

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

2019

Branislav Chovanec Bc.

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra energetiky**

**Návrh metodiky merania parametrov svietidiel pomocou
spektroradiometra a goniofotometra**

**Methodology for measurement of parameters of luminaires
by spectroradiometer and goniophotometer**

2019

Branislav Chovanec Bc.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Branislav Chovanec**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Návrh metodiky měření parametrů svítidel pomocí spektroradiometru a goniofotometru**
Methodology for measurement of parameters of luminaires by spectroradiometer and goniophotometer

Jazyk vypracování: slovenština

Zásady pro vypracování:

1. Teorie fotometrických měření
2. Parametry spektroradiometrů
3. Vlastnosti goniofotometrů
4. Návrh procedury měření parametrů svítidel
5. Příklad měření a vyhodnocení světelných parametrů svítidla

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Sokanský, K.: Světelná technika. ČVUT, Praha 2011
2. Habel, J.: Světlo a osvětlování. FCC Public, Praha 2013
3. Sborníky z Kurzů osvětlovací techniky, Sborníky VŠB-TU
4. Manuály ke spektroradiometru Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED

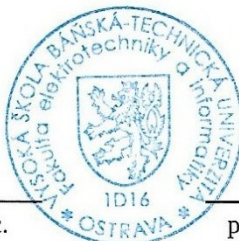
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Tomáš Novák, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2019


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

V Ostrave dňa: 30.4.2019



.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som pod'akoval pánovi doc. Ing. Tomášovi Novákovi Ph.D. za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto diplomovej práce, pánovi Ing. Lumírovi Kunčíčkému za ochotu a pomoc pri meraní v laboratóriu svetelnej techniky a pánovi Ing. Petrovi Běčákovi za pomoc pri práci s jasovým analyzátorom.

Abstrakt

Táto diplomová práca je zameraná na riešenie problematiky merania svietidiel. Keďže svietidiel je na trhu obrovské množstvo a dnešným trendom je vyrábať svietidlá so zdrojom LED, zamerám sa na tento smer. V práci sa budem zaoberať problematikou LED osvetlenia vozidla, kde sú kladené na svietidlo určité požiadavky. Budem sa taktiež zaoberať problematikou merania a návrhom vhodnej metódy merania svietidiel pomocou spektorradiometra a goniofotometra. Svietidlo sa podrobí jasovej analýze. Výsledky z meraní porovnáam na základe medzinárodných noriem pre automotive.

Kľúčové slová

Svietidlo, smerová charakteristika, svietivosť, jas, meranie, reflektor

Abstract

This diploma thesis is focused on solving problems of luminaire measurement. Since there is a huge amount of light on the market and today's trend is to produce LED lamps, I will focus on that direction. In my work I will deal with the issue of LED lighting of the vehicle where certain requirements are placed on the luminaire. I will also deal with the measurement and design of a suitable method of measuring luminaires using a spectroradiometer and a goniophotometer. The lamp is subjected to luminance analysis. The results from measurements are compared on the basis of international automotive standards.

Keywords

Luminaire, directional characteristic, luminance, brightness, measurement, reflector

Symbol	Význam symbolu
A	elektrický prúd
Ag	striebro
Al	hliník
Au	zlato
I	svietivosť (cd)
E	osvetlenosť (lx)
Fe	železo
G	generátor
λ	vlnová dĺžka (nm)
V(λ)	pomerná spektrálna citlivosť
T	teplota (°C)
L	jas (cd/m ²)
V	jednotka napätia
W	jednotka elektrický výkon
Un	menovité napätie (V)
R	elektrický odpor
Ω	priestorový uhol (sr)
K	náhradná teplota chromatičnosti
Φ	svetelný tok (lm)

Skratka	Význam skratky
3D	trojrozmerný
RGB	červená, zelená, modrá
XYZ	chromatické súradnice
MKO	medzinárodný kolorický systém
CCD	nábojovo viazaná štruktúra
BMP	bitmap (nezávislé na zdroji)
ECE	hospodárska komisia pre Európu
DRL	denné svietenie
LED	svetlo emitujúca dióda
InGaN	indium galliumnitrid
CIE	Commissioning Internationale de IEclairage
CCT	náhradná teplota chromatičnosti
ISO	medzinárodná organizácia pre štandardizáciu
SI	medzinárodná sústava jednotiek

Zoznam obrázkov a tabuliek

Obr. 1. Normál svietivosti	-2-
Obr. 2. Konštrukčné usporiadanie hradlového fotočlánku	-3-
Obr. 3. Trichromatický trojuholník RGB s farbami ležiacimi mimo trojuholníka	-9-
Obr. 4. Priebehy kolorimetrických koeficientov $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$	-9-
Obr. 5. Graf trichromatickej sústavy XYZ.....	-10-
Obr. 6 Princíp objektívneho jasomera	-11-
Obr.7. Schematické usporiadanie objektívneho jasomera	-11-
Obr. 8. Digitálny jasomer od Lichtmess-technik typ L1009.....	-12-
Obr. 9. Fotometrická lavica N-etalón H- 3boký hranol Z- skúšaný zdroj	-13-
Obr. 10. Fotometrická lavica z praxe s etalónovým zdrojom a skúšaným zdrojom	-13-
Obr. 11. Mini luxmeter UNI-T so vstavaným fotočlánkom	-15-
Obr. 12. Principiálny náčrt guľového integrátora.....	-16-
Obr. 13. Popis predného panela Gooch & Housego OL 770	-19-
Obr. 14. Popis zostavy Gooch & Housego OL 770 s integračnou guľou	-22-
Obr. 15. Popis integračnej guľe OL IS-670-LED pohľad zhora	-22-
Obr. 16. Ikony hlavného menu	-23-
Obr. 17. Základná konštrukcia goniofotometra	-24-
Obr. 18. Goniofotometer s otočným zrkadlom	-25-
Obr. 19. Příklad polárneho súradnicového systému C- γ	-26-
Obr. 20. Polárny diagram v priestorovom formáte.....	-27-
Obr. 21. Příklad isoluxovej mapy.....	-27-
Obr. 22. Krivky svietivosti – typy z tabuľky	-29-
Obr. 23. Princíp vzniku bielej LED a spektrum bielej LED.....	-31-
Obr. 24. Predná časť kompletných svietidiel Škoda Kodiaq	-32-
Obr. 25. Svietidlo DRL Škoda Kodiaq	-33-
Obr. 26. Příklad parabolického zrkadla	-33-
Obr. 27. Detail paraboli s viditeľným tvarom faziet výrobcu ZIPAR.....	-34-
Obr. 28. Typická mapa svietivosti pre svietidlo DRL.....	-36-
Obr. 29. Digitálna zrkadlovka Canon EOS 350D.....	-37-
Obr. 30. Okno nastavenia polohy v reálnom.....	-38-
Obr. 31. Rozobraté svietidlo Škoda Kodiaq (bez DRL)	-39-
Obr. 32. Miestnosť s pripraveným svietidlom DRL na kontrolné meranie	-40-
Obr. 33. Časť kontrolného merania	-40-
Obr. 34. Display digitálneho fotoaparátu	-41-
Obr. 35. Expozičný trojuholník	-42-
Obr. 36. Příklad preexponovanej, správnej a podexponovanej snímky.....	-43-
Obr. 37. Příklad obrazu so zodpovedajúcim histogramom.....	-43-
Obr. 38. Snímky vyhotovené fotoaparátom Canon 350D zo vzdialenosti 3,5m	-44-
Obr. 39. Integračná guľa OL IS-670 LED	-45-
Obr. 40. Výsledok z merania v polárnych súradniciach, vodorovná osa- svietivosť (cd), v polkruhu sú príslušné uhly	-46-

<i>Obr. 41. Spektrálna charakteristika svietidla DRL pomerne spektrálne vyžarovanie na osi y</i>	-47-
<i>Obr. 42. Uchytenie modulu DRL na podpornom statíve</i>	-48-
<i>Obr. 43. Uchytenie modulu DRL na podpornom statíve pohľad na stenu na ktorú sa bude premietat' a ktorá bude snímaná</i>	-48-
<i>Obr. 44. Snímka svietidla DRL z 3,5m pri napätí 12V</i>	-49-
<i>Obr. 45. Jasová mapa pri napätí 12V vzdialenosť 3,5m, $L_{max} = 24,48 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 8,097 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 0,052 \text{ cd/m}^2$</i>	-50-
<i>Obr. 46. Jasová mapa pri napätí 13,5V vzdialenosť 3,5m, $L_{max} = 46,41 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 14,69 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 0,19 \text{ cd/m}^2$</i>	-50-
<i>Obr. 47. Jasová snímka 12V s preloženým rozložením jasu podľa normy</i>	-51-
<i>Obr. 48. Priama jasová mapa z blízkej vzdialenosti pri napätí 13,5V $L_{max} = 2260000 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 301900 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 1377 \text{ cd/m}^2$</i>	-52-
<i>Tab.1. hodnoty exponenta c pre typ svetelného zdroja</i>	-15-
<i>Tab. 2. Rozdelenie svietidiel na základe svetelného toku</i>	-29-
<i>Tab. 3. Rozdelenie svietidiel na základe kriviek svietivosti</i>	-29-
<i>Graf. 1. Krivka svietivosti svietidla pri vertikálnom uhle 0°</i>	-51-

Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Teória fotometrických meraní.....	- 2 -
1.1 Svetelná normála	- 2 -
1.2 Fotoelektrické články.....	- 3 -
1.3 Fotometrické merania	- 4 -
1.4 Metódy merania	- 5 -
1.4.1 Vizuálne metódy merania.....	- 5 -
1.4.2 Fyzikálne metódy merania.....	- 5 -
1.5 Fotometrické veličiny	- 5 -
1.6 Radiometrické veličiny	- 6 -
1.7 Rádiometria.....	- 6 -
1.8 Fotometria.....	- 7 -
1.8.1 Vizuálna fotometria	- 7 -
1.8.2 Fyzikálna fotometria.....	- 7 -
1.9 Meranie konkrétnych svetelno-technických veličín	- 8 -
1.9.1 Meranie farieb.....	- 8 -
1.9.2 Meranie jasú	- 10 -
1.9.3 Meranie svietivosti.....	- 12 -
1.9.4 Meranie osvetlenosti.....	- 14 -
1.9.5 Meranie svetelného toku.....	- 15 -
1.9.6 Neistoty merania.....	- 17 -
2 Parametre spektrometrov	- 20 -
2.1 Parametre spektrometra Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED.....	- 20 -
2.1.1 Základné informácie k prístroju.....	- 20 -
2.1.2 Merané veličiny	- 22 -
2.1.3 Filter OL 770-15Q-A.....	- 22 -
2.1.4 Ultrafialové pásmo.....	- 22 -
2.1.5 Viditeľné pásmo	- 23 -
2.1.6 Infračervené pásmo.....	- 23 -
2.1.7 Zostava OL 770 pre meranie celkového svetelného a spektrálneho toku.....	- 23 -
2.1.8 Hlavné menu spektrometra s možnosťami merania	- 25 -

3	Vlastnosti goniometrov.....	- 26 -
3.1	Vyžarovacia charakteristika.....	- 28 -
3.2	Isoluxová mapa.....	- 29 -
4	Návrh procedúry merania parametrov svietidiel.....	- 30 -
4.1	Svietidlo.....	- 30 -
4.1.1	Svetelná účinnosť svietidiel.....	- 32 -
4.2	Voľba svietidla.....	- 32 -
4.3	LED v automotive.....	- 33 -
4.4	Svietidlo DRL Škoda Kodiaq.....	- 33 -
4.4.1	Fazetový reflektor.....	- 35 -
4.5	Experimentálne meranie základných parametrov svietidla.....	- 36 -
4.5.1	Základný predpoklad pre fotometrické merania.....	- 36 -
4.5.2	Norma ECE 87.....	- 37 -
4.5.3	Jasový analyzátor Canon EOS 350D.....	- 38 -
4.6	Procedúra merania svietidla DRL.....	- 39 -
4.6.1	Demontáž modulu DRL zo svietidla.....	- 39 -
4.6.2	Napájanie svietidla.....	- 41 -
4.6.3	Procedúra merania smerovej charakteristiky.....	- 41 -
4.6.4	Procedúra jasovej analýzy svietidla.....	- 43 -
4.6.5	Nastavovanie ISO.....	- 44 -
4.6.6	Nastavovanie expozície.....	- 44 -
4.6.7	Nastavovanie rýchlosti uzávierky.....	- 46 -
5	Príklad merania a vyhodnotenia svetelných parametrov svietidla.....	- 47 -
5.1	Meranie a vyhodnotenie údajov zo spektroradiometra.....	- 47 -
5.2	Meranie a vyhodnotenie jasových snímok DRL.....	- 49 -
6	Záver.....	- 55 -
	Použitá literatúra.....	- 57 -
	Zoznam príloh.....	- 59 -

Úvod

Úlohou diplomovej práce je v prvom rade uviesť do problematiky merania fotometrických veličín ako aj uviesť základné princípy merania základných svetelno-technických parametrov svetelných zdrojov. Teoretická časť sa bude zaoberať problematikou merania, porovnaniu radiometrie a fotometrie.

V druhej časti rozoberiem parametre spektrometra všeobecne, ale aj konkrétneho od firmy Gooch & Housego, ktorý sa nachádza v laboratóriu VŠB-TUO. Oboznámim s možnosťami merania pomocou prístroja a uvediem aké máme možnosti získania svetelno-technických parametrov s doplnkami k prístroju ako je integračná guľa a iné.

V tretej časti spomeniem základné vlastnosti goniofotometra a k akým výsledkom z merania sa môžeme dopracovať pomocou tohto prístroja.

V štvrtej časti sa budem venovať hlavnej časti tejto diplomovej práce a to samotnému návrhu meracej procedúry pomocou goniofotometra a spektrometra. Stručne rozoberiem pojem svietidlo a popíšem svietidlo na ktorom sa bude vykonávať analýza jeho svetelno-technických parametrov. Na svietidle sa bude snímať aj jasová mapa pomocou upraveného zrkadlového fotoaparátu vo veľkej laboratórii VŠB-TUO.

V piatej časti priblížim namerané výsledky zo svietidla, výsledky dôkladne popíšem a porovnam s normou ktorá sa vzťahuje na daný typ svietidla. Vyhodnotím chyby, ktoré vznikali pri samotnom meraní.

1 Teória fotometrických meraní

Základným predpokladom pri meraní svetelných veličín je určenie veľkosti meranej veličiny a číselnom vyjadrení danej veličiny v stanovenej jednotke. Okrem toho pri meraní vzniká určitá odchýlka, ktorú je tiež potrebné stanoviť. [1]

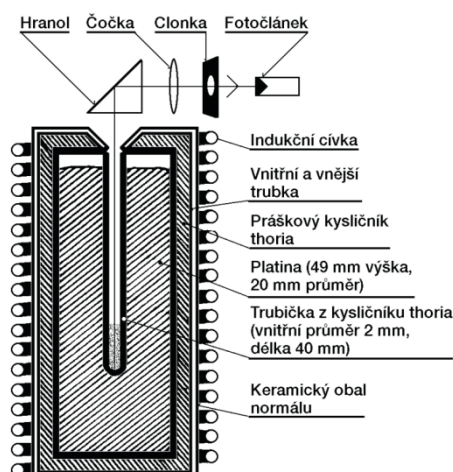
Pod pojmom fotometria môžeme chápať v samej podstate meranie množstva dopadajúceho svetla pomocou fotometra. Prijímačom dopadajúceho svetla môže byť ľudské oko, fotografická doska alebo fotoelektrický fotometer. Práve fotoelektrický fotometer bude predmetom tejto práce. [2]

Vlastné meranie môžeme rozdeliť na vizuálne (subjektívne metódy), pri ktorých sa používajú vlastnosti ľudského oka a fyzikálne (objektívne metódy). Meranie prebieha s využitím fyzikálnych snímačov nazývaných fotočlánky. [1]

1.1 Svetelná normála

Pri realizácii fotometrického merania je základnou úvahou získať súbor svetelných normálov svietivosti, svetelného toku, jas, chromatičnosti, kolority a iných.

Základným normálom fotometrického laboratória by mal byť normál svietivosti. Normál svietivosti na národnej úrovni nám určuje tento normál fotometrického laboratória. Ďalej je normálu nadradený etalón svietivosti v meracom stredisku medzinárodného laboratória vo Francúzsku. Etalón vychádza z definície jednotky 1 (cd).



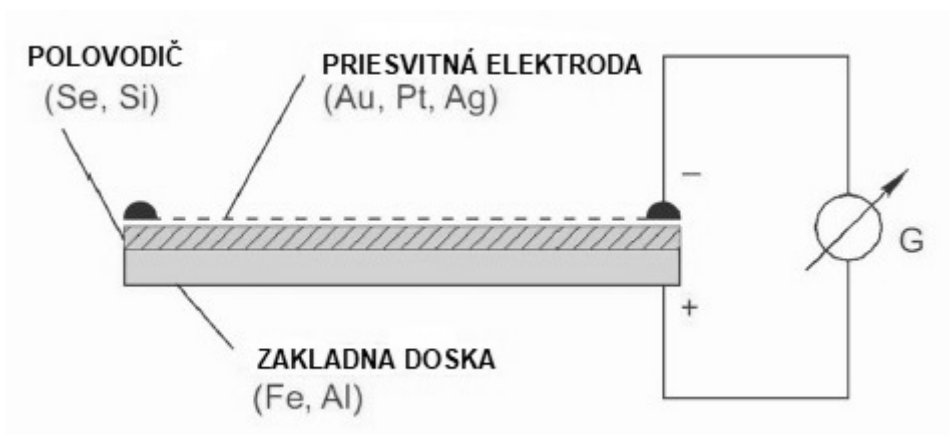
Obr. 1. Normál svietivosti [1]

Príprava normálov svetelného toku, teploty chromatičnosti, jasů a iných veličín je závislá na požiadavkách samotného merania. To znamená, že súčasné požiadavky sú rýchlosť a jednoduchosť. To ale neovplyvňuje skutočnosť, že požiadavka na kvalitu merania degraduje. Pre presné fotometrické merania je nutnosť používať svetelné zdroje s presne definovanými parametrami. Hodnota etalónu by sa pri meraniach nemala odlišovať od hodnoty u meraného zdroja. Pracovné etalóny a porovnávacie svetelné zdroje zastupujú prevažne žiarovky vhodnej konštrukcie a typu. U svetelných normálov sa používajú aj určité typy výbojkových svetelných zdrojov. Tieto svetelné normály, teda žiarovky definovaného typu sú riadne označené, musia sa pravidelne kontrolovať, či ich fotometrické parametre neodlišujú od deklarovaných menovitých parametrov. Pre meranie parametrov v praxi je dôležitou súčasťou používať kvalitné fotoelektrické články.

1.2 Fotoelektrické články

V praxi používame najčastejšie hradlové fotočlánky. V dnešnej dobe sú to prevažne články z kremíku a selénu. Princíp fotoelektrického článku je v podstate taký, že dopadom svetla na povrch článku vznikne medzi kovovou podložkou a vrstvou polovodiču na povrchu rozdiel potenciálov. Pokiaľ tento obvod uzavrieme na obvod fotoelektrický, začne nám pretekať prúd, ktorý je možné ďalej merať a spracovávať.

Fotočlánky musia spĺňať určité podmienky. Najdôležitejšou je priebeh spektrálnej krivky. Ten sa musí čo najviac zhodovať s krivkou $V(\lambda)$, teda spektrálnou citlivosťou normálneho fotometrického pozorovateľa. [1]



Obr. 2. Konštrukčné usporiadanie hradlového fotočlánku [1]

Základná doska hradlového fotočlánku je vyhotovená zo železného alebo hliníkového materiálu. Vrstva polovodiča na povrchu dosky je priesvitná a vyhotovená z platiny, striebra alebo zlata. Niekedy je na vrstvu polovodiča nanosená najskôr vrstva kadmia, ktorá pri katodickom rozprašovaní čiastočne oxiduje, a až potom sa na fotočlánok nanáša priesvitná kovová vrstva. Po obvode fotónky je zberný krúžok pre odvádzanie elektrického prúdu. Po ožiarení vznikne medzi kovovou podložkou a vrstvou polovodiča rozdiel potenciálov a uzavretým obvodom preteká prúd, ktorý sa meria. Závislosť fotoelektrického prúdu na svetelnom toku dopadajúcom na fotočlánok, je pri obvyklom zapojení nelineárna. Odpor je nelineárny, pokiaľ hodnota vonkajšieho obvodu fotočlánku je väčší ako 500Ω u kremíkových (resp. 100Ω u selénových) fotočlánkov. Teoreticky sa lineárnosti dosahuje pri nulovom odpore vonkajšieho obvodu článku. Pre zmenšenie celkovej chyby merania sa preto bežne využíva kompenzačné zapojenie s meraním fotoelektrického prúdu článku nakrátko.

Pri dlhotrvajúcich meraniach sa môže prejaviť tzv. únava fotočlánku (najmä selénových), a to zvyčajne poklesom fotoelektrického prúdu pri konštantnej osvietenosti. Ak sa vyžaduje väčšia presnosť merania, je potrebné fotočlánky overovať po polhodine až jednej hodine. Kremíkové fotočlánky sú z tohto hľadiska stabilnejšie.

Prúd hradlového fotočlánku tiež závisí od teploty okolia, ale u kremíkových článkov je táto závislosť takmer zanedbateľná. Pri zmene teploty okolia v rozmedzí 25 až $50 \text{ }^\circ\text{C}$ býva zmena fotoelektrického prúdu menšia ako $\pm 1\%$.

Prúd niektorých fotočlánkov tiež závisí na počte zmien, teda na frekvencií kolísania svetelného toku zdrojov. To sa môže prejaviť pri meraní výbojových zdrojov svetla napájaných striedavým prúdom sieťovej frekvencie. Potrebné je použiť elektronické predradníky fungujúce pri vysokej frekvencii rádovo 30 kHz . Pri vysokej frekvencii predradníka sa vplyv kolísania svetelného toku už neprejavuje. [3]

1.3 Fotometrické merania

Fotometrické merania teda meranie svetelno-technických veličín či už svetelných zariadení môžeme rozdeliť do týchto základných 3 typov skupín:

- Svetelný zdroj
- Svietidlo
- Osvetľovacia sústava
- zdroj elektromagnetického žiarenia
- slúži k manipulácii so svetelných zdrojov
- sústava svietidiel

Fotometrické merania majú široké využitie či už pri meraní nových svetelných zdrojov a svietidiel alebo u novo vytvorených a nainštalovaných osvetľovacích sústavách. Zdroje a svietidla overujeme či plnia požiadavky noriem a požiadavky projektu. Fotometrické merania využívame aj pri kontrolách už nainštalovaných sústavách. Kontrolujú sa z hľadiska prevádzkových parametrov, ktoré sa menia s dobou starnutia sústav. Ďalej využívame fotometrické merania aj pri kalibrácii prístrojov a vytváraní etalónov. [13]

1.4 Metódy merania

Pri fotometrických meraniach si musíme stanoviť akým spôsobom budeme merania riešiť. To znamená stanoviť si aké parametre svietidla chceme získať. Tu rozlišujeme dva druhy meraní a to metódy vizuálne a metódy fyzikálne.

1.4.1 Vizuálne metódy merania

Jedná sa o subjektívnu metódu merania. Hlavným nástrojom tohto merania je ľudské oko. Už pri oku samotnom vzniká problém z hľadiska nepresnosti. Nie každé oko vidí rovnako. To znamená, že každé oko má rozdielne vlastnosti a teda zjednodušene môžeme povedať, že jeden pozorovateľ nevidí rovnako ako pozorovateľ druhý. Taktiež do problému subjektívneho pozorovania vstupujú podmienky pozorovania. Je tým myslené napríklad zamračená obloha, jasný a slnečný deň a pod. Pokiaľ chceme tieto vplyvy eliminovať, tak metóda subjektívna sa prevádzkuje len v laboratórnych podmienkach. [1]

1.4.2 Fyzikálne metódy merania

Jedná sa o objektívnu metódu merania. Hlavným nástrojom tohto merania sú fyzikálne snímače. Bližšie tieto spôsoby merania budú rozobraté v nasledujúcich kapitolách.

1.5 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny sú charakteristiky svetla, teda elektromagnetického, žiarenia ktoré je viditeľné ľudským okom. Tieto veličiny sú historicky staršie ako rádiometrické. Aby sme mohli správne definovať fotometrické veličiny, to znamená popísať svetlo z hľadiska jeho vnímania ľudským okom, bolo potrebné zadať priemerné ľudské oko. V tomto kontexte sa teda definuje priemerná citlivosť ľudského zraku na svetlo pozostávajúce zo svetiel rôznych vlnových dĺžok. Citlivosť ľudského oka za obvyklého denného svetla je výrazne odlišná od

citlivosti pri nočnom videní. Z tohto vyplýva že fotometrické veličiny, ktoré ľudské oko popisuje vychádza z fotopickej citlivosti oka, teda citlivosti za bežného denného svetla.

Medzi fotometrické veličiny patrí:

- svetelný tok -vzťahuje sa k prenosu svetla priestorom
- svietivosť -vyjadruje vlastnosť zdroja svetla
- osvetlenie - určuje účinky svetla pri jeho dopadu na povrch telesa.
- osvit - plošná hustota svetelného množstva
- jas - charakterizuje schopnosť svietiacej alebo svetlo odrážajúcej, prípadne prepúšťajúcej plochy vyvolať vizuálny pocit [6],[7]

1.6 Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny sú definované pre všetky druhy elektromagnetického žiarenia. Použiteľné sú u všetkých druhov žiarenia, ktoré nie je schopné ľudské oko vnímať. Pre radiometrické veličiny platia analogické vzťahy ako pre fotometrické.

- žiarivý tok - vyjadruje výkon prenášaný žiarením
 - žiarivosť - vyjadruje schopnosť daného približne bodového zdroja vyžiariť v sledovanom smere
 - intenzita ožiarenia - vyjadruje výkon dopadajúci na plochu.
 - expozícia - plošná hustota žiarivej energie
 - žiar - je určená podielom žiarivosti elementárnej plôšky zdroja v zvolenom smere a kolmého priemeru plôšky v tomto smere.
- [6],[7]

1.7 Rádiometria

Rádiometria je meranie optického žiarenia, ktorým je elektromagnetické žiarenie vo frekvenčnom rozsahu od 3×10^{11} do 3×10^{16} Hz. Tento rozsah zodpovedá vlnovej dĺžke medzi 0,01 a 1000 mikrometrov a zahŕňa oblasti, ktoré sa bežne nazývajú ultrafialové, viditeľné a infračervené. Dve z mnohých typických jednotiek, s ktorými sa stretávame, sú W/m^2 a fotóny / steradián.

Fotometria je meranie svetla, ktoré je definované ako elektromagnetické žiarenie, ktoré je zistiteľné ľudským okom. Preto je obmedzený na rozsah vlnových dĺžok od 360 do 830

nanometrov (nm , $1000\text{ nm} = 1\text{ mm}$). Fotometria je rovnaká ako rádiometria, okrem toho, že všetko je odvinuté od spektrálnej odozvy oka. Vizuálna fotometria používa oko ako porovnávací detektor, zatiaľ čo fyzikálna fotometria používa buď detektory optického žiarenia konštruované tak, aby napodobňovali spektrálnu odozvu oka, alebo spektrometriu spojenú s príslušnými výpočtami na vykonanie váženého odozvy.

Jediným skutočným rozdielom medzi rádiometriou a fotometriou je skutočnosť, že rádiometria zahŕňa celé spektrum optického žiarenia, zatiaľ čo fotometria je obmedzená na viditeľné spektrum, ktoré je definované reakciou oka. Rádiometria je na druhej strane koncepčne o niečo jednoduchšia, ale oveľa ťažšie ju skutočne robiť. [4]

1.8 Fotometria

Ako už bolo spomenuté v kapitole o radiometrii, kde sa porovnávala fotometria a rádiometria, rozlišujeme v prípade fotometrie dva druhy fotometrických meraní.

1.8.1 Vizuálna fotometria

Táto fotometria nám slúži k porovnaniu jasov dvoch susedných plôch osvietených normálovým a skúšaným svetelným zdrojom. K tomu využijeme ľudské oko, ktoré túto vlastnosť ovláda. Oko nedokáže podať informáciu o absolútnej hodnote nameraných veličín.

Základnou podmienkou pri meraní je rovnaká chromatičnosť oboch meraných plôch. V prípade rozdielnosti je možné rozdiel v chromatičnosti dorovnať pomocou farebných filtrov. V tomto prípade bude základným nástrojom ku meraniu vizuálny fotometer. Rozlišujeme dva druhy fotometrov a to fotometer na rovnaký jas a fotometer na rovnaký kontrast. Na hlave fotometra sa nachádza kocka, ktorá slúži k získaniu fotometrického poľa. Na tejto kocke sú susedné plochy, ktoré sú delené ostrou čiarou. Podmienkou je aby susedné plochy boli tesne susediace. [13]

1.8.2 Fyzikálna fotometria

Na rozdiel od vizuálnej fotometrie, fyzikálna fotometria popisuje posudzovanie svetelno-technických veličín fyzikálnym snímačom. Ľudské oko je nahradené snímačom. Subjektívne posudzovanie je teda odstránené. Základné požiadavky na snímače, resp. na fotočlánky sú popísané v kapitole 1.2.

1.9 Meranie konkrétnych svetelno-technických veličín

1.9.1 Meranie farieb

Pri meraní farieb, teda meraní číselného údaju ktorý farbu definuje je možnosť merať troma metódami.

Meranie spektro-fotometrické pri ktorom je nutnosť výpočtu. Touto metódou meriame na monochromátoroch, ktoré majú za úlohu rozložiť svetlo na jednotlivé vlnové dĺžky a intenzitu následne meriame fotočlánkom.

Meranie porovnávacie s kolorimetrami je porovnávanie farby v zornom poli kolorimetra. Hľadané súradnice sa stanovujú zo zrovnávacieho podnetu údajov v ovládacej časti. Metóda je najmenej presná no stále sa vo veľkom používa v praktických meraniach.

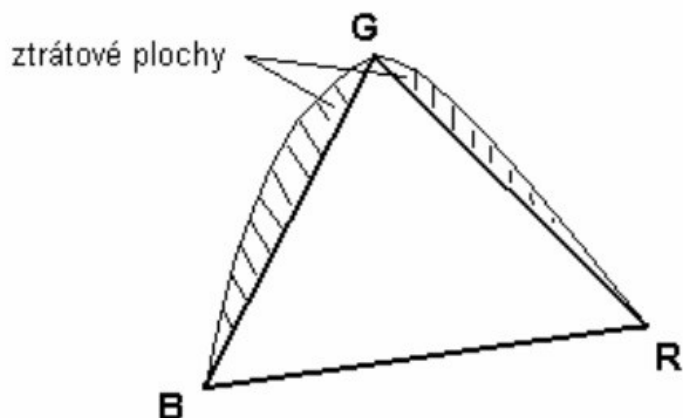
Meranie fotometrizujúcim kolorimetrom jej podstata je stanovenie súradníc meranej farby fotometrozujuúcim kolorimetrom. Pomocou fotometrie priamo získava veľkosť trichromatických zložiek. Farbu svetla teplotných svetelných zdrojov možno vystihovať aj pomocou teploty chromatičnosti. Metóda je rýchla, presná. Pre meranie trichromatických zložiek uvediem príklad prístroja ktorý sa volá chromameter rada CS – 100A od spoločnosti Minolta. (bakalarka o meraní majaku)

Farebné vlastnosti svetla presnejšie označujeme pod pojmom chromatičnosť a farebné vlastnosti predmetu pojmom kolorita. Koloritu a chromatičnosť môžeme fyzikálne určiť podľa spektrálneho zloženia farebného podnetu a spektrálnej citlivosti $V(\lambda)$ k žiareniu v rôznych vlnových dĺžkach. K popisu farieb používame kolorimetrické sústavy. Zakladajú sa na tom, že farebný podnet vieme nahradiť zmesou troch vhodne zvolených merných podnetov. Kolorimetrické sústavy uvediem napríklad RGB, CIE XYZ, CIE LUV a podobne. Všetky reálne farby môžeme získať miešaním tých základných a to červenej, zelenej a modrej. Tieto 3 farby tvoria vrchol trichromatického trojuholníka. Zjednodušene sa sústava nazýva RGB a je tvorená rovnostranným trojuholníkom. Nevýhodou sústavy RGB je, že niektoré farby sú mimo kolorimetrického trojuholníka a tým pádom sa uvažuje so zápornými súradnicami (záporné kolorimetrické koeficienty). Odpovedajú strátovej ploche podľa obrázka 3. Teda pomocou sústavy vieme namiešať farby ktoré ležia len dnu rovnostranného trojuholníka. Kolorimetrickú čistotu farieb vyjadrujeme jednoduchými vzťahmi:

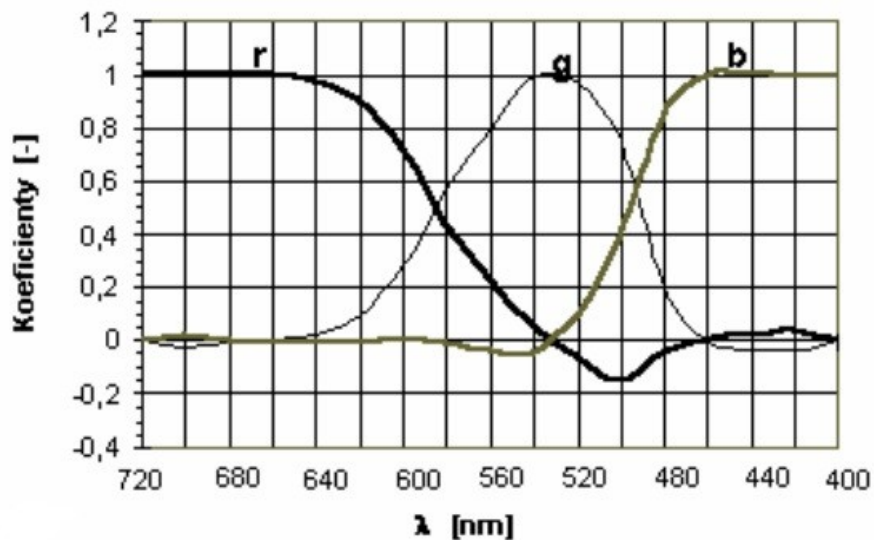
$$r = \frac{R}{R+G+B}; g = \frac{G}{R+G+B}; b = \frac{B}{R+G+B} \quad (1.1)$$

Z toho vyplýva:

$$r + g + b = 1 \quad (1.2)$$



Obr. 3. Trichromatický trojuholník RGB s farbami ležiacimi mimo trojuholníka



Obr. 4 Priebehy kolorimetrických koeficientov $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$

Z tohto dôvodu bola zavedená ďalšia sústava MKO teda trichromatický systém XYZ ktorá ma za úlohu odstrániť nedokonalosť sústavy RGB. Sústavu môžeme popísať rovnicami:

$$X = a_1 \cdot R + a_2 \cdot G + a_3 \cdot B \quad (1.3)$$

$$Y = b_1 \cdot R + b_2 \cdot G + b_3 \cdot B \quad (1.4)$$

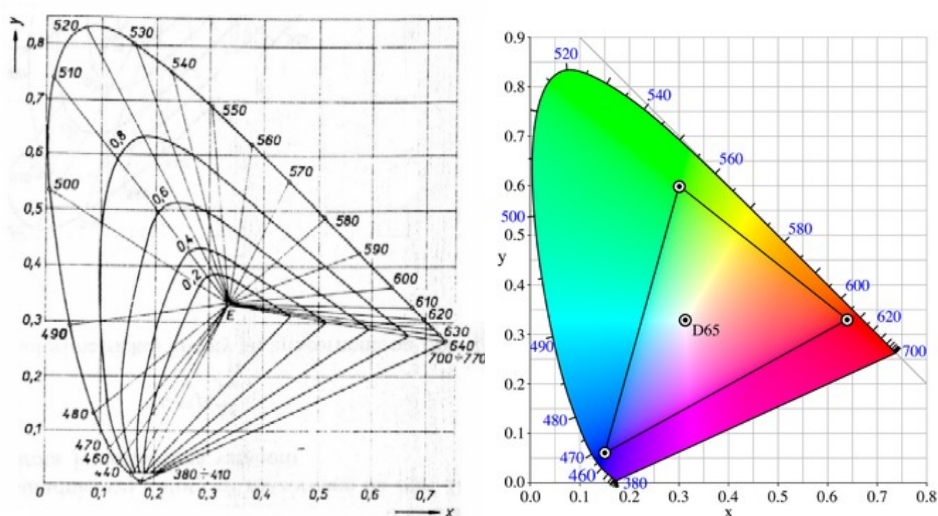
$$Z = c_1 \cdot R + c_2 \cdot G + c_3 \cdot B \quad (1.5)$$

Trichromatické činitele:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; y = \frac{Y}{X+Y+Z}; z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1.6)$$

A platí:

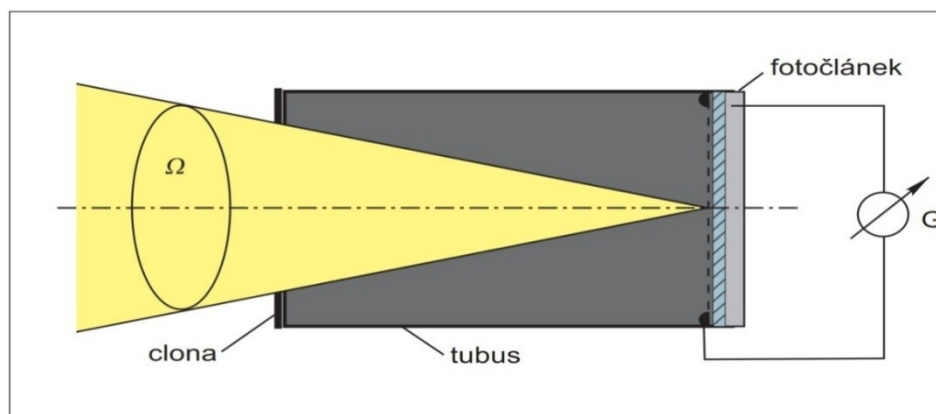
$$x + y + z = 1 \quad (1.7)$$



Obr. 5. Graf trichromatickej sústavy XYZ [8], [9]

1.9.2 Meranie jasú

Jas predstavuje podiel svetivosti ku kolmému priemetu plochy, ktorú vidíme. Pri meraní jasú je meraná plocha považovaná za bodovú. Teda je potrebné merať z väčšej vzdialenosti aby bola podmienka splnená. A tu vzniká problém. Preto na meranie jasú potrebujeme špeciálne prístroje ako je jasomer.

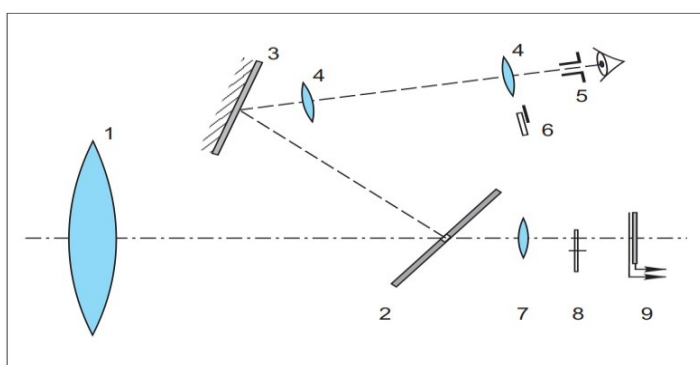


Obr. 6. Princíp objektívneho jasomera

Najjednoduchší princíp jasomera je načrtnutý na obrázku 6. Na prijímač teda fotočlánok je nasadený tubus. Tubus je v prednej časti osadený clonou kruhového tvaru. Clona vymedzuje priestorový uhol (Ω), v ktorom dopadajú lúče svetla z meranej časti na plochu fotočlánku. Podľa obrázka 6 sa meria normálnová osvetlenie E_n primajúcej plochy fotočlánku. Stredný jas L plochy je vymedzený priestorovým uhlom a teda vzťah ktorý popisuje túto závislosť je:

$$L = \frac{E_n}{\Omega} \text{ (cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{ lx, sr)} \quad (1.8)$$

Optika jasomera vymedzuje strednú hodnotu jasu L v závislosti na vzdialenosti od meraného povrchu. Podľa veľkosti plochy, ktorá sa vyhodnocuje jasomerom, teda podľa veľkosti clony delíme jasomery na bodové a integračné. Jasy plôch ktoré sú dôležité pre videnie sa merajú bodovým jasomerom. Väčšina fyzikálnych jasomerov (objektívnych) je založená na tom, že sa meria svetelný tok prechádzajúci clonou o určitej veľkosti a tvare. V rovine tejto clony sa zobrazuje zorným poľom vymedzená plôška ktorá jas určuje.



Obr. 7. Schematické usporiadanie objektívneho jasomera

Objektív 1 prístroja zobrazuje meraný objekt (meranú plochu) na plôšku 2, zrkadlo 3 sleduje odraz od plôšky 2 a premieta sa cez optiku 4 na okulár 5. Do zorného poľa okuláru je osadená stupnica meracieho prístroja. Na plôške 2 je tienitko, ktoré odkrýva otvor. Týmto otvorom prejde svetlo z plôšky pomocou optiky 7 na filter 8 a pokračuje na fotočlánok 9. Prúd z fotočlánku sa ďalej vyhodnocuje meracími prístrojmi. Veľkosť otvoru v plôške 2 sa zvyčajne volí tak, aby odpovedalo zornému poľu s uhlom 6', 15', 30', 1° a 2°.

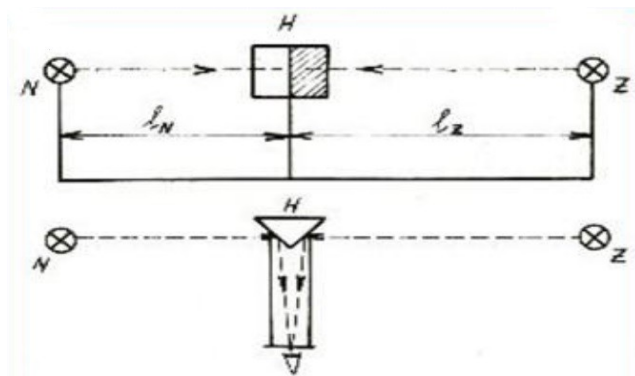
Kvalitné objektívne jasomery produkujú známy výrobcovia fotometrických prístrojov ako napríklad firma Minolta, americká firma Spektra Pritchard alebo nemecká Lichtmess-technik. [1],[14]



Obr. 8. Digitálny jasomer od Lichtmess-technik typ L1009 [16]

1.9.3 Meranie svietivosti

Svietivosť nemeríme priamo, ale pri objektívnom meraní sa prevádza na meranie osvetlenosti, pri meraní subjektívnom sa prevádza na meranie jasů. K meraniu svietivosti sa používa fotometrická lavica

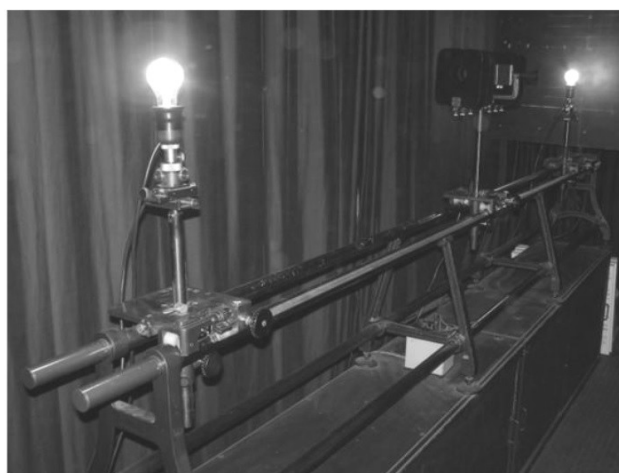


Obr. 9. Fotometrická lavica N-etalón H- 3boký hranol Z- skúšaný zdroj

Lavica sa skladá z vodiacich tyčí a koľajničiek po ktorých chodia vozíky so svetelnými zdrojmi a fotočlánkom. Stredy zdrojov musia byť nastavené v ose. Vyžarovacie plochy zdrojov a rovina prijímajúcej plôšky fotočlánku musia byť kolmé k optickej ose fotometrickej lavice. Pri meraní svietivosti zdroja Z, ktorý skúšame, sa fotočlánok na lavici najskôr osvetľuje etalónom N a potom zdrojom Z. Môžeme teda napísať vzťah ktorý popisuje túto situáciu:

$$I_Z = \frac{I_N(l_Z)^2}{(l_N)^2} \text{ (cd; cd, m, m)} \quad (1.9)$$

Pri meraní svietivosti sa uplatňuje štvorcový zákon. Pri meraní vychádzame z podmienky konštantného osvetlenia fotočlánku. To znamená že meníme vzdialenosť l_Z meraného zdroja od fotočlánku tak, aby výchylka meracieho prístroja bola rovnaká ako pri osvetlení fotočlánku zo vzdialenosti l_N . Týmto sa vylučuje nutnosť overiť nelineárnu charakteristiku fotočlánku a dopočítavať rôzne korekčné činitele. [1], [15]



Obr. 10. Fotometrická lavica z praxe s etalónovým zdrojom a skúšaným zdrojom[16]

1.9.4 Meranie osvetlenosti

Meranie osvetlenosti patrí k najčastejším úlohám a meria sa či už fotometrických laboratóriách alebo pri objektívnom overovaní rozloženia hladín osvetleností pri rôznych osvetľovacích sústavách. To znamená, že sa meria základná požiadavka na rovnomernosť osvetlenia. K objektívnemu meraniu máme k dispozícii prístroj ktorý sa volá luxmeter.

Prístroj sa skladá z prijímača, ktorý ma v jadre kremíkový fotočlánok, ďalej má prirobený kosínový nadstavec a k meracej a vyhodnocovacej časti patrí analógový alebo digitálny indikátor. Indikátor luxmetra musí obsahovať korekčné zariadenie ktorým vieme nastaviť nulu. Zdroj pre napájanie luxmetra je taktiež sledovaný a vyhodnocovaný, jeho odchýlky môžu vnieť do merania určité chyby. Luxmeter by mal zvládnuť preťaženie 20% z meracieho rozsahu po dobu 5 minút. Životnosť štandardného luxmetra je stanovená na 5000 hodín. Prístroj sa pred uvedením do merania musí nechať odkrytý vo svetelnom prostredí. Je na to dôvod taký, aby sa fotočlánky v luxmetru prispôbili podmienkam prostredia. Fotočlánok prevádzkou degraduje. Meria sa jeho vlastnosti a je ho potrebné kalibrovat' akreditovaným strediskom napríklad slovenským Elektrotechnickým Skúšobným Ústavom. Pri meraní osvetlenosti je potrebné dbať na to, aby sa neprekračoval rozsah meracieho prístroja. To znamená aby sa fotočlánok neosvetľoval nedovoleným svetelným tokom.

Meraním sa overujú a kontrolujú hodnoty osvetlenosti v bodoch pracovnej alebo porovnávacej roviny. Vo vonkajšom prostredí sa uvažuje vodorovná rovina vo výške 0,85 m a vo vnútorných priestoroch najviac 20 cm nad podlahou. Do merania vstupuje množstvo faktorov ktoré ho ovplyvňujú. Je treba uvažovať s kolísaním napätia v sieti a tým pádom zmenou svetelného toku zdrojov, taktiež na čistote svetelného zdroja, poškodeniu jeho obalov cez ktoré prestupuje svetelný tok, správnosťou osadenia svietidiel podľa projektu, poloha svietidla a vo vnútorných priestoroch aj k odraznosti plôch. Napríklad novo vymaľovaná miestnosť. Pri meraní treba dodržiavať aj zásady ktoré sa viažu na konkrétny svetelný zdroj. Týka sa to hlavne žiarivkových svetelných zdrojov ktoré je potrebné určitú dobu prevádzkovať a taktiež menia svoje vlastnosti v závislosti na teplote a napätí. Namerané hodnoty osvetlenosti sa korigujú pomocou korekčného činiteľa. Ten je daný vzťahom:

$$k_u = \left(\frac{U}{U_N}\right)^c \quad (1.10)$$

U je napätie v mieste pripojenia svietidla, U_N je menovité napätie svietidla a exponent c má dané orientačné hodnoty podľa tabuľky:

Tab.1. hodnoty exponenta c pre typ svetelného zdroja

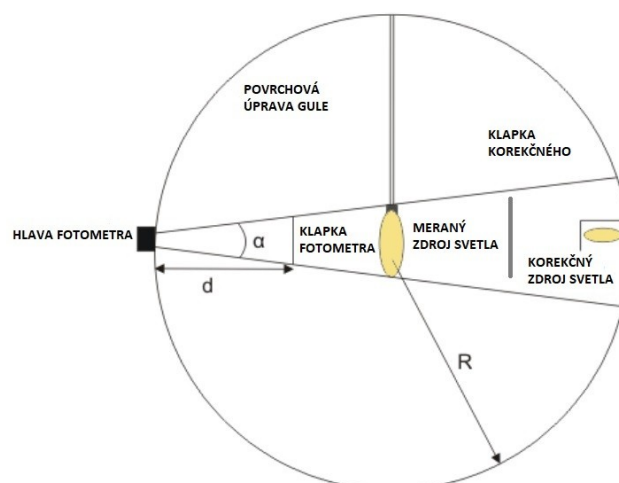
Svetelný zdroj	Exponent c
Žiarovky – všeobecné použitie	3,6
Žiarivky – indukčné zapojenie	1,4
Žiarivky – kapacitné zapojenie	0,6
Žiarivky – indukčno-kapacitné zapojenie	1,0
Vysokotlaká ortuťová výbojka	2,5
Halogenidová výbojka	3,0
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,7
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,0



Obr. 11. Mini luxmeter UNI-T so vstavaným fotočlánkom [1], [17]

1.9.5 Meranie svetelného toku

Pri meraní svetelného toku sa stretávame s metódou graficko-výpočtovou, ktorá sa počíta z nameraných kriviek svietivosti alebo môžeme svetelný tok merať pomocou guľového integrátora. Guľa sa javí ako najvhodnejší tvar z hľadiska rozdelenia svetelného toku. Guľový integrátor nájdeme aj pod pojmom Ulbrichtová guľa.



Obr. 12. Principiálny náčrt guľového integrátora

Meranie v guľovom integrátore je založené na mnohonásobných odrazoch svetelných lúčov od povrchu gule. Povrchová úprava gule musí byť s vysokým činiteľom odrazu ktorý sa pohybuje v medziach $\rho = 0,75$ až $0,85$. Používa sa matný biely náter pre dosiahnutie čo najlepšieho rovnomerného osvetlenia vnútra gule. Hodnota osvetlenosti sa meria fotometrom umiestneným za klapkou. Priemer gule závisí od veľkosti zdroja svetla ktoré sa bude merať. Bežný priemer guľového integrátora má veľkosť od $0,3$ m po 3 m. Priemer sa volí približne 10 násobok celkovej dĺžky svietidla no môže byť aj menší. Minimum je stanovené na 6 násobok. V integrátore sa využíva substitučného princípu merania.

Do stredu sa umiestni zdroj svetla so známym svetelným tokom ktorý je v samej podstate normál. Zdroj svetla musí byť v ose výhľadu fotometra. Stanovíme konštantu guľového integrátora a meria sa osvetlenosť vloženého svetelného zdroja. Svetelný normál sa vyberie a vloží sa zdroj svetla ktorému máme určiť svetelný tok. Korekčný zdroj slúži k eliminácii vzniknutého skreslenia ktorý vznikol pohltením časti svetelného toku. Pohltenie vzniká z dôvodu že sa meria len odrazený svetelný tok od povrchu gule. Svetelný zdroj musí byť zavesený na nosnej konštrukcii ktorý v prípade väčších rozmerov svetelného zdroja pohlcuje časť svetelného toku. Práve korekčný zdroj nám ma eliminovať tento nepriaznivý vplyv. Korekčný zdroj sa umiestňuje oproti hlave fotometra a je vhodné ak tento zdroj ma rovnaký svetelný tok ako meraný svetelný zdroj. Vzťah pre výpočet osvetlenosti je daný:

$$E = \frac{\Phi}{\pi D^2} = \frac{\rho}{\pi D^2(1-\rho)} = k_i \cdot \Phi_z \quad (1.11)$$

Vo vzťahu k_i predstavuje konštantu guľového integrátora, Φ_z predstavuje svetelný tok zdroja. Zo vzťahu vyplýva, že citlivosť je úmerná rozmerom integrátora a je ovplyvnená činiteľom odrazu.

Pokiaľ meriame s použitím korekčného zdroja, uplatňuje sa nasledovný postup:

- Rozsvietený normál a zhasnutý korekčný zdroj odčíta sa hodnota E_N
- Zhasnutý normál a rozsvietený korekčný zdroj odčíta sa hodnota E_{kN}
- Zhasnutý meraný svetelný zdroj a rozsvietený korekčný zdroj odčíta sa E_{kx}
- Rozsvietený meraný zdroj a zhasnutý korekčný zdroj odčíta sa hodnota E_x

Hodnoty sa dosadia do nasledovného vzťahu a vypočíta sa svetelný tok meraného zdroja Φ_x . Hodnota Φ_N predstavuje známy svetelný tok normálu.

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x \cdot E_{kN}}{E_N \cdot E_{kx}} (lm; lm, lx, lx, lx, lx) \quad (1.12)$$

Presnosti merania pri guľovom integrátore sa časom menia. Jednak fotočlánok starnutím degraduje na svojich vlastnostiach a taktiež dlhotrvajúcimi meraniami degraduje povrch náteru. To znamená mení svoje vlastnosti v oblasti odraznosti. Zapríčiňuje to teplo, ktoré vzniká vnútri integrátora hlavne pri výkonnejších svetelných zdrojov, ktoré majú veľké tepelné straty. Jednoducho povedané prehrievajú náter integrátora a ten mení svoje vlastnosti. [1]

1.9.6 Neistoty merania

Každé meranie určitej veličiny býva zaťažené chybou. Súbor meraných hodnôt býva skreslený náhodnú chybou, systematickou chybou a vlastnou chybou meracích prístrojov. Príčiny neistôt typu A sú neznáme, a preto sa vyčísľujú štatistickým spracovaním súboru nameraných hodnôt.

Ďalším typom je štandardná neistota typu B (označované uB), ktorá je súhrnom vzniknutých známych nepresností pri meraní, ktoré ovplyvňujú výslednú hodnotu. Neistoty typu B v sebe obsahujú ako systematickú chybu meracích prístrojov, tak chyby spôsobené nepresným odčítaním a zobrazovaním údajov z meradiel. U meracích prístrojov je pravdepodobnosť náhodnej premennej, v rámci intervalu tolerancie chyby prístroja. Ďalej sa pri niektorých meraniach uplatňuje normálne rozdelenie pravdepodobnosti, ako je napríklad umiestňovanie fotometrických hlavíc do osi fotometrického stredu svetelného zdroja. Pokiaľ nie

je možné zaistiť rovnaké podmienky merania a opakovať tak meranie sledovanej veličiny viackrát, neistota typu A sa neurčuje a do výslednej neistoty sa uvedú iba všetky čiastkové neistoty typu B. Pri meraní na goniofotometri môžu nastať nasledujúce chyby:

- nastavenie výchylky ramena goniofotometra
- určenie vzdialenosti medzi optickým stredom svietidla a stredom fotočlánku
- stabilita parametrov svetelného zdroja

Chyba pri nastavení výchylky

Pohon goniofotometra je riadený krokovým motorom s frekvenčným meničom. Nastavenie uhlového kroku ramena je automatizované riadiacim softvérom. Pri meraní s goniofotometrom uvažujeme nasledujúce chyby merania:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{\gamma_v \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad (1.13)$$

$\Delta\gamma_{\max}$ - maximálna odchýlka ramena goniofotometru

γ_v - hodnota uhlového kroku pri meraní

Dosadením do rovnice (1.13.) vychádza štandardná neistota nastavenia výchylky ramena goniofotometra.

Chyba pri určení vzdialenosti svietidla a fotočlánku

Odklon (vyosenie) fotočlánku vnáša chybu do merania. Nebude platiť podmienka kolmého dopadu svetelných lúčov na plochu fotočlánku.

$$u_{B\theta} = \frac{1 - \cos 2^\circ}{2} \cdot 100\% \quad (1.14)$$

Chyba stability svetelného zdroja

Stabilita parametrov svetelného zdroja v sebe zahŕňa nestabilitu napájacích parametrov siete, únavu fotočlánku a nestabilitu svetelného zdroja spôsobenú postupnou degradáciou počas doby života.

$$u_{B_s} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot \left(\frac{Y_{\max}}{Y_{\min}} - 1\right) \cdot 100\% \quad (1.15)$$

Y_{\max} – maximálna hodnota svietivosti zobrazená spektrometrom

Y_{\min} – minimálna hodnota svietivosti zobrazená spektrometrom

Chyba meracieho prístroja

Do chýb meracieho prístroja sa zahŕňa aj chyba spektrálnej citlivosti fotočlánku a chyby spôsobené žiarením v infračervenej a ultrafialovej oblasti spektra elektromagnetického žiarenia.

$$u_{Be} = \frac{\left(\frac{\delta 1}{100}\right) + \left(\frac{N \cdot R}{X}\right)}{\sqrt{3}} \cdot 100\% \quad (1.16)$$

$\delta 1$ chyba prístroja v %

N – počet zobrazených číslíc s možnou chybou

R – rozlíšenie prístroja, hodnota číslice s najmenšou váhou

X – nameraná hodnota svietivosti

Výsledná chyba typu B

Neistotami typu B sa zvyčajne charakterizujú známe príčiny chýb s určitou pravdepodobnosťou ich výskytu okolo pravej, resp. skutočnej hodnoty. [15]

$$u_B = \sqrt{u_{B\gamma}^2 + u_{Bo}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Be}^2} \quad (1.17)$$

2 Parametre spektrometrov

Spektrometria je meranie svetelnej energie pri jednotlivých vlnových dĺžkach v rámci elektromagnetického spektra. Môže sa merať v celom spektre alebo v špecifickom pásme vlnových dĺžok.

Spektrálne vyžarovanie je žiarenie svetelného zdroja je jediná hodnota, ktorá je súčtom všetkej energie meranej v spektre. Jednotlivé energetické hodnoty pri konkrétnej vlnovej dĺžke v nanometroch sa dajú určiť meraním spektrálneho žiarenia. Jednotky SI pre spektrálne žiarenie sú Watt / štvorcový meter steradian nanometer (Watt / m² sr nm).

Spektrálne vyžarovanie to je miera celkovej intenzity žiarenia na jednotku premietanej plochy. Jednotky SI pre spektrálne vyžarovanie sú Watt / štvorcový meter nanometra (Watt / m².nm) [5]

2.1 Parametre spektrometra Gooch and Housego OL 770VIS-LED/G-3 LED

2.1.1 Základné informácie k prístroju

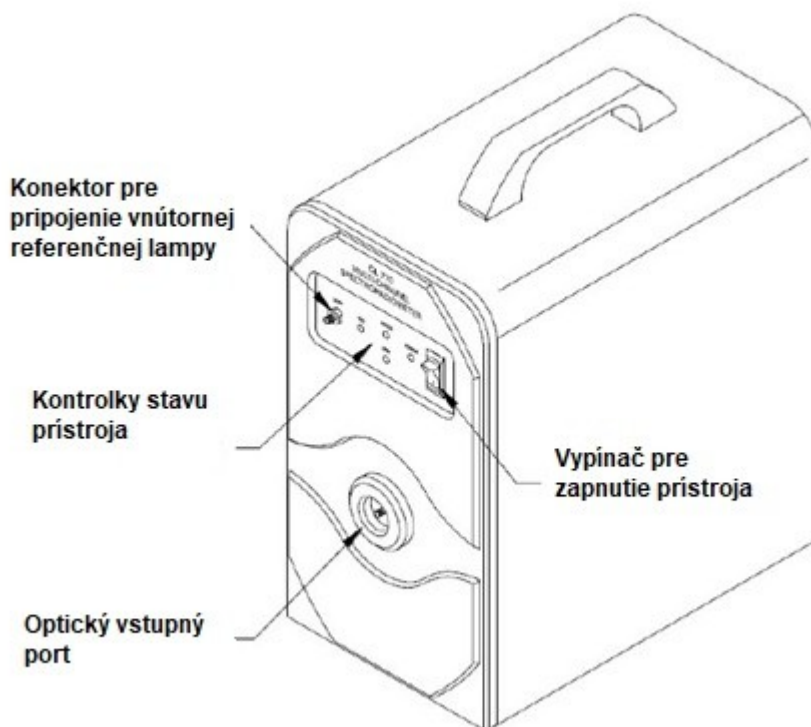
OL 770-LED je vysokorychlostný a multikanálový spektrometer na báze CCD, systém optimalizovaný na vykonanie všetkých meraní či už vo vedeckej sfére alebo v priemyselných aplikáciách. Prístroj dokáže testovať širokú škálu svetelných zdrojov od hotových svietidiel s päticou MR-16, E14, E26 / E27 až stredne veľkých E39 / 40 modulov až po 60 + lineárne fluorescenčné svietidlá. OL 770-LED bol navrhnutý pre zákazníka, ktorý vyžadujú rýchle výsledky merania, ale potrebujú nízke náklady na kvalitu, konzistenciu farieb alebo presnosť. OL 770-LED je dostatočne presný, aby charakterizoval svetelné zdroje LED pre výskumné a vývojové účely, úsporný, ľahký a prenosný. K prístroju je možnosť pripájať optické vlákna do vstupného portu na prednej strane. Prístroj má vysoké spektrálne rozlíšenie a vynikajúcu presnosť vlnovej dĺžky. Štandardná mriežka pracuje od vlnovej dĺžky 380 až 780 nm. K dispozícii sú aj iné rozsahy vlnových dĺžok pre ultrafialové a infračervené oblasti. Optický vstup do spektrometra je možný cez optický kábel. Vymeniteľná štrbina (štandard 100 mikrónov) je vo vstupnom porte na prednom paneli. V prípade zmeny optickej šírky vlákna sú k dispozícii aj iné rozmery štrbiny. Prístroj je riadený vlastným softwarom ktorý je kompatibilný s klasickými kancelárskymi nástrojmi ako je Word a Excel. Prístroj ďalej obsahuje port USB a sériovú linku RS-232 z ktorej je prístroj riadený pomocou počítača.

Spektrograf je továrne nastavený a kalibrovaný podľa normy CIE 127-1997.

Prístroj OL 770 disponuje širokou škálou možných konfigurácií pre merania. K prístroju OL 770 je možné pripojiť viacero doplnkov ktoré stručne spomeniem. Možné je merať priemernú intenzitu vyžarovania LED svietidla. K tomu je potrebný receptor s označením OL15AB LED. Pomocou softwaru je možné z merania vyhodnotiť spektrálnu šírku vyžarovania svietidla, špičkové vlnové dĺžky a vlnové dĺžky v ktorých je svietidlo dominantné a 60 chromatických hodnôt.

Ďalšou možnou konfiguráciou je meranie spektrálnych vyžarovacích charakteristík. K tomuto potrebujeme doplnok s označením OL 610 CCD – teleskop. Táto konfigurácia slúži meraniu vyžarovacích charakteristík prevažne displayov.

Prístroj vie merať celkový svetelný a spektrálny tok pomocou integračnej gule s označením OL IS-670-LED. Práve tento spôsob merania budem využívať vo svojej práci preto viac o tomto meraní bude spomenuté v kapitole nižšie.



Obr. 13. Popis predného panela Gooch & Housego OL 770 [18]

2.1.2 Merané veličiny

Pomocou spektrometru a prídavných prípravkov môžeme merať tieto svetelné technické veličiny:

- celkový vyžarovaný tok (total spectral flux) (W/nm)
- celkový svetelný tok (total luminous flux) (lm)
- čistota spektra (spectral purity) – činiteľ vyjadruje, ak presné je výsledné spektrum oproti spektru predpokladanému (nepresnosti sú spôsobené nelinearitou)
- spektrálna šírka pásma (spectral band width) (FWHM)
- špičková vlnová dĺžka (peak wave length)
- spektrálne vyžarovanie (spectral radiant intensity) ($W/sr nm$)
- priemerná svietivosť LED (cd)
- dominantná vlnová dĺžka (dominant wave length)
- teplota chromatičnosti (color temperature)
- index podania farieb (color rendering indices) [18]

2.1.3 Filter OL 770-15Q-A

Všetky spektrálne parametre merané spektrometrom sú závislé na vstupnom filtri. Priložený filter spektrometra Gooch & Housego VŠB-TUO má označenie 15Q-A. Služi na zúženie do piatich rôznych spektrálnych pásiem, v ktorých sa daný svetelný zdroj bude merať. Vstupné parametre pre tri základné spektrálne pásma sú uvedené nižšie. [13], [18]

2.1.4 Ultrafialové pásmo

Rozsah vlnových dĺžok:	200 nm až 780 nm
Presnosť rozsahu:	$\pm 0,75$ nm
Optická šírka pásma:	3,5 nm
Spektrálne rozlíšenie:	0,6 nm
Optická fokálna vzdialenosť:	140 mm

2.1.5 Viditeľné pásmo

Rozsah vlnových dĺžok:	380 nm až 780 nm
Presnosť rozsahu:	$\pm 0,5$ nm
Optická šírka pásma:	3,0 nm
Spektrálne rozlíšenie:	0,4 nm
Optická fokálna vzdialenosť:	140 mm

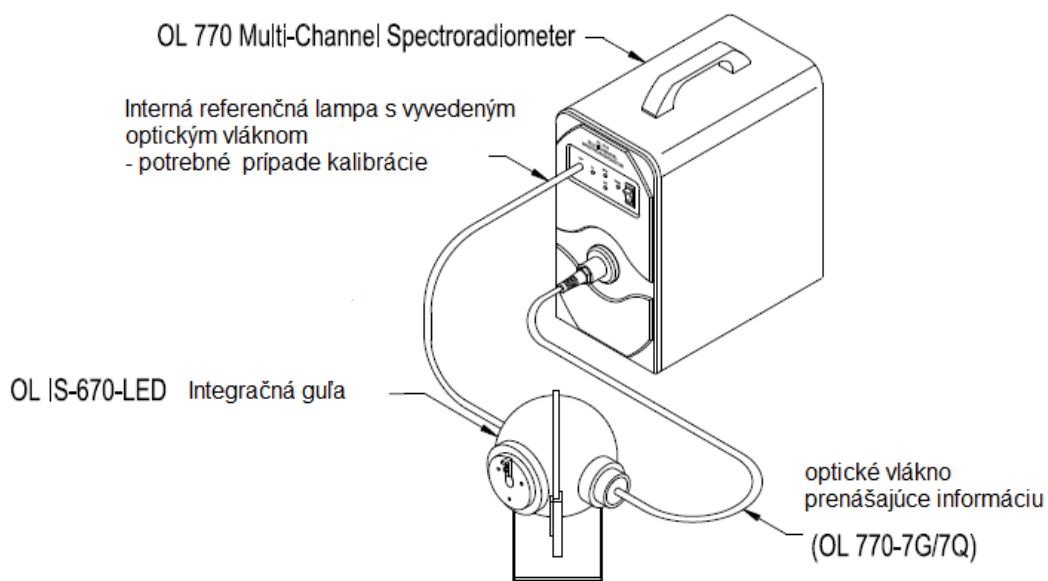
2.1.6 Infračervené pásmo

Rozsah vlnových dĺžok:	380 nm až 1100 nm
Presnosť rozsahu:	$\pm 1,0$ nm
Optická šírka pásma:	5,0 nm
Spektrálne rozlíšenie:	0,75 nm
Optická fokálna vzdialenosť:	140 mm

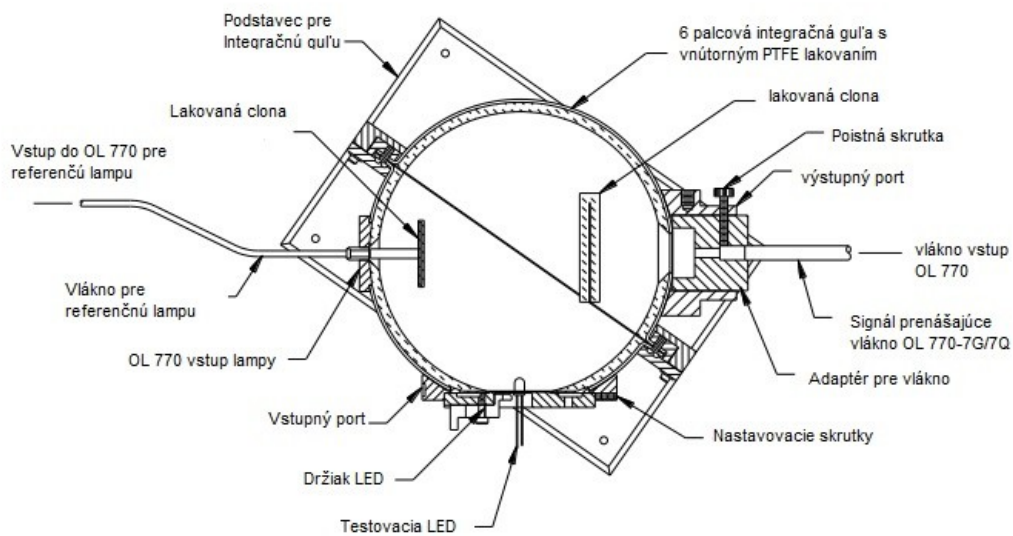
2.1.7 Zostava OL 770 pre meranie celkového svetelného a spektrálneho toku

Prístroj od výrobcu Gooch & Housego séria OL 770 disponuje možnosťou merať celkový svetelný tok a celkový spektrálny tok. K meraniu slúži integračná guľa s označením OL IS-670-LED určená pre meranie malých svetelných zdrojov a zdrojov LED.

Prístroj OL 770 disponuje vnútornou referenčnou lampou, ktorá umožňuje rýchlu recalibráciu. Je to veľmi výhodné a dôležité v prípade merania LED, kedy sa prístroj prispôsobí na špecifické svietidlo LED.



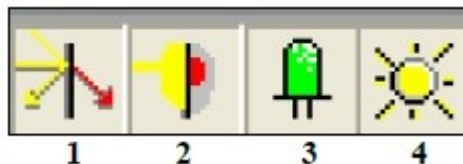
Obr. 14. Popis zostavy Gooch & Housego OL 770 s integračnou guľou [18]



Obr. 15. Popis integračnej gule OL IS-670-LED pohľad zhora [18]

2.1.8 Hlavné menu spektrometra s možnosťami merania

Po spustení obslužného programu ku spektrometru nás čaká na hlavnej obrazovke štvorica ikoniek. Každá sa vzťahuje na konkrétnu kombináciu prípravku ku spektrometru.



Obr. 16. Ikony hlavného menu

Prvou možnosťou merania je lineárna analýza. Pomocou lineárnej analýzy môžeme merať lineárny prenos alebo zrkadlovú odrazivosť. K tomu je potrebná zobrazovacia optika OL 600 alebo OL 610.

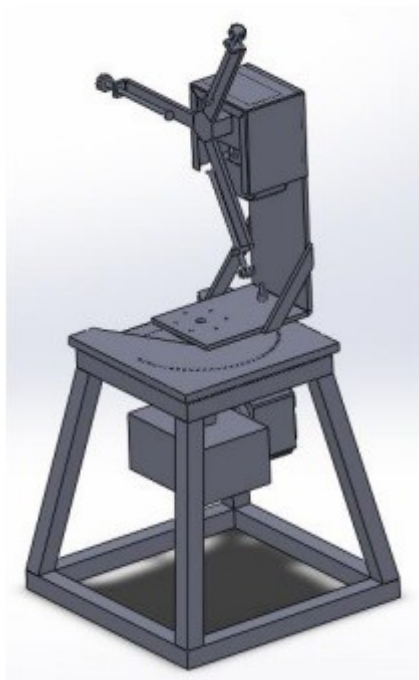
Druhou možnosťou je rozptylová analýza. Pomocou tohto merania sa meria difúzna priepustnosť alebo odrazivosť materiálov. Vyžaduje sa prípravok OL 700-70 pre meranie odrazivosti alebo prípravok OL 700-71 ktorý vie merať odrazivosť aj priepustnosť.

Tretou možnosťou je zdrojová spektrálna analýza pre LED. Pod touto ikonkou sa skrýva viacero meraní. Goniometrické meranie slúži k analýze priestorového rozloženia svietivosti. Toto meranie bude využívané v mojom prípade. Potrebný prípravok k tomuto meraniu je OL 700-30 LED goniofotometer. Ďalej sa pod touto ikonkou skrýva meranie celkového svetelného toku. K tomuto meraniu je potrebná integračná guľa IS-670-LED.

Štvrtou možnosťou je zdrojová spektrálna analýza. Pomocou tohto menu vieme zmerať spektrálne vyžarovanie, intenzitu, žiarenie a celkový spektrálny tok svetelného zdroja. K meraniu sa vyžaduje prípravok OL 610 CCD kamera alebo na všetky možnosti postačuje integračná guľa IS-670-LED. [18]

3 Vlastnosti goniofotometrov

Vo fotometrii sa jednotka svetelného toku realizuje ako celkový svetelný tok referenčných svetiel. Goniofotometria umožňuje základnú realizáciu priamou deriváciou z jednotky intenzity svetla.



Obr. 17. Základná konštrukcia goniofotometra

Goniofotometria umožňuje merať svietivosť v rôznych rovinách v rôznych uhloch. Prístroj slúži na meranie čiar svietivosti svietidiel a samotných svetelných zdrojov. Čiary svietivosti hovoria o rozložení svietivosti v okolí svietidla (svetelného zdroja) v rôznych fotometrických rovinách a v rôznych priestorových uhloch. Rozloženie svietivosti vyjadruje polárny diagram svietivosti a jeho znalosť je nevyhnutná pre návrh osvetľovacích sústav či vývoja svetelne činných plôch svietidiel. Z nameraných kriviek svietivosti možno stanoviť svetelný tok svietidla pomocou metódy pásmových tokov.

Goniofotometer možno rozdeliť do niekoľkých skupín podľa spôsobu vyhotovenia konštrukcie:

- zdroj svetla je otočný okolo vertikálnej a horizontálnej osi, hlavica fotočlánku je pevná

- zdroj svetla je otočný okolo vertikálnej osi, hlavica fotočlánku je pevná s otočnou sústavou zrkadiel
- zdroj svetla je otočný okolo vertikálnej osi, hlavica fotočlánku je pohyblivá
- zdroj svetla je umiestnený v strede a hlavica fotočlánku je pohyblivá po fiktívnej guľovej ploche

Výhodnejšie je používanie goniofotometra s pevne umiestneným svetelným zdrojom a pohyblivým ramenom s fotočlánkom. Takto je zaistená predpísaná prevádzková poloha svetelného zdroja. Pri meraní je treba dbať na to, aby bola splnená podmienka bodového zdroja, tj. minimálna vzdialenosť medzi fotometrickým stredom svetelného zdroja a fotočlánku. Rameno goniofotometra sa pohybuje vo vymedzenej fotometrickej rovine s určitým uhlovým krokom.

Podľa požadovanej presnosti sa meria svietivosť v jednotlivých fotometrických rovinách s krokom 2° , 5° alebo 10° . V prípade veľmi presnej krivky svietivosti sa krok môže zvoliť 1° . Rameno s goniometra sa okolo meraného svetelného zdroja pohybuje po kruhovej dráhe s konštantným polomerom. Aby bola dosiahnutá veľká presnosť a tiež rýchlosť merania, je posun ramena, so stanoveným uhlovým krokom, zaistený krokovým motorom, riadeným počítačom. Meranie prebieha úplne automatizovane a namerané dáta sa ukladajú a pomocou software priamo vyhodnocujú počas procesu merania. [15], [19]

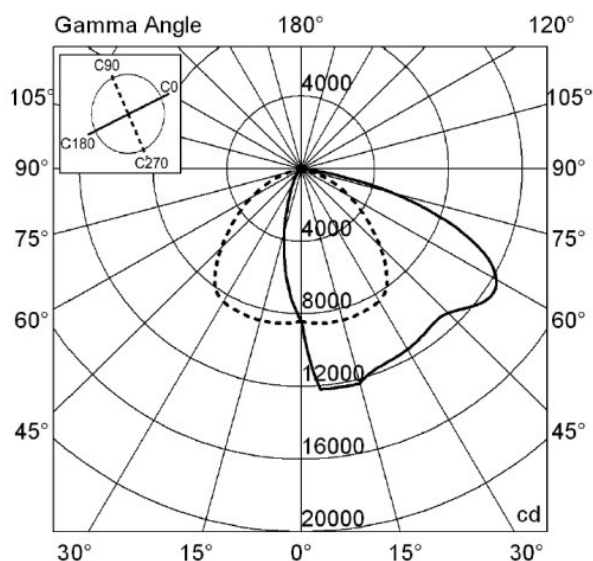


Obr. 18. Goniofotometer s otočným zrkadlom

3.1 Vyžarovacia charakteristika

V tejto kapitole sa pokúsím stručne vysvetliť ako porozumieť fotometrickým polárnym grafom. Krivky rozloženia svetla určujú v akom smere a s akou intenzitou svietidlo vyžaruje svetlo. Hodnota svetelnej intenzity v kandele (cd) pre dané svietidlo je získaná odčítaním hodnoty od stredy diagramu ku obrysu jedného z bodov.

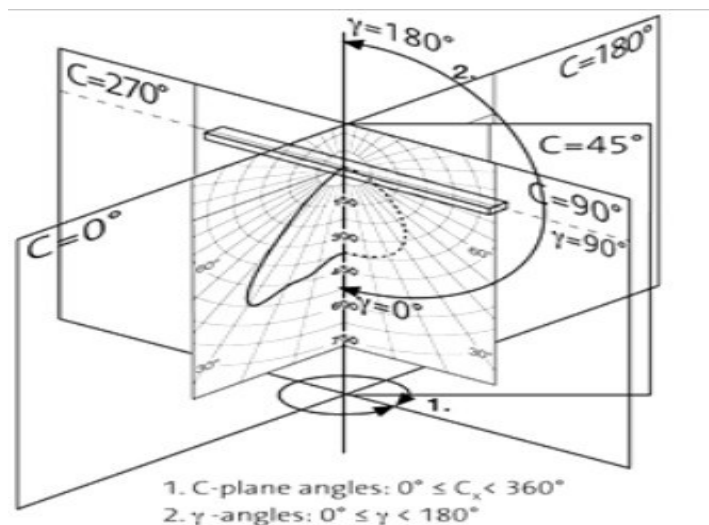
Hodnoty svetelnej intenzity sú uvedené na vertikálnej osi a uhly lúča na horizontálnej osi. V polárnej reprezentácii diagram určuje, ktoré úseky cez svietidlo (úrovne C) sa vzťahujú na krivky. Krivky svietivosti sú zvyčajne reprezentované v polárnych súradnicových systémoch.



Obr. 19. Príklad polárneho súradnicového systému C- γ

Z diagramu je okamžite jasné, ktorým smerom sa šíri svetelný tok. V príklade na obrázku sa všetok svetelný tok sústreďuje smerom dole. Poznáme však prípady kedy sa svetelný tok šíri aj do horného polopriestoru, to znamená v diagrame od uhlu 90° vyššie. Týka sa to otvorených svietidiel ako je klasická žiarovka.

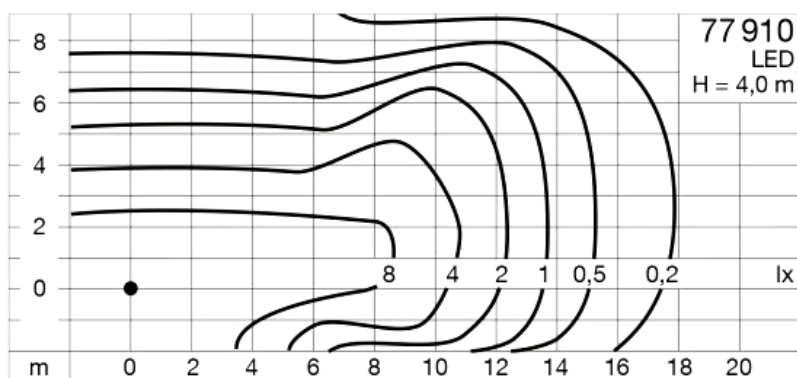
Elevačný uhol C- γ reprezentuje, ktorým smerom sa šíria svetelné lúče. To znamená v tomto prípade $\gamma = 0^\circ$ zodpovedá lúčom smerujúcim nadol. Uhol C roviny je obvyčajne reprezentovaný ako $C = 0$, lúče teda prechádzajú doprava pozdĺž kladnej osi x a pokiaľ uhol C roviny je daný ako $C = 90$ lúče prechádzajú pozdĺž kladnej osi y. Z obrázku 17 môžeme teda vyhodnotiť, že svietidlo vyžiari časť svojho svetelného toku doprava v ose x, a bude symetrické v ose y. Pre lepšiu predstavu obrázok 18 bude znázorňovať polárny diagram v priestorovom formáte.



Obr. 20. Polárny diagram v priestorovom formáte [20]

3.2 Isoluxová mapa

Isoluxová mapa špecifikuje rozloženie osvetlenia na viditeľnom povrchu. Body s rovnakou svietivosťou sú navzájom prepojené pomocou kriviek (isoluxové čiary). Svietidlo je umiestnené vertikálne montážnej výške (h). V závislosti od typu svietidla je špecifikovaná montážna výška (h). Plochy medzi krivkami sa vzťahujú na stredné hodnoty osvetlenia. Prírastky vybrané pre jednotlivé isoluxové čiary musia poskytovať zmysuplný obraz pre celý rozsah osvetlenia (napr. prírastky 100 lx). Časť mapy s veľmi hustými krivkami predstavuje oblasť s výraznými rozdielmi v osvetlení, zatiaľ čo veľké vzdialenosti medzi isoluxovými čiarami naznačujú že osvetlenie je jednotné bez veľkých rozdielov v osvetlení.



Obr. 21. Príklad isoluxovej mapy [11], [21]

4 Návrh procedúry merania parametrov svietidiel

4.1 Svietidlo

Základnou časťou svietidla je svetelný zdroj. Poznáme rôzne typy svetelných zdrojov:

- Žiarovky
- Halogénové žiarovky
- Žiarivky
- Sodíkové výbojky
- Halogenidové výbojky
- Indukčné výbojky
- Ortuťové vysokotlaké výbojky
- Svetlo emitujúce diódy - LED

Každý svetelný zdroj ma špecifické parametre a aj použitie. Svetelným zdrojom sa bližšie nebudem venovať, nakoľko nie sú záujmom mojej práce. Svetelný zdroj ako taký sa nepoužíva ako svietidlo, len veľmi výnimočne môžeme vidieť napríklad klasické žiarovky so zníženým napájaním ako okrasné svetlo v interiéroch. Vo vonkajších priestoroch nemá zmysel používať svetelný zdroj samostatne. Preto sa umiestňujú do svietidiel.

Svietidlo ako také ma za úlohu rozložiť a usmerniť svetelný tok svetelného zdroja do požadovaných tvarov a smerov. Taktiež ma za úlohu zamedziť nebezpečnému oslneniu od zdroja ako je to napríklad u pouličných svietidiel. Samotné svietidlo plní úlohu ochrany jak svetelného zdroja a elektrických častí tak ochranu osôb pred priamym dotykom nebezpečných živých častí svietidla. Svetidlo teda musí rešpektovať aj stupeň krytia IP.

Medzi základné časti svietidla patrí:

- Svetelný zdroj
- Konštrukcia svietidla (teleso, elektrická časť, úchyt optického systému)
- Optický systém (tienidla, reflektory, refraktory, difúzory, filtre)

Použitie svietidiel je dané príslušnou normou kde má byť svietidlo umiestnené, základné rozdelenie je:

- Vnútorne svietidlá
- Vonkajšie svietidlá

Svietidla sa ďalej delia aj na základe svetelného toku do dolného a horného polopriestoru. Ich označuje popisuje nasledujúca tabuľka.

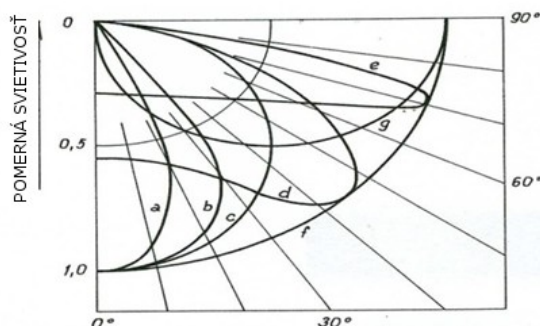
Tab. 2. Rozdelenie svietidiel na základe svetelného toku

Trieda rozloženia svetelného toku	Svietidlo	Rozdelenie svetelného toku v %	
		polopriestor	
		dolný	horný
I	priame	≥ 80	≤ 20
II	prevažne priame	60 až 80	40 až 20
III	zmiešané	40 až 60	60 až 40
IV	prevažne zmiešané	20 až 40	80 až 60
V	nepriame	≤ 20	≥ 80

Ďalšie rozdelenie svietidiel je na základe rozloženia svietivosti. Tu sa dostávame k problematike kriviek svietivosti ktorú som spomínal v kapitolách vyššie. Krivky svietivosti nadobúdajú určité tvary, ktoré sú popísané v nasledujúcej tabuľke

Tab. 3. Rozdelenie svietidiel na základe kriviek svietivosti

Tvar krivky svietivosti		Oblasť uhlov maximálnej svietivosti
označenie	názov	
a	koncentrovaná	0° až 15°
b	hlboká	0° až 30°, 150° až 180°
c	kosínusová	0° až 35°, 145° až 180°
d	pološiroká	35° až 55°, 125° až 14°
e	široká	55° až 85°, 95° až 125°
f	rovnomerná	0° až 180°
g	sínusová	70° až 90°, 90° až 100°



Obr. 22. Krivky svietivosti – typy z tabuľky

Okrem svietidiel sa používajú aj svetlomety. Tie vyžarujú smerovo sústredený zväzok svetelných lúčov. Ich dominantným použitím je osvetľovanie vzdialených plôch. [15], [22]

4.1.1 Svetelná účinnosť svietidiel

Svietidlo bude plniť svoju funkciu za predpokladu optimálnej kombinácie jednotlivých základných častí svietidla.

Svetelný tok, ktorý vyžaruje svietidlo, je vždy menší ako svetelný tok samotného svetelného zdroja. Zásadný vplyv na túto skutočnosť má optický systém, ktorý je použitý. Hodnoty účinnosti svietidiel sa pohybujú v rozmedzí 0,3 až 0,9. Účinnosť svietidla je závislá na použitom svetelnom zdroji, na tvare svietidla a na materiál priepustných a odrazných častí optického systému. Najlepšiu účinnosť dosahujú svietidlá, ktoré vyžarujú svoj svetelný tok priamo. Myslené je tým to, že napríklad nie sú potrebné ochranné kryty na svietidle, ktoré sú definované určitou priepustnosťou.

Základným predpokladom konštrukcie svietidla je to, aby svietidlo dosahovalo v rámci možností najvyššiu účinnosť. Pokiaľ je svetelný zdroj závislý na teplote okolia, udáva sa takzvaná prevádzková účinnosť. Prevádzková účinnosť je určená pomerom toku vyžiareného svietidlom pri prevádzkovej teplote, ku toku zdroja. Tok zdroja sa stanoví z predpísaných podmienok normalizovanej skúšobnej teploty. [15], [22]

4.2 Voľba svietidla

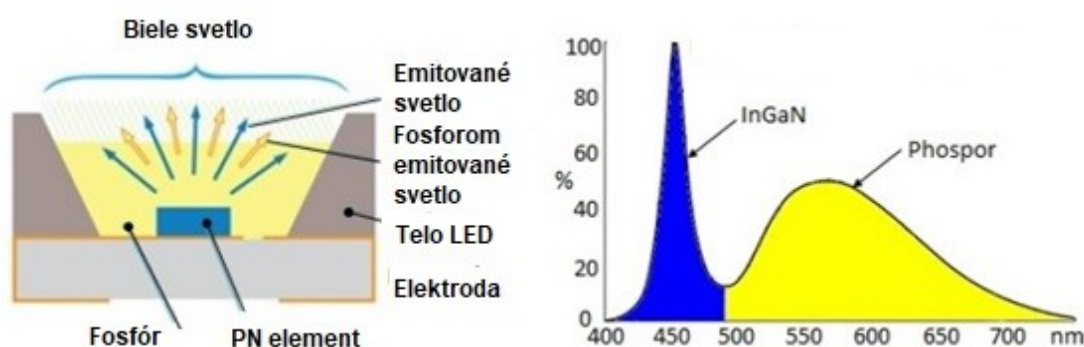
Keďže sa v mojom zadaní bližšie nešpecifikuje o aký druh svietidla sa má jednať, prvým krokom pre vytvorenie procedúry merania bude zvoliť svietidlo, na ktorom sa bude vykonávať príslušné meranie. V laboratóriu svetelnej techniky bolo niekoľko svietidiel, po konzultácii s mojím vedúcim sa rozhodlo, že sa bude merať svietidlo z automobilu Škoda Kodiaq. Konkrétne sa jednalo o denné svietenie poskytnuté a vyvíjané firmou Varroc Lighting. Vozidlo Škoda Kodiaq je na trhu relatívne krátko preto využíva taktiež trend LED svietidiel.

Svietidlo z automobilu konkrétne denné svietenie (skrátene DRL) musí spĺňať určité reguly ktoré sú popísané v medzinárodnej norme ECE 87 a ďalej sa svietidlo typu DRL radí do kategórie signálnych svietidiel popísané v norme ECE 47. Tieto normy sú vynikajúcim štartom pre návrh samotného merania.

4.3 LED v automotive

LED všeobecne v autách boli v minulosti doménou prevažne drahších aut. Dnes je tomu opak, dostupnosť LED je veľká, vyrábajú sa v rôznych prevedeniach ako náhrady klasických kovenčných zdrojov alebo hotové moduly ako je to v prípade prídavných svietidiel DRL.

U automobilových svietidiel v prednej časti sa používa výhradne biele svetlo. To u svetlo emitujúcich diód dosahujeme buď zmiešaním základných farieb RGB čo je nevýhodné. Skôr sa používa technológia nanosením luminoforu známym ako YAG (Y₃Al₅O₁₂:Ce) na povrch modrej krátkovlnnej LED vyhotovenej v podobe InGaN. Prechodom modrého svetla cez luminofor vznikne biele svetlo. V samej podstate je to kombinácia modrej a žltej.



Obr. 23. Princíp vzniku bielej LED a spektrum bielej LED [24]

4.4 Svietidlo DRL Škoda Kodiaq

Ako som už spomenul vyššie pre meranie som zvolil svietidlo z automobilu. V automobilovom priemysle je v dnešnej dobe najpoužívanejším typom zdroja svetla práve LED. Používa sa jak v interiéry vozidla tak v jeho exteriéry, či už ako denné svietenie alebo priamo stretávacie svetlo alebo signálne svetlo.

Výhody LED sú jednoznačné. Dlhá životnosť ktorú výrobcovia udávajú až 50 000 hodín, nízka spotreba elektrickej energie, veľkosť a váha, jednoduchá regulácia pomocou zmeny prúdu, teplota chromatičnosti, vysoký svetelný tok ktorý postupným vývojom stále rastie. Svetlo emitujúce diódy okrem svojich výhod majú aj značné nevýhody oproti konvenčným zdrojom. LED mení svoje vlastnosti s rastúcou teplotou. Medzi hlavné aspekty patrí s rastúcou teplotou sa znižuje životnosť a tým pádom znižuje svetelný tok. Preto je potrebné samotný LED čip chladiť. U nízkych výkonov rádovo do 5 W ako je to v prípade DRL zvláda odvádzať teplo samotný plošný spoj na ktorom je LED namontovaná prípade teplo odvádza hliníkové puzdro čipu. U vyšších výkonov sa chladí už aktívne prídavným ventilátorom. LED svietidla sú však už

v dnešnej dobe prepracované a vo všetkých smeroch predbiehajú klasické halogénové svietidla. Tento starší typ svietidiel však stále dominuje u nižších tried vozidiel kde jednoduchosť svietidla určuje cenu. Opačným príkladom môže byť spoločnosť KIA Motors, ktorá halogénové svietidlá neponúka už ani v najnižšom segmente.



Obr. 24. Predná časť kompletých svietidiel Škoda Kodiaq

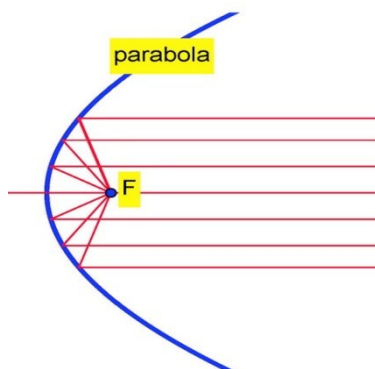


Obr. 25. Svetidlo DRL Škoda Kodiaq

Modul DRL je vyhotovený v podobe 4 samostatných parabol, na každú parabolú prislúchal jeden LED čip v puzdre s neznámym označením. Výrobca používa špeciálny typ SMD puzdra. Puzdro sa rozmerovo podobalo na LED čip s označením SMD 2835 ktorého základné parametre sú teplota chromatičnosti 5500 K, svetelný tok 26 lm a príkon 60mA pri napätí 3,2V. Toto

tvrdenie však nemusí byť pravdivé. Zapojenie LED čipov bolo v tomto prípade taktiež neznáme keďže celá doska plošného spoja bola potiahnutá čiernym povlakom.

Parabolické zrkadlá sa vo veľkej miere používajú v automotive. Tvar parabolického zrkadla je súčasťou kruhového paraboloidu otáčajúcej sa okolo svojej osi. Takýto tvar zrkadla láme lúče ktoré potom prechádzajú cez ohnisko a ďalej sú odrazené s rovnobežkou optickej osi.



Obr. 26. Príklad parabolického zrkadla

Ako je vidieť z obrázku 19, parabola denného svietenia nie je čistá. Skladá sa z množstva malých odrazných plôch ktoré sú nazývané fazety.

4.4.1 Fazetový reflektor

Jedná sa o reflektor, na ktorého povrchu sú umiestnené drobné plôšky – fazety. Väčšinou sú umiestnené po celej ploche reflektora a nadobúdajú rôzne tvary. Najčastejšie sú používané štvoruholníkové tvary. Fazety vystupujú z povrchu reflektora a preto sa ďalej volí optimálny sklon a prehnutie faziet. Správny návrh ovplyvňuje výsledné rozdelenie osvetlenia na premietanom obraze. Takýto reflektor vychádza z návrhu hladkého reflektora, na ktorý sa postupne osadzujú fazety. Cieľový obraz sa rozdelí na mriežku a pre každú časť mriežky sa zvolí priemerný svetelný tok. Každá fazeta je navrhovaná samostatne. Fazety sa postupne upravujú a simulujú aby svetelný lúč zo svietidla kopíroval požadovanú krivku svetivosti. Ako je vidieť na obrázku 21 modul DRL používa rozloženie faziet v rotačnej symetrii, to znamená že získame obraz s postupným vyhasínaním svetelného toku do okrajov. [12]



Obr. 27. Detail paraboli s viditeľným tvarom faziet výrobcu ZIPAR

Takýto typ reflektoru zabezpečuje homogénnu distribúciu svetla bez rušivých miest s inou úrovňou svetla, to znamená že zväzok lúčov dopadajúci na povrch je čistý a rovnomerne rozptýlený. Zvlášť výhodu nadobúda tento typ reflektoru so zdrojom svetla LED, kde pri hladkom povrchu reflektoru zvyčajne po okraji svetelného zväzku vznikajú farebné odchýlky. Povrch faziet je veľmi čistý a dosahuje odrazivosť do 98%.

4.5 Experimentálne meranie základných parametrov svietidla

4.5.1 Základný predpoklad pre fotometrické merania

Pokiaľ chceme svietidlu všeobecne zmerať charakteristiku, či už krivky svietivosti alebo iné fotometrické parametre, vychádzame z toho, že svietidlo sa javí ako bodový zdroj. Na základe veľkosti svietidla samotného sa volí vzdialenosť od snímača, ktoré bude merať parametre svietidla. Väčšinou volíme 6 až 8 násobok najväčšieho rozmeru svietidla. V mojom prípade však priamo udáva norma z akej vzdialenosti sa meria svietidlo používané v automotive.

Ďalším dôležitým aspektom pri meraní je svietidlo napájať zdrojom, ktorý zabezpečí svietidlu menovité hodnoty napätia a prúdu. Po zapnutí je potrebné nechať celé svietidlo zohriať na prevádzkovú teplotu. Optimálny čas ponechania svietidla zapnutého je 15 až 20 minút.

Meranie svietidla by malo prebiehať v miestnosti ktorá je tmavá. Pokiaľ je možnosť tak treba eliminovať každý zdroj rušenia. To znamená cudzie zdroje svetla či už prechod svetla cez škáry okolo dverí svetelného laboratória alebo rôzne signalizačné svetla či už na zdrojoch alebo vyhodnocovacej technike. Obzvlášť pri malých úrovniach svietivosti zdroja, kde by mohla vzniknúť veľká chybovosť merania. Taktiež treba brať v úvahu rôzne odrazy, preto by všetko v laboratóriu malo byť čierne, nelesklé. Dobré je dodržiavať čistotu v miestnosti, v optickej laboratórii by sa mali nachádzať len prvky potrebné k fotometrickému meraniu.

Počas merania, ktoré býva automatizované a obvykle trvá niekoľko desiatok hodín nesmie do miestnosti nikto vstupovať. Takto skoro vždy pri fotometrickom meraní vznikajú veľké chyby, kedy je merací snímač osvetlený cudzím zdrojom svetla a vo výslednom vyhodnocovaní je vidieť rôzne náhodné hodnoty alebo nezodpovedajúce hodnoty.

Optický systém a jeho časti by mali byť čisté, konštrukčné časti taktiež natreté čiernou matnou farbou. Pokiaľ sa idú merať krivky svietivosti svietidla, tak svietidlo je potrebné umiestniť na goniofotometer a zabezpečiť aby sa pri otáčaní svietidlo neuvoľnilo, prípadne samotne nenakláňalo. Goniofotometer by mal byť pred meraním nastavený na nulovú pozíciu, svietidlo umiestňujeme do optickej osi so snímačom. Ak je svietidlo parabolické a vieme, že vyžaruje do určitého smeru najviac, je pri montáži na goniofotometer zapnuté. Odhadneme tak to, že najvyššia hodnota svietivosti dopadá na snímač práve v nulovej pozícii goniofotometra. Je to však len odhad. Preto je vhodné spraviť skúšobné meranie svietivosti kde zistíme, či je maximum svietivosti práve v nule goniofotometra. Ak nie, svietidlo sa pootočí a meranie sa opakuje. Je to vhodné pri neskoršom vyhodnocovaní, kde na polárnom grafe potrebujeme vrchol svietivosti práve v nule kvôli symetrickosti krivky.

Pri jasovej analýze svietidla, ktoré premietame na bielu matnú stenu je potrebná taktiež čistota prostredia. Dôležitá je taktiež vzdialenosť od premietanej steny ktorá je buď predom stanovená normou ako v mojom prípade, prípadne sa volí v závislosti od rozptylu svetelných lúčov parabolou svietidla. Stena ktorá je osvetľovaná by mala byť pokiaľ čo najviac čistá. K prepočtu potrebujeme poznať koeficient odrazivosti bieleho povrchu. Pokiaľ nepoznáme do akej vzdialenosti máme svietidlo umiestniť, volíme vzdialenosť na základe osvetlenosti povrchu steny. To znamená pokúšame sa osvietiť pokiaľ je možné celú plochu steny.

4.5.2 Norma ECE 87

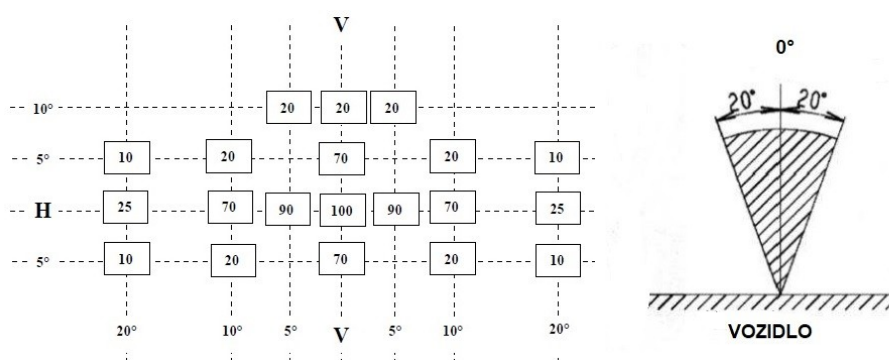
Ako už bolo spomínané v kapitolách vyššie, na svietidlá montované na osobné vozidlá existuje súbor noriem. V týchto normách vieme dohľadať informácie o každom svietidle či už stretávacom, signálnom alebo doplnkových svietidlách. Preto stručne spomeniem niektoré dôležité kapitoly, ktoré popisujú svietidlo a určujú jeho svetelno-technické parametre. Tieto parametre budú neskôr v praktickej časti potrebné pre vyhodnotenie.

Svietivosť svietidla DRL všeobecne nesmie prekročiť hodnotu 1200 cd a nesmie byť menšia ako 200 cd vo všetkých viditeľných uhloch. Pokiaľ sa v svietidle nachádza viac svetelných zdrojov, v prípade zlyhania ktoréhokoľvek svetelného zdroja nesmie zapojenie dovoľovať ostatným zdrojom meniť svoje parametre.

Napätie na aké je svietidlo konštruované teda vstupné napájacie napätie musí byť typicky 6,75V, 13,5V a 28V v závislosti od palubnej siete automobilu.

Meranie DRL by malo prebiehať pri teplote $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Doba ohriatia svietidla, kedy svietidlo distribuuje svoje menovité parametre je 1 minúta, doba pre ohriatie svietidla kvôli meraniu vyžarovacích kriviek je stanovená na 30 minút.

Norma ďalej udáva mapu, na ktorej sú určené body pri horizontálnych a vertikálnych uhloch. Body vyznačujú percentuálnu mieru svietivosti pri určitých uhloch. Svietidlo musí svoju svietivosť sústrediť do stredu kde je stanovená 100% svietivosti, pri horizontálnom uhle 20° je svietivosť stanovená na štvrtinu.



Obr. 28. Typická mapa svietivosti pre svietidlo DRL [25]

4.5.3 Jasový analyzátor Canon EOS 350D

Prístroj je v samej podstate digitálny zrkadlový fotoaparát od výrobcu Canon s typovým označením EOS 350D, v ktorom je nahratý a odladený software od firmy LMK. Fotoaparát zaznamenáva reálnu scénu v digitálnej podobe na pamäťovú kartu v komprimovanom formáte. Bol vyvíjaný pre široký rozsah merania od 10^{-3} do 10^5 lx, prístroj je určený k dlhodobej prevádzke bez obsluhy a napájaný je jak zo siete tak aj z batérie. Dáta je možné ukladať na vnútornú pamäť a ďalej spracovávať. Základom prístroja je kvalitný snímač, ktorý je prispôbený svojou spektrálnou citlivosťou k citlivosti ľudského oka.



Obr. 29. Digitálna zrkadlovka Canon EOS 350D

Prístroj je vybavený softwarom LMK 2000, ktorý zaznamenáva snímky vo formáte RAW. Tento formát je výhodný lebo nie je nijak upravovaný ako je tomu pri štandardných formátoch JPEG alebo BMP. Snímka je teda v pôvodnej podobe bez korekcií. Pri zaznamenávaní snímky je možné nastaviť úroveň expozície od hodnoty +2 do -2. Nastavenie expozície sa priamo ukazuje na display-i fotoaparátu v podobe troch samostatných čiarok. Pri nastavovaní dbáme na to, aby čiarky boli na svojom maxime teda +2 a -2 a stredná čiarka na nule. Fotoaparát vyhotoví 3 snímky a to snímku s najmenšími jasmi, snímku so strednými jasmi a snímku s vysokými jasmi. Snímky sa následne uložia na pamäťové médium pre neskoršie vyhodnotenie. Dôležitým nastavením pred stlačením samotnej spúšte je nastavenie ISO. Teda v podstate zašumenie snímku. Ako voliť parametre ISO popisujem v ďalších kapitolách. Prístroj využíva k svojej funkcii CCD kameru G2-4000 ako veľmi citlivý analyzátor jasu. Kamera G2-4000 používa čip Kodak KAI-4022 s rozlíšením 2056x2062 px. Rozsah meraných jasov je od 10^{-4} cd/m² do 10 000 cd/m². Maximum meraného jasu je limitovaná rýchlosťou uzávierky. [26]

4.6 Procedúra merania svietidla DRL

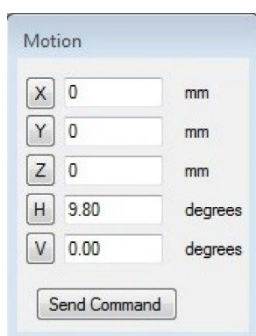
Keďže už viem aké svietidlo budem merať a viem aké parametre má spĺňať a taktiež som popísal prístroje k meraniu preto prejdem k návrhu merania svietidla.

4.6.1 Demontáž modulu DRL zo svietidla

Keďže som dostal na meranie kompletne celé svietidlo z vozidla Škoda Kodiaq, ktoré obsahovalo stretávacie, parkovné, diaľkové a DRL musel som najskôr potrebný modul

demontovať. Demontáž nebola komplikovaná celý modul DRL držal v svietidle pomocou pár skrutiek torx. Prívodné vodiče k modulu boli však robené na mieru cez konektor, a keďže svietidlo bolo na výskumné účely v jednoduchosti sa vodiče za konektorom tesne prerušili.

Hotový vymontovaný modul DRL s kúskom prívodného vodiča som namontoval na otočnú dosku goniofotometra pomocou sady nastavovateľných príchytiek. Goniofotometer sa nastavil na nulovú pozíciu to znamená v oboch osách horizontálnej a vertikálnej na 0°. Toto bola prvá podmienka. Nasledujúci obrázok zobrazuje rozhranie pre nastavenie goniofotometra v reálnom čase.



Obr. 30. Okno nastavenia polohy v reálnom čase

Nie je vhodné otáčať kompletným svietidlom keďže ma veľké rozmery, preto je lepšie demontovať jednotlivé časti pred začatím merania. Obdobne tento postup platí aj pri iných svietidlách ktorých optická časť nie je súčasťou tela svietidla. Je teda rozoberateľné.



Obr. 31. Rozobraté svietidlo Škoda Kodiaq (bez DRL)

4.6.2 Napájanie svietidla

Na modul DRL bolo potrebné priviesť napájanie. Norma ECE 87 udáva nominálne napätie 13,5V. My sme pri meraní použili napätie 12V nakoľko sa svietidlo prehrievalo už po pár minútach. Tu však nastala prvá chyba. Svietidlo je potrebné napájať menovitým napätím. V prípade smerovej charakteristiky však znížené napätie nemá vplyv na tvar samotnej charakteristiky. K napájaniu sa použil laboratórny zdroj Diametral P230R51D.

K napájaniu svietidiel je potrebný taký zdroj, ktorý zvládne dlhodobo dodávať požadovaný prúd a napätie. Prípadné poklesy negatívne vplyvajú na výsledky merania. Zvlášť citlivé sú LED zdroje, ktoré ku svojmu správne fungovaniu majú definovaný menovitý prúd.

4.6.3 Procedúra merania smerovej charakteristiky.

Po zapnutí svietidla sa pomocou odhadu celý modul fyzicky presúval a natáčal po otočnej doske goniofotometra tak, aby približné maximum svietivosti smerovalo v ose fotometrickej lavice na integračnú guľu. Modul svietidla DRL musel byť pevne uchytený. Prívodné vodiče pre napájanie modulu bolo potrebné viesť tak, aby bol zabezpečený voľný pohyb goniofotometra. Treba zabezpečiť aj to, aby pripojenie vodičov zdroja a svietidla bolo dostatočne pevné. Preto sa neodporúča používať krokodílove svorky ale pevný skrutkový spoj (takzvané čokoládky sú najvhodnejšie) a taktiež dostatočnú dĺžku a voľnosť prívodných vodičov. Všetky spoje musia byť dostatočne izolované keďže konštrukcia goniofotometra je oceľová a mohol by nastať prípadný skrat na kostru. Goniofotometer musíme vyskúšať vytočiť do maxima horizontálnej osy a maxima vertikálnej osy. Preto som v programe zadal maximum 90° do každého smeru goniofotometra a presvedčil sa teda či svietidlo drží a nič nebráni v pohybe. Vzďialenosť svietidla od zdroja bola v mojom prípade maximum a to 3,5m.

Po tejto procedúre je možné pristúpiť k prvému kontrolnému meraniu kriviek svietivosti.



Obr. 32. Miestnosť s pripraveným svietidlom DRL na kontrolné meranie

Do programu pre goniometer som zadal, aby sa svietidlo otáčalo 2 stupne horizontálne a 2 stupne vertikálne s krokom 0,5°. Takáto testovacia konfigurácia je postačujúca pre korekciu celého svietidla na goniometrii. Ako postupovať pri spustení merania je popísané v manuáloch k prístroju OL 770.

V miestnosti je potrebné zhasnúť a zistiť ktoré rušivé zdroje svetla je nutné eliminovať tak ako to bolo popísané v kapitole o predpoklade pri meraní. Meranie sa spustilo v programe a výsledkom boli hodnoty zapísané v Excel tabuľke, uvediem len potrebnú krátku časť. Celé kontrolné meranie je uvedené v prílohe A.

Osa H	Osa V	intenzita/cd	CCT
0,5	-0,5	1091,282192	5715,33
0	-0,5	1101,649199	5713,72
-0,5	-0,5	1113,197453	5715,58
-1	-0,5	1124,871725	5719,7
-1,5	-0,5	1137,241328	5723,22
-2	-0,5	1149,151349	5726,21
-2	0	1115,475939	5727,42
-1,5	0	1104,795	5726,3
-1	0	1093,645459	5726,37
-0,5	0	1081,979144	5725,71
0	0	1070,406332	5725,98
0,5	0	1059,324256	5726,22
1	0	1049,999288	5728,36

Obr. 33. Časť kontrolného merania

V tabuľke je zrejmé, že vrchol svietivosti nie je v požadovanom nulovom uhle. Preto sa svietidlo natočilo do požadovaného smeru a kontrolné meranie sa opakovalo. Niekedy z hľadiska tvaru svietidla nie je možné natočiť svietidlo do požadovaného smeru, preto je

jednoduchšie nastaviť Offset priamo v programe. Bližšie informácie k tomuto kroku sú uvedené v obslužnom návode k programu OL770-MS. Keď som bol presvedčený že vrchol svietivosti bol v nulovom uhle horizontálnej osy a v nulovom uhle vertikálnej osy, mohol som pristúpiť k samotnému meraniu kriviek svietivosti.

Do programu som zadal aby sa svietidlo otáčalo po horizontálnej osy 90° v oboch smeroch s krokom otáčania 5° . Takto získam krivku v celom polopriestore. Norma ECE 87 udáva že svietidlo ma vyžarovať primárne v uhloch 5° do spodného polopriestoru vertikálnej osy a 10° do horného polopriestoru vertikálnej osy. V programe som zadal aby sa svietidlo otáčalo 20° do oboch smeroch vertikálnej osy s krokom 10° . Samotné meranie sa spustilo obdobným spôsobom ako pri testovacom meraní. Kým sa všetky kombinácie uhlov zmerali prebehlo niekoľko hodín. Behom tohto času je potrebné zabezpečiť aby do miestnosti kde prebieha meranie nikto nevstupoval!

Po skončení merania sa výsledok uložil do Excel súboru, ktorý v ďalšej kapitole vyhodnotím. Výsledkom je tabuľka v ktorej sa zaznamenávala svietivosť pod kombináciou uhlov a taktiež teplota chromatičnosti (CCT) pri každej kombinácii. V Excel dokumente je taktiež druhá tabuľka v ktorej sa zaznamenávalo spektrálne vyžarovanie pri každom z meraní.

4.6.4 Procedúra jasovej analýzy svietidla

Základom je oboznámiť sa s funkciami digitálneho zrkadlového fotoaparátu Canon 350D. Prístroj je upravený a kalibrovaný firmou LMK, vyhodnocovanie jasových pomerov prebieha v programe LMK 2000. Bližšie prístroj popisuje kapitola 4.5.3. „Pri vyhotovovaní jasovej snímky je potrebné najskôr fotoaparát správne nastaviť.“



Obr. 34. Display digitálneho fotoaparátu

4.6.5 Nastavovanie ISO

Slovo ISO pochádza z medzinárodnej normy International Standards Org. Jedná sa v podstate o nastavovanie citlivosti fotočlánku fotoaparátu. Citlivosť fotočlánku vyjadruje schopnosť článku využiť svetlo. Každý záber, ktorý vznikne pomocou fotoaparátu bol riadený expozičným trojuholníkom.



Obr. 35. Expozičný trojuholník [27]

Citlivosť je veľmi dôležitou súčasťou trojuholníka. Jeho rozsah závisí na kvalite fotočlánku. Čím je hodnota ISO väčšia, tým rastie úroveň šumu vo výslednom snímku. Najlepšie je využívať hodnotu ISO 100 alebo 200 pri nízkych úrovniach osvetlenosti, v prípade fotografovania krajiny ISO 400. Fotoaparát Canon 350D je určený primárne k snímaniu nízkych úrovni osvetlenosti, akékoľvek zvyšovanie ISO vedie k zašumeniu snímku a zníženiu technickej kvality snímku.

4.6.6 Nastavovanie expozície

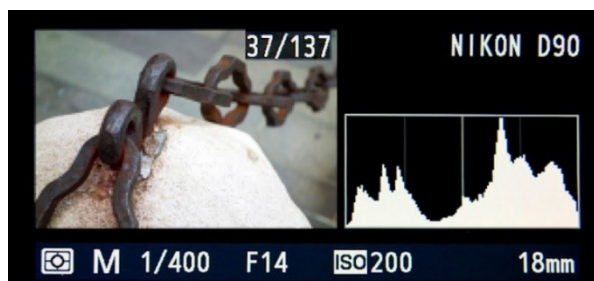
Korekcia expozície zasahuje priamo do expozičného trojuholníka. Ak sa nastaví konkrétna hodnota expozície, ovplyvní to ďalšie hodnoty v trojuholníku. Pokiaľ sa nastaví hodnota expozície na -1EV, zmení sa expozičný čas. Snímok sa podexponuje a stmaví. Pokiaľ sa hodnota nastaví na kladnú teda 1EV, snímok sa zosvetlí teda preexponuje. Presná expozícia

znamená naexponovať záber na základe svetla na scéne. Väčšina fotoaparátov si vie zmerať množstvo svetla na scéne a na základe toho upraví expozičný čas automaticky.



Obr. 36. Príklad preexponovanej, správnej a podexponovanej snímky

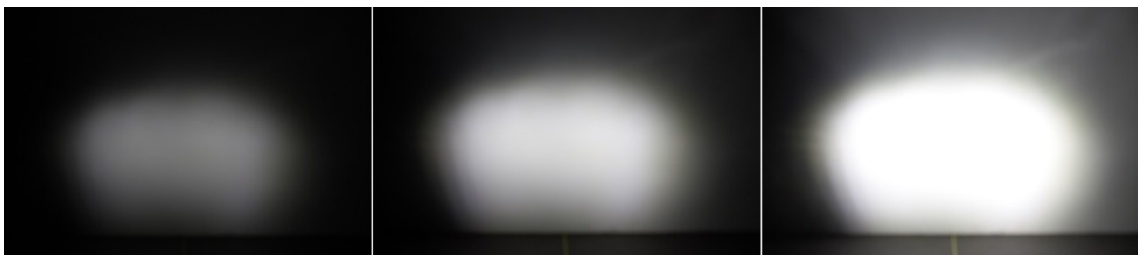
U digitálnych fotoaparátov máme možnosť manuálnej korekcie expozície na základe histogramu.



Obr. 37. Príklad obrazu so zodpovedajúcim histogramom

Príklad histogramu ukazuje že na snímku sú dominantné svetlé tóny. Ľavá strana histogramu ukazuje množstvo tmavých tónov a pravá strana množstvo bielych tónov. Digitálny fotoaparát vie zobrazit' aj takzvané prepálené časti na snímku. Tie blikajú čierne na display kde sa zobrazuje snímka. Pokiaľ sa jedná o bodové „prepali“ snímka je v poriadku. Pokiaľ by blikala polovica snímky tak to znamená že fotograf by mal prenastaviť hodnotu expozície.

Fotoaparát Canon 350D je vybavený softwarom od firmy LMK. Tu sa v základnom nastavení expozícia zadáva ako rozpätie na display-i fotoaparátu otočným kolieskom. Na expozičnej mierke nemáme jednu čiarku, ale tri. Pomocou otočného kolieska sa snažíme nastaviť čiarky tak, aby jedna bola na maxime expozície teda -2EV, druhá na 0EV a tretia na +2EV. Fotoaparát pri stlačení spúšte vyhotoví 3 snímky s najmenšou, strednou a vysokou expozíciou, ktoré uloží na SD kartu. Preto je potrebné používať statív. Na display priamo blikajú prepálené časti, to znamená že bol zlý spôsob vyhotovenia snímky buď zlým nastavením expozície, ISO alebo fotografovaním bez statívu pri dlhom expozičnom čase. Pri fotografovaní sa vždy snažíme aby na snímke so strednými jasmami bolo čo najmenej „prepalov“. [27]



Obr. 38. Snímky vyhotovené fotoaparátom Canon 350D zo vzdialenosti 3,5m

Na obrázku 38 sa nachádzajú snímky priamo z môjho prvého skúšobného snímania svietidla DRL. Snímky nie sú zaostrené. Všetky snímky sú nasnímané s parametrom ISO-100 a clonovým číslom F/4. U prvého snímku je čas expozície 1/8s, u druhého 1/2s a u tretieho 2s.

4.6.7 Nastavovanie rýchlosti uzávierky

Pomocou uzávierky sa reguluje množstvo svetla dopadajúce na fotočlánok. Čas dopadu určuje hĺbku ostrosti snímku. Pri nastavovaní rýchlosti uzávierky sa riadime množstvom svetla na scéne. V prípade fotografovania nízkych jasov v tmavej miestnosti volíme dlhšie časy uzávierky. Stručný prehľad používaných časov:

Čas 1/4000 až 1/1000 využívame na zachytávanie skutočne rýchlych pohybov.

Čas 1/800 až 1/400 je obvyklá hodnota na fotografovanie bežných fotografií.

Čas 1/350 až 1/80 snímky v makro-fotografii, fotografovaní krajiny

Čas 1/60 až 1/8 je v závislosti od ohniska najmenšia rýchlosť, ktorú pri fotografovaní možno udržať z ruky bez toho, aby vznikla rozmazaná snímka. Na dlhé ohniská (300 mm a viac) je však nutné o poznanie kratší čas, pretože trasenie rúk je oveľa výraznejšie. V týchto prípadoch už je veľmi užitočný statív.

Čas 1/6 až 4 sekundy je už vhodný pre exponovanie zo statívu.

Čas 5 až 30 sekúnd využívame najmä pri fotografovaní hviezd. Extrémne dlhá expozícia pri nízkej hodnote ISO je nutná pre hladké zachytenie nočnej oblohy.

Čas v rádoch minút sa používa na nočné scenérie, zábery trás hviezd po oblohe a podobne. [27]

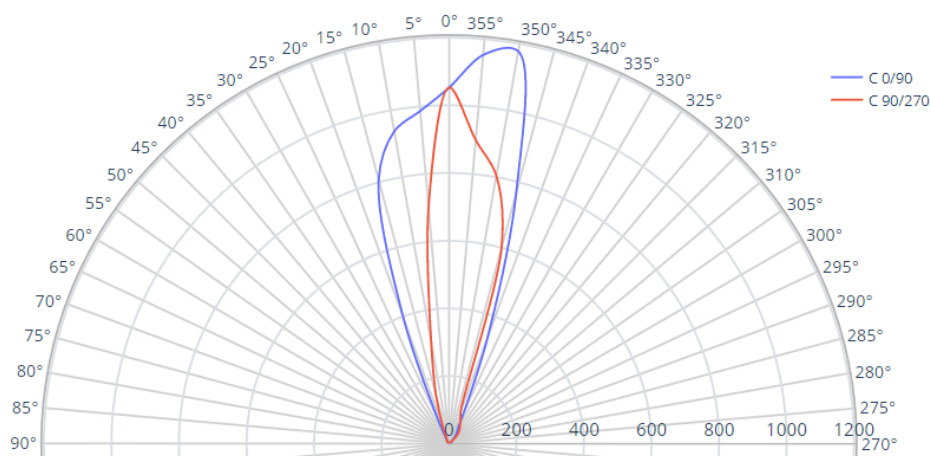
5 Príklad merania a vyhodnotenia svetelných parametrov svietidla

5.1 Meranie a vyhodnotenie údajov zo spektroradiometra

Tak ako bolo spomenuté v kapitole 4 o procedúre merania smerovej charakteristiky výsledkom merania je obsiahly súbor Excel. V tomto súbore nájdeme na prvom liste hodnotu svietivosti (cd) svietidla pod každou kombináciou uhlov, a taktiež teplotu chromatičnosti (CCT) v každej z kombinácii uhlov. Na ďalšom liste sa nachádzajú hodnoty pre vykreslenie spektrálnej charakteristiky pre každý krok goniofotometra. Celkovo prebehlo 334 meraní s parametrami popísanými v predošlej kapitole. Všetky potrebné údaje sa zaznamenávali na obslužný počítač s programom pre spektroradiometer OL 770. Samotné meranie prebiehalo v tmavej miestnosti v priestoroch VŠB-TUO. Merané svietidlo bolo DRL Škoda Kodiaq. Vzdialenosť na fotometrickej lavici od integračnej guľa bola 3,5m, čo je maximum ktorú dovoľuje fotometrická lavica. Integračná guľa je prepojená pomocou optického vlákna s prístrojom OL 770 tak ako je to naznačené v kapitole 2.1.7. Napájanie svietidla bolo 12V pri prúde 0,3A.



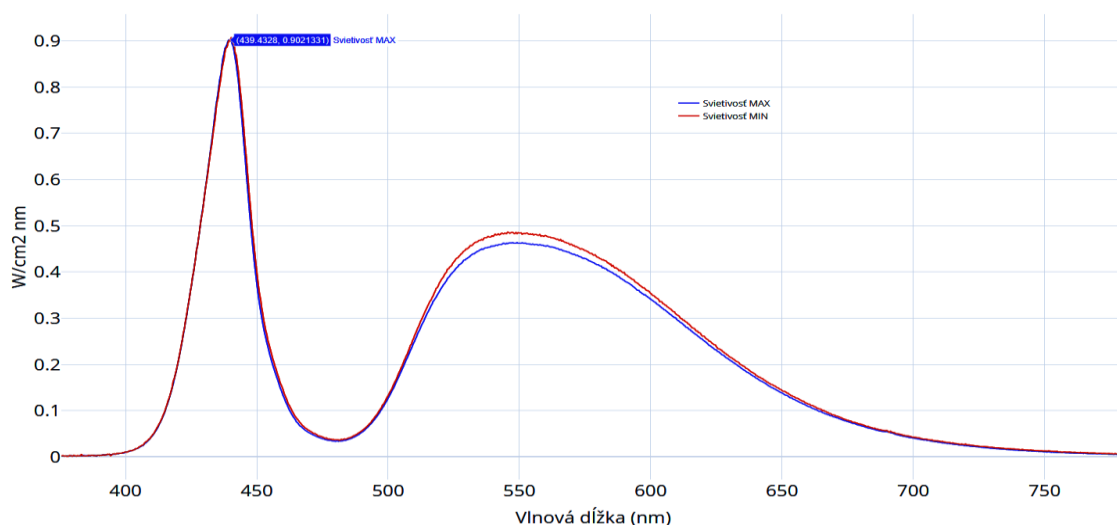
Obr. 39. Integračná guľa OL IS-670 LED



Obr. 40. Výsledok z merania v polárnych súradniciach, vodorovná osa je svietivosť (cd), v polkruhu sú príslušné horizontálne uhly

Z vykresleného polárneho grafu je zrejmé, že vyžarovanie svetidla DRL je po správnosti ako to určuje norma ECE 87. To znamená aby bolo svetidlo na aute viditeľné pod horizontálnym uhlom 20° v oboch smeroch. Ďalšou požiadavkou normy bolo, aby hodnota svietivosti v akomkoľvek žiadanom uhle nebola menej ako 200 cd. Túto požiadavku taktiež spĺňa. Krivka je však nepresne vykreslená. Zvolený krok goniofotometra nebol správny, taktiež horizontálny rozsah zbytočne veľký. Opakované meranie z časových dôvodov nebolo možné, no pre druhé meranie by som zvolil menší krok horizontálneho rozsahu a taktiež upravil maximum rozsahu do maximálne 40° . Graf znázorňuje krivku svietivosti pri vertikálnom uhle 0° ($C=0$) a potom jednotlivé krivky pri vertikálnom sklone 10° a 20° svetidla DRL do oboch polrovín. Maximálna hodnota svietivosti bola 1177 cd.

Pri meraní kriviek svietivosti teda smerovej charakteristiky nastalo niekoľko chýb. Prvou z nich bola čistota prostredia. Z obrázka 32 a obrázka 39 môžeme povedať, že meracie prostredie bolo znečistené. V pozadí je vidieť niekoľko kartónov a rôznych predmetov ktoré priamo narúšajú tvar smerovej charakteristiky. Druhou chybou bolo napájacie napätie. Meranie malo prebiehať pri napájaní 13,5V čo malo zásadný vplyv na hodnoty svietivosti, ktoré sú vynesené v polárnom grafe. V miestnosti svetiel aj monitor počítača ktorý svojou svietivosťou čiastočne ovplyvňoval celé meranie.



Obr. 41. Spektrálna charakteristika svietidla DRL, pomerne spektrálne vyžarovanie na osi y

Obrázok 41 znázorňuje vykreslenú spektrálnu charakteristiku svietidla DRL. Ako zdroj svetla je LED a krivka kopíruje typický tvar studenej bielej diódy. Vykreslená je krivka pri maximálnej svietivosti a krivka pri minimálnej svietivosti. V prílohe B sú vynesené hodnoty náhradnej teploty chromatičnosti pre celý priebeh merania. CCT malo svoje minimum v 4200K a maximum 5900K. Príloha C popisuje typický tvar krivky pre bielu LED.

5.2 Meranie a vyhodnotenie jasových snímok DRL

Vo veľkom laboratóriu VŠB-TUO sa nachádza predpripravená biela stena, na ktorú bude svietidlo premietaný a veľký goniofotometer vo vzdialenosti 10m. Koeficient odraznosti steny je 0.9. Goniofotometer je otočný elektrickým krokovým motorom a riadený cez obslužný program z vedľajšej miestnosti. Svietidlo je potrebné napájať obdobným spôsobom ako pri smerovej analýze.

V prípade jasovej snímky automobilových svietidiel sa svietidlo montuje na vzdialenosť 10m od premietanej steny. V prípade signálnych svietidiel je to 3,1m. Ja som svietidlo odfotil v oboch vzdialenostiach a výsledok zhodnotím v poslednej kapitole 5. Pred začatím snímania je potrebné nastaviť všetky vyhovujúce parametre a snímok zaostriť pomocou otočnej optiky. Fotoaparát je vhodné mať na statíve. Fotoaparát vyhotovuje 3 snímky po sebe, ktoré uloží a snímky sa analyzujú cez program od LMK ktorý je nahratý v obslužnom počítači vo vedľajšej miestnosti. Samotný modul DRL som odfotil aj priamo z krátkej vzdialenosti pomocou statívu. V takomto prípade sa vzdialenosť vyhotovenia snímky od svietidla riadi veľkosťou samotného svietidla. Ak by sme priamy snímok vyhotovili z väčšej vzdialenosti, je

ho potrebné približovať optikou fotoaparátu alebo približovať v programe od LMK. Tento spôsob znižuje kvalitu snímku a nie je výhodný.

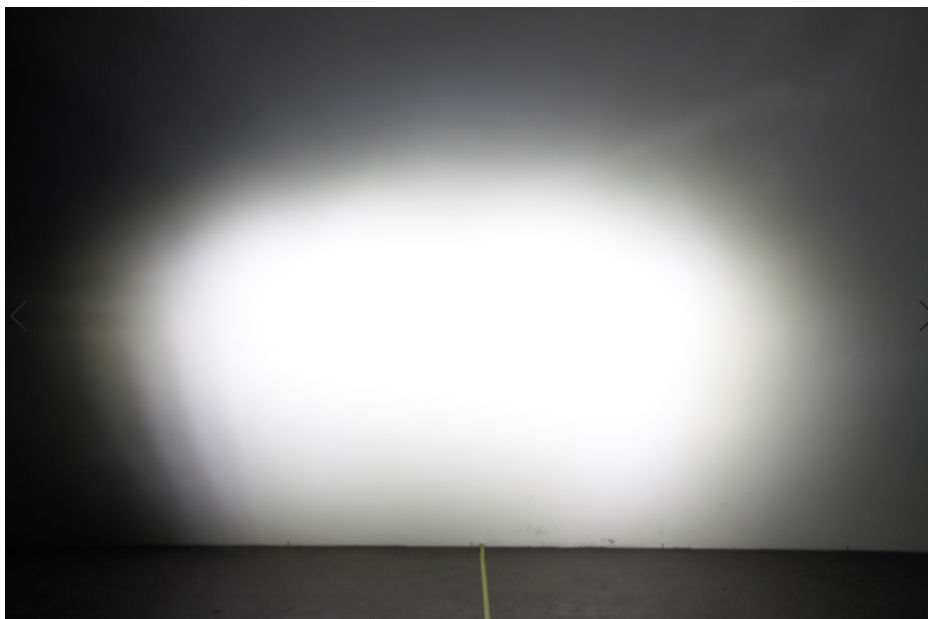
Nasledujúci obrázok popisuje prípravu na snímanie svietidla umiestnením svietidla na pevný statív, a pripojením na napájací zdroj.



Obr. 42. Uchytenie modulu DRL na podpornom statíve



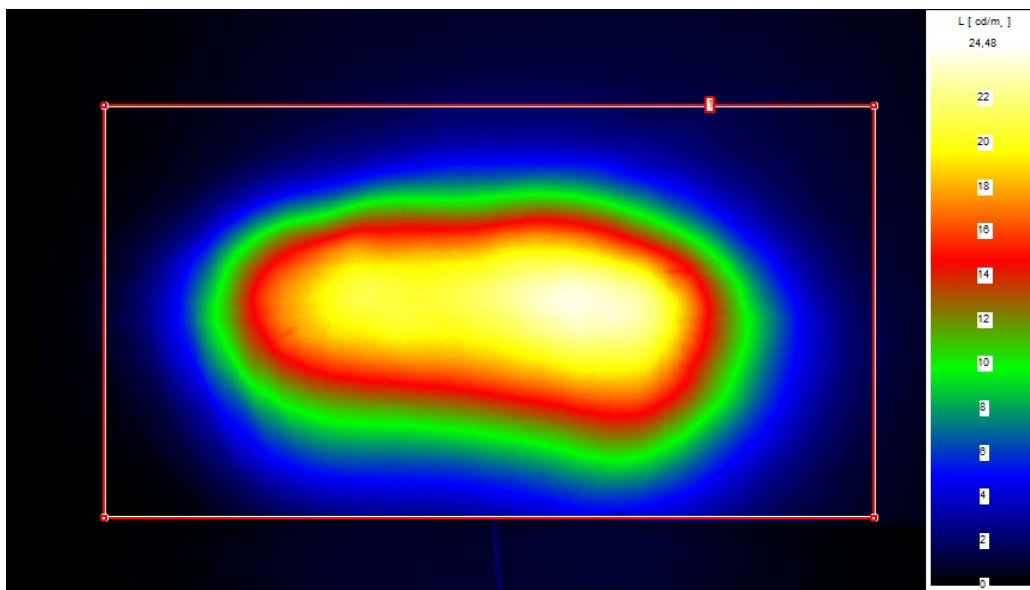
Obr. 43. Uchytenie modulu DRL na podpornom statíve pohľad na stenu na ktorú sa bude premietat' a ktorá bude snímaná.



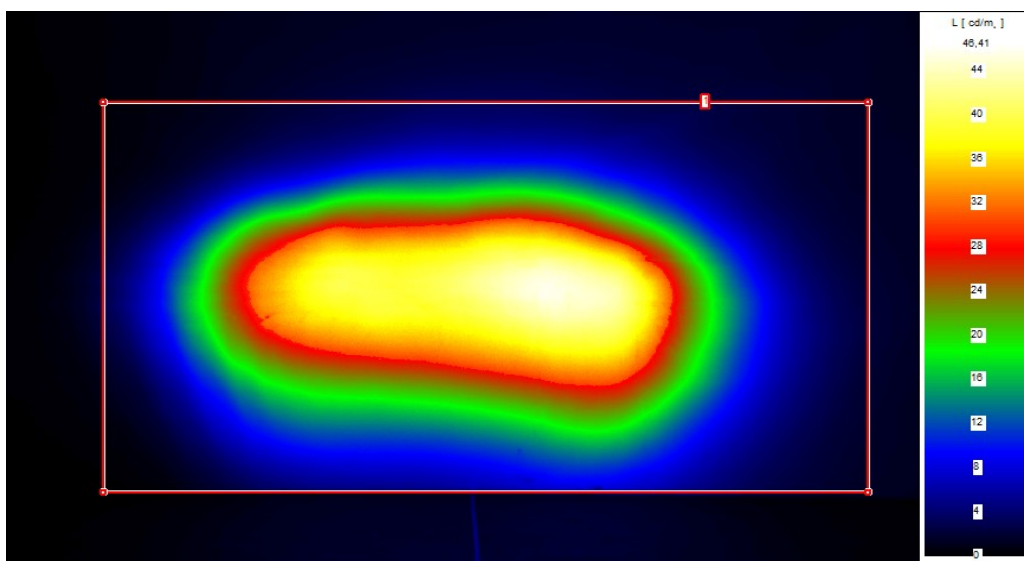
Obr. 44. Snímka svietidla DRL z 3,5m pri napätí 12V

Celkovo bolo vytvorených niekoľko snímok. Obrázok 34 je ukážka ako vyzeral zaostrený snímok zo vzdialenosti 3,5m s parametrami snímku ISO-100, clonové číslo F/4 s časom expozície 0,6s. Jedná sa teda o snímok kedy fotoaparát sníma v hodnote expozície +2EV, nasnímané sú maximálne hodnoty jasů. Ďalej sa fotilo pri napätí 13,5V, kde bol jas pre ľudského pozorovateľa skoro dvojnásobný. Snímok nejdem uvádzať keďže rozdiel by nebol poznať. Svietidlo sa namontovalo taktiež na goniofotometer vo vzdialenosti 10m od bielej steny, vyhotovilo sa niekoľko snímok pri napätí 12V a 13,5V. Snímky sa previedli do počítača s nainštalovaným softwarom LMK 2000 a urobil sa jasový rozbor. Nasledujúce obrázky znázorňujú jasové mapy pri rôznych vzdialenostiach a napätiach. Snímky a jasový rozbor vyhotovené zo vzdialenosti 10m sa nachádzajú v prílohe D.

Z nasledujúcich jasových máp je zrejmé, že pri nominálnom napätí 13,5V je jas skoro dvojnásobný. Tvrdenie ľudského pozorovateľa sa potvrdilo.



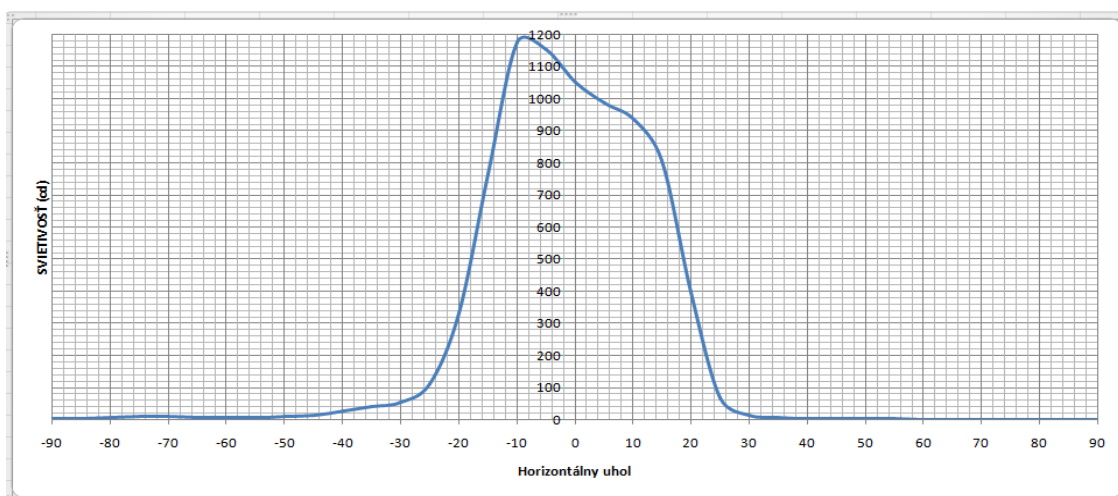
Obr. 45. Jasová mapa pri napätí 12V vzdialenosť 3,5m, $L_{max} = 24,48 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 8,097 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 0,052 \text{ cd/m}^2$



Obr. 46. Jasová mapa pri napätí 13,5V vzdialenosť 3,5m, $L_{max} = 46,41 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 14,69 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 0,19 \text{ cd/m}^2$

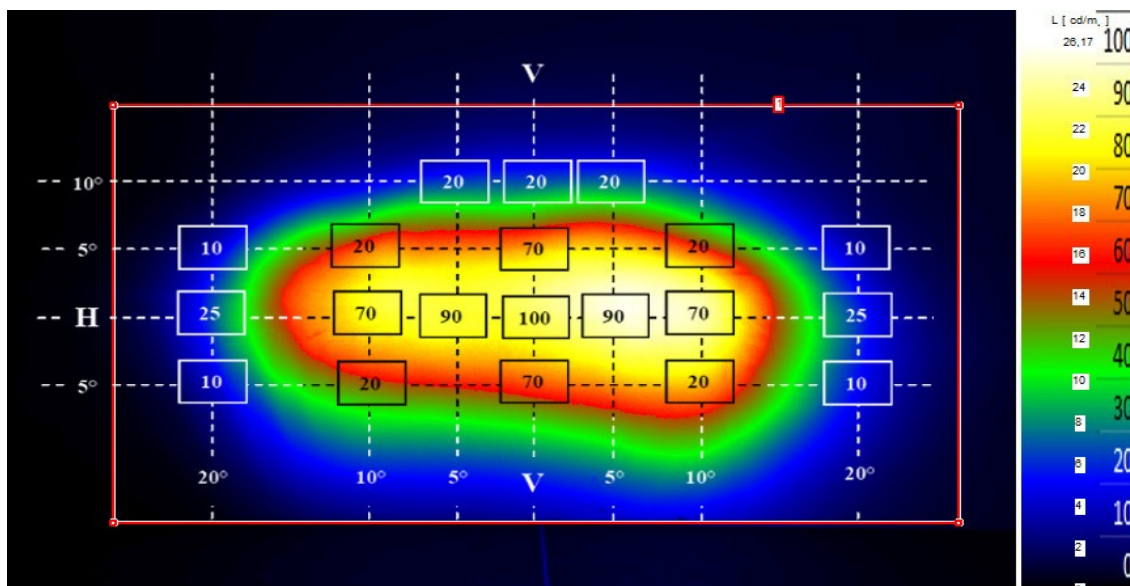
Nasledujúci graf vychádza z merania smerovej charakteristiky. Krivka je vynesená k hodnotám svietivosti vo vertikálnom uhle 0° . Na základe krivky viem určiť, v ktorých horizontálnych uhloch z merania je svietidlo tienené parabolou. Tento graf mi poslúži k preloženiu požadovaného rozloženia jasu z normy ECE 87. Maximálna svietivosť teda 100%

je 1177 cd. V jasovej mape je pridaná percentuálna škála, podľa ktorej je možné vyhodnotiť požadované a skutočné jasové rozloženie.



Graf. 1. Krivka svietivosti svietidla pri vertikálnom uhle 0° .

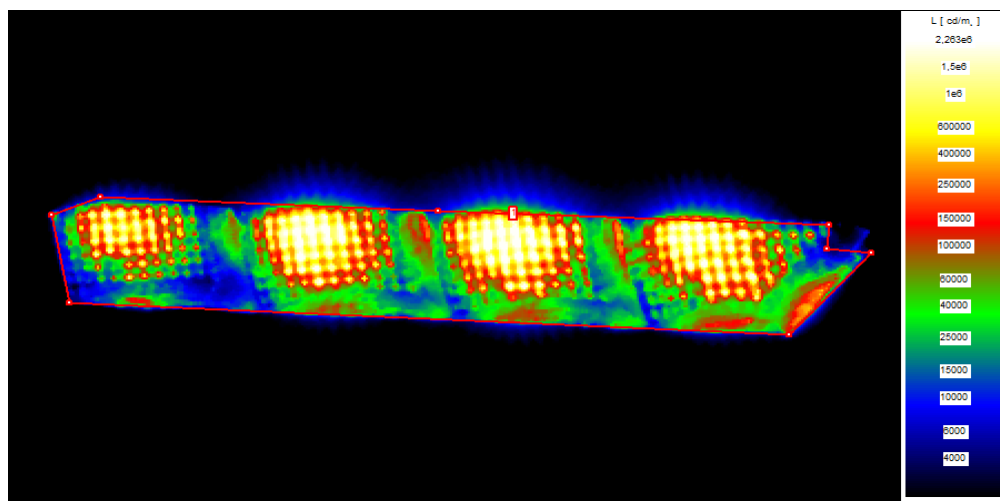
Z grafu je zrejmé, že pri horizontálnom uhle 25° je už svietidlo tienené a svietivosť je len 50 cd. To je 4,24% z maximálnej svietivosti. Z tohto poznatku môžeme pristúpiť k preloženiu požadovanej jasovej siete z normy ECE 87. Z jasovej mapy vyhotovenej pri napájaní 12V môžeme tvrdiť, že tmavomodrá oblasť prislúcha jasom o hodnote 2 cd/m^2 . Táto hodnota je 7,64% z maximálneho jasú. Požadovanú jasovú sieť teda umiestním do jasovej mapy nasledujúco.



Obr. 47. Jasová snímka 12V s preloženým rozložením jasú podľa normy

Z jasovej mapy s preloženou jasovou sieťou možno vidieť, že svietidlo DRL sústreď maximum jasú do horizontálneho uhlu 7° . Tento poznatok je zrejmý aj pri smerovej charakteristike. Homogenita vyžarovaného svetla podľa normy ECE 87 nebola splnená. Svietidlo by malo vyžarovať maximum svojho jasú práve na optický stred. Z jasovej mapy môžem tvrdiť, že svietidlo nie celkom zodpovedá požiadavku. Veľký rozdiel požiadavku a reálneho rozloženia jasú je vidieť vo vertikálnych uhloch 5° . Tu je požiadavka na jas len 20% z maxima jasú, reálne svietidlo v tejto oblasti vyžaruje až o 25% viac.

Okrem jasových máp som vyhotovil aj snímok svietidla priamo. Vzďialenosť od svietidla v tomto prípade bola volená s ohľadom na rozmery na 1,5m. Vzďialenosť je postačujúca, v prípade väčšej vzďialenosť by bola nutnosť optického zoom-u. Napájanie svietidla bolo 13,5V teda dovolené maximum. Snímok sa vyhotovil s parametrami ISO-200 a clonovým číslom F/22, rýchlosti uzávierok boli 1/4000s, 1/1250s a 1/320s. Takto vyhotovené snímky sa previedli taktiež do obslužného počítača. Oblasť, ktorá sa mala vyhodnotiť, sa orezala na tvar svietidla. Z výslednej jasovej mapy môžem vidieť, že jas je rozložený takmer rovnomerne na každej z faziet. Prvá parabola na snímke svieti akoby slabšie. To bolo už pozorovateľné aj ľudským okom. Prvá parabola mala aj rozdielnu farbu. Tento jav bol spôsobený pravdepodobne starnutím a opotrebovaním LED čipu. Na svietidle sa v minulosti robili rôzne merania a taktiež to môže byť dôsledok zmeny farby. Reálna jasová snímka sa nachádza v prílohe E.



Obr. 48. Priama jasová mapa z blízkej vzďialenosťi pri napätí 13,5V $L_{max} = 2260000 \text{ cd/m}^2$, $L_{priemer} = 301900 \text{ cd/m}^2$, $L_{min} = 1377 \text{ cd/m}^2$

6 Záver

Cieľom mojej diplomovej práce bolo navrhnúť procedúru merania a vyhodnotenia parametrov svietidiel pomocou zadaných meracích prístrojov. Spektroradiometer OL 770 v kombinácii s rôznymi prípravkami dokáže zmerať takmer všetky parametre svietidla. V mojej práci som sa venoval meraniu pomocou integračnej gule a pokúsil sa získať všetky možné údaje o zvolenom svietidle. Postupy v kapitole procedúra sú aplikovateľné na akékoľvek svietidlo za podmienky úpravy parametrov merania.

V prvej kapitole popísal rozdiely medzi fotometrickými a radiometrickými veličinami. Oboznámil som sa základom fungovania fotočlánku. Popísal som aké sú princípy merania základných svetelno-technických veličín. Bol uvedený príklad prístrojov, ktoré sú určené ku konkrétnemu meraniu veličín.

V druhej kapitole sa venujem spektroradiometru od výrobcu Gooch & Housego. Tento prístroj mi stručne popísal pán Ing. Kunčický, ktorý na ňom už spravil už veľa meraní. Dostal som návody od prístroja v anglickom jazyku. Bolo potrebné návody prejsť a naštudovať funkcie prístroja. Návod je veľmi obsiahly, tak ako možnosti s týmto multikanálovým spektroradiometrom. V mojej práci som stručne spomenul aké sú možnosti s týmto prístrojom.

Tretia kapitola sa venuje popisu goniofotometra vo všeobecnosti. Funkcia prístroja je zrejmá. Prístroj ma za úlohu otáčať svietidlom v presne definovaných uhloch s definovaným krokom.

Vo štvrtej kapitole sa dostávam k jadrú problému. Mojou úlohou bolo pomocou prístrojov spektroradiometer a goniofotometer pripraviť vhodnú procedúru merania svietidiel. Samotná vytvorená procedúra je vhodná pre väčšinu svietidiel. Základom pri návrhu osvetľovacej sústavy je poznať smerové charakteristiky svietidiel. Takáto smerová charakteristika je poskytovaná väčšinou známych výrobcov svietidiel, ktoré sú dostupné pre bežného zákazníka. Keďže sa jednalo o svietidlo pre automobil, vedel som, že takéto svietidlo musí podliehať určitým normám. Naštudovaním normy som pristúpil k návrhu procedúry.

Štandardne sa smerová charakteristika meria v rozsahu 180° v horizontálnom aj vertikálnom smere. V mojom prípade som volil na základe svietidla špecifické uhly. Zmerala sa smerová charakteristika v celom rozsahu horizontálneho smeru. Vo vertikálnom smere sa meralo do maximálne 40° . Väčšie uhly by bolo zbytočné merať, keďže svietidlo je tienené tvarom paraboly. Krok, ktorý bol zvolený, bol veľmi veľký. V prípade ďalšieho merania by som

zvolil menší krok goniofotometra napríklad 2° . Meranie bude prebiehať dlhšie, no s väčšou presnosťou. Krok goniofotometra mal vplyv na čistotu krivky v polárnych súradniciach. Spektroradiometer popri meraní svietivosti zmeral aj teplotu chromatičnosti a taktiež spektrálne vyžarovanie svietidla. Všetky tieto údaje som mohol porovnať s normou ECE 87, ktorá ich uvádzala. Problémom pri meraní bola čistota miestnosti. V mojom prípade sa v miestnosti nachádzalo množstvo predmetov a kartónov. Všetko sú to predmety, ktoré pri nízkych úrovniach svietivosti ovplyvňujú tvar smerovej charakteristiky. Ďalším problémom bolo zle zvolené napájacie napätie. Svietidlo malo byť napájané 13,5V a nie 12V. Ako sa ukázalo pri jasovej analýze, pri 13,5V malo svietidlo skoro dvojnásobný jas ľudským pozorovaním. Zo snímok je maximálny jas pri 13,5V o 1,89 krát väčší. Napätie však nemalo vplyv na tvar smerovej charakteristiky. Ovplyvnené boli len hodnoty svietivosti.

Po dohode s mojím vedúcim diplomovej práce sa urobila aj jasová snímka svietidla. Svietidlo sa snímalo zo vzdialenosti 3,5m a z 10m. Rozbor snímok sa spravil pre oba prípady. Svietidlo sa snímalo aj priamo, z dôvodu analýzy rozloženia svetelného toku po fazetovom reflektore.

V piatej kapitole sa venujem vyhodnoteniu výsledkov. Navrhnutým spôsobom merania som zmeral smerovú charakteristiku svietidla DRL. Údaje som mohol porovnať s normou ECE 87. Svietidlo spĺňa základnú požiadavku a to bol uhol horizontálneho vyžarovania 20° do oboch smerov. To znamená, že svietidlo je viditeľné pod žiadaným uhlom. Taktiež spĺňa požiadavku na hodnotu minimálnej svietivosti 200 cd pod uhlom 20° . Pod uhlom 25° už nedosahuje svietivosť ani 100 cd. Získaný tvar smerovej charakteristiky je však nepresný. Nebol správne zvolený krok merania a taktiež vertikálne uhly mali 10° krok. Opakované meranie z časových dôvodov nebolo možné. V prípade opakovaného merania by som volil menší krok goniofotometra a taktiež iné vertikálne uhly. Takto by som získal hladší priebeh krivky v polárnom grafe. Teplota chromatičnosti sa zistila v rozmedzí 4200 K do 5900 K. Hodnoty zodpovedajú bielemu svetlu. Namieraná krivka spektrálneho vyžarovania zodpovedá typickému tvaru bielej LED. V prípade merania spektrálneho vyžarovania svietidla by bolo vhodné zmerať spektrum aj pri zvýšenom napätí 13,5V. Takéto meranie však neprebehlo.

Jasovými snímkami sme získali tvar vyžarovaného svetelného toku svietidlom. V prípade snímok zo vzdialenosti 3,5m sme získali celý tvar vyžarovaného toku. Tvar sa na základe jasových máp porovnal s požiadavkou rozloženia svietivosti udávanou v norme ECE 87. Túto požiadavku čiastočne svietidlo spĺňa. V prípade snímok zo vzdialenosti 10m je osvietená takmer celá stena. Jasová mapa z 10m sa nachádza v prílohách.

Použitá literatúra

- [1] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] Fotometria. *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Fotometria_\(astronómia\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Fotometria_(astronómia))
- [3] Základy svetelnej techniky. *Svetlo* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-3--15576>
- [4] Radiometry and Photometry. *Radiometry and Photometry* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20130313095139/http://fp.optics.arizona.edu/Palmer/rpfaq/rpfaq.htm>
- [5] Konica Minolta. *Radiometry, Spectroradiometry and Photometry* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.us/learning-center/light-measurement/radiometry-spectroradiometry-photometry/>
- [6] Encyklopedie fyziky. *Fotometrické veličiny* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [7] Wikiskripta. *Radiometrické a fotometrické veličiny* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Radiometrick%C3%A9_a_fotometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny
- [8] *Laboratorne úlohy zo svetelnej a osvetľovacej úlohy* [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: http://www.svetelnalaborator.cz/files/sylabus/01_Mereni_barevnych_souradnic_svetla_pomoci_Donaldsonova_kolorimetru.pdf
- [9] *Portál pre odborné publikovanie: Teplota chromatičnosti a možnosti jeho výpočtu* [online]. Posterus, 2011 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=12198&output=pdf>
- [10] prof. Ing. JiříHabel, DrSc.,. *Základy svetelnej techniky 4: Základy fotometrie 2* [online]. Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze, 2009 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15661>
- [11] *Photometricarticles: How to understandphotometricpolaridiagrams* [online]. OwenRansen [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <http://www.ransen.com/photometric/understanding-photometric-polar-diagrams.htm>

- [12] FOURNIER, F.: *FREEFORM REFLECTOR DESIGN WITH EXTENDED SOURCES* B.S. Institut d'Optique, University of Central Florida, 2008. Jannick P. Rolland.
- [13] KUNČICKÝ, Jakub. *Měření vyzařovacích charakteristik pomocí spektrometru*, VŠB-TUO, 2017 [cit. 2019-04-24]. Vysoká škola báňská.
- [14] HABEL, Jiří a Petr ŽÁK. *Elektrické světlo 1*. České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [15] HABEL, Jiří. *Základy fotometrie (2. část)* [online]. Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze, 2009 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15661>
- [16] *Svetlo-Pristroje: Pristrojové vybavení laboratorní světelné techniky* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/WikiPrint.jsp?page=SvetloPristroje>
- [17] HABEL, Jiří. *Základy fotometrie (2. část)* [online]. Elektrotechnická fakulta ČVUT V Praze, 2009 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/zaklady-svetelne-techniky-4--15601>
- [18] *Manuály Gooch&Housego: OL Series 770*. AD. Orlando USA, 2015.
- [19] BÁLSKY, Marek a Jiří HABEL. *Modernizace goniofotometru: Svetlo - časopis pro světelnou techniku*, FFC Public, 2009, ročník 12, sv. 4
- [20] *Garage ceiling lighting: Light distribution* [online]. 2015 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://lyckligiskogen.se/garage_lighting/
- [21] *Bega: About Light and Illumination* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.bega.com/en/knowledge/about-light-and-illumination/15-lichtstaerkeverteilungskurven-ausleuchtungs-isoluxdiagramme/>
- [22] PLCH, Jiří. *Světelná Technika v praxi*. Lohenická 111, 190 17 Praha 9 - Vinor: IN-EL, spol., 1999. ISBN 80-86230-09-0.
- [23] BAXANT, Petr. *Světelná Technika*. Vysoké učení technické v Brně, 2013.
- [24] *Svítilna a světelné přístroje., Současnost a budoucnost automobilového osvětlení*, [online], Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44730.pdf>
- [25] REGULATION NO.87. *Uniform provisions concerning the approval of daytime running lamps for power-driven vehicles: ECE 87*. Supplement 12. United Nations, 2008.
- [26] *Prístroje pre dlhodobé meranie nízkych úrovni osvetlenosti a jasů. Svetelná technika: Měření a výpočty* [online]. 2010 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/pristroje-pro-dlouhodobemereni-nizkych-urovni-osvetlenosti-a-jasu--15531>
- [27] *Manuály E-photo: Fotoškola* [online]. 2012 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.ephoto.sk/fotoskola/>

Zoznam príloh

Príloha A: Výsledok z kontrolného merania smerovej charakteristiky

Príloha B: Priebeh CCT pre celé meranie

Príloha C: Typický tvar spektrálnej charakteristiky LED zdroja

Príloha D: Snímky a jasový rozbor DRL z 10m

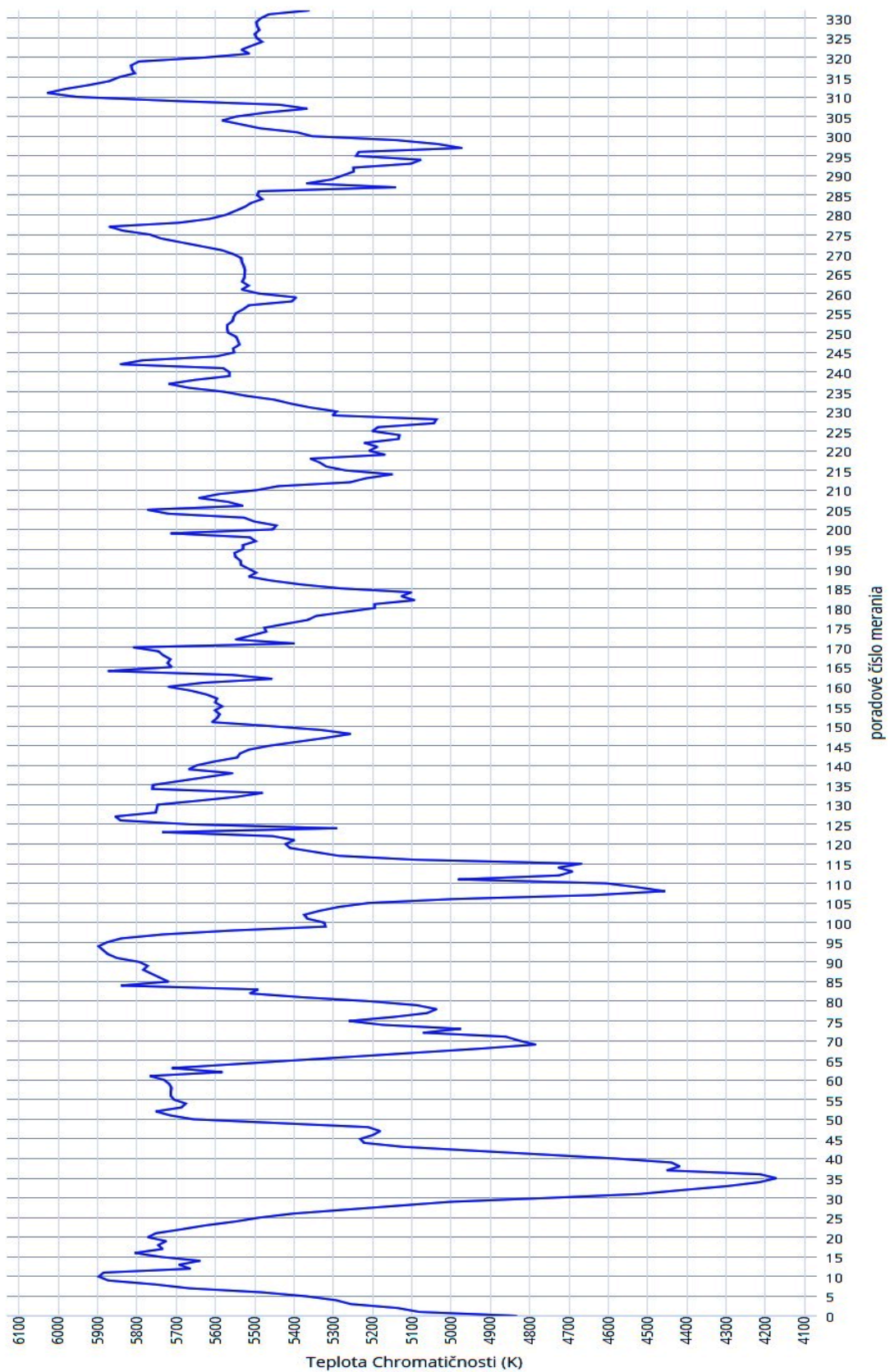
Príloha E: Priame snímky svietidla DRL z blízkej vzdialenosti

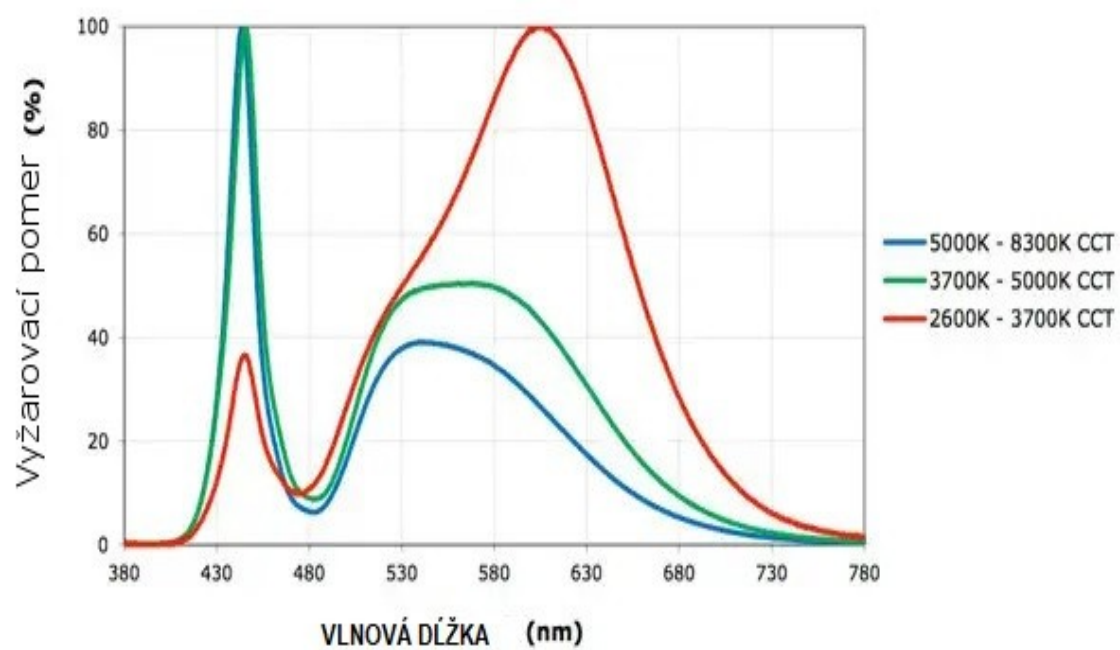
Prílohy na CD

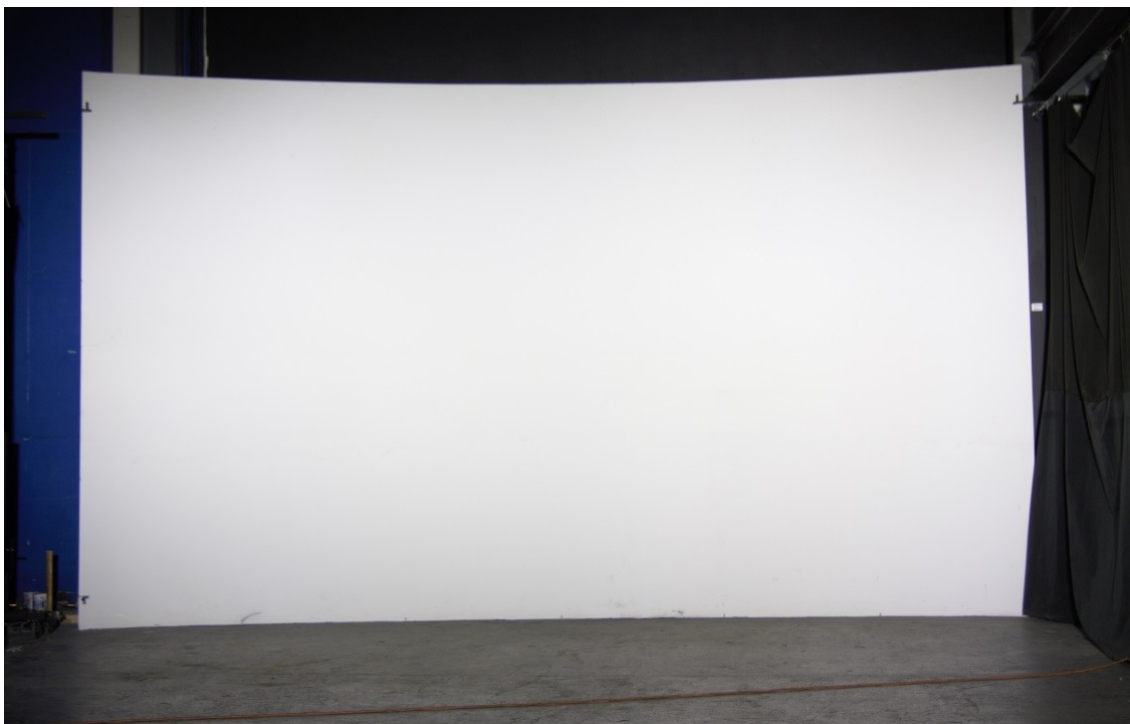
Príloha 1: Kompletné meranie smerovej charakteristiky svietidla v súbore EXCEL

Príloha A

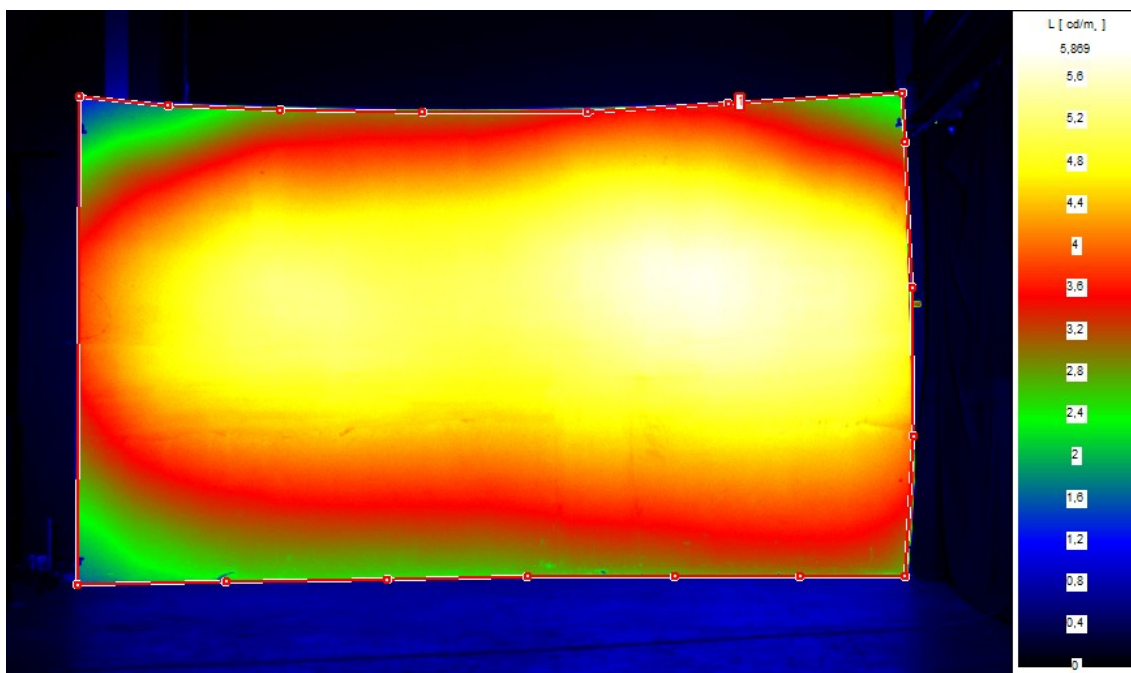
Osa H	Osa V	intenzita/cd	CCT
-2	-2	1240,993932	5737,584
-1,5	-2	1227,804092	5733,175
-1	-2	1213,90221	5727,672
-0,5	-2	1200,613788	5719,21
0	-2	1187,587419	5714,603
0,5	-2	1176,398453	5718,307
1	-2	1166,035741	5722,317
1,5	-2	1156,78695	5722,723
2	-2	1147,324642	5720,435
2	-1,5	1121,803931	5706,699
1,5	-1,5	1130,960694	5711,143
1	-1,5	1139,490053	5711,639
0,5	-1,5	1148,745456	5708,475
0	-1,5	1159,26996	5705,361
-0,5	-1,5	1171,914557	5705,901
-1	-1,5	1184,873606	5714,851
-1,5	-1,5	1198,215059	5721,647
-2	-1,5	1211,69344	5727,565
-2	-1	1182,01223	5726,075
-1,5	-1	1168,82165	5720,292
-1	-1	1156,190586	5713,359
-0,5	-1	1143,407705	5711,164
0	-1	1131,565699	5703,922
0,5	-1	1121,209059	5708,04
1	-1	1111,461917	5712,124
1,5	-1	1102,727891	5708,715
2	-1	1094,270356	5705,463
2	-0,5	1065,768148	5715,043
1,5	-0,5	1073,330319	5717,915
1	-0,5	1081,94095	5718,465
0,5	-0,5	1091,282192	5715,328
0	-0,5	1101,649199	5713,723
-0,5	-0,5	1113,197453	5715,578
-1	-0,5	1124,871725	5719,705
-1,5	-0,5	1137,241328	5723,218
-2	-0,5	1149,151349	5726,215
-2	0	1115,475939	5727,416
-1,5	0	1104,795	5726,295
-1	0	1093,645459	5726,371
-0,5	0	1081,979144	5725,714
0	0	1070,406332	5725,977
0,5	0	1059,324256	5726,222
1	0	1049,999288	5728,362
1,5	0	1041,693603	5730,17
2	0	1033,99529	5730,909
2	0,5	999,9842811	5745,412
1,5	0,5	1007,796277	5741,678
1	0,5	1015,844996	5740,373
0,5	0,5	1025,646197	5738,914
0	0,5	1036,145248	5737,016
-0,5	0,5	1047,543047	5736,663
-1	0,5	1058,445579	5736,914
-1,5	0,5	1068,751922	5736,79
-2	0,5	1078,787232	5737,736
-2	1	1042,144765	5742,105
-1,5	1	1032,361476	5744,274
-1	1	1022,394839	5745,897
-0,5	1	1011,246204	5747,348







Snímka fotoaparátom Canon 350D v hodnote expozície 2 zo vzdialenosti 10m, napájanie 13,5V



Jasový rozbor snímky z 10m napájanie 13,5V

$$L_{\min} = 0,13\text{cd/m}^2 \quad L_{\text{priemer}} = 5,869 \text{ cd/m}^2 \quad L_{\max} = 4,275 \text{ cd/m}^2$$



Priama jasová snímka s hodnotami ISO-200, clonové číslo F/22,
hodnoty expozície 1/4000s, 1/1250s a 1/320s