



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**NÁVRH A REALIZACE TESTOVACÍHO SVÍTIDLA
S UNIFORMNÍ VYZAŘUJÍCÍ PLOCHOU A
MOŽNOSTÍ ZMĚNY SPEKTRÁLNÍHO SLOŽENÍ**

SEMESTRÁLNÍ PRÁCE

SEMESTRAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Šilha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

BRNO 2022



Bakalářská práce

bakalářský studijní program Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Ústav elektroenergetiky

Student: Jakub Šilha

ID: 211130

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace testovacího svítidla s uniformní vyzářující plochou a možností změny spektrálního složení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše světelných zdrojů, způsobů jejich napájení a materiálů pro odrazné plochy a difuzory
2. Návrh koncepce svítidla s ohledem na zmíněné požadavky
3. Realizace svítidla
4. Laboratorní měření svítidla
5. Zhodnocení naměřených dat z hlediska zadaných požadavků

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 31.5.2022

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

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce řeší problematiku návrhu a konstrukce svítidla podle zadaných parametrů. Seznamuje čtenáře se základními vlastnostmi světelného záření, zdroji světla a jednotlivými částmi svítidla. Dále v práci nalezneme vývoj návrhu svítidla a jeho realizaci dle požadovaných parametrů. Výsledkem bude otestování vyrobeného svítidla a jeho zhodnocení.

Klíčová slova

svítidlo; konstrukce; světlo; světelný zdroj; fotometrie

Abstract

The thesis deals with the design and construction of the luminaire according to the specified parameters. It introduces the reader to the basic properties of light radiation, light sources and individual parts of the luminaire. Furthermore, the thesis presents the development of the luminaire design and its implementation according to the required parameters. As a result, the manufactured luminaire will be tested and evaluated.

Keywords

luminaire; construction; light; light source; photometry

Bibliografická citace

ŠILHA, JAKUB. *Návrh a realizace testovacího svítidla s uniformní vyzářující plochou a možností změny spektrálního složení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2021. 58 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Šilha Jakub

VUT ID studenta: 211130

Typ práce: *Bakalářská práce*

Akademický rok: 2021/22

Téma závěrečné práce: *Návrh a realizace testovacího svítidla s uniformní vyzařující plochou a možností změny spektrálního složení*

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

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

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Martinovi Motyčkovi, Ph.D. za odborné vedení, konstruktivní připomínky, trpělivost a pomoc při výrobě dílů pro svítidlo řešené v mé bakalářské práci.

Také chci poděkovat za morální podporu a rady při realizaci svítidla Ing. Janu Škodovi, Ph.D.

V Brně dne: 31. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	11
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
2. ZÁKLADY FOTOMETRIE	14
2.1 ZÁŘENÍ.....	14
2.2 VIDITELNÉ ZÁŘENÍ – SVĚTLO	15
2.2.1 Ultrafialové záření - UV	15
2.2.2 Infračervené záření - IR.....	15
2.3 POJMY A VELIČINY VE SVĚTELNÉ TECHNICE.....	16
2.3.1 Světelný tok - Φ	17
2.3.2 Prostorový úhel – Ω	17
2.3.3 Svítivost - I	18
2.3.4 Osvětlenost - E	19
2.3.5 Jas svazku světelných paprsků - L_{op}	19
2.3.6 Světlení – M	20
2.4 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN	20
2.4.1 Vizualní fotometrie.....	20
2.4.2 Fyzikální fotometrie	20
2.4.3 Měření osvětlenosti	21
2.4.4 Měření jasu	22
3. SVĚTELNÉ ZDROJE	23
3.1 TEPLOTNÍ ZDROJE.....	24
3.1.1 Obyčejná žárovka.....	24
3.1.2 Halogenové žárovky.....	25
3.2 VÝBOJOVÉ ZDROJE.....	25
3.2.1 Nízkotlaké výbojky	25
3.2.2 Vysokotlaké výbojové zdroje	27
3.3 LUMINISCENČNÍ ZDROJE.....	28
3.3.1 LED dioda.....	28
4. SVĚTELNĚ ČINNÉ ČÁSTI SVÍTIDEL.....	30
4.1 REFLEKTORY.....	30
4.1.1 Zrcadlové refraktory	30
4.1.2 Matované reflektory	31
4.1.3 Difuzní reflektory	31
4.2 DIFUZORY	31
4.3 REFRAKTORY A ČOČKY	31
4.4 SVĚTLOVODY	32
4.5 CLONY A STÍNIDLA	33
4.6 FILTR.....	33
5. NÁVRH SVÍTIDLA	34
5.1 VÝVOJ NÁVRHU.....	34
5.1.1 Zvolení počtu komor pro světelné zdroje	37

5.1.2	<i>Výběr světelných zdrojů</i>	39
5.1.3	<i>Úpravy povrchů ve svítidle</i>	41
5.2	FINÁLNÍ NÁVRH.....	42
6.	REALIZACE SVÍTIDLA	44
6.1	REALIZACE KOMOR	44
6.2	REALIZACE KULOVÉHO INTEGRÁTORU	46
6.3	ELEKTROINSTALACE	47
6.4	FINALIZACE SVÍTIDLA	50
7.	LABORATORNÍ MĚŘENÍ SVÍTIDLA	51
7.1.1	<i>Měření teploty svítidla</i>	55
8.	ZÁVĚR	56
	BIBLIOGRAFIE	58
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	59
	SEZNAM PŘÍLOH	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Elektromagnetické spektrum [2].....	14
Obr. 2. Křivka poměrné spektrální citlivosti zraku [3]	16
Obr. 3. Přehled závislostí fotometrických veličin	16
Obr. 4. Vymezení prostorového úhlu [4]	18
Obr. 5. Náčrt konstrukčního uspořádání fotočlánku [1].....	21
Obr. 6. Porovnání průběhu spektrální citlivosti polovodičových fotočlánků a normálního fotometrického pozorovatele [1].....	21
Obr. 7. Struktura třídění elektrických zdrojů světla [1]	23
Obr. 8. Poměrné spektrální složení světla žárovky [5]	24
Obr. 9. Zjednodušené schéma halogenového regeneračního stupně [1]	25
Obr. 10. Spektrální složení světla kompaktní zářivky	26
Obr. 11. Světelné spektrum nízkotlaké sodíkové výbojky	27
Obr. 12. Spektrální složení světla vysokotlaké halogenové výbojky	27
Obr. 13. Emisní spektrum základních druhů LED diod [1]	29
Obr. 14. Kulový reflektor se světelným zdrojem: a) mimo střed reflektoru, b) ve středu reflektoru [1]	31
Obr. 15. Princip funkce refraktoru [1]	32
Obr. 16. Zjednodušený nárys svítidla s rotující konstrukcí.....	35
Obr. 17. Zjednodušený nárys rozvíjeného návrhu	36
Obr. 18. Zjednodušený bokorys rozvíjeného návrhu	37
Obr. 19. Detail nákresu pro 10 komor	38
Obr. 20. Schéma simulace	38
Obr. 21. Výsledek simulace na výstupu z kulového integrátoru.....	39
Obr. 22. Schéma umístění světelných zdrojů v návrhu	40
Obr. 23. 3D model kulového integrátoru	42
Obr. 24. 3D model vnitřních částí svítidla	43
Obr. 25. Dílna školy, kde probíhala realizace	44
Obr. 26. První sestavení komor.....	44
Obr. 27. Nabarvené vnější čelo komor	45
Obr. 28. Proces lepení komor	45
Obr. 29. Nanášení barvy na kulový integrátor	46
Obr. 30. Kulový integrátor s úchyty	47
Obr. 31. Zadní část svítidla a elektroinstalací	48
Obr. 32. Otestování zdrojů světla bez MH. výbojky.....	48
Obr. 33. Schéma zapojení svítidla	49
Obr. 34. Ověření funkce kulového integrátoru po vycentrování.....	50
Obr. 35. Stupnice s ukazatelem polohy.....	50
Obr. 36. Měření spektrometrem CS-1000A.....	51
Obr. 37. Naměřená spektra jednotlivých zdrojů světla spektrometrem CS- 1000A	52
Obr. 38. Průběhy výstupního jasu svítidla pro sodíkovou výbojku po 45°	53
Obr. 39. Měření jasovým analyzátozem.....	54

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Seznam navrhovaných zdrojů světla do svítidla	41
Tab. 2: Maximální hodnoty jasu pro jednotlivé zdroje	53
Tab. 3: Naměřené a vypočítané hodnoty jasu a jeho uniformity	54
Tab. 4: Naměřené teploty.....	55

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací svítidla, které bude sloužit k ověření kalibrace spektrálních analyzátorů. Cílem by měla být realizace vybraného návrhu dle zadaných požadavků na svítidlo a jeho otestování v praxi. Pro lepší seznámení s problematikou svítidel nalezneme v práci popis základních vlastností záření s důrazem na viditelné spektrum a citlivosti lidského oka na něj. Práce pokračuje definicí základních fotometrických veličin a popisem přístrojů na jejich měření. Významnou kapitolou pro návrh svítidla jsou světelné zdroje, které jsou rozděleny do skupin dle svého fungování a popsáno je jejich vyzařované spektrum. Další nemálo důležitá část práce je zaměřena na opticky aktivní části svítidla sloužící k úpravě a vedení záření svítidla. Na seznámení s problematikou svítidel navazuje praktická část se samotným vývojem prvních koncepcí a detailně je popsán konečný návrh. V 3D návrhu jsou upřesněny základní rozměry, počet komor a použité zdroje. Následuje postup realizace a jeho zdokumentování. Pro ověření funkčnosti a splnění požadavků proběhne testovací měření všech zdrojů světla a jejich spektrálního složení. Podle výsledků bude provedeno závěrečné zhodnocení, zda realizovaný návrh uspěl.

První kapitola seznamuje se základy fotometrie. Druhá kapitola se zabývá druhy světelných zdrojů a jejich spektrálním složením. Jednotlivé světelně činné části svítidla jsou popsány v kapitole tři. Kapitola čtyři provází postupem vývoje návrhu a jeho hlavními úskalími. Navazuje kapitola pět se zdokumentovaným postupem realizace svítidla. Otestování funkce svítidla a spektrálního složení použitých zdrojů světla nalezneme v kapitole šest. Poslední sedmá kapitola hodnotí celkový postup návrhu, realizaci a ověření funkčnosti svítidla s požadovanými parametry.

2. ZÁKLADY FOTOMETRIE

2.1 Záření

Také nazývané radiace je šíření či přenos energie prostorem v podobě elektromagnetických vln nebo hmotných částic. Kvantová teorie přikládá tomuto záření duální charakter a to částice (korpuskulární struktura) a vlnění. Hranice mezi těmito rozpornými charaktery elektromagnetického záření není přesně určena. Tento fakt, ale nijak neovlivňuje měření ve světelné technice. Ta sleduje rozdělení toků energie v určitých časových úsecích při jejich přesunu mezi určenými místy v prostoru. Díky tomu můžeme elektromagnetické záření rozložit na jednotlivé jeho složky se sinusovým průběhem. [1]

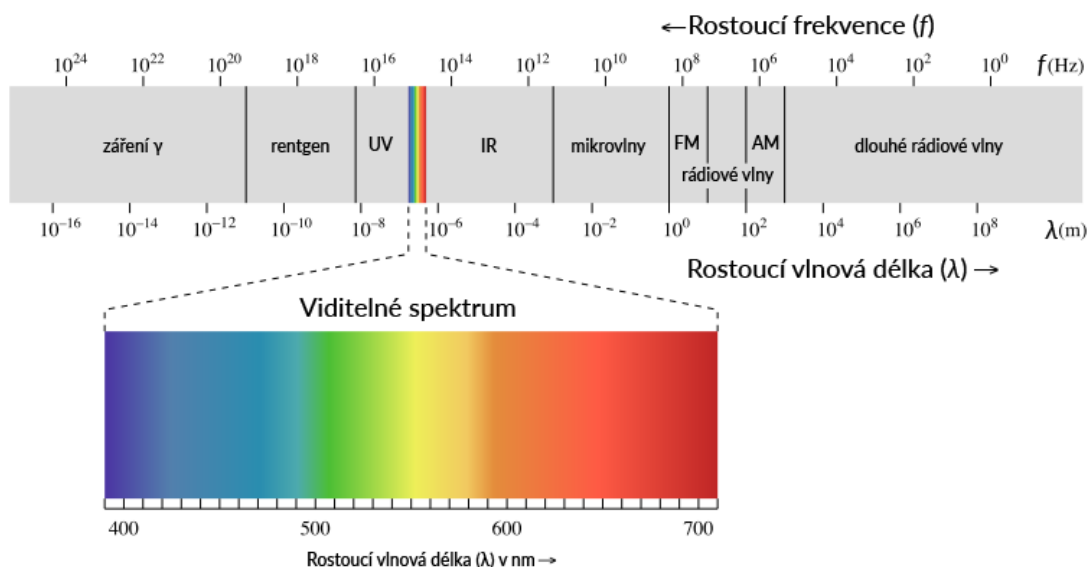
Jednotlivé složky jsou charakterizovány svým kmitočtem ν (Hz) nebo vlnovou délkou λ (m). Záření, které obsahuje pouze jednu složku s neměnným kmitočtem, nazýváme monofrekvenční. Pokud uspořádáme všechny složky záření podle jejich kmitočtu nebo vlnové délky získáme spektrum záření. [1]

Vlnová délka λ je obecně závislá na rychlosti šíření záření. Ve vakuu se vlnová délka záření určuje ze vztahu [1]

$$\lambda = c_0 \cdot \nu^{-1} \text{ (m; ms}^{-1}\text{, Hz)}$$

(2-1)

- rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu - $c_0 = 2,998 \cdot 10^8$ ms



Obr. 1. Elektromagnetické spektrum [2]

Oblast záření, se kterou pracuje optika, je mezi 10 nm až 1 mm vlnové délky. Této části se říká optické záření a jeho součástí je ultrafialové (UV), viditelné a infračervené (IR) záření. [1]

2.2 Viditelné záření – světlo

Jakékoliv optické záření schopné přímo vyvolat zrakový vjem či počitek se označuje názvem viditelné záření. V podmínkách denního vidění budí viditelné záření vjemy barevné. Spektrální rozsah viditelného záření se spodní hranicí nacházející se v rozmezí vlnových délek mezi 360 nm až 400 nm a horní hranicí mezi vlnovými délkami 760 nm až 830 nm. Rozložení barev ve viditelném spektru nalezneme na Obr. 1. [1]

Záření ve viditelné oblasti spektra jsou hlavně důležitá pro život lidí, živočichů a rostlin. V dnešní době se přesouvá lidská aktivita do nočních hodin a také do míst bez přístupu slunečního záření. Díky tomuto přechodu si musíme dávat větší pozor, jaké zdroje umělého osvětlení požíváme, jelikož světelné záření ovlivňuje naši pozornost a náladu. [1]

Největším zdrojem světla pro Zemi je Slunce. Ve spektru slunečního záření může oko člověka rozeznat asi 128 barevných tónů. Spektrum slunečního záření se během dne mění a tím řídí náš denní cyklus. [1]

2.2.1 Ultrafialové záření - UV

Spektrální rozsah ultrafialového světla se pohybuje od 400 nm do 1 nm. Je součástí záření zejména od rtuťových výbojek. Nalezneme ho jako součást slunečního záření, ale většina je pohlcena ozonem v atmosféře. Pokud by tomu tak nebylo, UV záření způsobuje spáleniny kůže a přispívá ke vzniku rakoviny kůže. U umělých zdrojů světla je pohlceno sklem, ze kterého jsou vyrobeny trubice a baňky světelných zdrojů.

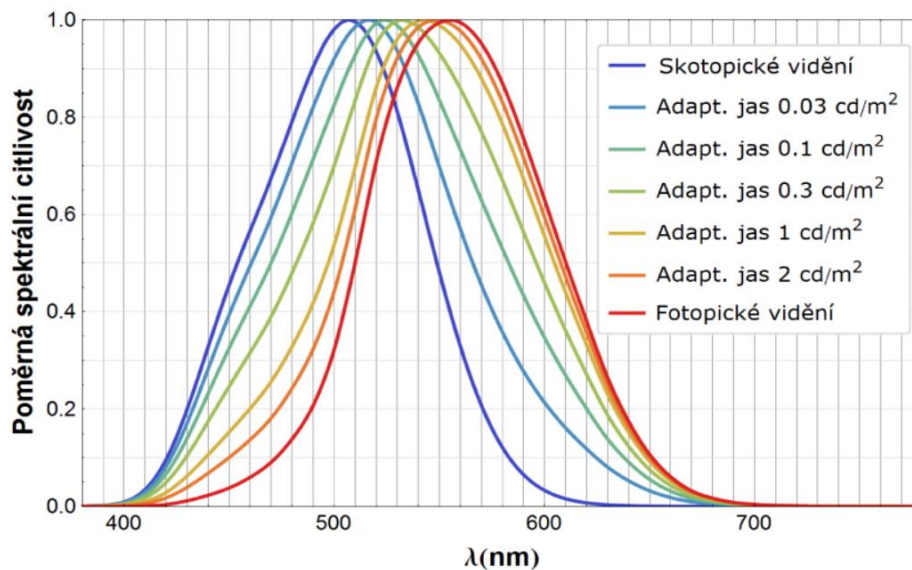
Záření pod vlnovou délkou 256 nm má dostatek energie k ionizaci vzduchu, a tedy ke tvorbě ozonu, který je toxický. Při kontaktu s mikroorganismy je často zahubí, proto ho lze použít ke sterilizaci potravin, nástrojů či celých prostor. [1]

2.2.2 Infračervené záření - IR

Toto záření se nachází v rozsahu 780 nm do 1 mm vlnové délky. Projevuje se tepelnými účinky a jeho zdrojem je každé teplé těleso. Infračervené světlo je nosičem sálavého tepla. Využití při ohřevu nebo bezdotykovém zjišťování teploty těles. [1]

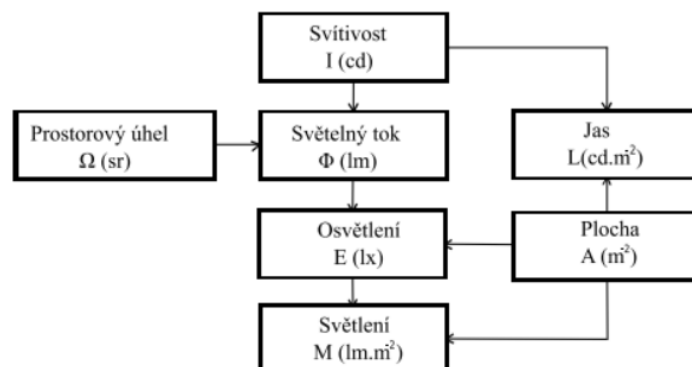
2.3 Pojmy a veličiny ve světelné technice

Pro měření optického záření používáme spíše fotometrické veličiny než radiometrické, které lze použít na jakékoli záření. Pro naše vidění není důležité kolik energie oko přijme v čase, ale výkon zdroje a prostorové rozdělení záření. Při posuzování hodnot musíme zohledňovat spektrální citlivosti oka, které není stejně citlivé na všechny vlnové délky viditelného záření. Citlivost pak udáváme v poměrných jednotkách vztažených k maximální absolutní hodnotě citlivosti. [1]



Obr. 2. Křivka poměrné spektrální citlivosti zraku [3]

Na Obr. 2 je znázorněno, jak se citlivost oka mění v závislostech na jasu. Aby byla zajištěna jednotnost výpočtů a měření, musí být ustanoven normálový fotometrický pozorovatel. Ten je určen křivkami fotopického a skotopického vidění. [1]



Obr. 3. Přehled závislostí fotometrických veličin

2.3.1 Světelný tok - Φ

Je světelně technická veličina, odpovídá zářivému toku a vyjadřuje schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem. Světelný tok se udává v jednotce jeden lumen (lm). Světelný tok Φ monochromatického záření s vlnovou délkou λ a zářivým tokem Φ_e , se určí ze vztahu (2-2). [1]

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \Phi_e(\lambda) = K_m V(\lambda) \Phi_e(\lambda) \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, -, \text{W}) \quad (2-2)$$

Veličina $K(\lambda)$ ($\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$) je světelná účinnost monochromatického záření a je rovna poměru světelného toku a jemu příslušného zářivého toku. K_m je maximum veličiny $K(\lambda)$, které bylo stanoveno relativně přesnými měřeními a výpočty při fototypickém vidění pro případ normálního fotometrického pozorovatele a záření o základní vlnové délce $\lambda = \lambda_m = 555,155 \text{ nm}$ a činní $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Poměrná světelná účinnost $V(\lambda)$ monochromatického záření se určí ze vztahu (2-3). [1]

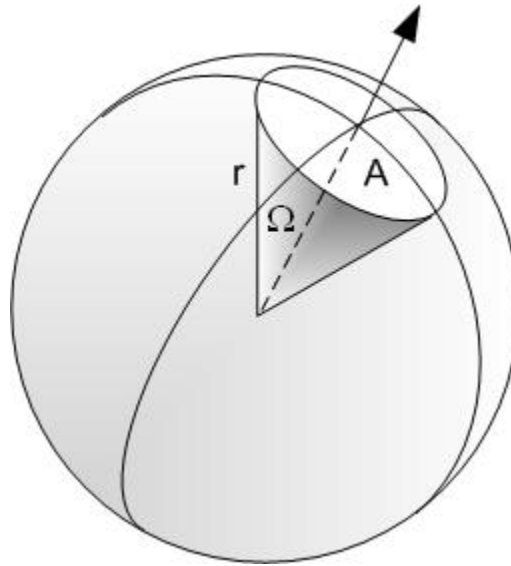
$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (-; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (2-3)$$

Z pohledu individuálního pozorovatele je výše uvedená veličina totožná s poměrnou spektrální citlivostí pozorovatele. [1]

2.3.2 Prostorový úhel – Ω

Užívá se ve světelné technice, jako důležitá geometrická veličina. Jednotka prostorového úhlu je jeden steradián (sr). Velikost je určena velikostí plochy, která je vyřatá obecnou kuželovou plochou na povrch koule o jednotkovém poloměru, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je identický s vrcholem uvažované kuželové plochy. Prostorový úhel Ω , pod kterým je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A , která je vyřatá na povrchu této koule. Prostorový úhel se stanoví ze vztahu . [4]

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (\text{sr}; \text{m}^2, \text{m}) \quad (2-4)$$



Obr. 4. Vymezení prostorového úhlu [4]

Prostorový úhel nabývá největší hodnoty $\Omega_{max} = 4\pi$ pro plochu A , která je rovná povrchu koule, tj. $A = 4\pi r^2$. [4]

2.3.3 Svítivost - I

Svítivost je prostorová hustota světelného toku v různých směrech. Svítivost se značí $I_{\gamma, \zeta}$ a ve směru určeném úhly γ, ζ je jako prostorová hustota vyzařovaného světelného toku rovna toku obsaženému v jednotkovém prostorovém úhlu. Je dána vztahem (2-5) [1]

$$I_{\gamma, \zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma, \zeta}} \quad (\text{cd; lm, sr}) \quad (2-5)$$

$d\Omega_{\gamma, \zeta}$ - prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly γ, ζ a v jehož mezích uvažovaný zdroj vyzařuje tok $d\Phi$.

Jednotkou svítivosti je kandela ($\text{cd} = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$), která patří k sedmi základním jednotkám SI. Svítivost zdroje je zpravidla jiná v každém směru, proto se svítivost zdroje charakterizuje křivkou svítivosti. Tato křivka by měla být součástí katalogového listu svítidla. [1]

2.3.4 Osvětlenost - E

Osvětlenost neboli intenzita osvětlení E rovinné plošky dA . Vyjadřuje plošnou hustotu světelného toku, který dopadne na plošku dA . Jednotkou osvětlenosti je lux (lx), rozměr jednotky 1 lx je $1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{m}^{-2}$. Osvětlenost je určena vztahem (2-6). [1]

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (\text{lx}; \text{lm}, \text{m}^2) \quad (2-6)$$

Osvětlenost plošky dA se často nazývá osvětlenost v bodě. Elementární okolí tohoto bodu tvoří plošku dA . [1]

Čáry spojující na dané rovině místa, která mají stejnou hodnotu osvětlenosti, se nazývají izoluxy a platí, že osvětlenost ve směru od zdroje světla klesá se čtvercem, což popisuje vztah (2-7). [1]

$$E = \frac{I}{l^2} \quad (\text{lx}; \text{cd}, \text{m}) \quad (2-7)$$

2.3.5 Jas svazku světelných paprsků - L_{op}

Jas je fotometrická veličina definovaná jako měrná svítivost. Označuje se L a udává se v ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$). Je to veličina, na kterou oko přímo reaguje. Jas je určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku přenášeného paprsky. Lze tedy popsat vztahem (2-8). [1]

Proto vždy záleží na poloze pozorovatele a na směru jeho pohledu. Nezáleží přitom, zda vychází jas svazku paprsků přímo ze zdroje záření, nebo je odražen od libovolné plochy. [1]

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_n} \quad (\text{cd} * \text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2) \quad (2-8)$$

L_{OP} - jas svazku paprsků ve směru osy OP svazku

$d\Omega$ - prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří

dA_n - ploška kolmá k ose svazku paprsků, na níž se realizuje plošná hustota světelného toku

2.3.6 Světlení – M

Veličina je definována jako plošná hustota světelného toku v $d\Phi$, který je vyzařován z plochy dA . Jednotkou světlení je lumen na čtverečný metr. Určen vztahem (2-9). [1]

$$M = \frac{d\Phi_v}{dA} \quad (lm * m^{-2}; lm, m^2) \quad (2-9)$$

2.4 Měření světelně technických veličin

Měření provádíme za účelem zjištění nebo ověření parametru světelných zdrojů a přístrojů. Měření je důležité jak pro prvotní zjištění parametrů, tak v průběhu provozu. Pro kalibraci nebo jednoduché porovnání používáme fotometrické etalony. [1]

Rozlišujeme měření podle požadavků na přesnost měření na:

- a) přesná - při tvorbě etalonů, při kalibracích
 - odhad rozšířené nejistoty přesných měření je $U \leq 8\%$
- b) provozní - ověřování a porovnávání parametrů světelných zařízení
 - odhad rozšířené nejistoty provozních měření je $8\% < U \leq 14\%$
- c) orientační - kontrola vybraných základních funkcí zařízení a ověřování

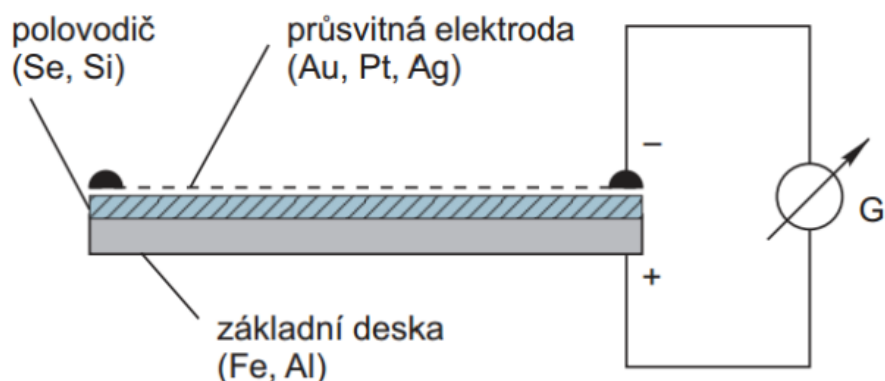
Metody měření se dělí do dvou skupin vizuální a fyzikální. [1]

2.4.1 Vizuální fotometrie

Lidské oko dokáže dobře porovnat rovnost jasů dvou sousedních ploch současně pozorovaných za podmínky, že mají stejnou chromatičnost. Adaptační schopnosti oka však zabraňují určit absolutní hodnoty fotometrických veličin. [1]

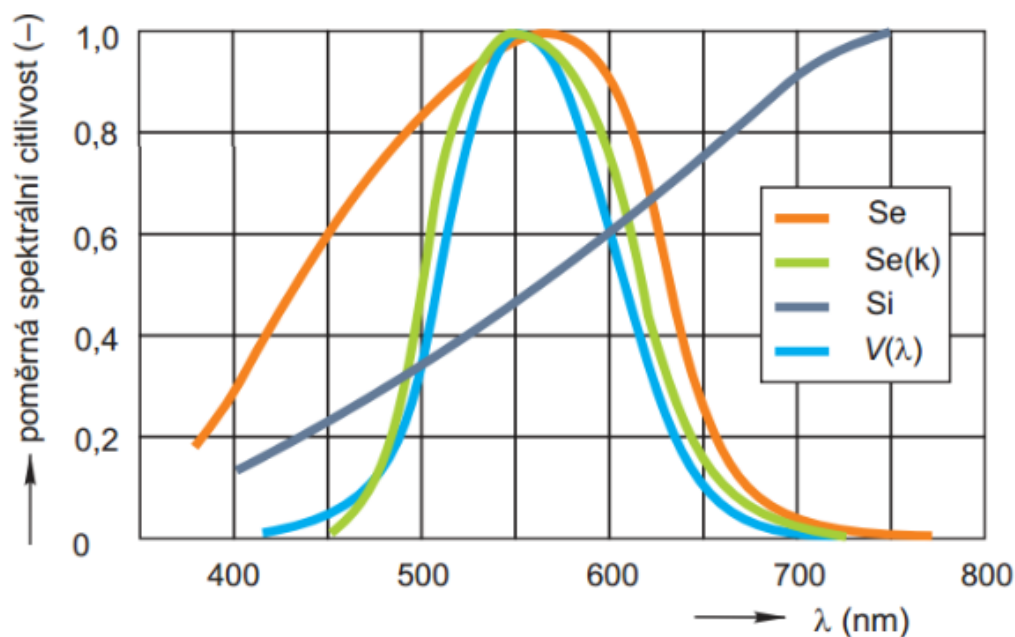
2.4.2 Fyzikální fotometrie

Lidské oko je při měření přístroji nahrazeno čidly. Nejčastěji je jím fotočlánek, který funguje na principu fotoelektrického jevu na přechodu kovu a polovodiče. Dále lze použít fotorezistory a fotonky. [1]



Obr. 5. Náčrt konstrukčního uspořádání fotočlánku [1]

Důležitou podmínkou pro měření je nastavit správnou spektrální citlivost fotočlánku, tak aby se co nejvíce podobal průběhu normálního fotometrického pozorovatele.



Obr. 6. Porovnání průběhu spektrální citlivosti polovodičových fotočlánků a normálního fotometrického pozorovatele [1]

2.4.3 Měření osvětlenosti

Osvětlenost je v praxi nejčastěji měřená veličina. K jejímu měření se používají luxmetry. Luxmetr se skládá nejčastěji z přijímače zkorigovaným křemíkovým fotočlánkem s kosinusovým nástavcem, měřicího a vyhodnocovacího systému. [1]

Rozlišují se do tříd přesnosti číslicemi 1, 2, 3, 4, nebo písmeny L, A, B, C. Těmto třídám přesnosti jsou přiřazeny dovolené chyby luxmetrů 2, 5, 10, 20 %. Do měření

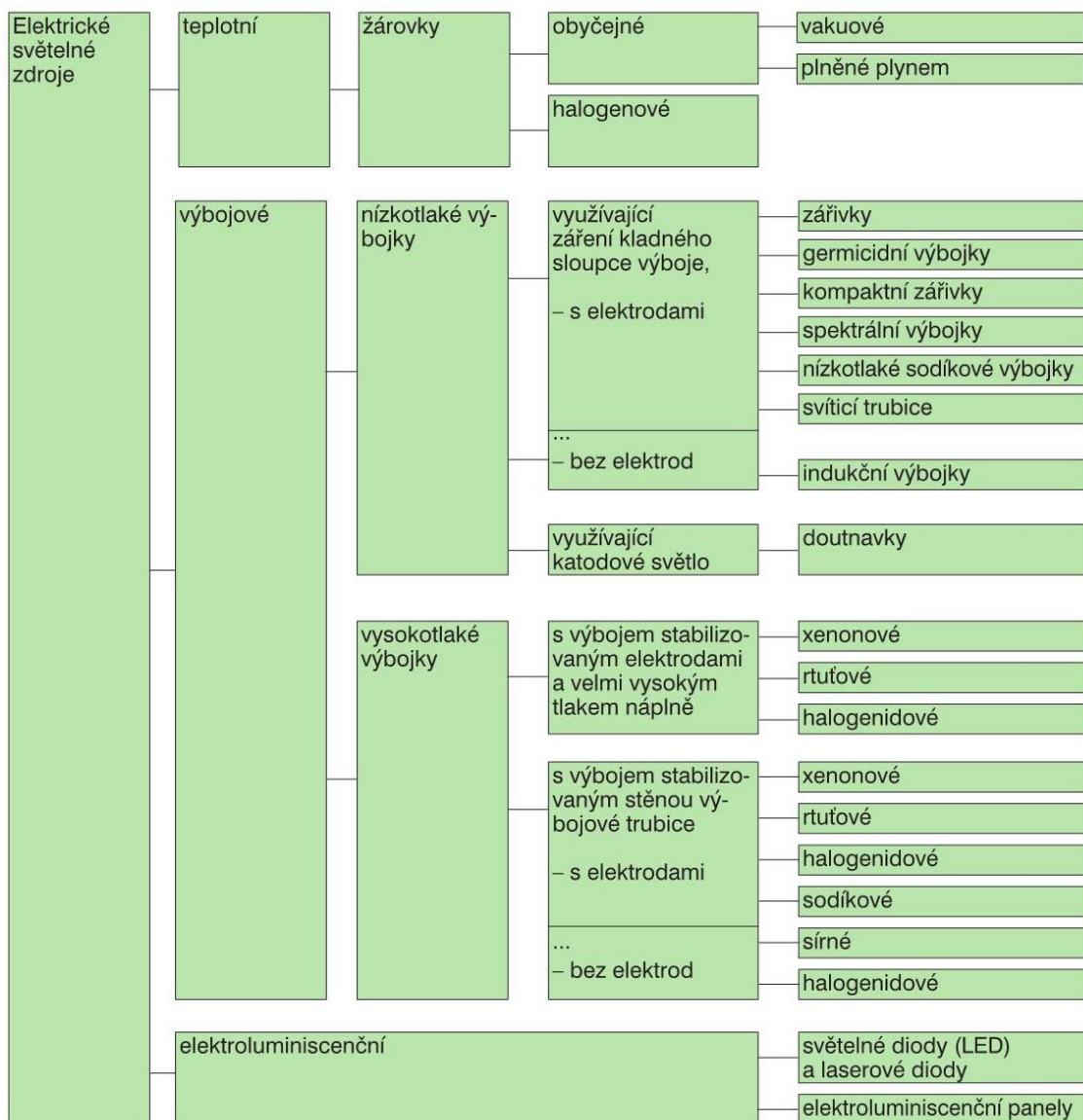
musíme zahrnout až 11 možných chyb, mezi které patří například chyba spektrální, která vzniká při měření osvětlenosti světlem jiného spektrálního složení, než které bylo použito při kalibraci daného luxmetru. Dále pak chyba směrová, úhlová, linearity a citlivosti na UV a IČ záření. Luxmetry s třídou přesnosti L a A se využívají jako sekundární etalony pro přesná laboratorní měření. Pro běžnější měření se používají přístroje s třídou přesnosti B a C. Luxmetr musí zvládnout přetížení svého měřícího rozsahu až o 20 %, a to až po dobu 5 minut. Životnost luxmetru se pohybuje kolem 5 000 hodin. Před měřením je třeba fotočlánek nechat odkryté na světle, aby se čidla přizpůsobila a stabilizovala se. Při měření musíme počkat, dokud se hodnota nestabilizuje. [1]

2.4.4 Měření jasu

Princip jasoměru je podobný jako u luxmetru. Je doplněn optikou, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo fotočlánek v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém se integruje snímaný jas. Jasoměr měří jas reálných nebo fiktivních povrchů, které vyzařují nebo odrážejí světlo. Důležité při měření jasoměrem je přesné zaměření měřené plochy, protože zjišťuje střední hodnotu jasu z celé měřené plochy. Jako jasoměr lze použít i digitální fotoaparát s úpravou spektrální citlivosti podle křivky citlivosti lidského oka. Zde problém s přesným zaměřením odpadá, protože každý pixel fotoaparátu měří jas jednotlivě. [4]

3. SVĚTELNÉ ZDROJE

Pro vznik světla je nutné vybuzení nebo ionizace elementárních částic. Jedná se o zařízení, které vysílá optické, obvykle viditelné záření. Mohou být přírodní nebo umělé. Sekundární světelný zdroj, je předmět či povrch, který vysílá světlo tím, že světelné paprsky alespoň zčásti propouští nebo odráží. Umělý světelný zdroj je aparát určený k přeměně některého druhu energie na světlo. Světelný zdroj je základním prvkem osvětlovací soustavy. Pro osvětlování mají největší význam umělé zdroje, napájené elektrickou energií. Elektrické světelné zdroje se dělí v zásadě na tři základní skupiny. Teplotní, výbojové a elektroluminiscenční. Podrobnější rozdělení je patrné z Obr. 7. [1]



Obr. 7. Struktura třídění elektrických zdrojů světla [1]

Vývoj světelných zdrojů stále pokračuje a v některých oborech je pokrok velice rychlý. Na druhé straně mohou některé objevy vést k obnovení používání starších světelných zdrojů. Velice důležitou vlastností světelných zdrojů je jejich bezpečnost. Všechny světelné zdroje ve větší či menší míře jsou zdroji tepla a tuto vlastnost je potřeba sledovat od návrhu až po konečnou instalaci a používání svítidla. [1]

Popsat vlastnosti světelných zdrojů je možné pomocí mnoha parametrů. Mezi ty nejdůležitější technické parametry patří elektrické a světelně technické parametry, konstrukční provedení a život. Mezi elektrické parametry spadá příkon světelného zdroje, napájecí napětí, velikost a druh proudu a napětí na zdroji. Světelně technické parametry popisují zejména světelný tok, spektrální složení světla, jas, svítivost a její prostorové rozložení a jejich změny v průběhu života. Podrobnější popis veličin naleznete v kapitole 3. Život světelného zdroje je dán celkovou dobou, během které je světelný zdroj použitelný a splňuje stanovená kritéria. [1]

3.1 Teplotní zdroje

U teplotních zdrojů se k vybuzení částic využívají kovy, které se zahřejí průchodem elektrického proudu na teplotu, která je nutná pro vytvoření energie potřebné pro vznik tepelného pohybu. Částice, které přijmou tuto energii, se vybudí a stávají se tak elementárními zdroji světla. Látka tak vysílá optické záření, jehož spektrum je spojité. [1]

3.1.1 Obyčejná žárovka

Žárovky s wolframovým vláknem patří mezi světelné zdroje s nejnižší hodnotou světelného výkonu a krátkou životností. Z hlediska kvality světla se řadí k nejlepším druhům osvětlení. Jednoduchost a nízká cena je řadí k stále velmi rozšířeným světelným zdrojům, přestože od roku 2012 je zakázán jejich prodej jako zdroje světla. [1]

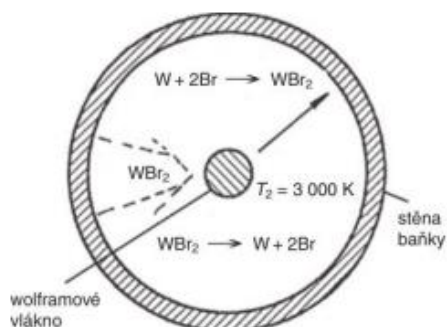


Obr. 8. Poměrné spektrální složení světla žárovky [5]

Hlavní předností klasických žárovek je spojité světelné spektrum, mající příjemný teplý odstín, charakterizující teplotou chromatičnosti 2700 až 2900 K, vysoký index podání barev $R_a = 100$, okamžitý start a omezení vlivu střídavého proudu na stálost zdroje. [1]

3.1.2 Halogenové žárovky

Halogenové žárovky jsou nástupci žárovek obyčejných. Zvýšením teploty wolframového vlákna dosahují většího měrného výkonu. Tím se ale životnost samotné žárovky snižuje díky rychlému odpařování wolframu. Proto jsou halogenové žárovky naplněny plynem s příměsí halogenů nebo jejich sloučenin. Wolfram vypařující se z vlákna se v blízkosti baňky slučuje s halogenem na halogenid wolframu. Ten v důsledku gradientu koncentrace difunduje plynným prostředím zpět k vláknu, kde se rozpadá na wolfram a volný halogen. Tato reakce se nazývá halogenový regenerační cyklus, který zásadně prodlužuje životnost žárovky. [1]



Obr. 9. Zjednodušené schéma halogenového regeneračního stupně [1]

Největší výhodou oproti obyčejným žárovkám je vyšší teplota chromatičnosti a doba životnosti. Nevýhodou jsou technologická náročnost a s tím spojená vyšší cena. Zbylé parametry jako index podání barev a spojité světelné spektrum jsou velmi podobné. [1]

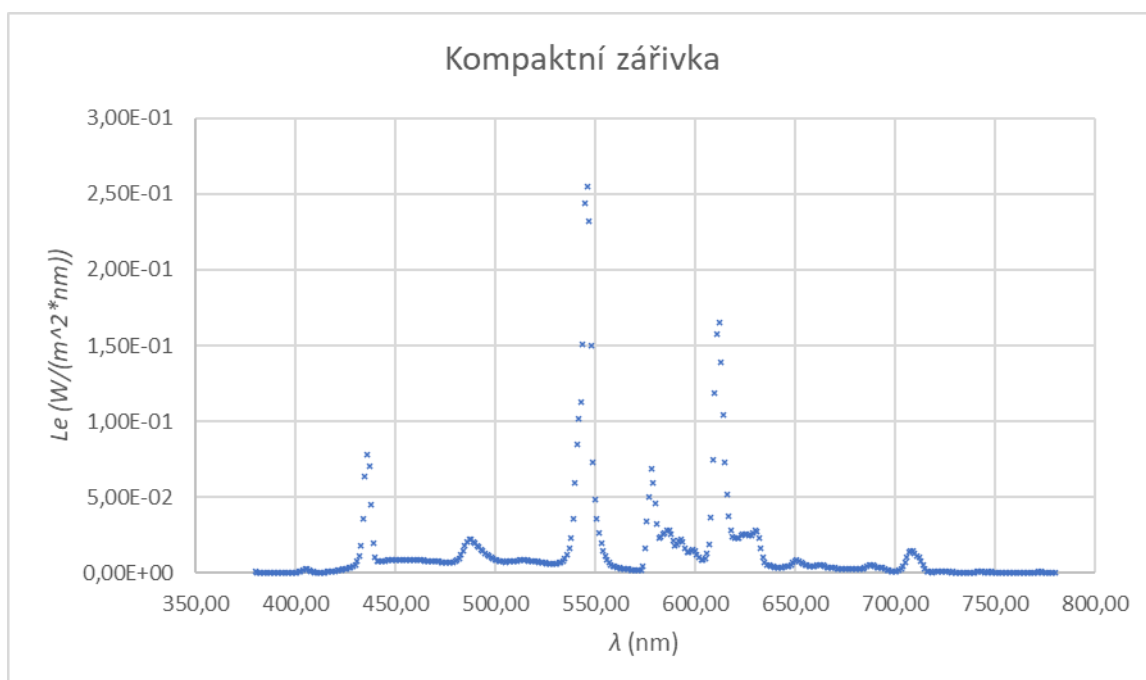
3.2 Výbojové zdroje

U výbojových světelných zdrojů se k vybuzení elementárních částic využívá elektrických výbojů v plynech a parách kovů, při nichž dochází k přeměně elektrické energie na kinetickou energii elektronů pohybujících se mezi elektrodami. Při srážkách elektronů s atomy plynů a kovových par se jejich energie mění na optické záření. Spektrum záření výbojových světelných zdrojů je čárové, přičemž rozložení spektrálních čar závisí na druhu výboje a na složení plynné náplně. [1]

3.2.1 Nízkotlaké výbojky

Nízkotlaké výbojky jsou nejběžnějšími typy umělého osvětlení vnitřních prostorů. Patří mezi ně zářivky, kompaktní zářivky, nízkotlaké sodíkové výbojky a indukční výbojky. [1]

Zářivky jsou nejčastěji v podobě protáhlého tvaru skleněných trubíc naplněné inertním plynem s příměsí malého množství rtuti. Proto je zářivka nazývána také nízkotlaká rtuťová výbojka. Tlak uvnitř trubice se pohybuje kolem 400 Pa. Lineární zářivka je na obou koncích opatřena paticí s dvěma kolíky včetně žhavicích elektrod, které jsou z wolframu. Na vnitřní straně trubice je nanášeno několik vrstev luminoforu, které slouží k transformaci ultrafialového na viditelné záření. V závislosti na typu použitého luminoforu lze dosáhnout různého barevného indexu podání barev R_a . Nejčastěji používané jsou třípáskové luminofory každý pro jednu základní barvu RGB. To se projeví je na světelném spektru, kde se vyskytují tři výrazné vrcholy. Lze pozorovat na Obr. 10. [1]



Obr. 10. Spektrální složení světla kompaktní zářivky

Nízkotlaké sodíkové výbojky jsou světelné zdroje, v nichž je světlo vyzařováno sodíkovými parami s provozním parciálním tlakem v rozmezí 0,1 až 1,5 Pa. Sodík se vyznačuje intenzivním rezonančním zářením ve žluté části viditelného spektra s vlnovou délkou 589,0 až 589,6 nm, která se blíží maximu spektrální citlivosti lidského oka. V současné době dosahuje měrný výkon nejvýkonnějšího typu těchto výbojek u špičkových výrobců téměř 200 lm/W, takže nízkotlaké sodíkové výbojky jsou zatím nejúčinnější sériově vyráběné umělé světelné zdroje vůbec.

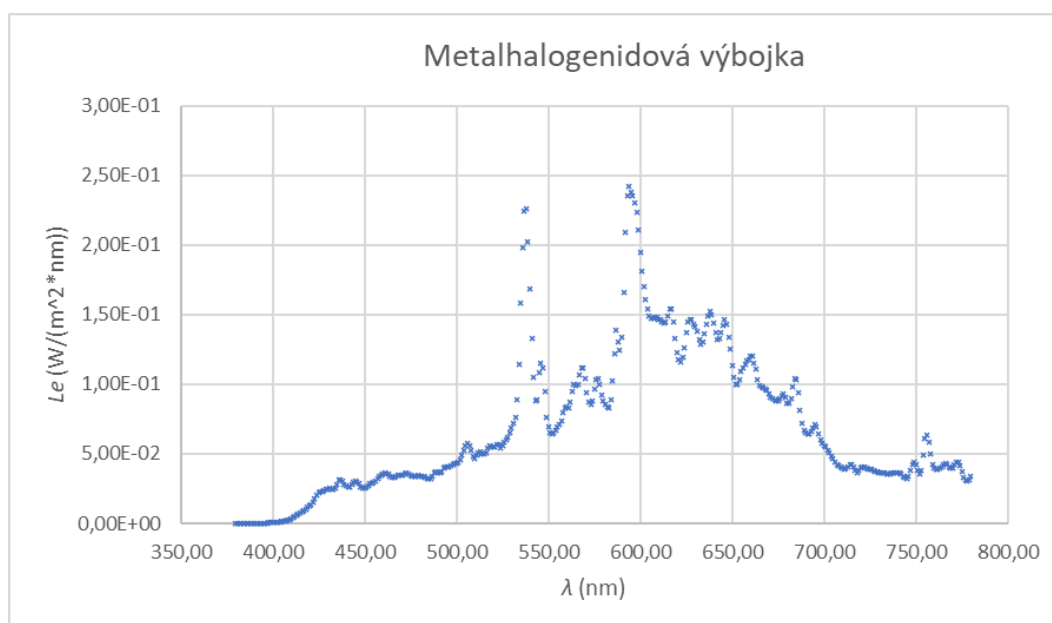


Obr. 11. Světelné spektrum nízkotlaké sodíkové výbojky

3.2.2 Vysokotlaké výbojové zdroje

U vysokotlakých výbojek je spektrum vyzařovaného světla posunuto do viditelného spektra díky zvýšenému tlaku par a zvyšování proudové hustoty. Díky tomu se vytváří spojité vyzařované spektrum, které ale pořád neobsahuje všechny vlnové délky. Proto se zde používá luminofor na vytvoření červené složky světla. Vyznačují se velkým měrným výkonem a dlouhou dobou náběhu. [1]

Vysokotlaké halogenidové výbojky jsou vysokotlaké rtuťové výbojky, ale princip vzniku světla u nich není založen jen na záření par rtuti, ale převážně na záření produktů štěpení halogenidů. Tím se získá podstatné zvýšení měrného výkonu při dobrém podání barev. [1]



Obr. 12. Spektrální složení světla vysokotlaké halogenové výbojky

Vysokotlaké sodíkové výbojky, sodíkové páry u tohoto zdroje mají tlak 10kPa. Spektrum u těchto výbojek není pouze čárové, ale obsahuje i souvislé spektrální pásmo barev. Mají poměrně velký měrný výkon, díky kterému se nejčastěji používají pro venkovní osvětlení a osvětlení vysokých výrobních a sportovních hal. [1]

3.3 Luminiscenční zdroje

Luminiscence pevných látek je jev, při němž se z atomů, molekul či krystalů látky vyzářuje energie ve formě fotonů. Tato vyzářovaná energie se uvolňuje při samovolném přechodu elektronů z vybuzeného stavu do základní polohy. Je-li zmíněné vybuzení vyvoláno elektrickým polem, hovoří se o elektroluminiscenci. Pokud je vybuzení způsobeno dopadajícím zářením jedná se o fotoluminiscenci. Vzhledem k tomu, že se elektrony mohou pohybovat jen v určitých drahách, z nichž každé přísluší daná energetická hladina, může mít vyzářený foton také jen určité hodnoty energie. Luminiscenční záření proto obsahuje jen záření některých vlnových délek. [1]

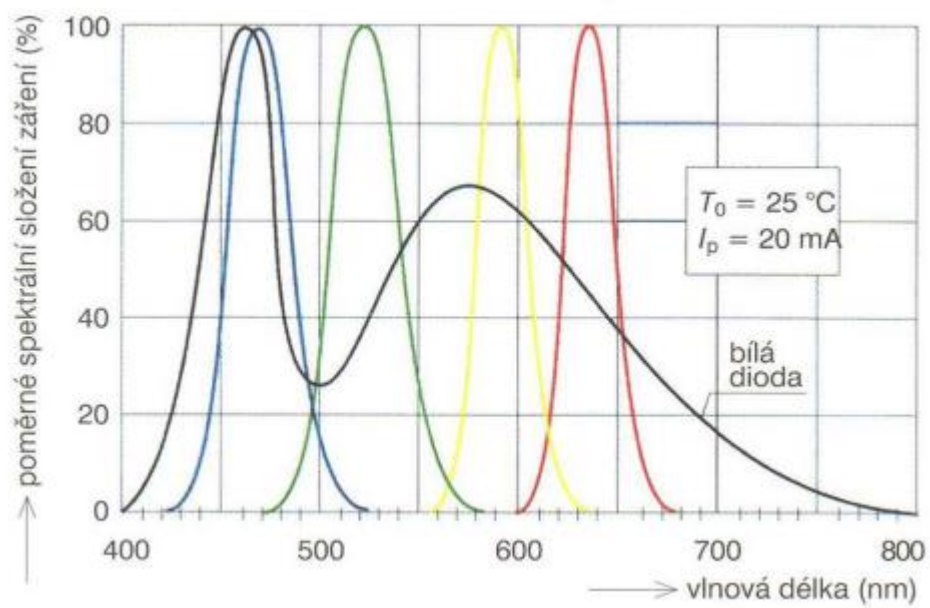
3.3.1 LED dioda

Nejvýznamnějším zástupcem luminiscenčních zdrojů je LED dioda, která funguje na principu elektroluminiscence. Při průchodu proudu přechodem P-N, který je polarizovaný v propustném směru, elektrony rekombinují a uvolňují určité kvantum energie ve formě fotonu. Tato energie přibližně odpovídá šířce zakázaného pásu, vlnová délka vyzářovaného světla tedy závisí na jeho šířce. [1]

Přestože jejich princip byl objeven během 20. let minulého století, první diody použitelné v praxi se objevily teprve v 70. letech. Od jejich uvedení na trh jsou však soustavně vyvíjeny nové základní materiály a zdokonalovány technologické procesy vedoucí k postupnému rozšíření sortimentu o další barvy vyzářovaného světla a ke zvýšení jejich účinnosti a prodloužení života a stability světelných parametrů během svícení. Proto světelné diody zaznamenávají v posledním desetiletí nesmírně dynamický rozvoj.

Vzhledem ke zcela jinému principu generování světla a zcela odlišné technologii se LED, na rozdíl od ostatních světelných zdrojů, vyrábějí ve firmách produkujících polovodičové čipy. [1]

Pro účely osvětlování jsou zapotřebí diody emitující světlo bílé barvy. Toho lze docílit dvěma způsoby. První možnost je kombinace světla ze tří základních složek: červené, zelené a modré. Pokud jsou tyto zdroje dostatečně blízko, složky se promíchají a výsledné světlo se jeví jako bílé. Druhý způsob, jak dosáhnou bílé barvy, je použití LED modré barvy v kombinaci s luminoforem, který převádí světlo modré barvy na záření jiných vlnových délek. Tohoto způsobu využívá většina současných zdrojů světla bílé barvy. [1]



Obr. 13. Emisní spektrum základních druhů LED diod [1]

4. SVĚTELNĚ ČINNÉ ČÁSTI SVÍTIDEL

Slouží k úpravě fotometrických vlastností svítidla. Jejich použitím můžeme docílit rozptýlení do prostoru nebo usměrnění světelného toku na určité místo. Jinými částmi jde clonit světelné zdroje nebo upravit jejich vyzařované spektrum filtry. Dále pomocí nich můžeme vést světlo od zdroje k místu potřeby. [1]

Pro úpravu vlastností svítidel se používají tyto světelně činné části:

- Reflektory
- Difuzory
- Čočky a refraktory
- Holografické optické prvky
- Světlovody
- Stínidla a kryty
- Filtry

Každá z těchto částí svítidel upravuje svým určením vlastnosti svítidla. [1]

4.1 Reflektory

Jsou používány ke změně prostorového rozložení světelného toku zdroje pomocí odrazu. Dělí se podle odrazných vlastností na refraktory zrcadlové, matové a difuzní. Vlastnosti použitého materiálu refraktoru nemusí ovlivňovat nejen účinnost svítidla, ale i výsledné složení spektra svítidla, tedy barvu vyzařovaného světla. [1]

4.1.1 Zrcadlové refraktory

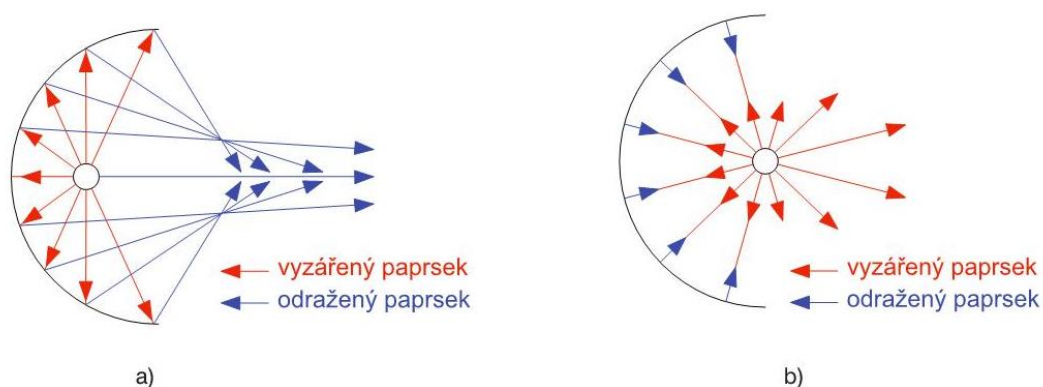
Slouží k úpravě křivky svítivosti svítidla. Utvářejí požadované rozložení svítivosti a jasů v určených směrech. Obvykle se konstruují tak, aby docházelo pouze k jednomu odrazu paprsků vycházejících ze světelného zdroje. [1]

Dříve se používala na výrobu reflektorů postříbřená skla, která dnes nahradily hliníkové plechy. Jejich vlastnosti zdaleka převyšují mechanické vlastnosti skla. Na hliníkové plechy se ve válcovnách nanáší různé vrstvy pro zlepšení činitele odrazu. Základní úpravou je eloxovaná úprava, po které následuje případné stříbření. V nedávné době se začaly objevovat i reflektory z plastu, které jsou levnější, ale trpí horším činitelem odrazu a omezením maximální teploty. [1]

Reflektory rozdělujeme na rovinné, rotačně souměrné, korýtkové a asymetrické. Kdy první zmíněný se používá nejčastěji u dekoračních svítidlech a zbylé pro všeobecná a směrová svítidla. Dále jsou různé tvary odrazových ploch, které jsou odvozeny od základních řezů kuželu. Tvary odrazových ploch tedy dělíme na kruhový, eliptický a parabolický. [1]

Pro správné fungování reflektoru musí být zdroj světla umístěn správně vůči světelnému středu optického systému svítidla, sousí s optickou osou reflektoru

a dalšími podmínkami. Tímto určíme, zda reflektor zeslabí, zesílí nebo nasměruje světelný tok svítidla. Pro Obr. 14 a) výstupní svítivost svítidla se zdvojnásobí a u druhého případu zůstane stejná. [1]



Obr. 14. Kulový reflektor se světelným zdrojem: a) mimo střed reflektoru, b) ve středu reflektoru [1]

4.1.2 Matované reflektory

Jsou velmi podobné se zrcadlovými reflektory, dokonce se stejně dělí. Odlišují se tím, že úhel maximální svítivosti odraženého světelného svazku odpovídá úhlu dopadu. Tím dochází k vytvoření hladké křivky svítivosti. Vyrovnávají a zjemňují nahodilé nepravidelnosti. Často se na jejich výrobu používá leptaný nebo kartáčovaný hliník. [1]

4.1.3 Difuzní reflektory

Využívají difuzní odraz, který dopadající světlo z jakéhokoli směru rozptyluje do všech směrů. Používají se hlavně u svítidel, od kterých požadujeme rovnoměrně rozptýlené osvětlení. [1]

4.2 Difuzory

Jedná se o průhledný materiál s funkcí měnit prostorové rozložení světelného toku zdroje rozptylem procházejícího světla. Nejčastěji se vyrábí z opálového skla, které má nejlepší rozptylové vlastnosti. Také snižují jas svítidla z důvodu ztrát průchodem, ale to nemusí být vždy na škodu. Díky tomu se často využívají u bodových a velmi jasných zdrojů světla. [1]

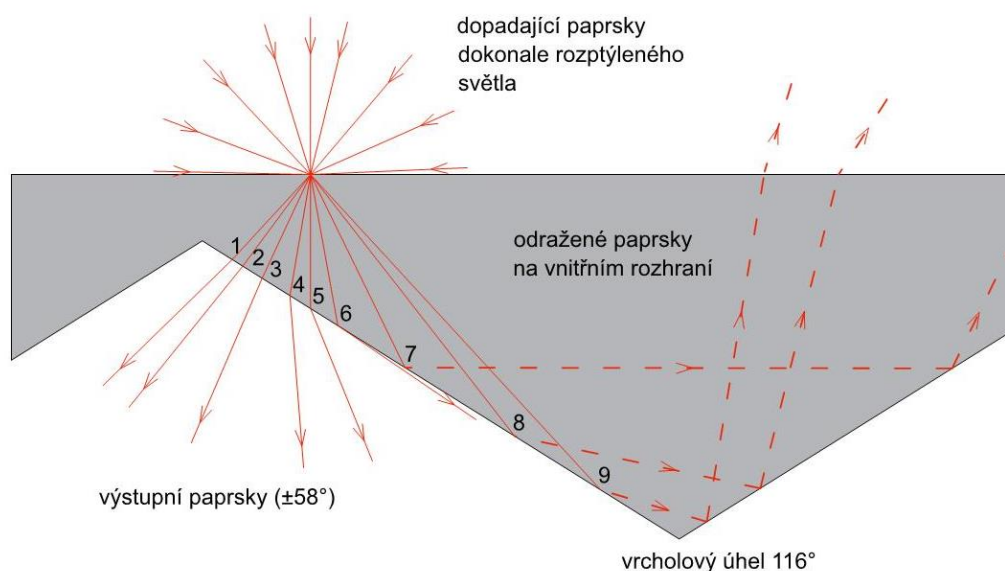
4.3 Refraktory a čočky

Používají lom světelných paprsků ke změně prostorového rozložení světelného toku. Účinnost čoček a refraktorů závisí na pohlcení světla v celém jejich průřezu a odrazu

světla na vnější a vnitřní straně. [1]

Dnes se nejčastěji používají pro upravení křivky svítivosti světelných diod. Důvodem je velká poptávka o tyto zdroje světla, ale jejich křivka svítivosti často nevyhovuje a je nejčastěji upravena právě čočkou. Čočky slouží buďto k většímu rozšíření vyzařování nebo k zúžení světelného svazku. [1]

Refraktory používají nejen lom, ale i úplný vnitřní odraz. Vzniká při dopadu paprsku na vnitřní stranu materiálu minimálně pod mezním úhlem. Paprsek neprochází ven z refraktoru a odráží se nazpět. Tento princip naleznete znázorněný na Obr. 15. [1]



Obr. 15. Princip funkce refraktoru [1]

4.4 Světlovody

Slouží k vedení světla ze zdroje do místa určení. Vzdálenost, na kterou mohou vést světlovody světlo, je od minimální až po desítky kilometrů u optických vláken. [1]

Prvním typem jsou světlovody duté, které tvoří materiál s vysokým činitelem odrazu. Světlovody mohou vyzařovat světlo na konci, které se používají pro vedení slunečního světla do budov. Jiné dokážou vyzařovat světlo po celé délce a toho se využívá v náročných a nebezpečných prostředích. Další předností je velká plocha rozvedení světelného toku, díky které lze použít i u velmi výkonných světelných zdrojů. [1]

Plné světlovody využívají úplný vnitřní odraz a dělí se na deskové světlovody a optické kabely. Deskové světlovody slouží k rozvedení světelného toku po větší ploše. Optické kabely slouží pro přenos světelného toku na dlouhé vzdálenosti. Toho se využívá pro komunikaci. Nejčastěji jsou vyrobeny z plastu nebo skla. [1]

4.5 Clony a stínidla

Zabraňují přímému pohledu na světelný zdroj, a tak zamezují přímému oslnění. Jsou vyrobeny z neprůsvitných nebo rozptylových materiálů. Míru clonění určuje úhel clonění, který svírá úhel mezi horizontální rovinou a největším úhlem pohledu, kdy ještě není pozorovatelný zdroj světla a plochy s vysokým jasem. [1]

4.6 Filtr

Slouží ke změně spektrálního složení světelného toku nebo k jeho zmenšení. Nejčastěji využívají absorpčního a interferenčního jevu. První jmenovaný pohlcuje určenou část spektra a zbylou propouští. Interferenční filtr určitou část spektra odráží a zbylá opět prochází. [1]

Rozdělení podle základního použití:

- Barevné
- Konverzní
- Ochranné

Barevné filtry slouží k propouštění pouze určité části viditelného spektra. Nejčastěji se vyrábějí ze skla nebo plastu. Pokud se jedná o absorpční filtr jeho spektrum není ostře ohraničeno, a tak výsledné barvy trpí na výslednou sytost. Dále se musí řešit problémy s jeho zahříváním. Zato interferenční filtry vynikají sytějšími barvami díky ostrému spektrálnímu ohraničení. Jejich nevýhodou je lehké poškození stříbrných polopropustných vrstev, které slouží k odrazu daného spektra. [1]

Konverzní filtry pomocí upraveného spektrálního činitele prostupu přetváří teplotu chromatičnosti světla, a to směrem nahoru i dolů. [1]

Ochranné filtry zamezují průniku IR a UV záření, které je součástí optického záření. UV záření může reagovat s organickými látkami, u kterých dochází ke změně mechanických a optických vlastností. IR záření dodává dodatečné teplo, a tedy zvyšuje namáhání předmětu. [1]

5. NÁVRH SVÍTIDLA

Základní požadované parametry navrhovaného svítidla byly zadány dva. Prvním z nich je podmínka na uniformní vyzařující plochu svítidla a druhá na možnost změny spektrálního složení záření svítidla. Všechny návrhy byly podmíněny těmito dvěma parametry. Dalšími důležitými hledisky, na které se byl brán zřetel při návrhu, byly schopnost a složitost realizace návrhu, velikost a cena.

Pro splnění první podmínky, tedy požadavku na uniformní vyzařující plochu, jsem se rozhodl po konzultaci s vedoucím práce použít difuzor na výstupu svítidla. Ten paprsky rovnoměrně rozptýlí, a tím zvýší uniformitu záření. Jak je uvedeno v kapitole 4.2 o difuzorech, nejlepší a nejpoužívanější jsou opálová skla, a tak i já jsem zvolil tuto variantu. Další částí svítidla, která napomáhá uniformitě výsledného záření, je kulový integrátor, v něm se záření mnohokrát odrazí od stěn a tím se zvýší rovnoměrnost světelného toku. Pro jeho použití ve svítidle jsem se rozhodl kvůli jeho výhodám. Schopnost rozptylu světelného toku můžeme využít při regulaci jasů svítidla, tím že do kulového integrátoru pustíme méně světelného toku. Použití pouze opálového skla a regulace světelného toku změnou velikosti otvoru má špatný vliv na výslednou uniformnost. Tento problém by šel vyřešit použitím mechanismu s clonkami, ale zde narážíme na další problémy. Celý návrh by se zkomplikoval. Nevýhodou použití kulového integrátoru je jeho velikost a pořizovací náklady v případě koupě. Kvůli vysoké ceně jsem se rozhodl vyrobit kulový integrátor podle vlastního návrhu. Tím mohu ovlivnit přesně jeho velikost a vlastnosti.

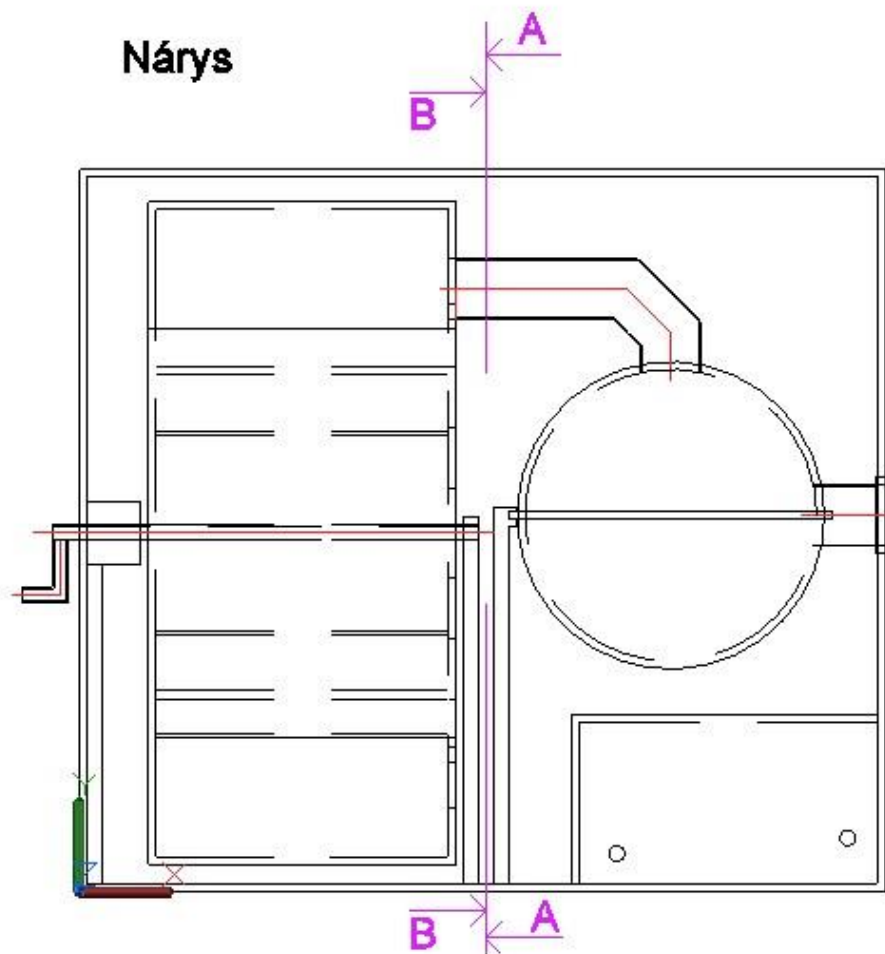
Druhým požadavkem na svítidlo byla schopnost změny spektrálního složení záření svítidla. Požadovaná spektra měla odpovídat dnes používaným zdrojům světla. Jeden zdroj světla, který by dokázal v potřebné kvalitě měnit vyzařované spektrum a simulovat obvyklé zdroje světla, jsem nenašel. Z tohoto plyne nutnost užití více druhů zdrojů světla s různými spektry vyzařování. Z toho vznikají komplikace v podobě nutnosti oddělit zdroje od sebe, aby se jednotlivá spektra neovlivňovala. Mezi další nevýhody patří nutnost dlouhého ustálení jednotlivých zdrojů. Proto nelze umístit více zdrojů do jedné komory z důvodu dlouhých intervalů mezi změnami spektra. Z těchto důvodů jsem se rozhodl pro zdroje vytvořit komory, které zamezí vzájemnému ovlivnění spekter a mohou být zapnuty současně.

5.1 Vývoj návrhu

První moje myšlenky šly k jednoduché konstrukci svítidla bez složitějších prvků. Záření od jednotlivých zdrojů světla by se pomocí odrazných ploch nasměrovalo do kulového integrátoru a z něj poté na výstupní skličko opálového skla. Toto řešení však velice brzy začalo narážet na problémy. Nejvýznamnější z nich byl princip odrazných ploch a hradel, aby se daly jednoduše přenastavit bez složitého otvírání

svítidla. Dále mohly vzniknout pravděpodobné problémy se vzdáleností nejzazších zdrojů od kulového integrátoru, a tedy veliký pokles maximálního jasů. Z těchto důvodů jsem tento směr návrhu opustil.

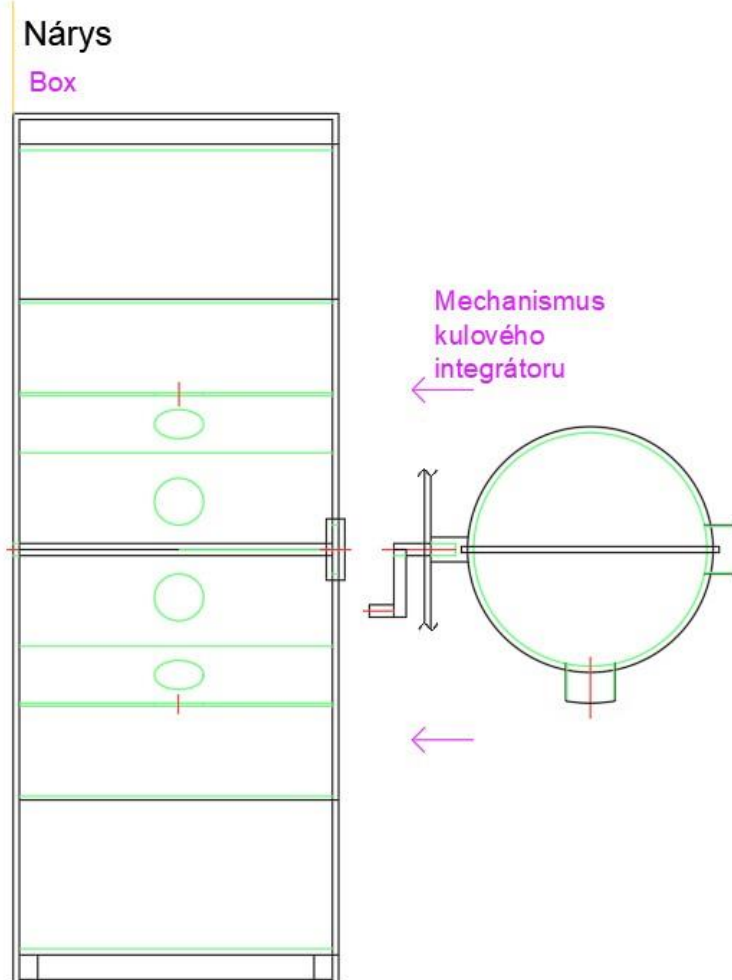
V druhém návrhu jsem chtěl využít rotace jedné či více částí uvnitř svítidla, které by sloužily ke změně zdroje světla ve svítidle. Zde se konstrukce rozdělila na dvě cesty. První byla vytvořit rotující konstrukci o tvaru n úhelníku s komorami pro jednotlivé zdroje světla. Komora s požadovaným zdrojem světla by se pomocí rotace přesunula k světlovodu, díky kterému záření doputuje do kulového integrátoru a následně na výstupní opálové sklíčko. Tato konstrukce má několik výhod. Komora s požadovaným spektrem záření se nachází blízko kulového integrátoru, díky čemuž je maximalizován výsledný jas svítidla. Další významnou předností je jednoduchá regulace jasů pomocí přivření otvoru mezi komorou a světlovodem. Jako zásadní nevýhodu lze označit mechanismus na hřídeli sloužící k přenosu elektrické energie pro zdroje světla, tak aby konstrukce s komorami pro zdroje světla mohla bez omezení rotovat.



Obr. 16. Zjednodušený nárys svítidla s rotující konstrukcí

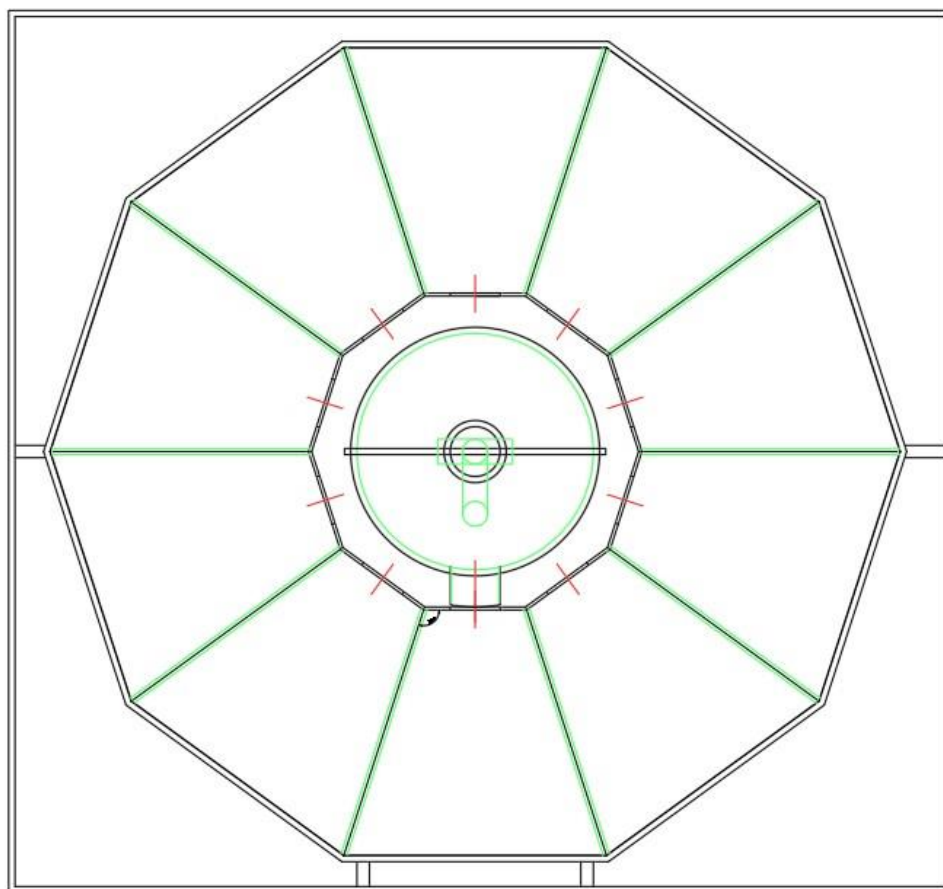
Druhá varianta využívá rotace kulového integrátoru. Komory se zdroji jsou důkladně upevněny a za pomoci rotace kulového integrátoru se k jejich otvoru přibližuje světlovedoucí do něj. Touto konstrukcí získáváme stejné výhody jako u předešlé varianty, a navíc odstraňujeme zásadní problém v podobě složitého mechanismu přenosu energie. Nevýhodou se stává velikost svítidla a velká neefektivita prostoru uvnitř.

Z důvodu zefektivnění prostoru uvnitř svítidla jsem přepracoval návrh s rotačním kulovým integrátorem. Komory se zdroji světla paprskovitě obklopují kulový integrátor. Ten se díky tomu může napojit na komoru s minimální vzdáleností. Velikost celého svítidla se tímto krokem nezanedbatelně zmenší. Nevýhodou konstrukce se může stát teplo od zdrojů světla, které vzniká kvůli stísněnosti vnitřního prostoru svítidla. Po konzultaci s vedoucím práce jsme se domluvili na rozvinutí posledního zmíněného návrhu tak, aby byla možná realizace návrhu.



Obr. 17. Zjednodušený nárys rozvíjeného návrhu

Bokorys



Obr. 18. Zjednodušený bokorys rozvíjeného návrhu

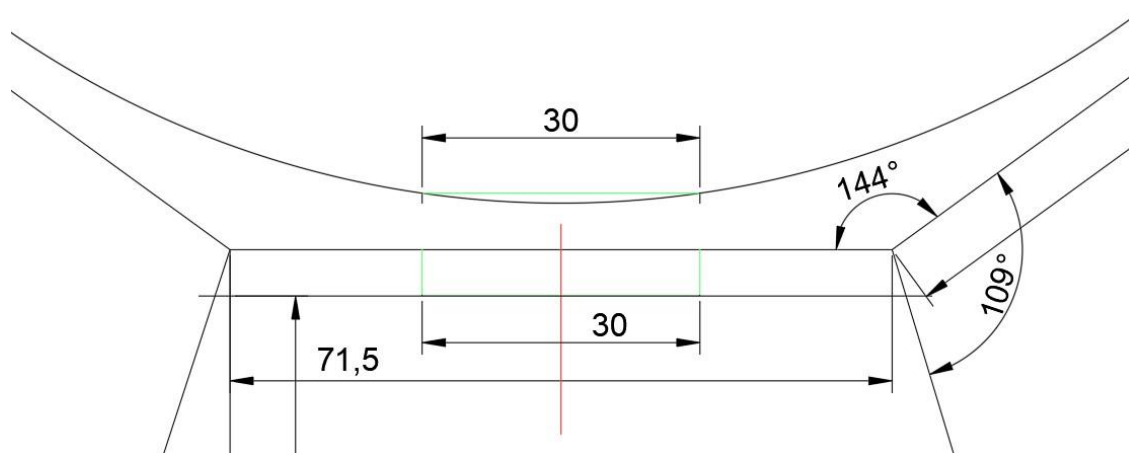
5.1.1 Zvolení počtu komor pro světelné zdroje

Zvolení počtu komor a na ně navázaný počet světelných zdrojů je zásadní pro celkový návrh svítidla. Pro svítidlo je nejlepší co nejvyšší počet komor, ale je omezen několika faktory. Nejzásadnější je velikost kulového integrátoru a velikost vstupního otvoru integrátoru.

Velikost kulového integrátoru je omezena na maximální vnější průměr 210 mm. Tato hodnota je důležitá z důvodu snahy o minimální mezeru mezi komorou a kulovým integrátorem, díky které zaručíme co nejvyšší jas na výstupu svítidla. Druhý určující parametr je přesná šířka vstupního otvoru. Ten může nabýt velikosti maximálně do té míry, kdy nebude překrývat ani jeden z otvorů sousedních komor. To je velmi důležité z důvodu ovlivnění spektra měřeného zdroje záření při minimálních jasech na výstupu ze svítidla.

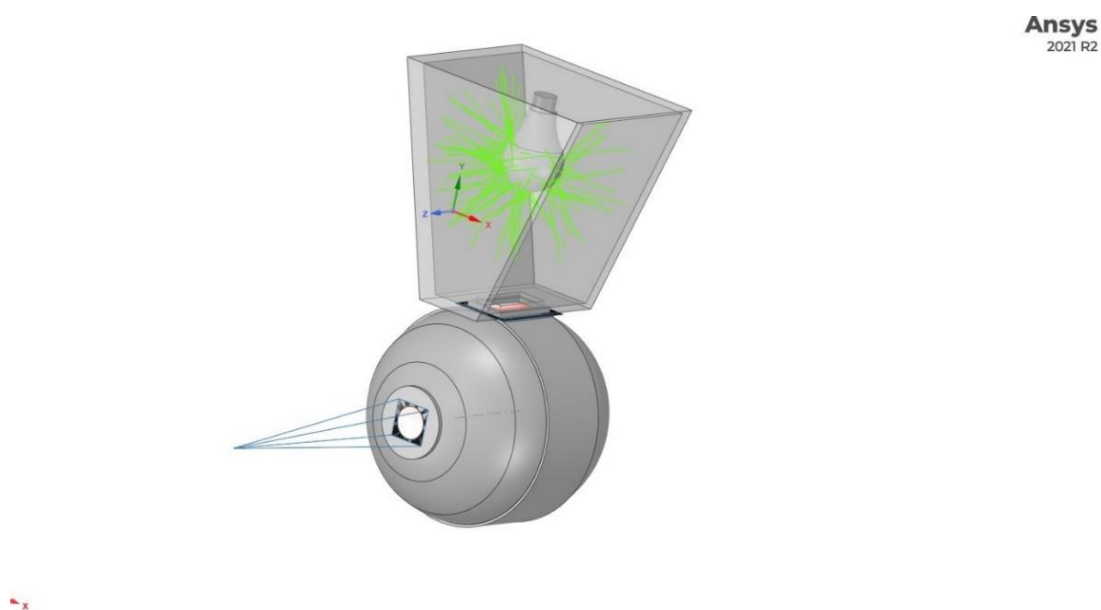
Rozhodoval jsem se mezi počtem 8, 10 a 12 komor s tím, že bude-li potřeba, mohu přidat do výběru počet 9 a 11. Z nákrešů jsem určil maximální možné velikosti otvoru. Pro osm komor může otvor mít velikost až 40 mm, a naopak u dvanácti komor pouze

25 mm, které jsou velmi hraniční a těžké na realizaci. Počet deseti komor s 30 mm šířkou díry a dostatečnou rezervou pro kartáčky na vyplnění mezery se zdají být ideální.



Obr. 19. Detail nákresu pro 10 komor

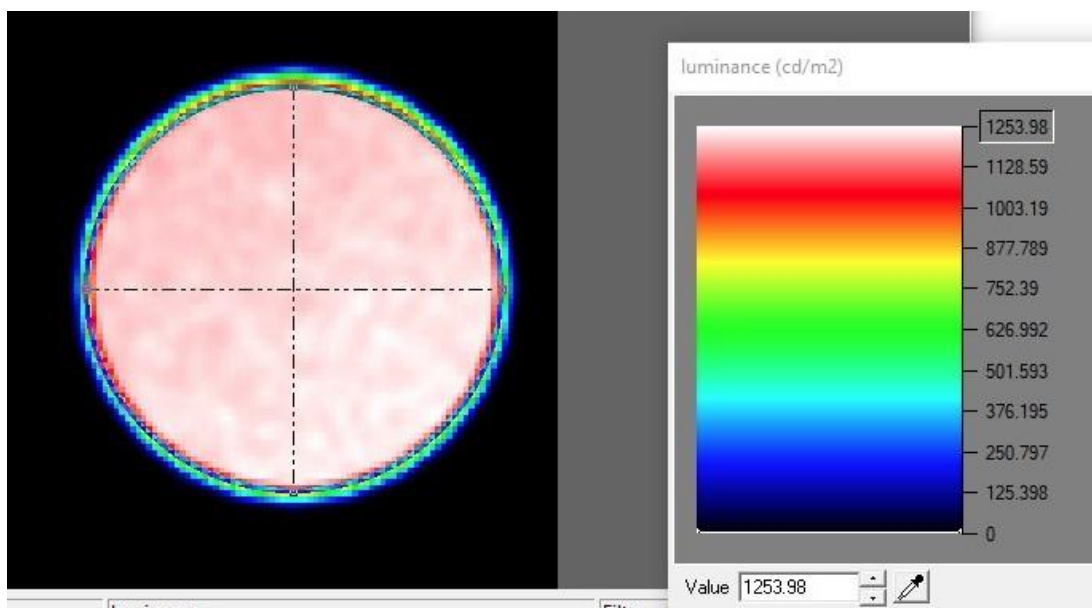
Byla provedena série simulací sestavy komory a kulového integrátoru v programu Ansys Speos 2021 R2. Velikost komory se měnila ve své hloubce a výšce. Vybrané hodnoty pro hloubku byly 140, 160, a 180 mm. Výšky komory byly stanoveny na 180, 200 a 220 mm. Činitel odrazu byl zadán 90 % s ideálním difúzním odrazem ploch komory a kulového integrátoru. Parametry testovaného zdroje byly 1000 lm a tvaru žárovky. Výsledky simulace ukázaly jako nevhodnější komoru s hloubkou 140 mm a výškou 180 mm. Simulace upozornila na potenciální problém na přechodu komory a kulového integrátoru, kterou prochází 84,5 lm. Možností na zvýšení hodnoty světelného toku je několik.



Obr. 20. Schéma simulace

Nejjednodušší je možnost zlepšení parametru činitele odrazu díky použití barvy s lepšími odrazovými parametry. Další možností je zvětšení rozměrů díry, změna polohy zdroje nebo instalace reflektoru.

Na výstupu z kulového integrátoru se měřil jas a jeho uniformita s výslednými hodnotami 1200 cd/m^2 a 1 % uniformitou (směrodatná odchylka). Pokud zvážíme vliv opálového skla, které nebylo součástí schématu simulace, jas pravděpodobně klesne a uniformita se zvýší.

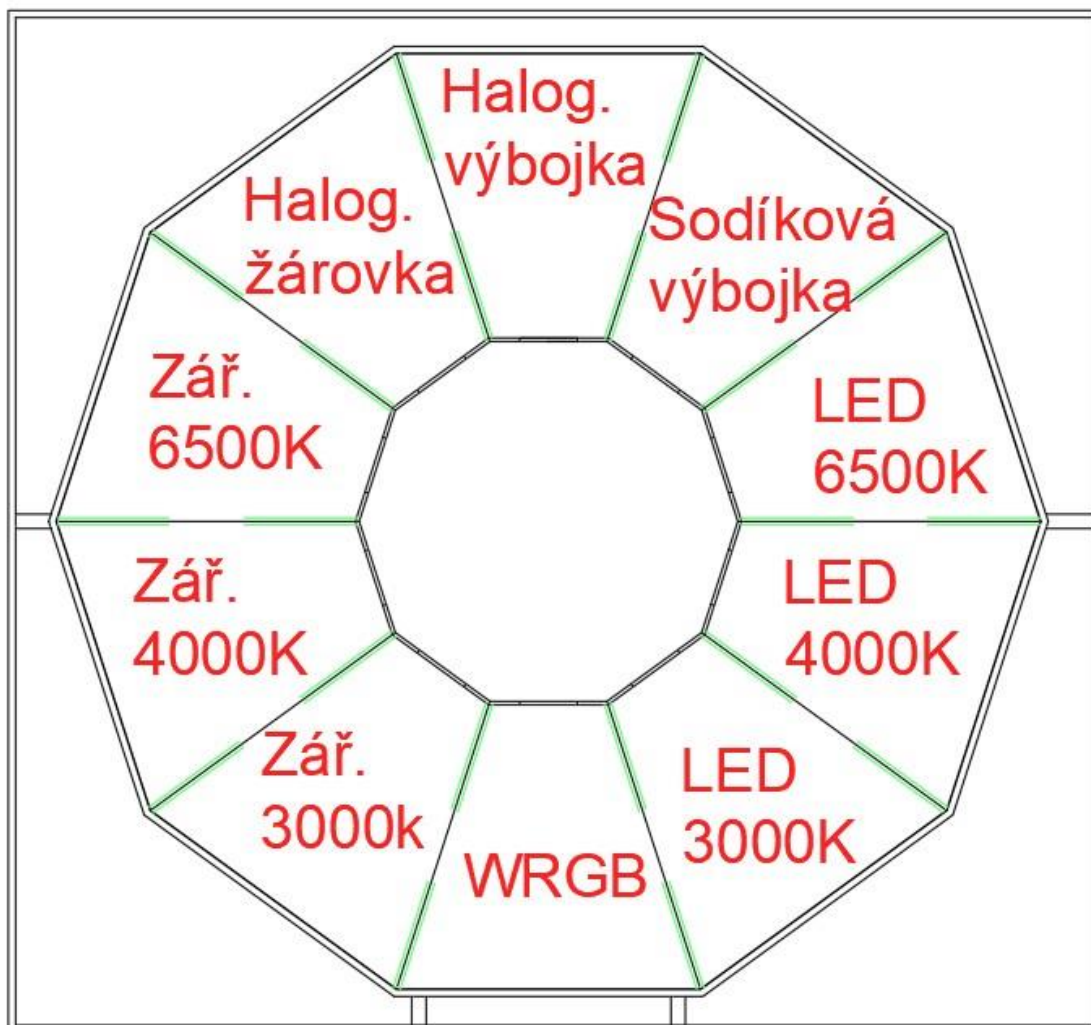


Obr. 21. Výsledek simulace na výstupu z kulového integrátoru

5.1.2 Výběr světelných zdrojů

V návrhu svítidla je umístěno 10 komor, pro které musíme zvolit světelné zdroje. Jelikož potřebujeme svítidlo se schopností změny vyzařovaného spektra, z toho vyplývá nutnost použití odlišných zdrojů světla. Výběr by měl odpovídat dnes nejčastěji používaným zdrojům a zároveň musí splnit podmínky na maximální výkon a světelný tok. Dnes nejpoužívanější zdroje světla jsou LED zdroje světla. Proto jsem jim v návrhu přiřadil čtyři komory. První tři LED zdroje by se měly odlišovat velikostí teploty chromatičnosti. První z nich by měl mít teplé barvy, kterým odpovídá teplota do 3000 K. Druhý zdroj by se měl pohybovat kolem 4000 K, aby vyzařované světlo bylo neutrální. Třetí zdroj bude vyzařovat studené světlo s teplotou okolo 6500 K. Díky tomu bude docíleno výraznější změna spektra. Čtvrtý LED zdroj bude LED WRGB, který dokáže měnit barvu světla pomocí regulace čtyř diod s odlišnou barvou vyzařovaného světla. Podobně budou zastoupeny kompaktní zářivky, které budou tři, rozděleny podle teploty chromatičnosti na 3000 K, 4000 K a 6500 K. Dalším zástupcem bude vysokotlaká sodíková výbojka, kterou najdeme v lampách pouličního osvětlení. V poslední komoře by měla být metal halogenidová výbojka. S jejím výběrem jsou komplikace z důvodu vyšších výkonů a velikosti. Pokud by se nepodařilo vyřešit

konstrukční problémy které přináší, je vybrána náhrada v podobě halogenidové žárovky.



Obr. 22. Schéma umístění světelných zdrojů v návrhu

Z důvodu jednoduchosti instalace a dostupnosti byly voleny zdroje světla na patici E27 nebo E14. Dalším kritériem bylo jednotné napájení AC 230 V z důvodu jednoduchosti zapojení a bez nutnosti umístění transformačních prvků napětí pro jednotlivé zdroje.

Seznam navrhovaných světelných zdrojů s parametry nalezneme v tabulce Tab.1.

Tab. 1: Seznam navrhovaných zdrojů světla do svítidla

Technologie zdroje světla	Teplota chromatičnosti (K)	Patice	Příkon (W)	Napětí (V)	Světelný tok (lm)	Navrhovaný typ světelného zdroje
Kompaktní zářivky	3000	E27	15	230	970	TUN SPIRAL T2 15W/827 230V E27 10000H
	4000	E27	20	230	1320	TUN SPIRAL T2 20W/840 230V E27 10000H
	6500	E27	15	230	900	TUN SPIRAL T2 15W/865 230V E27 10000H
LED	3000	E27	10,5	230	1055	PHILIPS COREPRO LEDBULB A60 E27 830
	4000	E27	10,5	230	1055	PHILIPS COREPRO LEDBULB A60 E27 840
	6500	E27	10,5	230	1055	PHILIPS COREPRO LEDBULB A60 E27 865
RGB LED	-	E27	9	230	806	EGLO ZDROJ LED LM-E27 A60 9W RGBW/CCT
Sodíková výbojka	2000	E27	50	230	3600	LDV OSR NAV-E 50W SUPER 4Y E27
Halogenidová výbojka	4200	E27	35	230	3200	TUN VÝBOJKA HALOGENID 35W/942 G12 CMH35
Halogenová žárovka	2700	E14	28	230	370	EMOS mini globe °ECCL28-P45E27

5.1.3 Úpravy povrchů ve svítidle

V simulaci je použita ideální difúzní odraznost ploch svítidla 90 %. Aby se dosáhlo takovýchto parametrů, musí mít určená plocha tyto parametry nebo na ní nanese vrstvu materiálu, která danou odraznost splňuje. V návrhu se počítá s použitím obou možností.

Díly kulového integrátoru budou přímo vyrobeny z materiálu, který vyhovuje potřebným požadavkům s difúzní odrazností 91 %. Pokud bychom použily nátěr barvou hrozí pravděpodobné popraskání nátěru z důvodu tepelného namáhání kulového integrátoru. Důvodem namáhání bude vnější povrch kulového integrátoru, na který bude nanesena černá barva, která dané teplo snese. Nástřík bude sloužit k pohlcení velké části světla ze zbylých zrovna neměřených zdrojů světla. Sníží se osvětlení v mezeře

mezi kulovým integrátorem a komorami a zmenší se riziko proniknutí do kulového integrátoru a tím ovlivnění výstupního záření.

Komory jsou složeny z dílů, které jsou vyrobeny z PVC a dibondových desek a ani jedna nesplňuje požadavky na odraznost. Proto budou natřeny barvou Primalex Polar, která má bělost 92 % BaSO₄ a této hodnotě odpovídá i odraznost. Výhodou využití nátěru je provedení nátěru v pozdní fázi realizace a tím menší pravděpodobnosti znečištění povrchu a zhoršení výsledných vlastností.

5.2 Finální návrh

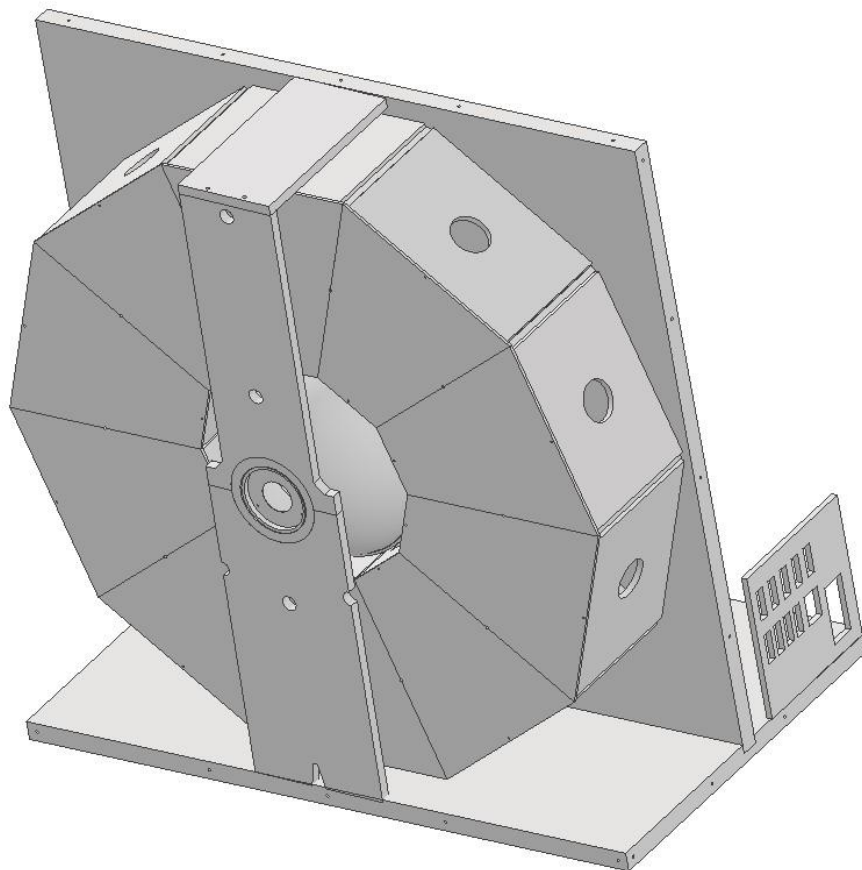
Od zvoleného předběžného návrhu se provedlo mnoho úprav a změn pro docílení co největší funkčnosti celého zařízení. Pro ověření všech rozměrů dílů a schopnost sestavit celé svítidlo vznikl 3D návrh svítidla v poměru 1:1, tak aby model odpovídal co nejvíce realizovanému svítidlu.

Zásadními změnami prošel kulový integrátor, který prošel velkým vývojem. Do prvního kulatého tvaru se změnil na tvar podobný pilulce, kdy dvě polokoule jsou spojeny střední částí kruhového tvaru s ohraničeným vstupním otvorem. Tímto prodloužením nastal problém s ukotvením integrátoru a musel se ukotvit nezávisle na hlavní konstrukci komor.



Obr. 23. 3D model kulového integrátoru

Další změnou bylo zahrnutí budoucí možnosti rozšíření svítidla o vzdálené ovládání kulového integrátoru. z tohoto důvodu se rozšířila zadní část svítidla o 150 mm. Tím se zvětšil zadní prostor a bude se zde moci umístit potřebné zařízení. Pro jednodušší napojení pohonu ovládání zařízení a integrátoru je připraveno už současně navrhované mechanické ovládání.

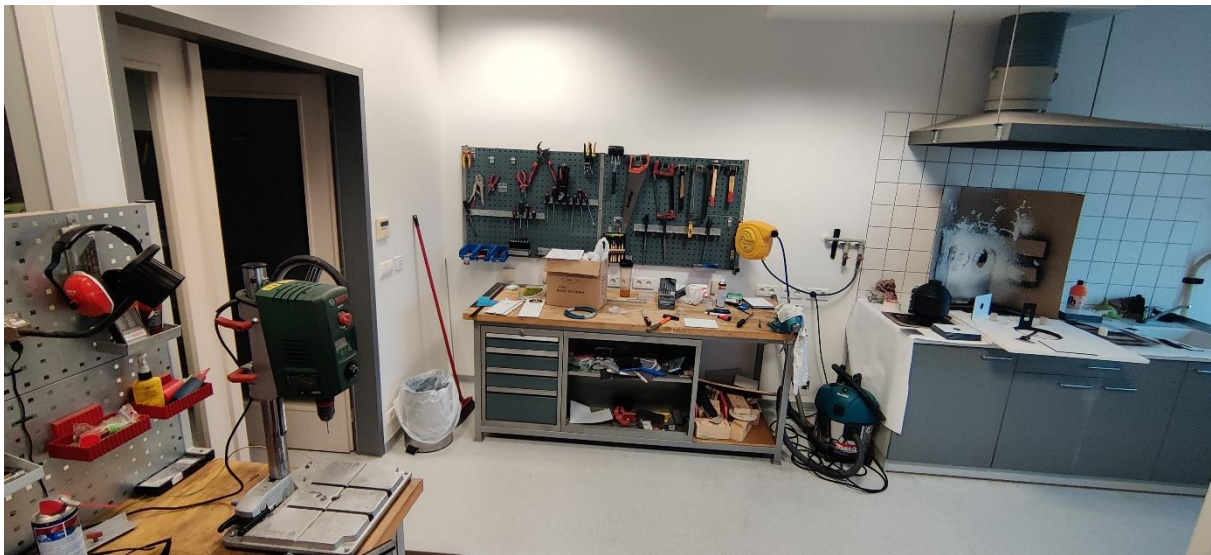


Obr. 24. 3D model vnitřních částí svítidla

Ostatní díly se upravily pro použití s už předvybranými elektrosoučástkami a vytvořily se díly na zakrytí vnitřních částí. Podrobný seznam nakoupených dílů nalezneme v příloze.

6. REALIZACE SVÍTIDLA

Realizace svítidla proběhla na dílně školy, kde bylo vše potřebné. Prováděly se zde veškeré práce na výrobě svítidla zahrnující úpravu a výrobu některých dílů, tmelení, barvení, zapojení elektrických obvodů a celková kompletace návrhu svítidla.



Obr. 25. Dílna školy, kde probíhala realizace

6.1 Realizace komor

Navržené díly svítidla se odeslaly do výroby a po jejich převzetí se upravily do požadované podoby. To zahrnovalo vyvrtání a vytvoření závitů do vík od komor a otvory se závitem do bočních stěn komor. Z důvodu ověření rozměrů proběhlo první sestavení komor.



Obr. 26. První sestavení komor

Následovalo oblepení a nanášení černé barvy na určené díly, tak aby barva zachytila světlo z druhé strany.



Obr. 27. Nabarvené vnější čelo komor

Všechny díly určené k sestavení byly připraveny na lepení. Lepení pomáhaly drážky v nosné desce, které zaručovaly přesnost umístění a stabilní ukotvení. Použity jsou dva druhy silikonu, a to bílé a černé barvy. Díky použití dvou barev nemusíme přebarvovat některé spáry. Na zahlázení spár se použila jarová voda, která zaručí nepřilnavost silikonu na prsty. Boční stěny byly zpevněny víky komor při tvrdnutí lepidla. Po vytvrdnutí silikonu se ověřila pevnost konstrukce ve vertikální poloze, jestli nedochází k vyvrácení desek nebo netěsnosti spár.



Obr. 28. Proces lepení komor

Vnitřní prostor komor a jejich víka byly nabarveny barvou Primalex Polar s vysokou bělostí. Aby bylo zaručeno správné krytí barvy, byly nanесeny 3 vrstvy nátěru.

Víka a stěny komor na sebe nedoléhaly, a tím docházelo k prostupu světla z jedné komory do druhé. Pro zabránění pronikání světla do ostatních komor se instalovalo tenké pěnové těsnění.

Sestava komor se zasunula do drážky v podstavě a spojila vruty. Tím se vytvořila hlavní nosná konstrukce. Stabilitu sestavě komor zajišťuje i umístění komor, tak že se o spodní celá sestava opírá.

6.2 Realizace kulového integrátoru

Návrh kulového integrátoru se skládá ze tří dílů. K rozdělení došlo z důvodu omezení velikosti tisknutelných rozměrů objektu na použité 3D tiskárně. Po vytisknutí se díly očistily od podpěr a malých nepřesností v tisku. Pevnost integrátoru je zajištěna vpasováním krajních dílů do prostředního a následně uchycením pomocí šroubků. Při manipulaci se musí dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo ke zašpinění vnitřních ploch.

Předtím, než započalo nanášení černé barvy na vnější povrch integrátoru, zakryli jsme všechny otvory do vnitřního prostoru. Pokud by se dostala barva na vnitřní stranu, došlo by k degradaci odrazných vlastností povrchu.



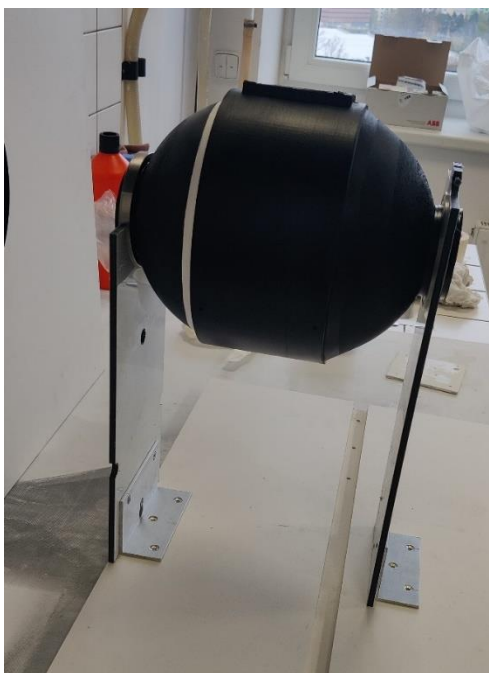
Obr. 29. Nanášení barvy na kulový integrátor

Při nasazování ložisek se vyskytly komplikace s nepřesností tisku a průměr římsy integrátoru nebyl přesný. Proto se nepřesnosti vyrovnaly izolační páskou. Následně nasazená ložiska dostatečně drží a nemuselo dojít k jejich přilepení.

Vstupní otvor integrátoru nepřiléhá na výstupní otvory komor, a to způsobuje ovlivnění požadovaného spektra. Proto se přilepily kartáčky okolo vstupního otvoru. Ty zamezí vniku záření z vedlejších komor, a to hlavně při regulování jasu, kdy se otvory vzájemně vychylují a vstupní otvor se přibližuje k otvoru vedlejší komory.

Na druhé straně integrátoru je umístěna zápustná matka pro uchycení závitové tyče. Tím bude umožněno ovládání, více v kapitole 6.4.

Kulový integrátor s ložisky je uložen na samostatných podpěrách, viz. Obr. 30. Kulový integrátor s úchyty. Ty se vyrobily spolu s ostatními díly. Byl kladen velký důraz na jejich přesnost z důvodu nutnosti správného vycentrování integrátorů vůči otvorům komor. Podpěry jsou ukotveny k podstavě pomocí hliníkových L profilů.



Obr. 30. Kulový integrátor s úchyty

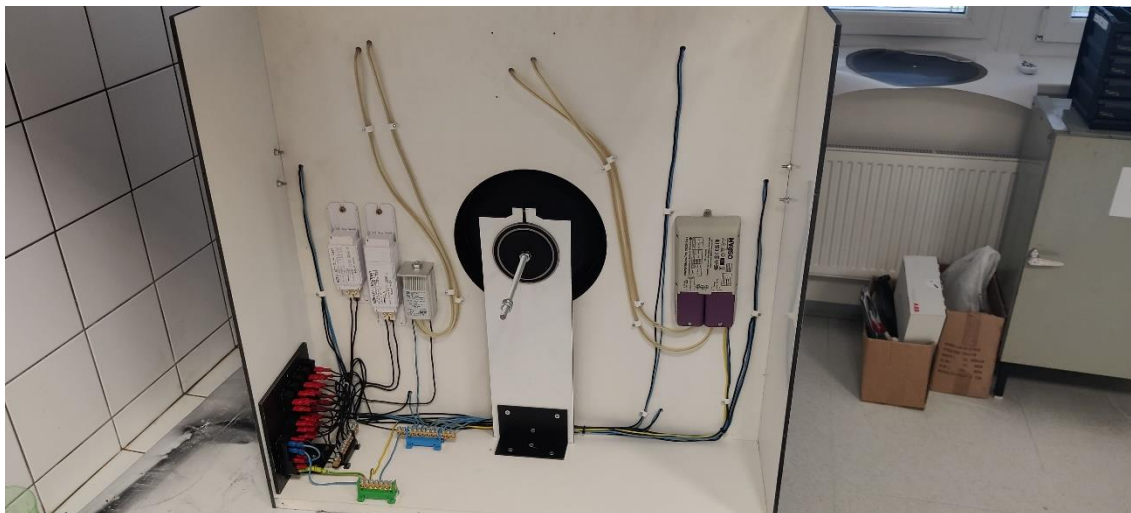
6.3 Elektroinstalace

Svítilno je zařízení třídy ochrany I. a je připojeno přes konektor IEC C14 k síti. Z důvodu zvýšení ochrany je instalována válcová pojistka 10 A a hlavní spínač svítidla. Základní zapojení je provedeno vodičem H05V-U 1 vyžadované barvy. Drát byl použit z důvodu schopnosti držet tvar a tím zlepšit přehlednost zapojení. Výjimku tvoří zapojení sodíkové a metal halogenidové výbojky, kde je vyžadováno použití vodiče s izolací na 5 kV viz Obr. 33 a ochranný vodič. Ochranný vodič je přiveden na svorkovnici, která je připravena na budoucí možné přidání pohonu.

Většina zdrojů světla používá patici E27. Výjimkou je halogenová výbojka s paticí G12. Každý zdroj světla je ovládán samostatným vypínačem, kdy u sodíkové výbojky je dvoupolohový pro provoz s tlumivkou 36 W a 58 W. Tlumivky už obsahují i potřebný

kondenzátor pro kompenzaci. Důvodem použití tohoto řešení je možnost omezení výkonu pro možnost nastavení nižších jasů na výstupu svítidla.

Ovládací panel s napájecím konektorem a spínači se nalézá na levém boku svítidla a je konstruován tak, aby i při demontování krycích desek zůstal na místě a plně funkční.

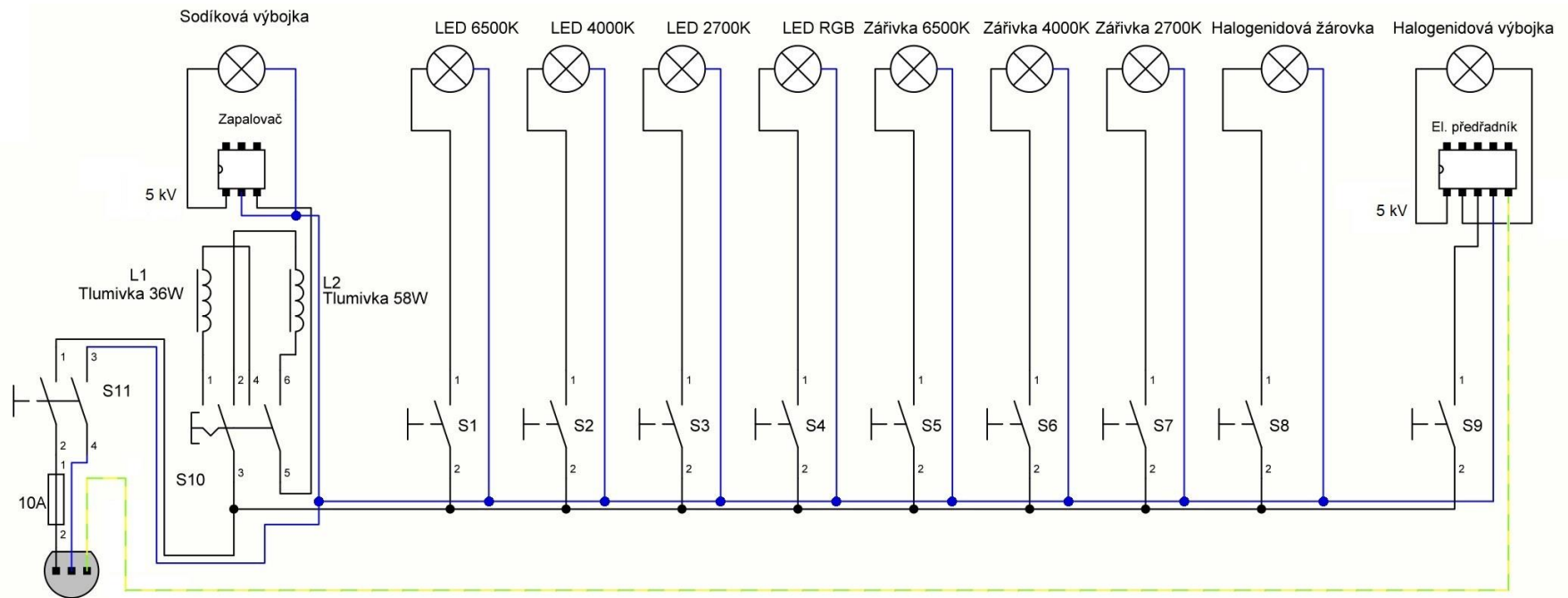


Obr. 31. Zadní část svítidla a elektroinstalaci

Do komor se umístily světelné zdroje dle návrhu v Tab. 1. na přiřazená místa a proběhlo otestování funkčnosti všech prvků.



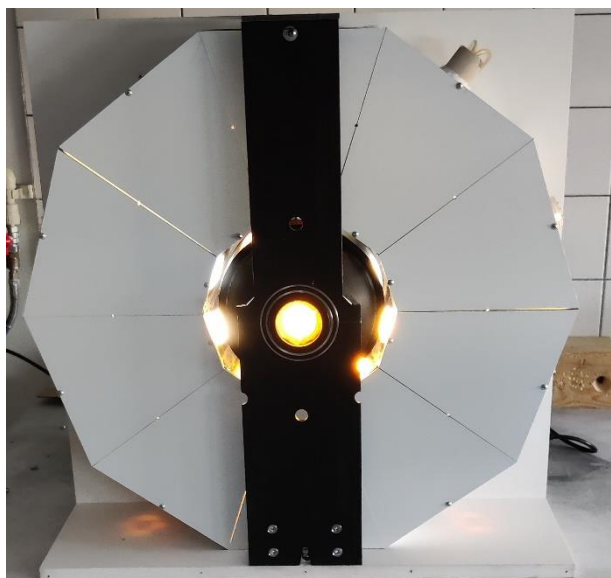
Obr. 32. Otestování zdrojů světla bez MH. výbojky



Obr. 33. Schéma zapojení svítidla

6.4 Finalizace svítidla

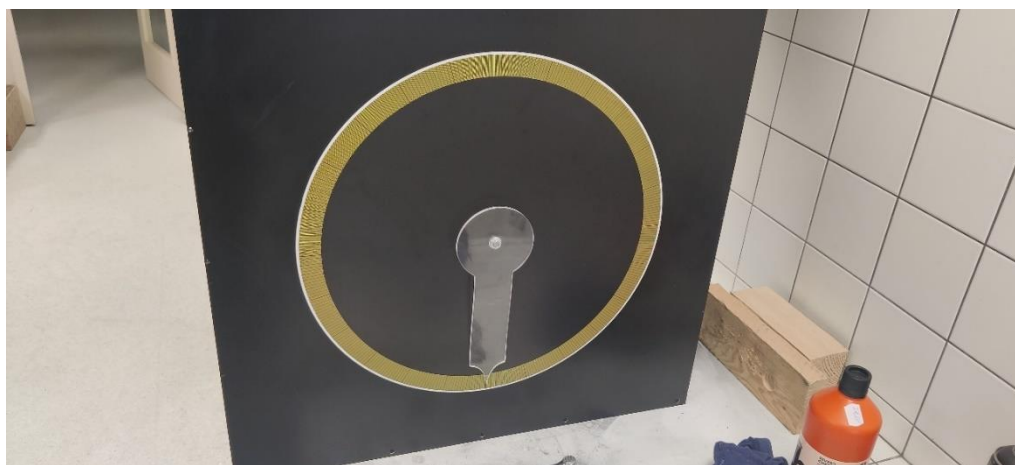
V poslední fázi realizace se řešily vnější krycí desky svítidla, vycentrování a manuální ovládání kulového integrátoru.



Obr 34. Ověření funkce kulového integrátoru po vycentrování

Na krycích deskách se vyvrtaly potřebné díry se závity a výseče pro zapuštění. Po ověření lícování všech desek na sebe smontováním celého pláště se desky nabarvily na černo z důvodu zvýšení schopnosti absorpce záření vnějšího povrchu desek. Na zadní krycí desku se nalepila folie se stupnicí umožňující přesné určení polohy kulového integrátoru.

Poloha bude určována ukazatelem, který zároveň bude sloužit i k nastavení samotné polohy. Je ukotven na závitové tyči, která je přímo spojena s kulovým integrátorem přes zápusťnou matku.



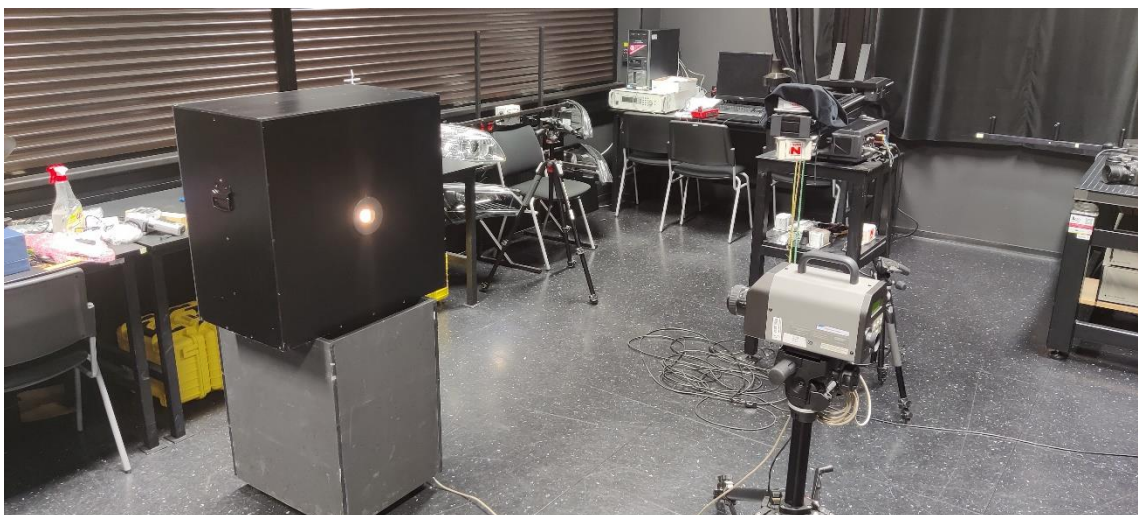
Obr. 35. Stupnice s ukazatelem polohy

7. LABORATORNÍ MĚŘENÍ SVÍTIDLA

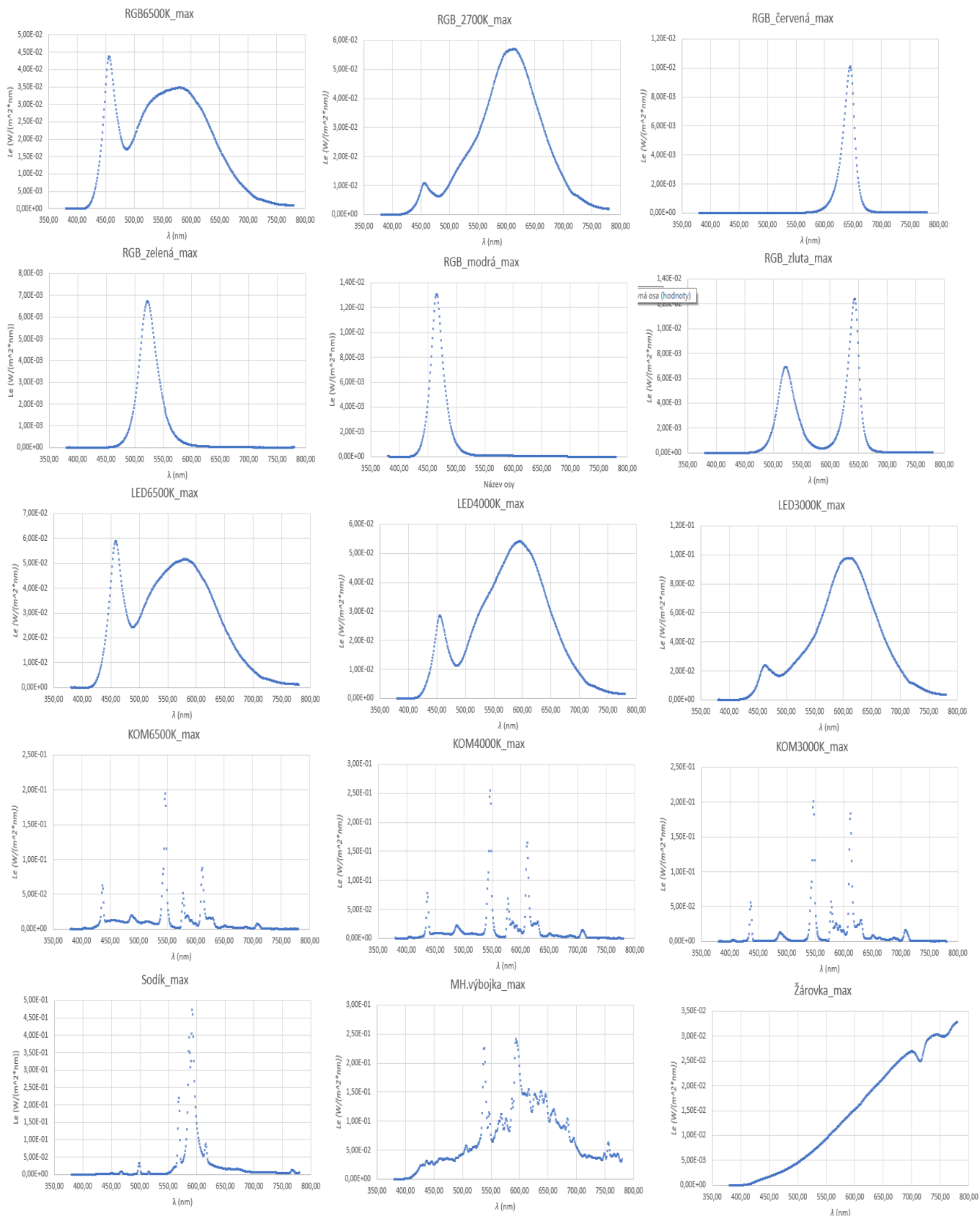
Měření svítidla proběhlo v laboratoři světelné techniky a cílem bylo zjištění uniformity jasu a vyzařovaná spektra pro každý světelný zdroj ve svítidle. Pomocí získaných dat vymezit a označit potřebné polohy na stupnici pro přesné nastavení požadovaného zdroje a požadované hodnoty jasu.

První měření svítidla mělo za cíl stanovit polohu kulového integrátoru pro minimální jas jednotlivých zdrojů bez ovlivnění vyzařovaného spektra vedlejším zdrojem. Pro měření byl použit spektrometr Jeti specbos 1211UV. Pomocí naměřených dat byly vyznačeny přechodové oblasti na stupnici svítidla, kde se sousední zdroje ovlivňují a požadované výstupní spektrum je narušené. V další části měření jsme pomocí dat zjišťovali polohu kulového integrátoru při jasu 1000 cd/m^2 pro každý zdroj. Tato velikost jasu se bude používat při ověření kalibrace jasových analyzátorů. Hodnoty jasu žárovky nedosáhly požadované velikosti. Nejvyšší naměřená hodnota byla pod 800 cd/m^2 . To by mohlo zapříčinit nutnost změny nastavení jasového analyzátoru jen pro tento zdroj. Při další měření bylo ověřeno, že změna nastavení není nutná. Druhým zdrojem, který nedosáhl požadovaného jasu, je RGB LEDka při nastavení jednotlivých barev, zde se nepočítalo s tím, že by danou hranici splnila. Data z měření najdeme v příloze C.

První použitý spektrometr nedokázal změřit maximální hodnoty jasu pro některé zdroje světla. Měření maximálního jasu se provedlo pomocí spektrometru CS-1000A. Poloha kulového integrátoru byla zaznamenána na stupnici svítidla. Výsledná spektra nalezneme na Obr. 37. Naměřená spektra jednotlivých zdrojů světla spektrometrem CS-1000A a naměřená data nalezneme v příloze D.



Obr. 36. Měření spektrometrem CS-1000A

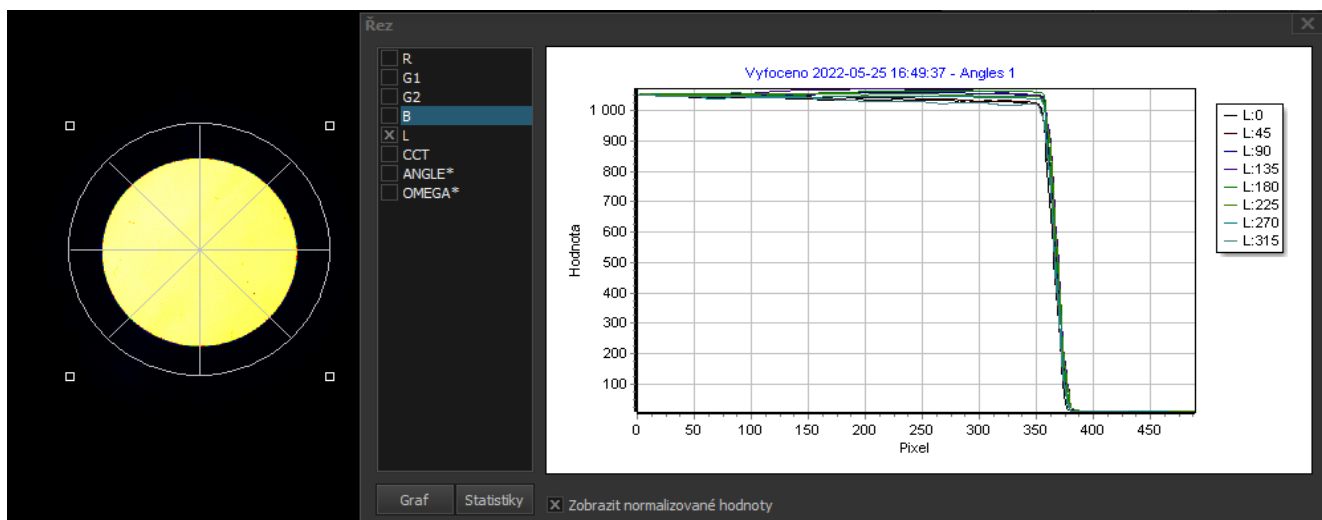


Obr. 37. Naměřená spektra jednotlivých zdrojů světla spektrometrem CS- 1000A

Tab. 2: Maximální hodnoty jasu pro jednotlivé zdroje

Zdroj	L (cd/m ²)	T_c (K)
Sodík	4548,23	-----
LED6500K	3190,43	4645
LED4000K	2875,35	3270
LED3000K	4142,76	2384
RGB6500K	2231,63	4831
RGB2700K	2460,06	2981
KOM3000K	1774,50	4020
KOM4000K	2194,45	5265
KOM6500K	1642,20	2356
Žárovka	792,14	2797
MH.výbojka	7615,90	-----
RGB červená	36,37	-----
RGB zelená	141,74	-----
RGB modrá	32,35	4221
RGB žlutá	189,59	2400

Na zjištění uniformity jasu pro jednotlivé zdroje byl použit jasový analyzátor LDA-LumiDISP. Nastavena hodnota jasu na 1000 cd/m² s výjimkou u žárovky s jasem pod 800 cd/m².



Obr. 38. Průběhy výstupního jasu svítidla pro sodíkovou výbojku po 45°

Tab. 3: Naměřené a vypočítané hodnoty jasu a jeho uniformity

Zdroj	Průměr L_r (cd/m ²)	Rozptyl σ^2_L (cd/m ²)	Uniformita σ_L (%)
Sodík	1049,1	198,1	1,3
LED 6500K	1001,3	156,2	1,2
LED 4000K	1036,4	153,9	1,2
LED 3000K	984,2	160,6	1,3
RGB LED 2700K	1142,1	148,4	1,1
RGB LED 6500K	961,7	117,5	1,1
R LED	32,6	0,1	1,0
G LED	143,5	1,7	0,9
B LED	33,2	0,1	1,0
RGB žlutá	186,2	2,6	0,9
KZ 3000 K	1001,4	104,9	1,0
KZ 4000 K	998,8	121,3	1,1
KZ 6500 K	906,0	88,7	1,0
Žárovka	769,0	56,3	1,0
Halogenid 4000 K	1016,7	217,6	1,5

Uniformita jasu zvoleného zdroje světla odpovídá hodnotě směrodatné odchylky jasu v procentech. Tu lze vypočítat podle vzorce (7-1) pomocí průměrného jasu L_r a rozptylu daného jasu σ^2_L .

$$\sigma_L = \frac{\sqrt{\sigma^2_L}}{L_r} \cdot 100 \quad (\%; \text{cd/m}^2, \text{cd/m}^2)$$

(7-1)

Výsledné hodnoty uniformity jasu nepřesáhly velikost 1,5 %. Výsledky splňují zadané kritérium na dostatečnou uniformitu jasu. Pokud je porovnáme s hodnotou ze simulace tady 1% je pozorovatelný malý nárůst. Pravděpodobným důvodem jsou nečistoty a prach ve svítidle.



Obr. 39. Měření jasovým analyzátořem

7.1.1 Měření teploty svítidla

Důležitými provozními vlastnostmi svítidla jsou provozní teploty po ustálení. Pokud by byly příliš vysoké hrozí zničení svítidla nebo zhoršení parametrů. Pro účely měření byl použit infrateploměr Testo 845. Měření proběhlo po 7 hodinách provozu svítidla, aby se teploty dostatečně ustálily.

Tab. 4: Naměřené teploty

Poloha	Teplota T (°C)
Víko svítidla	45
Horní úchyt	56
Komora MH. výbojky	87
Komora Sodíkové výbojky	78
Komora Žárovky	81

Teplota v některých částech svítidla je vyšší, než by bylo optimální. Přesto konstrukční limit 90 °C nebyl překročen. Limit je stanoven odolností silikonu použitého při konstrukci. Pokud bychom chtěli zásadně zlepšit provozní teploty svítidla, musel by se upravit návrh krycích desek. Vytvořené průduchy by zaručily cirkulaci vzduchu mezi vnitřním prostorem svítidla a okolím. Nevýhodou tohoto řešení je umožnění usazování prachu uvnitř svítidla a nutnost čištění svítidla pro udržení světelných parametrů. Z tohoto důvodu tato úprava nebyla provedena.

8. ZÁVĚR

Tato práce seznamuje se základními vlastnostmi záření ve viditelném spektru a jeho veličinami. Tyto základy jsou rozvinuty o teorii světelných zdrojů a aktivních optických částí. Díky těmto znalostem jsem se mohl posunout k návrhu koncepce svítidla s uniformní vyzařovací plochou a možností změny spektrálního složení. První koncepce svítidla měly mnoho nedostatků. Postupnou úpravou návrhu základní konstrukce svítidla se došlo k řešení, které splňuje základní stanovené požadavky. Desetiúhelníková konstrukce má stejným počet komor pro zdroje světla orientované do středu a na tyto komory navazuje otočný kulový integrátor. Tímto řešením získáváme možnost jednoduché změny spektra záření, a také schopnost regulovat jas svítidla. Další nespornou výhodou návrhu je využití vnitřního prostoru svítidla, díky čemuž svítidlo nebude nadměrně veliké. Pro ověření funkčnosti návrhu a optimalizaci velikosti návrhu komory se provedla série simulací. Výsledkem bylo ověření funkčnosti návrhu a určení velikosti komory 71,5 x 140 x 180 mm.

Před samotnou realizací proběhlo ověření všech zásadních rozměrů dílů, aby bylo zaručeno pasování dílů a snížilo se riziko nepadnoucích a špatně navržených dílů. K realizaci svítidla došlo na dílně školy. První část výroby se zaměřila na sestavení komor, jejich nátěru a upevnění nosného panelu s komorami k podstavě. Mezitím byly zadány k tisku části kulového integrátoru, které se následně spojily a jako celek prošly barvením. Integrátor je uložen do ložisek, která zaručují plynulé otáčení. Elektroinstalace byla zapojena dle návrhu se zvolenými zdroji světla a otestována byla její funkčnost. Následovala výsledná kompletace, v rámci které se vyrobily krycí desky a mechanismus pro manipulaci a určení polohy.

Měření bylo provedeno v laboratoři světelné techniky. Pomocí spektrometru určili polohy kulového integrátoru pro mezní polohy mezi zdroji světla, hodnotu jasu 1000 cd/m² a maximální hodnotu jasu. V druhé části měření se soustředila na zjištění přesného spektrálního složení záření použitých světelných zdrojů. Poslední měření zjistilo uniformitu jasu na výstupu ze svítidla. Žádná z hodnot nepřekročila hodnotu 1,5 %. Tímto byl splněn požadavek na uniformní vyzařování svítidla.

Porovnání výsledků simulace a naměřených hodnot jasu zdrojů světla s obdobným světelným tokem ukazuje na značný nárůst výstupního jasu u realizovaného svítidla. Důvodem tohoto nárůstu je použití materiálu s větším činitelem odrazu na výrobu kulového integrátoru. Použitá barva uvnitř komor se zdroji má také lepší parametry, než bylo nastaveno v simulaci.

Svítidlo teplotně obstálo s tím, že neposkytuje žádnou rezervu pro osazení výkonnějších zdrojů. Přednos v konstrukci dostalo celkové uzavření svítidla, tak aby se zabránilo usazování prachu ve vnitřních částech svítidla.

Svítidlo obsahuje deset komor se stejným počtem světelných zdrojů. Byly vybrány dle požadavků s důrazem na použití dnes nejpoužívanější zdrojů světla. Svítidlo má

funkci regulace výstupního jasů pro všechny komory. Díky tomu lze nastavit pro odlišné zdroje stejné jasy bez použití dalších filtrů či clonek. Nastavení svítidla je velmi jednoduché. Stačí nastavit ukazatel na požadovaný zdroj světla a následně mírně upravit nastavení na požadovaný jas. Takto lze otestovat všechny použité zdroje světla bez nutnosti opětovného zaměření na nový. Druhou výhodou je schopnost svítidla mít všechny zdroje světla sepnuty naráz bez vzájemného ovlivnění vyzařovaných spekter při měření. Díky tomu mohou být zapnuty a ustáleny všechny měřené zdroje najednou.

Tyto výhody vedou k zásadnímu urychlení procesu ověření kalibrace jasového analyzátoru. Tyto vlastnosti zajišťují svítidlu splnění hlavních požadavků a celého zadání práce.

BIBLIOGRAFIE

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. 1. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] Světlo: Elektromagnetické vlnění, spektrum a fotony. *Khan Academy* [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://cs.khanacademy.org/science/obecnachemie/xefd2aace53b0e2de:atomy-a-jejichvlastnosti/xefd2aace53b0e2de:fotoelektronova-spektroskopie/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>
- [3] TOMÁŠ, David. *Osvětlování komunikací v podmínkách mezopického vidění*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Jan Zálešák.
- [4] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [5] How to Block Blue Light for Better Sleep and Why It Works. *Remember Everything* [online]. 2018 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://remembereverything.org/block-blue-light-better-sleep/>
- [6] Spektra běžných světelných zdrojů. *Sbírka fyzikálních pokusů* [online]. 2019 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://fyzikalnipokusy.cz/1839/spektra-beznych-svetelnych-zdroju>
- [7] Světelné zdroje. *Power wiki* [online]. Praha: ČVUT FEL, 2008 [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/A5M15ES1-06-Zdroje.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
LED	dioda emitující světlo
UV	ultrafialové světlo
IR	infračervené světlo
PVC	Polyvinylchlorid

Symbole:

U	napětí	(V)
I	proud	(A)
ϕ	světelný tok	(lm)
L	jas	(cd·m ⁻²)
N	index lomu	(-)
c_0	rychlost světla ve vakuu	(m·s ⁻¹)
f	frekvence	(Hz)
λ	vlnová délka	(nm)
E	osvětlenost	(lx)
A	plocha	(m ²)
l	vzdálenost	(m)
Ω	prostorový úhel	(sr)
r	poloměr	(m)
I	svítivost	(cd)
T_c	teplota chromatičnosti	(K)
P	příkon	(W)
Ra	index podání barev	(-)
ρ	odraznost	(-)
L_r	Průměrný jas	(cd/m ²)
σ_L^2	Rozptyl jasu	(cd/m ²)
σ_L	Směrodatná odchylka výběru jasu v %	(%)

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	3D model svítidla
Příloha B	Seznam nakoupených dílů
Příloha C	Naměřená data Jeti specbos 1211UV
Příloha D	Naměřená data CS- 1000A
Příloha E	Naměřená data LDA-LumiDISP
Příloha F	3D model svítidla bez krycích desek
Příloha G	Modely dílů
Příloha H	Výsledky simulace

Všechny přílohy jsou uloženy zvlášť v souboru přílohy.zip