software, který na základě vstupních hodnot ze světelných zdrojů dokáže vyhodnotit vizuální a nevizuální odezvy. Tento software zahrnuje CIE systém metrologie optického záření tak, aby bylo možné porovnávat data z různých experimentů. Je třeba říct, že analytický software v diplomové práci disponuje pouze jednoduchým grafickým rozhraním, které může být do budoucna vylepšeno.

Díky intenzivnímu rozvoji moderních technologií lze předpokládat, že v budoucnu by mohl být podobný analytický software použit pro komerční použití jako aplikace pro chytré telefony či tablety. Tato aplikace by mohla být následně stažena z internetových obchodů jako například Apple Store či Google Play. Alternativou je vytvoření verze analytického programu pro stolní počítače. K tomu, aby aplikace našla své uplatnění, je zapotřebí vyřešit otázku týkající se uložení světelných spekter. Na výběr jsou pravděpodobně dvě možnosti.

První možností je uložení světelných spekter přímo do aplikace. Díky pravidelným aktualizacím aplikace se počet světelných spekter zdrojů uložených v aplikaci může rapidně zvyšovat. Překážkou však může být nevěle výzkumných pracovníků, lidí měřících světelné zdroje či výrobců svítidel k distribuci světelných spekter.

Druhou možností je vytvoření cloudového úložiště, které by bylo napojeno na samotnou aplikaci. Jednotliví výrobci světelných zdrojů by rázem mohli sdílet světelná spektra svítidel na toto úložiště, odkud by uživatel pomocí aplikace v chytrém telefonu či tabletu četl jednotlivé výsledky. Díky tomu by měl každý uživatel detailní přehled o svítidlech a mohl by se tak snadněji rozhodnout, které svítidlo je pro jejich účel výhodnější.

V současné době analytický software umí zobrazit pouze křivky jednotlivých fotoreceptorů a porovnat je s importovanými světelnými zdroji. Bohužel nelze zjistit, jaké hodnoty světelných zdrojů jsou již pro oko nevhodné a nebezpečné, neboť tyto limity nebyly do současné doby stanoveny.

V budoucnu lze tento analytický software zdokonalit o přidání maximálních limitů ozáření oka, které by uživatele informovaly, jaký zdroj je pro něho vhodnější a bezpečnější.

6 Závěr

Diplomová práce na téma Modelování citlivosti lidského oka k optickému záření se zabývá tvorbou jednoduchého analytického software umožňujícího vyhodnotit vliv světelných zdrojů na vizuální a nevizuální odezvy lidského zrakového systému.

V teoretické části byl popsán zrakový orgán člověka včetně principu fungování cirkadiánního systému člověka. Následně byly popsány jednotlivé světelné zdroje, které se nejčastěji používají pro svítidla veřejného osvětlení.

Výzkumná část práce byla realizována ve třech experimentech. Pro realizaci prvního experimentu bylo zapotřebí vytvořit speciální temný box. Zde byly jednotlivé světelné zdroje měřeny v uspořádání C- γ dle normy CIE 070-1987. Temný box obsahoval oddělenou zdrojovou a detekční část. Výsledkem tohoto experimentu byly naměřené vyzařovací charakteristiky včetně křivek svítivosti různých LED a kombinovaného světelného zdroje, na kterých byl demonstrován vliv difuzoru z mléčného skla na zvýšení úhlu vyzařování.

V druhém experimentu byly naměřeny hodnoty osvětleností na zemi a fasádě budov. Cílem bylo poukázat na nevhodnou distribuci rušivého světla, které díky nevhodnému natočení výložníků vyzařuje světlo do fasády a oken budov. Součástí tohoto experimentu bylo vytvoření mapy osvětleností, které graficky znázorňuje distribuci světelné energie na zem a budovy pěší zóny. Dále byla vytvořena jasová mapa, která díky započtené spektrální odrazivosti vyjadřuje přibližný jas dopadajícího do oka člověka.

Cílem třetího experimentu bylo vytvoření analytického software, který na základě vložených dat dokáže vyhodnotit vizuální a nevizuální odezvy zrakového systému člověka. Analytický software dokáže zobrazit, jaký fotoreceptor je na různý světelný zdroj nejcitlivější. Disponuje jednoduchým grafickým rozhraním, které může být v budoucnu ještě více vylepšeno a sofistikováno.

Na základě zjištěných skutečností z provedeného výzkumu lze říct, že je nezbytné se problematikou spojenou s vyzařováním světla zabývat.

Seznam použité literatury

- (1) ROSINA, Jozef et al. *Biofyzika: pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4237-3.
- (2) SINEL'NIKOV, Rafail Davidovič. *Atlas anatomie člověka. III. díl, Nauka o nervové soustavě, o ústrojích smyslových a o žlázách s vnitřní sekrecí*. 3. vyd. Praha: Avicenum, 1982.
- (3) ČIHÁK, Radomír. *Anatomie. Třetí, upravené a doplněné vydání*. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5636-3.
- (4) HABEL, Jiří. Základy světelné techniky 2: Zrak a vidění (1.část). *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2008, **12**(5), 53-54. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37974.pdf>
- (5) MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. 2. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3918-2.
- (6) PETROVICKÝ, Pavel a Rastislav DRUGA. *Systematická, topografická a klinická anatomie*. Praha: Karolinum, 1997. ISBN 80-7184-118-8.
- (7) GRIM, Miloš a Rastislav DRUGA. *Základy anatomie*. 2., přeprac. vyd. Praha: Galén, 2014. ISBN 978-80-7492-156-8.
- (8) VIK, Michal a Martina VIKOVÁ. *Fyziologie vnímání barev* [přednáška]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní, 21.10.2020.
- (9) DUŠEK, Dominik. *Vliv zobrazovacích jednotek a monitorů na cirkadiánní rytmus člověka*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta zdravotnických studií. Dostupné také z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/151113/Bakalarska_prace_Dominek_Dusek_2018_BMT.pdf?sequence=1&sAllowed=y.
- (10) CIE 018/2019. *The Basis of Physical Photometry*. 3rd ed. Vienna: CIE, 2019.
- (11) GAŠPAROVSKÝ, Dionýz a Roman DUBNIČKA. Mezopicke videnie: čo to je a čo to prinesie pre praxi. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2018, **21**(2), 47-50. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/mezopicke-videnie-co-to-je-a-co-to-prinesie-pre-praxi--2858>

- (12) HABEL, Jiří. Základy světelné techniky 2: Zrak a vidění (1.část). *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2008, **12**(5), 53-54. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/37974.pdf>
- (13) ŽÁK, Petr. Barva světla ve veřejném osvětlení – Část 2. Vliv prostředí a adaptačních podmínek na zrakový vjem. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2015, **18**(5). ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/barva-svetla-ve-verejnem-osvetleni-cast-2-vliv-prostredi-a-adaptacnich-podminek-na-zrakovy-vjem--1239>
- (14) GREGORY, Peter a Mark EDSELL. Fatigue and the Anaesthetist. *Continuing Education in Anaesthesia Critical Care & Pain*. 2014, **14**(1), 18-22. DOI 10.1093/bjaceaccp/mkt025
- (15) BENEŠ, J., J. KYMPLOVÁ a F. VÍTEK. *Základy fyziky pro lékařské a zdravotnické obory*. Praha: Grada, 2015. ISBN 978-80-247-4712-5.
- (16) HABEL, Jiří. Základy světelné techniky (3): Světelnotechnické veličiny (1.část). *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2009, **13**(1), 40-43. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38554.pdf>
- (17) SYNEK, Svatopluk a Šárka SKORKOVSKÁ. *Fyziologie oka a vidění*. 2. vyd. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- (18) FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2010, **13**(6), 56-58. ISSN 1212-0812.
- (19) LIU, Y., Z. ZHIXIAN a M. R. LUO. The impact and model of CS and CCT on alertness. *China International Forum on Solid State Lighting & International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS)*. **2020**, 196-198. DOI 10.1109/SSLChinaIFWS51786.2020.9308723
- (20) ZHU, Lirong a Phyllis C.ZEE. *Circadian rhythm sleep disorders*. Neurologic Clinic. 2012, 30(4). DOI 10.1016/j.ncl.2012.08.011
- (21) CIE S 026/E:2018. *CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light*. Vienna: CIE, 2018.
- (22) LUCAS, Robert J, et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends in Neurosciences*. 2014, **37**(1), 1-9. DOI: 10.1016/j.tins.2013.10.004
- (23) VESELÝ, Ivo. Spánková hygiena a rušivé světlo. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2019, **22**(4), 32. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/spankova-hygiena-a-rusive-svetlo--3875>

- (24) AUGER, R. Robert, ed. 2020. *Circadian Rhythm Sleep-Wake Disorders*. Cham: Springer, 2020. DOI 10.1007/978-3-030-43803-6.
- (25) ŠTĚPÁNEK, Jaroslav. *Fotobiologická bezpečnost svítidel a světelných zdrojů*. Brno, 2020. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/129395>
- (26) [Světelné znečištění] [online obrázek]. In: Osvětlení domu a zahrady [online]. [cit. 2021—06-21]. Dostupné z: svetelneznecisteni.cz/svitme-spravne/osvetleni-domu-a-zahrady/
- (27) HABEL, Jiří et al. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978- 80- 86534-21-3.
- (28) REICHL, Jaroslav. Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. 2006-2021, [Česko], [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- (29) SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- (30) HADŽIOSMANOVIČ, Mirza a Jiří HOCHMAN. Svítidla pro veřejné osvětlení a jejich použití. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2017, **20**(2). 36-39. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/svitidla-pro-verejne-osvetleni-a-jejich-pouziti--2229>
- (31) DUSIL, Tomáš. *Xenonové světlo vs. LED: Jsou diody opravdu lepší*. Auto.cz [online]. 2017. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/xenonove-svetlomety-vs-led-jsou-diody-opravdu-lepsi-103658>
- (32) ŽÁK, Petr. Využití LED ve veřejném osvětlení. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2017, **20**(5), 53-56. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Svetlo/2017/05/Svetlo_05_2017/index.html#p=53
- (33) PASEKA, Petr a Irena PELIKÁNOVÁ. LED ve veřejném osvětlení – skutečnost vs mýty. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2009, **12**(6), 38-39. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/ovladani-verejneho-osvetleni--3036>

- (34) BARTÍK, Hynek. Světelné diody ve veřejném osvětlení. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2010, **13**(6), 40-42. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42558.pdf>
- (35) ŽÁK, Petr a Teodor TERRICH. Ovládání veřejného osvětlení. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2018, **21**(3), 33. ISSN 1212-0812. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/ovladani-verejneho-osvetleni--3036>
- (36) NOVÁK, Tomáš et al. Zavedení smart technologií do měst a obcí využitím prvků veřejného osvětlení. *Světlo: odborný časopis pro světelnou techniku*. 2017, **20**(5), 46-47. ISSN 1212-0812.
- (37) PULTZNER, Martin. *Podívejte se, jak budou v Praze vypadat chytré lampy pro nabíjení elektromobilů*. FDrive.cz [online]. Praha: 24net, 9.10.2020 [cit. 2021-6-19]. Dostupné také z: <https://fdrive.cz/clanky/podivejte-se-jak-budou-v-praze-vypadat-chytre-lampy-pro-nabijeni-elektromobilu-5937>
- (38) VARGA, Jan. *Praha vybaví veřejné osvětlení štítky s QR kódy*. PrahaTV [online]. Praha: PRAHATV, 16.6.2020 [cit. 2021-6-19]. Dostupné také z: <https://prahatv.eu/zpravy/praha/praha/13135/praha-vybavi-verejne-osvetleni-stitky-s-qr-kody>
- (39) ČSN CEN/TR 13201-1. *Osvětlení pozemních komunikací – část 1: Návod pro výběr tříd osvětlení*. Praha. 9/2016
- (40) PRMTZ8. *Motorized Precision Rotation Stage: User Guide* [online]. THORLABS, 2018 [cit. 2021-02-25]. Dostupné také z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2419&pn=KDC101
- (41) Avantes. *Avaspec 2048 spectrometer manual*. Eerbeek: Avantes. Dostupné z: http://web.unideb.hu/uh9v32/muszer2/avantes_all.pdf
- (42) CIE 70-1987. *The measurement of absolute luminous intensity distributions*. Vienna: CIE, 2008.
- (43) PHOTO RESEARCH. PR-740 *SpectraScan. Photo Research* [online]. Topanga Canyon Place, 2012, 8. Dostupné z: <https://www.photoresearch.com/sites/default/files/PR-7%20Series%20%20Brochure.pdf>
- (44) XRITE. *i1 PRO 3: Taking calibration and profiling to the next Level*. X-Rite [online]. United States, 2019. Dostupné také z: https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/literature/17/17-700_17-799/17-718-i1pro3-spec-sheet/17-718_i1pro3_spec-sheet_en.pdf

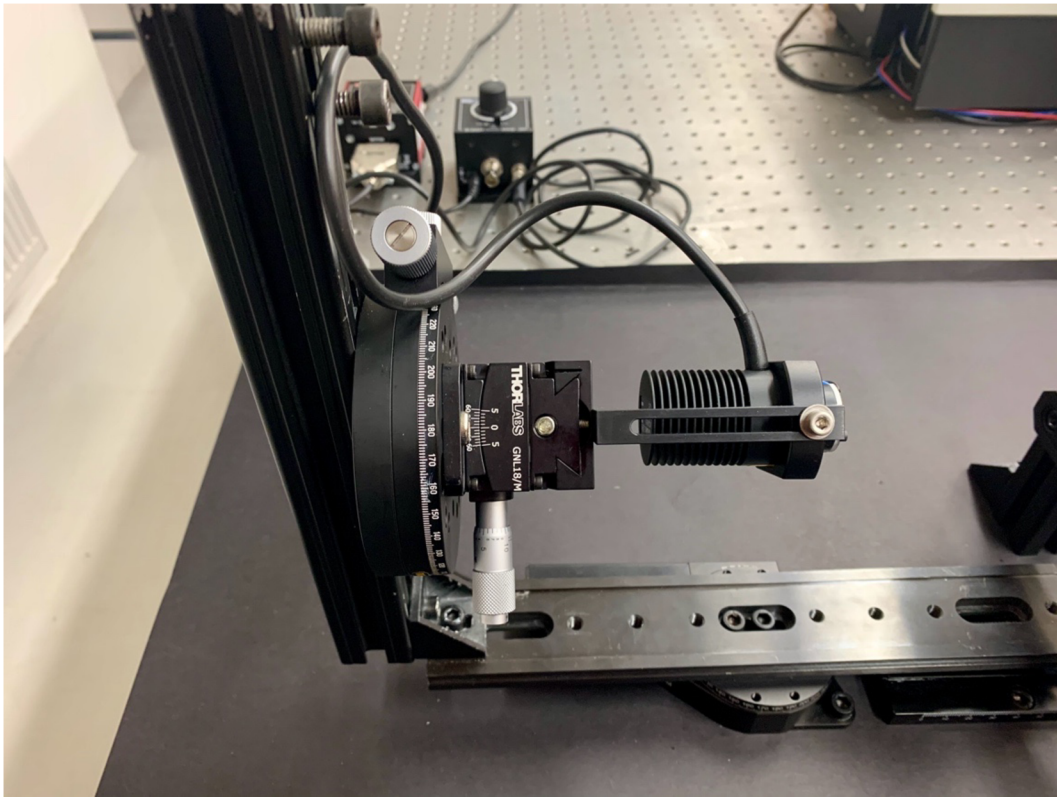
Seznam příloh

Příloha A Komponenty temného boxu a vyzařovací charakteristiky LED zdrojů

Příloha B Ukázky veřejného osvětlení

Příloha C Ukázka části zdrojového kódu analytického software

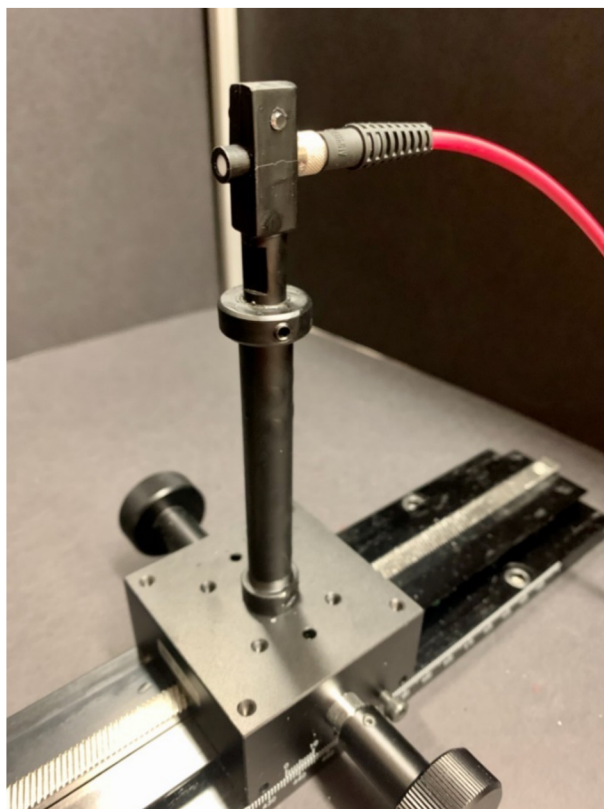
Příloha A Komponenty temného boxu a vyzářovací charakteristiky LED zdrojů



Obr. 47 Zdroj světla uchycený na goniometrickém stolku (Zdroj: Autor)



Obr. 48 Rotační stolek (Zdroj: Autor)



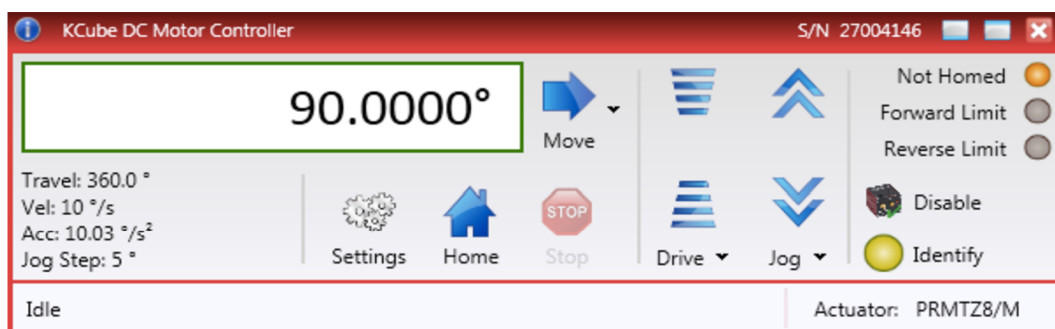
Obr. 49 Kosinový korektor (Zdroj: Autor)



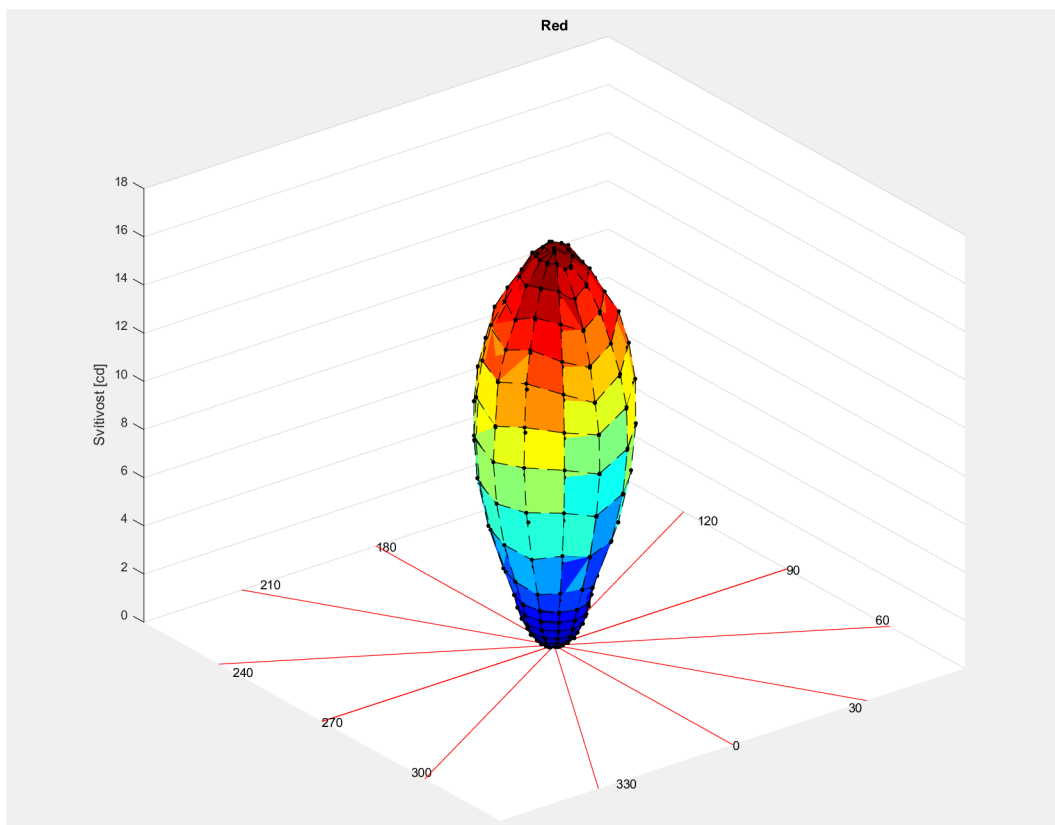
Obr. 50 Ovladač elektronického stolku Kinesis (Zdroj: Autor)



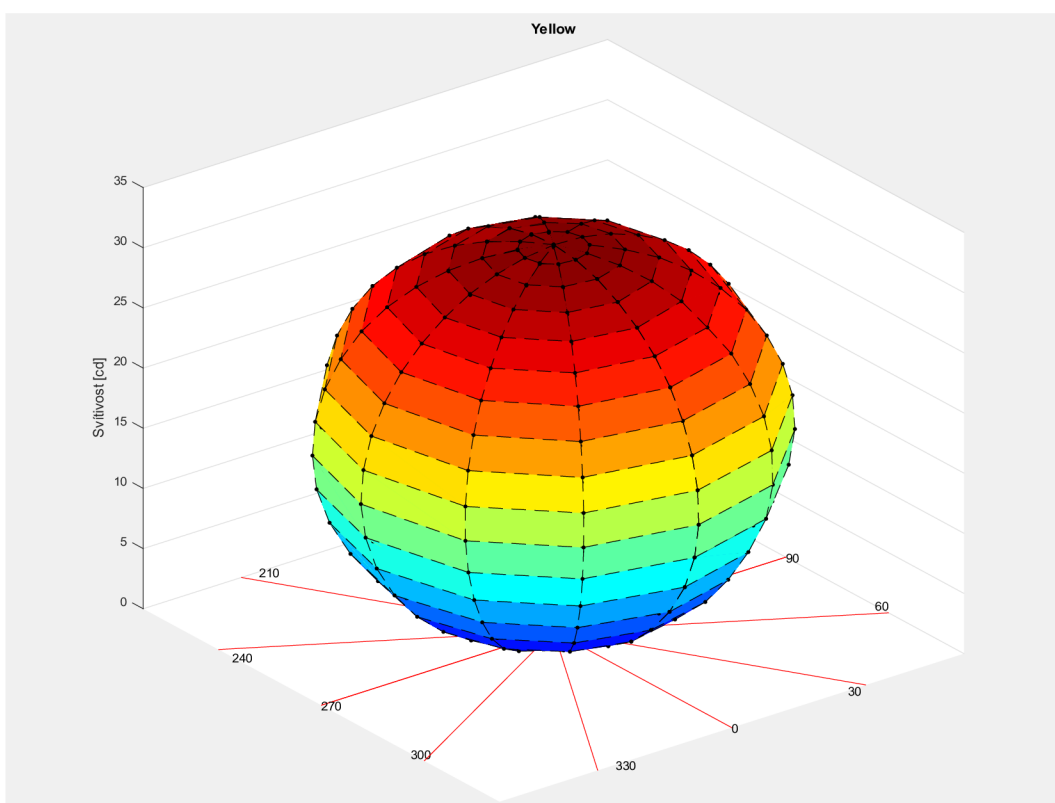
Obr. 51 Ovladač LED zdroje (Zdroj: Autor)



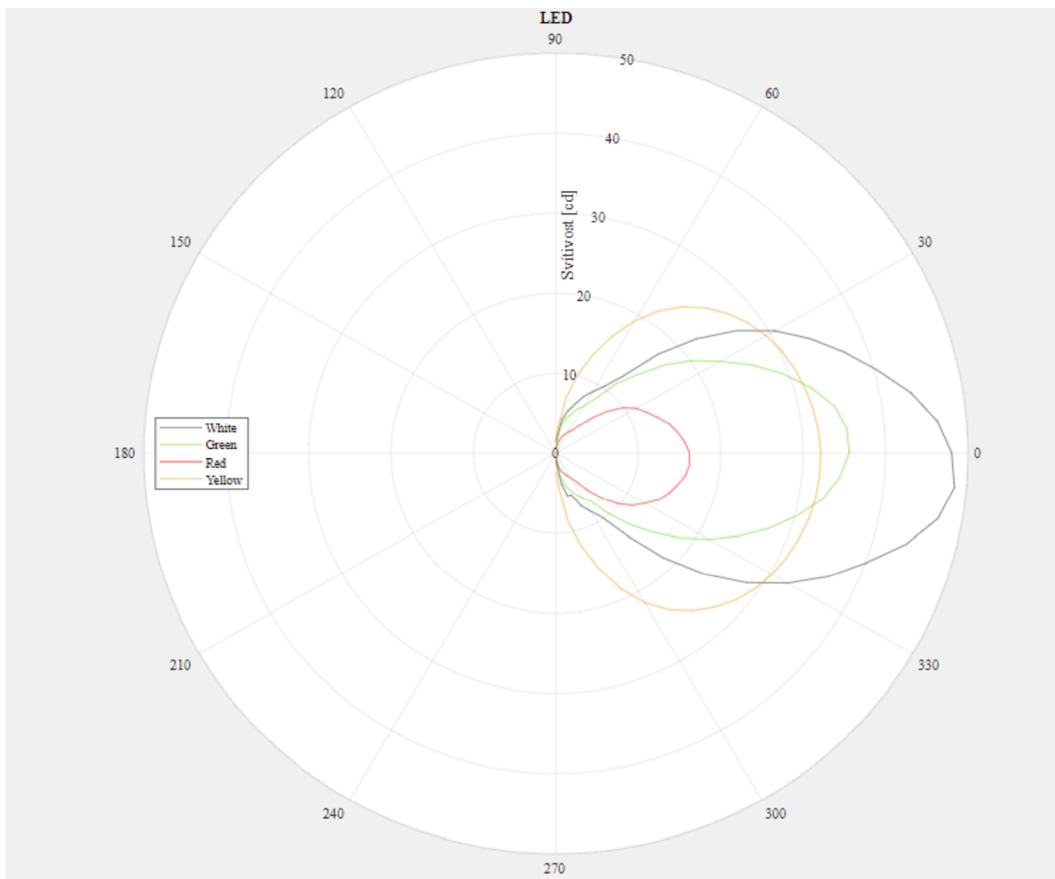
Obr. 52 Uživatelské prostředí Kinesis elektronického stolku (Zdroj: Autor)



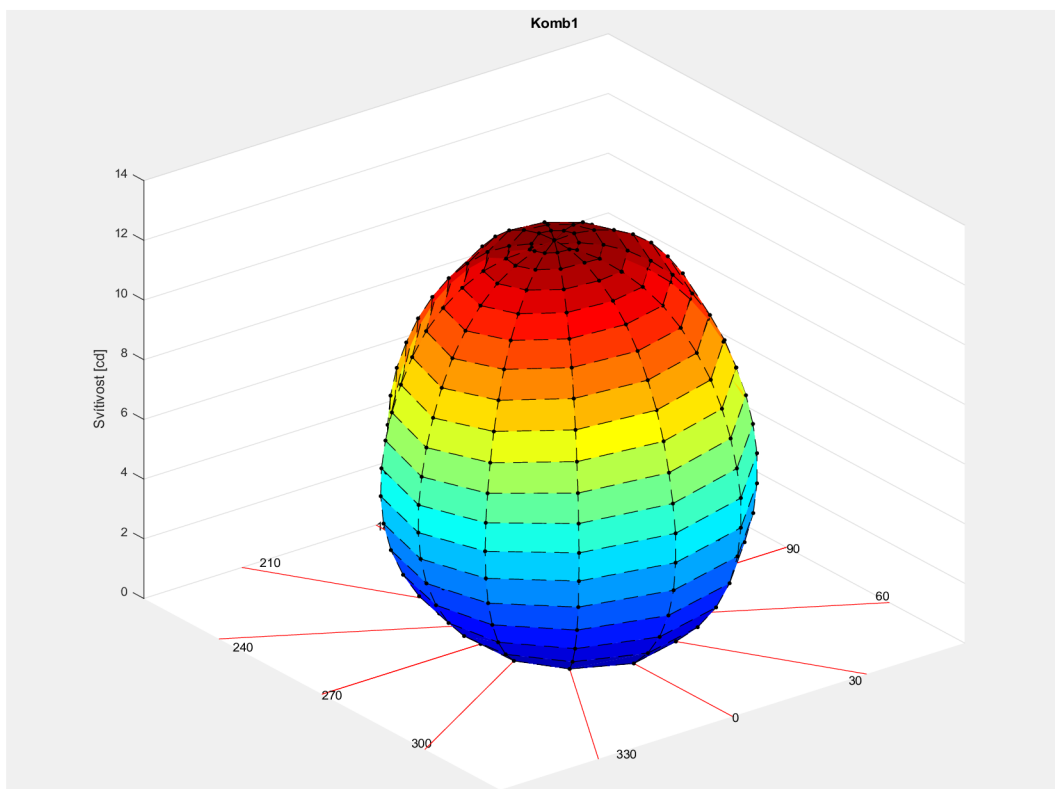
Graf 12 Vyzářovací charakteristika svítivosti červeného LED zdroje



Graf 13 Vyzářovací charakteristika svítivosti žlutého LED zdroje



Graf 14 Křivky svítivosti jednotlivých LED zdrojů



Graf 15 Vyzařovací charakteristiky kombinovaného zdroje

Příloha B Ukázky veřejného osvětlení



Obr. 53 Ukázka veřejného osvětlení ulice Husova v Liberci (Zdroj: Autor)



Obr. 54 Ukázka veřejného osvětlení ulice Masarykova v Liberci (Zdroj: Autor)



Obr. 55 Ukázka veřejného osvětlení ulice Březinova cesta v Litoměřicích (Zdroj: Autor)

		V2.5m	V2m	V1m	0	2	4	6	8	10	12	14	V1m	V2m	V2.5m
		A2.5	A2	A1	A	B	C	D	E	F	G	H	H1	H2	H2.5
0	1	14,100	14,670	11,150	11,530	16,240	21,000	22,730	13,170	22,400	22,170	15,620	12,410	13,180	11,160
3	2	12,540	10,970	11,970	10,930	14,510	18,180	19,490	12,040	16,650	18,040	14,240	11,900	12,180	10,730
6	3	8,279	8,141	8,936	9,798	11,570	12,060	9,309	8,272	9,670	13,670	11,860	11,200	9,080	8,080
9	4	8,015	8,800	10,330	10,750	11,080	12,620	12,570	10,300	9,640	9,769	9,826	8,470	6,420	4,170
12	5	13,910	12,410	11,920	14,690	16,560	18,290	19,330	14,380	17,410	15,710	13,490	12,600	11,770	10,990
15	6	14,020	12,880	12,960	14,050	17,030	20,610	22,420	14,780	20,520	14,770	14,550	14,290	12,760	12,070
18	7	16,770	16,030	15,050	14,700	16,460	19,130	20,000	14,190	18,360	18,640	14,050	14,910	13,200	13,450
21	8	10,600	9,540	11,570	11,040	12,630	14,720	15,420	9,590	13,290	12,890	11,440	9,722	8,218	7,555
24	9	10,340	10,020	11,600	12,100	12,250	14,030	14,910	5,620	13,350	14,170	10,930	8,320	7,484	7,060
27	10	18,180	16,910	13,940	15,750	17,380	18,680	19,810	14,220	18,150	18,460	14,100	12,580	12,190	12,260
30	11	16,360	15,170	13,990	15,150	18,250	21,590	23,050	13,550	22,050	22,220	16,510	14,570	13,270	11,560
33	12	15,280	12,330	12,750	13,420	16,910	20,090	21,210	14,330	20,080	19,250	13,790	13,060	11,050	10,130
36	13	10,990	9,810	11,320	11,970	13,360	15,110	11,850	9,459	16,240	14,580	11,240	9,947	9,496	8,952
39	14	9,742	9,294	9,872	11,160	12,170	14,310	14,280	8,180	14,460	13,650	10,290	7,314	6,969	6,132
42	15	12,560	11,840	10,500	13,150	15,080	17,060	18,040	12,140	16,720	17,730	11,570	10,530	10,070	4,820
45	16	13,980	12,710	11,390	13,180	16,620	20,660	20,940	15,140	22,370	19,440	14,210	12,290	12,310	12,500

Obr. 56 Mapa osvětlenosti v pěší zóně mezi budovami G a FZS (Zdroj: Autor)

Příloha C Ukázka části zdrojového kódu analytického software

```
function main(app)
[importedValues5nm, illegal] = getWavelength(app);
if illegal; return; end
% Value 1.19104295262457e+29 represents 2*hc^2 where h is Planck and c is the
speed of light
% and value 14387773.5382772 represents hc/k where k is Boltzmann constant.
% These are used fo blackbody radiation function
(2hc^2/lambda^5)*1/(exp(hc/kTlambda)-1)
range = 380:5:780;
intensity=(1.19104295262457e+29./(range.^5)).*(1./(exp(14387773.5382772./(app.BlackbodytemperatureEditField.Value.*range))-1));
% N = e^(-x^2*ln(2)), where x = lambda-lambda_max / 0.5*FWHMpeak
% This can be rewritten as used below N = e^(-x^2*4*ln(2)), where x = lambda-
lambda_max / FWHMpeak
% Or N=16^(-x^2), for complete simplicity, where x = lambda-lambda_max /
FWHMpeak
N=exp(-(range-
app.NarrowbandpeakEditField.Value)/(app.NarrowbandFWHMEditField.Value)
).^2*log(16));
app.src.sourceData.relPowDis(:,6) = intensity./sum(intensity);
app.src.sourceData.relPowDis(:,5) = N/sum(N);
app.src.sourceData.relPowDis(:,5) = app.src.sourceData.relPowDis(:,5) .*
((N/sum(N))>10e-5)';
app.src.sourceData.relPowDis(:,8) = importedValues5nm./sum(importedValues5nm);
if string(app.SelectModeDropDown.Value) == app.SelectModeDropDown.Items{2}
    i = find(contains(app.LightSourceDropDown.Items,
app.LightSourceDropDown.Value));
    if app.LightSourceDropDown.Value ~= 'E'
        app.PeakspectralirradianceEditField.Value =
375+5*find(max(app.src.sourceData.relPowDis(:,i))==app.src.sourceData.relPowDis
(:,;
    else
```

```

    app.PeakspectralirradianceEditField.Value = Inf;
end

L = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,i) .*
app.src.sourceData.refFun.photopicSI);

P = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,i));

Q = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,i) .* range');

% Value 6.83001547790227 represents Photometry constant Km/100

% Value 5034116651.11454 represents 10^-15/hc, where h is Planck constant a c is
the speed of light

LP = 6.83001547790227*L/P;
QP = 5034116651.11454*Q/P;

units = getUnits(app, importedValues5nm);

if app.UnitsDropDown.Value(1) == 'Q'
    app.PhotopicilluminanceEditField.Value = LP*units/QP;
    app.IrradianceEditField.Value = units/QP;
    app.PhotonfluxEditField.Value = units;
    app.LogphotonfluxEditField.Value = log10(units);
elseif app.UnitsDropDown.Value(1) == 'P'
    app.PhotopicilluminanceEditField.Value = LP*units;
    app.IrradianceEditField.Value = units;
    app.PhotonfluxEditField.Value = QP*units;
    app.LogphotonfluxEditField.Value = log10(QP*units);
else
    app.PhotopicilluminanceEditField.Value = units;
    app.IrradianceEditField.Value = units/LP;
    app.PhotonfluxEditField.Value = QP*units/LP;
    app.LogphotonfluxEditField.Value = log10(QP*units/LP);
end

[~] = getLambda(app, app.src.sourceData.relPowDis(:,i), true);

```

```

    plotGraphs(app, app.src.sourceData.relPowDis(:,i))
else
    L = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,8) .*
app.src.sourceData.refFun.photopicSI);
    P = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,8));
    Q = sum(app.src.sourceData.relPowDis(:,8) .* range');
    LP = 6.83001547790227*L/P;
    QP = 5034116651.11454*Q/P;
    units = getUnits(app, importedValues5nm);
    app.PeakspectralirradianceEditField.Value =
375+5*find(max(app.src.sourceData.relPowDis(:,8))==app.src.sourceData.relPowDis
(:,8));
    app.PhotopicilluminanceEditField.Value = LP*units;
    app.IrradianceEditField.Value = units;
    app.PhotonfluxEditField.Value = QP*units;
    app.LogphotonfluxEditField.Value = log10(QP*units);
    [~] = getLambda(app, app.src.sourceData.relPowDis(:,8), true);
    plotGraphs(app, app.src.sourceData.relPowDis(:,8))
end
end

```

```

function lambda = getLambda(app, activeSource, reference)

```

```

% Get alpha opic values for pigments

```

```

if reference==true

```

```

    divide = string(app.JednotkyDropDown.Value) ==
app.JednotkyDropDown.Items(1);

```

```

    app.CyanopicscEditField.Value = getLambda(app, activeSource,
app.src.sourceData.refFun.cyanopic)/(1+12.2516160379921*divide);

```

```

    app.MelanopiczEditField.Value = getLambda(app, activeSource,
app.src.sourceData.refFun.melanopic)/(1+7.32410568771484*divide);

```

```

    app.RhodopicrEditField.Value = getLambda(app, activeSource,
app.src.sourceData.refFun.rhodopic)/(1+6.05360483304084*divide);

```

```
app.ChloropicmcEditField.Value = getLambda(app, activeSource,  
app.src.sourceData.refFun.chloropic)/(1+5.20038450812400*divide);
```

```
app.ErythropiclcEditField.Value = getLambda(app, activeSource,  
app.src.sourceData.refFun.erythropic)/(1+4.78845594617544*divide);
```

```
lambda = [];
```

```
else
```

```
lambda =  
6.83001547790227*app.IrradianceEditField.Value*sum(activeSource.*reference)*sum  
(app.src.sourceData.refFun.photopicSI)/sum(reference);
```

```
end
```

```
end
```