

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

JASOVÉ SKENOVÁNÍ SVÍTIDEL A SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

BC. ONDŘEJ ŠEVČÍK

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Ondřej Ševčík

ID: 112060

Ročník: 2

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Jasové skenování svítidel a světelných zdrojů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Porovnejte konvenční a nekonvenční fotometrická měření v oblastech měření jasu a křivek svítivosti.
2. Definujte možné chyby při měření.
3. Navrhněte možný postup rekonstrukce křivek svítivosti pomocí plošného jasového skenování.
4. Návrh z bodu 3 se pokuste prakticky ověřit.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

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

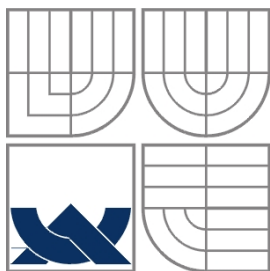
Bibliografická citace práce:

ŠEVČÍK, O. *Jasové skenování svítidel a světelných zdrojů*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2013, 74 stran.

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

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Škodovi, Ph.D, za odbornou metodickou pomoc a za to, že mi obětoval svůj čas při zpracování této diplomové práce. Díky patří též programátorovi Ing. Stanislavu Sumcovi, Ph.D., který přizpůsobil program LumiDISP tak, abych v něm mohl realizovat navržený postup. Také nemohu zapomenout poděkovat celé mé rodině, přátelům a především mé přítelkyni Lence Vincencové, za podporu během mého studia.

.....
Bc. Ondřej Ševčík



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

JASOVÉ SKENOVÁNÍ SVÍTIDEL A SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

LUMINANCE SCANNING OF LUMINAIRES AND LIGHT SOURCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. ONDŘEJ ŠEVČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN ŠKODA, Ph.D.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Práce se zabývá měřením křivek svítivosti světelných zdrojů a svítidel konvenčními a nekonvenčními metodami. Úvodní část práce je věnována popisu zrakového systému a základních fotometrických veličin.

Hlavní teoretická část je zaměřena na popis současných metod měření křivek svítivosti a nových metod měření pomocí jasového analyzátoru. Současně jsou pro jednotlivé metody uvedeny zdroje nejistot, které ovlivňují výsledky měření.

Těžiště práce spočívá v návrhu metodiky měření křivek svítivosti z jasových skenů svítidla a následném ověření tohoto postupu vlastním měřením. Dále bylo provedeno srovnání naměřených výsledků navrženým postupem, s výsledky konvenčního měření na goniofotometru s luxmetrem.

KLÍČOVÁ SLOVA: svítivost; křivky svítivosti; goniofotometr; jasový analyzátor; digitální zrcadlovka; jasové skenování svítidel;

ABSTRACT

The work deals with the measurement of luminance curves of light sources using conventional and unconventional methods. The introductory part is devoted to the description of the visual system and basic photometric quantities.

The main theoretical part is focused on the description of current methods of luminance curves measurement and new methods using the luminance analyzer. The uncertainty sources affecting the results are listed for each method at the same time.

The thesis focuses on design of methodology of measuring luminance curves using brightness scans of light source and subsequent verification of the measurement procedure. Furthermore, a comparison of the results, obtained by the proposed procedure and the results of conventional goniophotometer with luxmeter measurements, was made.

KEY WORDS: luminance; luminance curves; goniophotometer; brightness analyzer; DSLR Camera; luminance lights scanning

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	12
1 ÚVOD	14
2 CÍLE PRÁCE	15
3 ZRAK A VIDĚNÍ.....	16
3.1 OPTICKÉ ZÁŘENÍ.....	16
3.1.1 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ	16
3.1.2 VIDITELNÉ ZÁŘENÍ.....	17
3.1.3 ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ	17
3.2 VIDĚNÍ.....	17
3.2.1 MEZNÍ STAVY ZRAKU	18
3.3 OSLNĚNÍ.....	19
4 ZÁKLADNÍ VELIČINY A JEDNOTKY SVĚTELNÉ TECHNIKY	21
4.1 SVĚTELNÝ TOK.....	22
4.2 PROSTOROVÝ ÚHEL	22
4.3 SVÍTIVOST.....	23
4.4 OSVĚTLENOST	23
4.5 JAS.....	24
4.6 SVĚTLENÍ.....	25
5 KŘIVKY SVÍTIVOSTI	26
6 METODY MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI.....	29
6.1 KONVENČNÍ METODY MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI	29
6.1.1 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI NA FOTOMETRICKÉ LAVICI.....	29
6.1.2 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI NA GONIOFOTOMETRU S FOTOMETREM	31
6.1.3 VÝPOČET A ZDROJE NEJISTOT PŘI MĚŘENÍ KONVENČNÍMI METODAMI.....	33
6.2 NEKONVENČNÍ METODY MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI	37
6.2.1 JASOVÁ ANALÝZA MĚŘENÉHO ZDROJE (SVÍTIDLA) S VYUŽITÍM DIGITÁLNÍ FOTOGRAFIE	37
6.2.2 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI POMOCÍ ODRAZU SVĚTLA OD SROVNÁVACÍ ROVINY.....	45
6.2.3 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI SVÍTIDLA POMOCÍ JASOVÉHO SKENOVÁNÍ	48
6.2.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ NEKONVENČNÍCH METOD MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI	52
6.3 SROVNÁNÍ KONVENČNÍ A NEKONVENČNÍ METODY.....	55
7 SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ	56
7.1 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI NA GONIOFOTOMETRU S OTOČNÝM SVÍTIDLEM A PEVNÝM FOTOMETREM	56
7.2 MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI POMOCÍ JASOVÝCH SKENŮ SVÍTIDLA	62

7.3 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ KONVENČNÍ A NEKONVENČNÍ METODY MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI SVÍTIDLA	69
8 ZÁVĚR.....	71
8.1 ZÁVĚRY PRÁCE A JEJÍ PŘÍNOS.....	71
8.2 NÁVRH DALŠÍHO POSTUPU	72
POUŽITÁ LITERATURA	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1 Spektrum elektromagnetického záření [3]</i>	16
<i>Obr. 3-2 Struktura oka [4]</i>	17
<i>Obr. 4-1 Průběh poměrné spektrální citlivosti oka normálního fotometrického pozorovatele[4]</i> 21	
<i>Obr. 4-2 Grafické znázornění prostorového úhlu [2]</i>	23
<i>Obr. 4-3 Grafické znázornění jasu [2]</i>	25
<i>Obr. 5-1 Příklad křivek svítivosti v jedné z polorovin soustavy C-γ [5]</i>	26
<i>Obr. 5-2 Fotometrická soustava rovin A - α, B - β, C - γ [5]</i>	27
<i>Obr. 5-3 Příklad izokandelového diagramu [2]</i>	28
<i>Obr. 5-4 Tvary křivek svítivosti svítidel [6]</i>	28
<i>Obr. 6-1 Schematické uspořádání subjektivního fotometru na fotometrické lavici [2]</i>	30
<i>Obr. 6-2 Uspořádání stínících clon na fotometrické lavici [2]</i>	30
<i>Obr. 6-3 Uspořádání goniofotometru s otočným zdrojem a pevným fotometrem [9]</i>	31
<i>Obr. 6-4 Konstrukční řešení goniofotometru s pevně umístěným zdrojem a otočným fotometrem [7]</i>	32
<i>Obr. 6-5 Princip modernizovaného goniofotometru s pevně umístěným zdrojem a otočným fotometrem [10]</i>	32
<i>Obr. 6-6 Konstrukční řešení goniofotometru s otočným zrcadlovým systémem [7]</i>	33
<i>Obr. 6-7 Postup při jasové analýze světelného zdroje (svítidla)</i>	37
<i>Obr. 6-8 Příčný řez digitální zrcadlovkou [15]</i>	38
<i>Obr. 6-9 a) Soustava barev RGB b) Soustava barev CMY c) Interpolace v Bajerově masce [21]</i>	39
<i>Obr. 6-10 Architektura CCD a CMOS snímače [27]</i>	41
<i>Obr. 6-11 Ukládání dat ze snímače do obrazových formátů RAW, JPEG a TIFF [17]</i>	43
<i>Obr. 6-12 Obsah kufříku jasového analyzátoru LumiDISP - LDA[20]</i>	44
<i>Obr. 6-13 Geometrické parametry bodu P [20]</i>	46
<i>Obr. 6-14 Geometrické uspořádání fotoaparátu, srovnávací plochy a měřeného zdroje (svítidla) [20]</i>	46
<i>Obr. 6-15 Geometrické uspořádání snímaného svítidla a objektivu digitální zrcadlovky</i>	49
<i>Obr. 6-16 Stanovení souřadnic normály plošky A</i>	50
<i>Obr. 6-17 3D křivka svítivosti výkonové LED a znázornění paprskového modelu LED [25]</i>	51
<i>Obr. 7-1 Schéma zapojení a uspořádání pracoviště pro měření křivek svítivosti na goniofotometru s otočným svítidlem a pevným fotometrem</i>	57
<i>Obr. 7-2 3D křivka svítivosti měřeného svítidla změřená na goniofotometru pomocí luxmetru</i> ...	60

<i>Obr. 7-3 Polární křivka svítivosti měřeného svítidla změřená na goniofotometru pomocí luxmetru.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-4 Schéma zapojení a uspořádání pracoviště pro měření křivek svítivosti pomocí jasového skenování svítidla.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 7-5 Pořízený snímek svítidla.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-6 Pořízený snímek převedený na jasový kanál s orámováním svítidla.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 7-7 3D křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestrojená z průměrných hodnot jasu celkové světelné plochy svítidla.</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 7-8 Polární křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestrojená z průměrných hodnot jasu celkové světelné plochy svítidla.</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 7-9 3D křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestrojená z průměrných hodnot jasu jednotlivých plošek světelné plochy svítidla.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 7-10 Polární křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestrojená z průměrných hodnot jasu jednotlivých plošek světelné plochy svítidla.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 7-11 Odlišnost křivek svítivosti zkoumaného svítidla měřených v různých fotometrických vzdálenostech pomocí konvenční a nekonvenční metody.....</i>	<i>70</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1 Rozdělení svítidel podle tvaru křivky svítivosti [2].....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 6-1 Hlavní zdroje chyb při měření křivek svítivosti svítidla (zdroje) na goniofotometru [10].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 6-2 Srovnání CCD a CMOS snímačů[17]</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 6-3 Datová náročnost a počet barev pro různé barevné hloubky [22].....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6-4 Technické parametry digitální jednobarevné zrcadlovky Nikon D7000 [24].....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 6-5 Technické parametry objektivu AF-S DX NIKKOR 18-105 f/3,5-5,6G ED VR [24].....</i>	<i>44</i>
<i>Tab. 6-6 Srovnání konvenční a nekonvenční metody měření křivek svítivosti</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 7-1 Stanovení nejistoty digitálního luxmetru Radio Lux 111 [29].....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 7-2 Stanovení nejistoty jasového analyzátoru LumiDISP - LDA.....</i>	<i>65</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol, zkratka	Vysvětlivka	Jednotka
A	plocha	m ²
A, B, C	systém rovin	-
a, b, c, d	exponenty pro výpočet indexu oslnění UGR	-
A/D	převodník analogového signálu na digitální	-
C	clona	-
CCD	snímač s vázaným nábojem	-
CMOS	snímač řízený elektrickým polem	-
CMY	systém míchání barev	-
cos	kosinus	-
DIN	označení německé normy	-
DSLR	digitální zrcadlovka	-
E	osvětlenost	lx
f	kmitočet	Hz
F	fotočlánek	-
G	činitel oslnění	-
H	hlavice	-
H	světlení	lm·m ⁻²
HDR	vysoký dynamický rozsah	-
I	svítivost	cd
IR	infračervené záření	-
ISO	citlivost snímače	-
JPEG	formát obrazu	-
k	koeficient rozšíření	-
K	kontrast jasu	-
l	vzdálenost	m
L	jas	cd·m ⁻²
LED	elektroluminiscenční dioda	-
log	logaritmus	-
m, n, i	počet	-
N, Q	symboly označující vzdálenost	m
p	činitel polohy	-

r	vzdálenost plošky od světelného středu	m
$r_{d(s)}$	míra zastoupení difuzní (zrcadlové) složky	m
R	rameno goniofotometru	-
R	vzdálenost plošky od objektivu	m
RAW	formát obrazu	-
RGB	system míchání barev	-
Si	chemická značka křemíku	-
SiO ₂	chemická značka oxidu křemičitého	-
TIFF	formát obrazu	-
u	označení dílčí nejistoty měření	%
U	označení rozšířené nejistoty měření	%
UGR	index oslnění	-
USB	univerzální sériová sběrnice	-
UV	ultrafialové záření	-
v	kmitočet	Hz
X	označení neznámé veličiny	-
x, y, z	souřadnice	-
Z	zdroj	-
α	odklon odraženého paprsku, azimut	°
α	činitel pohltivosti	-
α, β, γ	úhel	°, rad
β	odklon paprsku od normály plošky	°
γ, c	natočení svítidla	°
δ	obecná odchylka	°
η	účinnost	-
Θ, u	úhel dopadu paprsku do objektivu	°
λ	vlnová délka	m
π	matematická konstanta	-
ρ	činitel odrazu	-
τ	činitel prostupu	-
Φ	světelný tok	lm
Ω	prostorový úhel	sr

1 ÚVOD

Světlo zásadně ovlivňuje zrakové vnímání člověka a přispívá k vytvoření celkové duševní pohody lidí. Zrakový orgán je pro člověka velmi důležitý, neboť pomocí zraku získává asi 80 - 90% informací o okolním prostředí.[1] Nejpřirozenějším zdrojem světla je Slunce, které vytváří i neoptimálnější podmínky pro zrakové vnímání. Ovšem působení tohoto zdroje světla je v průběhu dne vymezeno určitým časovým intervalem. Proto je v místech kam sluneční paprsky nepronikají a v čase, kdy je tma, využíváno uměle vytvořeného osvětlení.

Světelné záření v člověku vyvolává fyziologické ale i psychologické reakce, které jsou ovlivňovány jak množstvím světelné energie, tak jejím prostorovým a časovým rozdělením, druhem světla a jeho barvou.[1] Tyto požadavky na umělé osvětlení mají zásadní vliv na činnosti člověka a jeho výkonnost.

Jelikož se neustále zvyšují kvalitativní a kvantitativní požadavky na umělé osvětlení musí být jak návrh, tak i realizace osvětlovací soustavy provedena zvláště pečlivě. V současné době je projektování osvětlovacích soustav výhradně počítačovou záležitostí. Projektant se při návrhu osvětlení drží stanovených norem, které definují požadavky na osvětlení pro vykonávané zrakové činnosti člověka v daném prostoru. Programy většinou umožňují přímou 3D vizualizaci prostoru s rozmístěnými svítidly a rozložení jejich světla. Informace o světelných parametrech zdrojů a svítidel jsou načítány z databáze s možností výběru výrobce. Jedním z údajů, uloženém v raydatech je i směrové rozložení svítivosti světelného zdroje (svítidla), které se využívá při výpočtu osvětlení srovnávací roviny. Přesné měření křivek svítivosti má své opodstatnění zejména pro tyto výpočty a návrhy osvětlení.

Klasické měření křivek svítivosti na gonifotometru s fotometrem je známé a zavedené řadu let a i v současnosti je prioritně využíváné. Ovšem křivky svítivosti zaznamenané touto metodou, neodpovídají skutečným směrovým charakteristikám v návrhu osvětlovacích soustav, což vnáší odchylku do výsledného výpočtu osvětlení na srovnávací rovině. Novou nekonvenční metodou měření křivek svítivosti, která by mohla nahradit stávající metodu měření křivek svítivosti na gonifotometru je jejich měření pomocí jasových skenů. Tato metodika, která vychází z měření jasů pomocí jasového analyzátoru, má vysoký potenciál, neboť odstraňuje zmíněnou odchylku díky své nezávislosti na fotometrické vzdálenosti. Změřená a uložená křivka svítivosti v raydatech může být přepočítána na konkrétní vzdálenost mezi světelným zdrojem a srovnávací rovinou, což je příznivé, jelikož křivka svítivosti má poté tvar, úměrný konkrétní vzdálenosti a následný výpočet osvětlenosti srovnávací roviny je mnohem přesnější.

Díky této nové metodě by se projektování osvětlovacích soustav mohlo opět o kousek přiblížit k reálnému popisu distribuce osvětlení. Otázkou tedy je, zda se zaměřit na vývoj a zdokonalení nekonvenční metody měření směrových charakteristik a stanovit ji jako standard, nebo zůstat u konvenčního měření, které už výrazné zpřesnění výsledků nepřinese.

2 CÍLE PRÁCE

Jelikož je světlo elektromagnetické záření, které vzniká ve světelném zdroji a následně jej detekuje lidský zrak, je nezbytné mít představu jak tyto generátory a přijímače světla pracují. Proto bude v úvodní kapitole stručně popsán zrakový systém a jeho funkce. Dále budou v této kapitole uvedeny mezní stavy zraku a druhy oslnění.

Protože svítivost není přímo měřenou fotometrickou veličinou, ale je získána výpočtem z osvětlenosti či z jasů, pak v případě nekonvenční metody, bude v práci uveden teoretický úvod týkající se základních fotometrických veličin a jejich možných výpočtů a způsobů měření.

Mezi nejčastěji měřené fotometrické veličiny u světelných zdrojů a svítidel je svítivost. Vynesení svítivosti do tzv. křivek svítivosti získáme informaci o rozložení světla distribuovaného z každého světelného zdroje či svítidla. Tato křivka svítivosti se používá při návrhu osvětlovacích soustav a její správné změření má tedy vliv i na výsledný návrh osvětlení prostorů. Proto je důležité tuto fotometrickou veličinu měřit správně a pomocí vhodných metod, které následný výpočet osvětlení srovnávací plochy nezkreslují.

V práci je proveden rozbor konvenčních a nekonvenčních metod měření křivek svítivosti. Konvenční metodou je míněno měření na goniofotometru s fotometrem a nekonvenční metodu představuje měření křivek svítivosti pomocí jasového analyzátoru. Každá z metod je zatížena určitým procentem nejistoty měření, a proto jsou v této práci uvedeny i hlavní zdroje nejistot, které mají zásadní vliv na výsledky měření.

Hlavním cílem práce je návrh metodiky k měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů. Tato metoda by měla představovat nový přístup k směrovému rozložení svítivosti v prostoru. Protože metoda vychází z jasové analýzy, kde měřicím přístrojem je digitální zrcadlovka, bude v práci uveden princip a hlavní části jasového analyzátoru.

Praktická část bude zaměřena zejména na ověření navržené metody měření křivek svítivosti. Dále zde bude provedeno srovnávací měření konvenční a navržené nekonvenční metody a následné vyhodnocení naměřených výsledků.

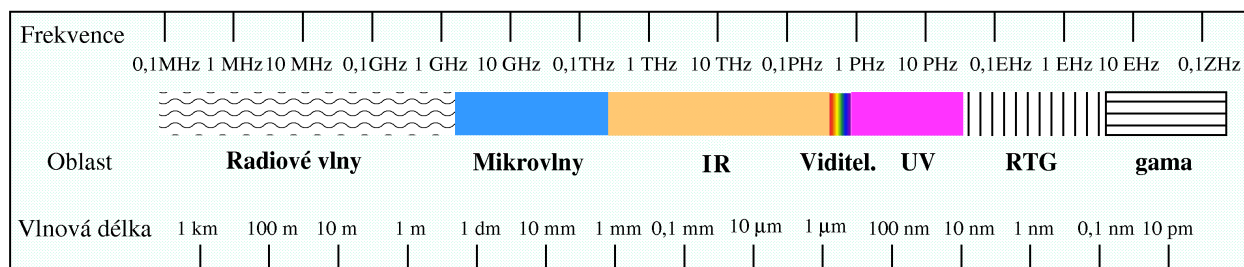
3 ZRAK A VIDĚNÍ

Světelné záření způsobuje fyziologické a psychologické reakce, jež jsou ovlivněny jak množstvím světelné energie, tak jejím prostorovým a časovým rozdělením, druhem světla a jeho barevnou jakostí.[1]

Pokud si uvědomíme jak velký má význam osvětlení a skutečnost, že světlo je důležitým činitelem ovlivňujícím estetické a psychické působení prostředí, obklopující člověka, dospějeme k závěru, že všichni, kteří navrhují, realizují a hodnotí osvětlovací soustavy, musí mít alespoň základní představu o fyziologii zraku a o vzájemném vztahu zrakového orgánu a osvětlení. Tento předpoklad je nezbytný k tomu, aby tito pracovníci mohli v praxi nacházet správná řešení, která jsou vždy určitým kompromisem mezi požadavky na dosažení zrakové pohody a technickými i ekonomickými možnostmi.[1]

3.1 Optické záření

Záření je vysílání či přenos energie ve formě elektromagnetických vln nebo hmotných částic. Libovolné záření lze rozložit na složky se sinusovým průběhem. Každá složka je charakterizována jediným kmitočtem f nebo ν , případně vlnovou délkou λ . Záření jediného kmitočtu se nazývá monofrekvenční. Seřadí-li se složky záření podle jejich kmitočtu či vlnových délek, získá se spektrum záření. Na *Obr. 3-1* je znázorněn přehled různých druhů elektromagnetických záření, sestavený podle kmitočtů a vlnových délek.[2]



Obr. 3-1 Spektrum elektromagnetického záření [3]

Optické záření je složeno z infračerveného záření (IR), viditelného záření a ultrafialového záření (UV).

3.1.1 Infračervené záření

Spektrální rozsah IR záření je přibližně 780 nm až 1mm. V tomto spektrálním rozsahu rozeznáváme tři druhy IR záření:

IR – A 780 nm až 1400 nm, IR – B 1400 nm až 3000 nm, IR – C 3000 nm až 10^6 nm

IR záření se projevuje tepelnými účinky, jejichž zdrojem je nejen sluneční záření, ale každé teplé těleso, elektrický oblouk, nebo infražárovky. IR paprsky jsou nosiči sálavého tepla a slouží k vytápění, ohřívání a sušení. Dále se IR paprsky uplatňují v lékařství nebo v infrafotografii při pozorování v noci (převedení na viditelné světlo např. v infradalekohledu).[2]

3.1.2 Viditelné záření

Záření v rozmezí vlnových délek od 380 nm do 780 nm je schopno vyvolat zrakový vjem a proto se nazývá viditelným zářením. Světelným zářením rozumíme viditelné záření, které je zhodnoceno zrakovým orgánem podle citlivosti oka k záření různých vlnových délek. Jednotlivé barvy, vyskytující se ve světelném spektru se nazývají spektrálními barvami a odpovídají jim určité intervaly vlnových délek elektromagnetického záření.

Záření ve viditelné oblasti spektra jsou důležitá pro život organismů, ale mají také praktický význam ve světelné technice a dalších oblastech, např. v optice, ve fotografii, elektrotechnice atd.[2][3]

3.1.3 Ultrafialové záření

Spektrální rozsah UV záření je přibližně od 400 nm do 1 nm. V UV spektrálním rozsahu rozeznáváme tři druhy UV záření:

UV – A 315 nm až 400 nm, UV – B 280 nm až 315 nm, UV – C 100 nm až 280 nm.

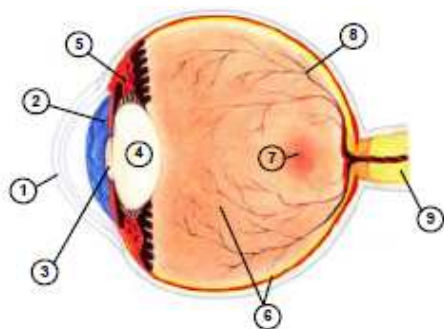
Zdrojem UV paprsků je zejména sluneční záření. Umělým zdrojem světla vyzařujícím UV paprsky jsou např. rtuťové výbojky. UV záření má uplatnění v mnoha vědních oblastech, např. v zemědělství (např. výběr obilí, výběr vajec apod.), ve zdravotnictví (např. boj proti kožním plísním), v průmyslu atd.[2]

3.2 Vidění

Zrakový systém tvoří soubor orgánů, které zajišťují příjem, přenos a zpracování informace světelným podnětem v nervový vzruch, jehož výsledkem je zrakový vjem. Zrakový systém člověka se skládá ze tří částí: periferní (oči člověka), spojovací (zrakové nervy) a centrální (podkorové a korové části mozku).

Oko je smyslový orgán, který zprostředkovává příjem informace o vnějším prostředí přenášené světlem a v němž se tato informace upravuje v nervový vzruch, který se zpracovává v mozku.

Na Obr. 3-2 můžeme vidět strukturu oka. Světlo vstupuje do oka přes rohovku (přední stěnu oka), přední oční komoru, dále přes duhovku a čočku a po průchodu sklivcem dopadá na sítnici. Na ní světlo způsobuje řadu fotochemických reakcí ve světločivných buňkách (tyčinky a čípky), které vyvolávají nervové vzruchy, jejichž výsledkem je pak frekvenčně modulovaný pulzní signál, postupující jednotlivými vlákny očního nervu do mozku.[2][4]



- 1 - rohovka, 2 - duhovka,
- 3 - zornice (pupila), 4 - čočka,
- 5 - ciliární sval, 6 - sítnice,
- 7 - centrální jamka, 8 - cévnatka,
- 9 - zrakový nerv

Obr. 3-2 Struktura oka [4]

Senzorem a převodníkem světelné energie na nervové impulsy jsou světločivné buňky, tedy tyčinky a čípky. Podle složení fotonpigmentu, který je nejdůležitějším prvkem v cestě transformace, se mění citlivost na různé druhy světla, v závislosti na jeho spektrálním složení.

Zatímco tyčinky jsou schopny rozlišovat pouze jakási kvanta světelné energie, u čípků je pozorována i spektrální závislost citlivosti jednotlivých druhů. Z hlediska spektrální citlivosti jsou rozlišovány tři druhy čípků, podobně jako je tomu u jiných systémů využívajících barevného míchání, či barevné filtrace. Citlivost čípků je však podstatně menší než u tyčinek (asi tisíckrát). Proto se uplatňují zejména ve dne, kdy se úroveň jasu pohybuje nad hranicí $10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$. V noci přebírají funkci světlocitlivých buněk tyčinky, které naopak ve dne nemohou pracovat kvůli své vysoké citlivosti. Jelikož jsou však tyčinky pouze jediného typu, nerozlišují barevné složení světla.[4]

Oko se přizpůsobuje různým hladinám osvětlenosti kromě přechodu z tyčinkového na čípkové vidění i dalšími mechanismy. Těmto mechanismům obecně říkáme adaptace zraku na jas. Další významný mechanismus je omezení světla velikostí zornice. Ta může měnit plochu vstupního otvoru (až dvacetinásobně) a tím reguluje množství světelného toku vstupujícího do oka.[2][4]

Posledním z řady adaptačních mechanismů je změna velikosti tzv. vjemových polí. Vjemová pole jsou části plochy sítnice, do kterých se sdružují tyčinky a čípky za účelem vzniku většího signálu na výstupu. Vjemová pole se mohou vzájemně překrývat, tj. buňky mohou být součástí více než jednoho pole.[4]

Pro člověka a jeho zrakovou, psychickou, ale i fyzickou pohodu je tedy důležité zajištění optimálních osvětlovacích podmínek. Osvětlení by mělo v člověku navozovat pocit pohody a dobré nálady.

3.2.1 Mezní stavy zraku

Mezními stavy zraku rozumíme stavy, kdy již nelze zajistit zcela správnou činnost zraku, zraková činnost začíná být nějakým způsobem narušována. Pokud je tato hranice překročena, může nastat situace, kdy zrak přestane pracovat zcela a záleží pak na druhu podnětu, zda je tato nefunkčnost krátkodobá, dlouhodobá či v nejhorsím případě trvalá. Mezi nejběžnější mezní stavy zraku, které rozlišujeme, patří[2][4]:

Vysoká úroveň jasu – může být celková či lokální. Při celkově vysoké hladině jasu dochází k přetěžování celé sítnice, při lokální zvýšené hladině jasu se může přetížít pouze některá část sítnice.[4]

Nízká úroveň jasu – je opačná situace, kdy sice nedochází k přetěžování sítnice, ale zraková činnost je také znemožněna či omezena. Tento stav nastává, jestliže v místě zrakového úkolu není dostatečná úroveň osvětlení a naopak okolí je osvětleno více. Zrak se adaptuje na celkově vyšší hodnotu jasu a vlastní činnost zraku je zhoršena. Dochází k rychlejší únavě zraku a snížení zrakového výkonu obecně. Aby se dala lépe definovat rozlišitelnost jako schopnost oka rozlišit určité rozdíly jasu, byla zavedena veličina nazvaná kontrast jasu K , kterou můžeme určit ze vztahu (3.1):[4]

$$K = \frac{|L_a + L_b|}{L_b} \quad [-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3.1)$$

kde: L_a - je jas detailu

L_b - je jas okolí detailu

Nejmenší rozlišitelný rozdíl jasů se nazývá práh rozlišitelnosti jasu a odpovídá mu tzv. prahový kontrast K_{min} . Převrácenou hodnotou prahového kontrastu je kontrastní citlivost.

Velikost kontrastní citlivosti závisí na jasu bezprostředního okolí rozlišovaného detailu a na velikosti kritického detailu. Kontrastní citlivost roste s adaptačním jasnem a optimálních hodnot dosahuje pro jasy přibližně 300 až 5000 cd·m⁻². [2][4]

Hladina adaptačního jasu je pro rozeznání dvou ploch s rozdílným jasnem velice důležitá. Při práci, která vyžaduje rozlišování malých kontrastů, se požaduje rovnoměrný jas zorného pole, který by se příliš nelišil od obou srovnávaných jasů. Pro delší práci ale není vhodné vytvářet prostředí zcela jasově monotónní, neboť takové prostředí vede k únavě zraku a působí útlumově. [2][4]

Nejmenší detail – je dalším mezním faktorem určujícím hranice lidského vidění. Nejmenší detail, který je při práci pozorován se nazývá kritický detail. Abychom ho mohli rozlišit zrakem, musí být větší, než umožňuje rozlišovací schopnost zraku. Rozlišovací schopnost zraku je posuzována pomocí tzv. zrakové ostrosti, která je definována jako schopnost zraku rozeznat dva detaily na určitém pozadí, např. dvě čáry nebo dva body. Číselně je zraková ostrost vyjádřena jako převrácená hodnota nejmenšího úhlu, měřeného v úhlových minutách, pod kterým jsou dva detaily okem pozorovány. Čím menší je vzdálenost pozorovaných detailů, které oko ještě rozezná, tím větší je zraková ostrost. [2][4]

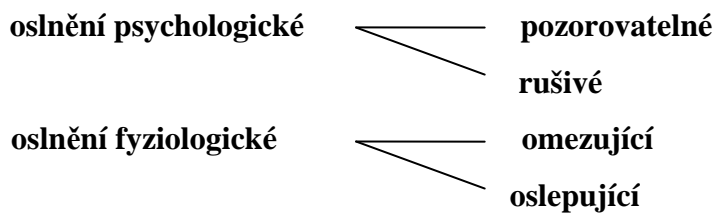
Frekvence splývání – zrakový vjem má určité časové zpoždění, což má za následek to, že zrakový vjem je zachován i v době, kdy světelný podnět již neexistuje nebo má jinou hodnotu a naopak, vjem vznikne až za určitou dobu po vzniku světelného podnětu. Pokud se světelný podnět periodicky opakuje, je vnímán jako přerušovaný pouze do určité frekvence. Po překročení této frekvence se jeví stejně jasný jako aritmetický průměr intenzit periodicky se měnícího podnětu. Tuto skutečnost popisuje Talbotův zákon a mezní frekvence se nazývá frekvence splývání. [4]

3.3 Oslnění

Oslnění je stav, při kterém zrak zaznamenává jisté narušení funkce vlivem světla, které vychyluje zrakovou činnost od ideálního stavu. Oslnění vzniká, pokud jsou v zorném poli oka příliš velké jasy, rozdíly jasů, nebo časové kontrasty jasů, které výrazně překračují meze adaptability zraku. Oko se adaptuje na určitý průměrný jas zorného pole, na tzv. adaptační jas, který ovlivňuje všechny funkce oka, a tím i pracovní výkon, kvalitu práce, ale také únavu. Podle příčiny se rozlišuje oslnění na:

- Přímé oslnění** - je způsobeno nadměrným jasnem svítivých částí svítidel nebo hlavních povrchů prostoru
- Oslnění odrazem** - je způsobeno odrazy svítivých ploch na lesklých částech pozorovaných předmětů a jejich bezprostředního okolí
- Přechodové oslnění** - je způsobeno náhlou změnou adaptačního jasu, které se zrakový systém nestačí tak rychle přizpůsobit
- Závojevé oslnění** - vzniká, je-li před pozorovaným pozadím prostředí s vyšším jasnem
- Kontrastní oslnění** - je způsobeno tím, že se v zorném poli vyskytnou jasy příliš vysoké v porovnání s jasnem, na který je zrak adaptován

Z hlediska světelné techniky je z výše uvedených oslnění nejvíce významné kontrastní oslnění. Rozlišujeme dva základní typy kontrastního oslnění - oslnění fyziologické a oslnění psychologické.



Psychologické oslnění zahrnuje nejen oslnění rušivé, ale i jeho nižší stupeň, označený jako oslnění pozorovatelné. Při psychologickém oslnění odpoutává zdroj vyššího jasů v zorném poli pozornost pozorovatele od vlastního zrakového úkonu, a tím vzniká subjektivní pocit zrakové nepohody a vzrůstá únava, aniž by si pozorovatel uvědomoval, že je to způsobeno osvětlením. Měřitelné změny zrakových funkcí však psychologické oslnění nevyvolává.[4]

Fyziologické omezující oslnění zhoršuje činnost zraku a způsobuje snížení zrakových schopností, neboť se prokazatelně snižuje zraková ostrost a kontrastní citlivost. Krajním případem fyziologického oslnění je oslnění oslepující, což je mezní případ označovaný jako absolutní oslnění, které znemožňuje činnost zraku vůbec. Oslepující a omezující oslnění by se v osvětlovacích soustavách nemělo vyskytovat vůbec.[4]

Hodnocení oslnění vychází z přímého oslnění, které je založeno na výsledcích výzkumu rušivého oslnění. V podstatě všechny metody z tohoto faktu vycházejí a jsou rovněž na podobných experimentech založeny.[4]

Jedním ze způsobů, který se používá pro hodnocení oslnění je založen na výpočtu indexu oslnění, popřípadě činitele oslnění G z různě modifikovaného vzorce. Tento vzorec vychází z úvahy, která předpokládá, že oslnění je tím větší, čím vyšší je jas oslňujícího zdroje L_z a čím je větší prostorový úhel Ω , pod nímž je zdroj vidět. Naopak oslnění klesá, pokud se zvyšuje jas pozadí L_p (adaptační jas) a zdroj se vzdaluje od optické osy vidění – popsáno činitelem polohy p . Obecně lze tuto závislost popsat vztahem ve tvaru[2][4]:

$$G = \frac{L_z^a \cdot \Omega^b}{L_p^c \cdot p^d} \left[-; -, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{sr}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2} \right] \quad (3.2)$$

kde: L_p - je jas pozadí

L_z - je jas zdroje

Ω - je prostorový úhel, pod kterým je z kontrolního místa vidět oslňující zdroj

p - je činitel polohy určovaný nejčastěji podle Luckieshe a Gutha z diagramu

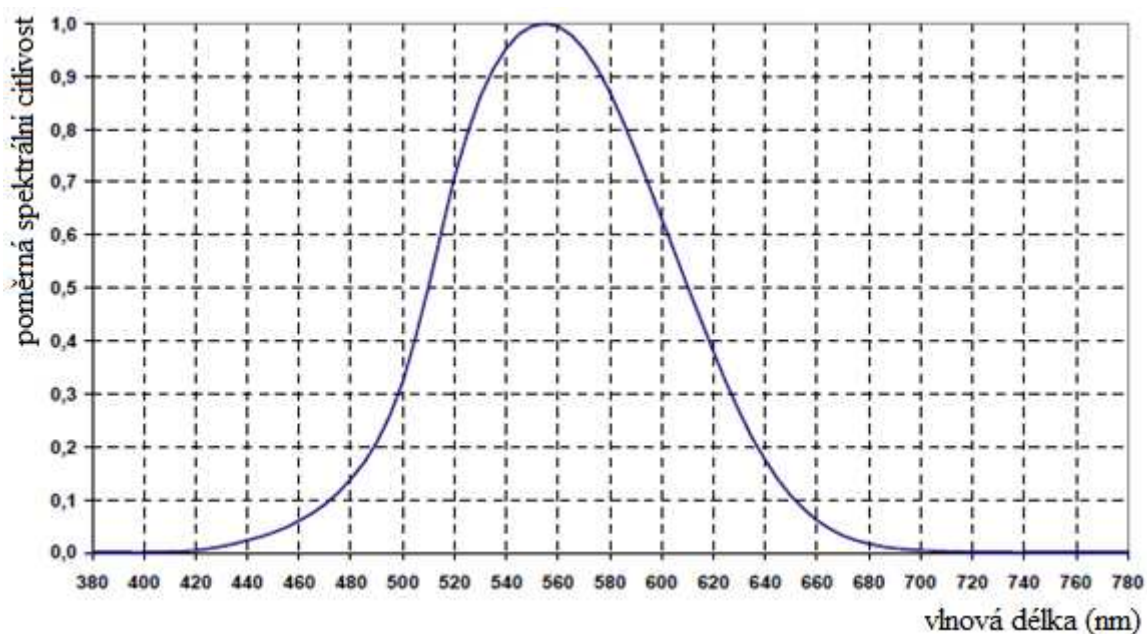
a, b, c, d - jsou experimentálně stanovené hodnoty exponentů, které se liší podle autora, jenž výzkum prováděl a hodnot, které byly stanoveny jako limitní činitele oslnění pro různé pracovní činnosti.

Dnes uznávaný a doporučovaný systém hodnocení oslnění tzv. UGR (Unified Glare Ratio) vychází ze Sørensenova vztahu. Vztah pro n oslňujících zdrojů má tvar [4]:

$$UGR = 8 \cdot \log \left[\frac{0,25}{L_p} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_{zi}^2 \cdot \Omega_i}{p_i^2} \right] \left[-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{sr}, - \right] \quad (3.3)$$

4 ZÁKLADNÍ VELIČINY A JEDNOTKY SVĚTELNÉ TECHNIKY

Obor zabývající se měřením veličin světelné techniky je nazýván fotometrie. Fotometrické veličiny, s nimiž se ve světelné technice pracuje, jsou založeny na zhodnocení záření s ohledem na rozdílnou citlivost oka ke světlu různých vlnových délek. Spektrální citlivost jednotlivých pozorovatelů se liší a proto se při výpočtech musí pracovat se spektrální citlivostí tzv. normálního fotometrického pozorovatele.[1] Průběh poměrné spektrální citlivosti $V(\lambda)$ oka normálního fotometrického pozorovatele je zobrazena na *Obr. 4-1*.



Obr. 4-1 Průběh poměrné spektrální citlivosti oka normálního fotometrického pozorovatele[4]

Metody měření světelně technických veličin se dělí na:

vizuální (subjektivní) metody - při kterých se jako indikátoru využívá zraku

fyzikální (objektivní) metody - při kterých se jako indikátoru využívá fyzikálních čidel

Pro kontrolu jakosti záření světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav se dnes obvykle užívají objektivní fotometrické metody. Funkce lidského zraku, jako přijímače záření při vizuálních měřeních, je v objektivní fotometrii nahrazena fyzikálními čidly, čímž se vylučuje závislost měření na dokonalosti zraku pozorovatele. Křivka spektrální citlivosti fyzikálního přijímače má mít průběh shodný s křivkou $V(\lambda)$ spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele. Spektrální rozložení citlivosti fotočlánků je však odlišné od průběhu poměrné spektrální citlivosti oka normálního fotometrického pozorovatele a přizpůsobuje se korekčními filtry. Při šikmém dopadu světla na fotočlánek jsou naměřené fotoproudy menší, než odpovídá skutečné hodnotě osvětlenosti. Tato chyba se kompenzuje tzv. kosinovým nástavcem, např. ve tvaru kulového vrchlíku z rozptýlného skla. Nejčastěji používané přijímače jsou fotonky hradlové a emisní nebo fotoelektrické násobiče.[1][2]

4.1 Světelný tok

Označení: Φ

Jednotka: [lm]

Světelně technická veličina, která odpovídá zářivému toku a vyjadřuje jeho schopnost způsobit zrakový vjem, se nazývá světelný tok. Jednotkou světelného toku je lumen.[2]

Účinnost přeměny elektrické energie na světlo je označována jako měrný výkon, který je definován jako podíl výstupního světelného toku zdroje a celkového elektrického příkonu světelného zdroje. Jednotkou je v tomto případě lm/W. Maximální teoretická hodnota měrného výkonu je 683 lm/W a to za předpokladu, že veškerá elektrická energie, bude přeměněna na optické záření s frekvencí 540 THz. Frekvence 540 THz odpovídá přibližně vlnové délce 555 nm, což je hodnota, při které má oko normálního fotometrického pozorovatele nevyšší citlivost. Maximálního měrného výkonu 683 lm/W reálně nemůžeme dosáhnout, neboť při přeměně elektrické energie na světlo dochází ke ztrátě většiny energie např. ve výboji, teplem, atd.[2][4]

Světelný tok můžeme stanovit dvěma způsoby, výpočtem z křivek svítivosti nebo měřením světelného toku v kruhovém integrátoru.[2]

4.2 Prostorový úhel

Označení: Ω

Jednotka: [sr]

Důležitou geometrickou veličinou používanou ve světelně technických výpočtech je prostorový úhel. Jeho velikost je určena velikostí plochy, vyřáté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy. Jednotkou prostorového úhlu je steradián, určený jednotkovou plochou (1 m^2) na povrchu jednotkové koule ($r=1 \text{ m}$). Prostorový úhel, pod nímž je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A vyřátá na povrchu této koule, se zjistí ze vztahu (4.1).[2]

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \left[\text{sr}; \text{m}^2, \text{m} \right] \quad (4.1)$$

Nejvyšší hodnoty $\Omega_{max} = 4\pi$ nabývá prostorový úhel pro plochu A rovnou povrchu celé koule o ploše $A = 4\pi r^2 = 4\pi l^2 = 4\pi$. [2][4]

Prostorový úhel $d\Omega$, pod nímž je vidět element plochy dA z bodu P obecné plochy A ve vzdálenosti l , se vypočte ze vztahu (4.2)[4]:

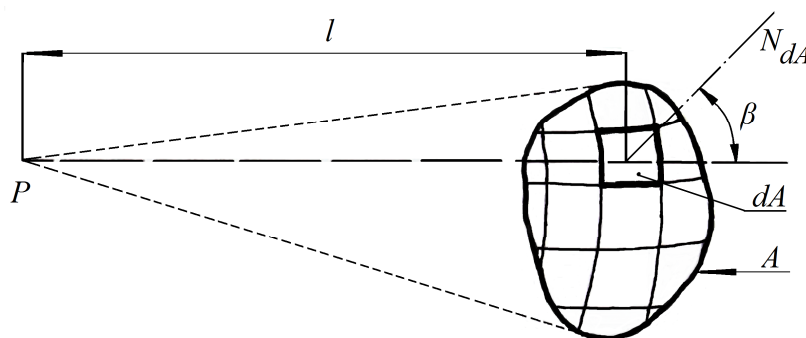
$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2} \left[\text{sr}; \text{m}^2, -, \text{m} \right] \quad (4.2)$$

kde β - je úhel, který svírá osa prostorového úhlu $d\Omega$, tj. paprsek l , s normálou N_{dA} plošky dA

l - vzdálenost bodu pozorování a středu elementární plošky dA

Celá plocha A na Obr. 4-2 je z bodu P vidět pod prostorovým úhlem Ω , který je roven součtu všech dílčích prostorových úhlů, v jejichž mezích lze z bodu P pozorovat všechny dílčí plošky dA , na které byla plocha A rozdělena. To znamená, že prostorový úhel Ω se stanoví integrací rovnice (4.2) po ploše a tím dosáhneme vztahu (4.3).[2]

$$\Omega = \iint_A \frac{\cos \beta}{l^2} dA \quad [\text{sr}; -, \text{m}, \text{m}^2] \quad (4.3)$$



Obr. 4-2 Grafické znázornění prostorového úhlu [2]

4.3 Svítivost

Označení: I

Jednotka: [cd]

Rozložení světelného toku zdroje, či svítidla v prostoru se nazývá svítivost. Ta je rovna prostorové hustotě světelného toku. Jednotkou svítivosti je kandela, která patří k základním jednotkám soustavy SI. Svítivost bodového zdroje I_γ ve směru určeném úhlem γ od zvoleného vztážného směru je dána vztahem[1][2]:

$$I_\gamma = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{cd}; \text{lm}, \text{sr}] \quad (4.4)$$

Svítivost je možné definovat pro tzv. bodové zdroje, což jsou zdroje s nekonečně malými rozměry. V praxi takový zdroj není realizovatelný. Proto za bodové zdroje světla považujeme objekty, u nichž největší rozměr jejich svítící plochy přesahuje 5-krát vzdálenost, ze které je tento světelný zdroj pozorován. Zdroje s většími rozměry tedy nelze popsat vektory svítivosti, pokud bychom zdroj neposuzovali z dostatečné vzdálenosti, kdy už se jako bodový jeví. Velké zdroje světla lze však rozdělit na zdroje menší a výsledné působení je dáno společným působením jednotlivých takto vzniklých elementárních zdrojů.[1][4]

Přístroje, které umožňují měřit svítivost, se nazývají goniofotometry. Jsou to zařízení, které měří svítivost světelného zdroje nebo svítidla v různých rovinách a pod různými úhly. Výsledkem měření jsou směrové charakteristiky vyzařování tzv. křivky svítivosti světelného zdroje. [2][4]

4.4 Osvětlenost

Označení: E

Jednotka: [lx]

Plošná hustota světelného toku tedy osvětlenost (intenzita osvětlení) je rovna poměru světelného toku, dopadajícího na určitou plochu. Jednotkou osvětlenosti je lux. V praxi je osvětlenost nejsledovanější fotometrickou veličinou, neboť na osvětlenost vnitřních a venkovních

prostor jsou kladeny vysoké požadavky vycházející z hygienických norem návrhu osvětlovacích soustav.[1][2][4]

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{lx}; \text{lm}, \text{m}^2] \quad (4.5)$$

Osvětlenost bodovým zdrojem je nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti osvětlované plochy od zdroje. Tuto závislost nazýváme čtvercový zákon, který je určen rovnicí[2][4]:

$$E = \frac{I_\gamma}{l^2} \quad [\text{lx}; \text{cd}, \text{m}] \quad (4.6)$$

Z rovnic (4.5) a (4.6) vyplývá další závislost, tzv. Lambertův kosinusový zákon, podle něhož je osvětlenost rovinné plochy v okolí sledovaného bodu úměrná úhlu dopadu, který svírá normála osvětlované plochy s osou svazku světelných paprsků. Pro vnímání osvětlované plochy je tedy nejvýznamnější kolmá (normálová) složka osvětlenosti.[1][4]

$$E = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos \beta \quad [\text{lx}; \text{cd}, \text{m}, -] \quad (4.7)$$

K získání lepšího přehledu o rozložení hladin osvětlenosti v bodech pracovní nebo srovnávací roviny je možno sít kontrolních bodů v uvažované rovině popsat zjištěnými hodnotami osvětlenosti, popřípadě spojit body stejných osvětleností a graficky znázornit čáry nazývané izoluxy.[2]

Měření osvětlenosti se provádí pomocí luxmetrů, které se skládají z přijímače s korigovaným fotočlánkem opatřeným kosinusovým nastavcem a z měřicího a vyhodnocovacího přístroje s analogovým nebo digitálním indikátorem.[4]

4.5 Jas

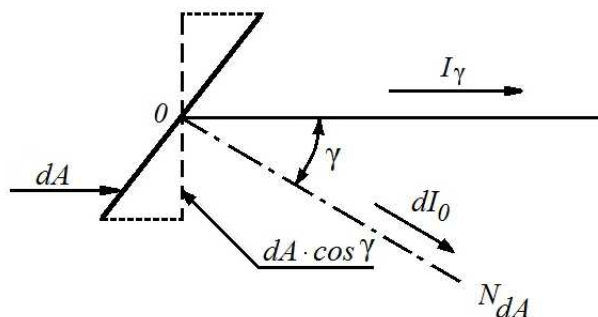
Označení: L

Jednotka: $[\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$

Reakce zrakového orgánu pozorovatele na světlo je určena plošnou a prostorovou hustotou světelného toku dopadajícího do oka pozorovatele, tj. jasem. Z hlediska lidského vidění je jas nejvýznamnější veličinou. Jednotkou jasu je kandela na čtvereční metr. Pro snadnější představu je praktičtější vyjádření jasu jako poměru svítivosti, kterou disponuje svítící, nebo odrážející elementární ploška ve směru k pozorovateli, k průmětné ploše této plošky na směr pozorování viz Obr. 4-3. Jednoduše lze toto vyjádřit vztahem[1][4]:

$$L = \frac{I_\gamma}{dA \cdot \cos \gamma} \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd}, \text{m}^2, -] \quad (4.8)$$

Ke kontrole jasových poměrů v osvětlovaných prostorech slouží jasoměry v provedení vizuální nebo fyzikální. U vizuálních jasoměrů se v zorném poli porovnává neznámý jas s jasně uměle vytvořeným vlastním zdrojem instalovaným v přístroji. Většina fyzikálních jasoměrů je založena na měření světelného toku, který prochází clonou určitého tvaru a velikosti. V rovině této clony se zobrazuje zorným polem vymezená ploška, jejíž jas se určuje.[1][2]



Obr. 4-3 Grafické znázornění jasu [2]

4.6 Světlení

Označení: H

Jednotka: $[\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}]$

Světlení je ekvivalent osvětlení s tím rozdílem, že na rozdíl od osvětlení, kde na osvětlenou plochu světelný tok dopadá, světlení definuje světelný tok z plochy vyzařující, resp. odražený. Jednotkou je lumen na čtvereční metr.[4]

$$H = \frac{d\Phi}{dA} [\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{m}^2] \quad (4.9)$$

Světelný tok dopadající na určitou činnou látku, se obecně dělí na tři části, a to na tok, který se odrazí Φ_ρ , tok který materiálem projde Φ_τ a tok který hmota pohltí Φ_α . Z uvedeného rozdělení toku vyplývá, že světelně technické vlastnosti látek charakterizují tři činitele, mezi nimiž platí[1]:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (4.10)$$

Činitele ρ , τ , α nezávisí jen na vlastnostech sledované látky, ale také na vlnové délce dopadajícího světla.

Rozložení světelného toku, odraženého od povrchu určité látky, může být různé. Nejjednodušším případem je tzv. zrcadlový odraz, kdy se světelné paprsky od daného povrchu odrážejí pod stejným úhlem, pod kterým na povrch dopadly. Rozdělí-li se světelný tok odražený od určitého elementu povrchu tak, že jas tohoto elementu uvažované plochy je ve všech směrech stejný, jde o rovnoměrně rozptýlený (difúzní) odraz. Svítivost ideálního rozptylovače je maximální (I_0) v kolmém směru a v ostatních je určena kosinovým zákonem dle (4.11).[1]

$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma [\text{cd}; \text{cd}, -] \quad (4.11)$$

U difúzních povrchů platí vztah mezi světlením povrchu a jasem, který lze odvodit z výše uvedených vztahů [1][4]:

$$H = L \cdot \pi [\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, -] \quad (4.12)$$

Pokud osvětlujeme dokonale rozptylující povrch a vytvoří se osvětlení E , pak ze známé odrazivosti ρ , lze určit světlení a následně jas takové plochy dle vztahu [4]:

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi} [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{lx}, -, -] \quad (4.13)$$

5 KŘIVKY SVÍTIVOSTI

Směrové vyzařovací charakteristiky zdrojů světla a svítidel jsou dnes při návrhu osvětlení vnitřních i venkovních prostor důležitým parametrem. Z tohoto důvodu jsou tyto křivky často uváděny výrobcí svítidel nebo zdrojů v dokumentaci k těmto zařízením.

Pokud změříme hodnoty svítivosti zdroje světla ve všech směrech prostoru jako radiusvektory, vznikne spojením jejich koncových bodů fotometrická plocha svítivosti. Tato plocha jednoznačně popisuje intenzitu vyzařování bodového zdroje do prostoru. Svítivost je definována pouze pro bodové zdroje. Prakticky se však používá i pro popis vyzařovacích charakteristik zdrojů nebodové povahy – svítidla.[1][5]

Při výpočtech obvykle postačuje znát jen některé řezy touto plochou, a to rovinami procházející bodovým zdrojem. V rovinách řezu takto získáme křivky svítivosti v polárních souřadnicích. Počátek diagramu svítivosti se umísťuje do tzv. světelného středu zdroje či svítidla, tj. do bodu, kde je soustředěn uvažovaný zdroj. Základní či vztahný směr diagramu svítivosti, od kterého se měří úhly, se umísťuje obvykle do směru normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Jednotlivé křivky se v současnosti nejčastěji získávají měřením na goniofotometru.[2]

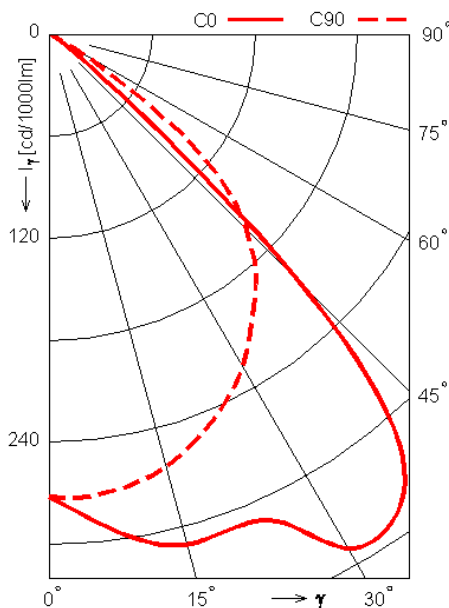
Křivky svítivosti lze matematicky obecně popsat vztahem [2]:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad [\text{cd}; \text{cd}, -] \quad (5.1)$$

kde: I_{γ} - je svítivost přečtená z uvažovaného diagramu svítivosti pod úhlem γ od vztahného směru (viz Obr. 5-1)

I_0 - je svítivost uvažovaného zdroje ve vztahném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla

$f_I(\gamma)$ - je charakteristická funkce svítivosti matematicky popisující uvažovanou křivku svítivosti (nejčastěji se k aproximaci využívá funkcí $\cos^n \gamma$ (kde $n=0, 1, 2, 3, 4$ a 5), $\sin^n \gamma$, $\sin \gamma \cdot \cos^m \gamma$ (kde $m=0, 1, 2, 3, 4$), a zejména pak různých lineárních kombinací uvedených funkcí



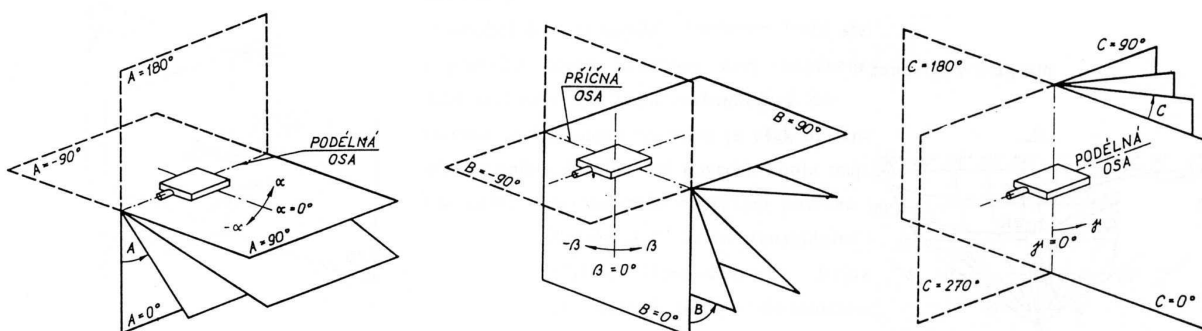
Obr. 5-1 Příklad křivek svítivosti v jedné z polorovin soustavy C- γ [5]

Obr. 5-1 znázorňuje příklad použití křivek svítivosti pro určitý zdroj. Obecně není vhodné v jednom polárním diagramu zobrazovat více než dvě křivky svítivosti.[5]

Aby bylo možné porovnat křivky svítivosti mezi jednotlivými zdroji či svítidly, přepočítávají se křivky svítivosti na světelný tok zdroje 1000 lm. Z uvedených hodnot lze určit i účinnost svítidla pomocí tzv. metody zonálních toků. Metoda vychází z předpokladu, že pro každý zonální pás určený prostorovým úhlem a svítivostí v tomto pásu lze vypočítat světelný tok. Výsledným součtem světelných toků všech pásů je dán celkový světelný tok svítidla. Účinnost svítidla lze vypočítat podle vztahu (5.2).[2][5]

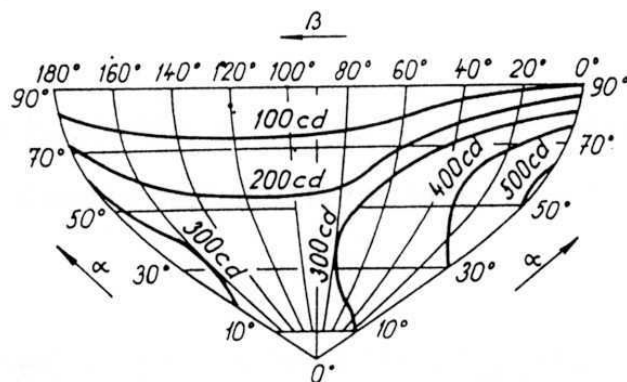
$$\eta_{sv} = \frac{\Phi_{sv}}{1000} [-; \text{lm}, -] \quad (5.2)$$

Protože matematický a grafický popis plochy svítivosti je složitější, používá se v praxi řezů této plochy v určitých rovinách vybraných z některého ze tří typů různoběžných rovin, jejichž průsečnice prochází středem zdroje nebo svítidla. Podle směru vedení řezné roviny se používají soustavy rovin, resp. polorovin A - α , B - β nebo C - γ . K určení směru vektoru se používají dvě souřadnice. První souřadnice udává rovinu, resp. její úhel natočení a druhá souřadnice určuje úhel natočení vektoru svítivosti v dané rovině. Nejčastěji užívaná soustava rovin je C - γ , jejíž osa je kolmá k hlavní vyzařovací ploše zdroje či svítidla. Někdy je však vhodnější zobrazit křivky svítivosti v rovinách A - α (osa roviny je totožná s podélnou osou svítidla), případně B - β (osa roviny je totožná s příčnou osou svítidla). Obr. 5-2 graficky znázorňuje orientaci jednotlivých soustav rovin A - α , B - β a C - γ . [2][5]



Obr. 5-2 Fotometrická soustava rovin A - α , B - β , C - γ [5]

Svítivost je možné znázornit také v prostorovém rozložení pomocí hodnot svítivosti zapsaných na povrchu jednotkové koule, jejíž střed je totožný s bodovým zdrojem světla. Poloha jednotlivých bodů na povrchu koule a tím i uvažovaný směr v prostoru se určuje v síti rovnoběžek a poledníků. Spojením bodů stejných hodnot svítivosti na povrchu koule vzniknou čáry nazývané izokandely. Výsledkem je síť izokandel tzv. izokandelový diagram. Realizace prostorové souřadnicové soustavy je složitá a proto je praktičtější zvolit jiný způsob zobrazení povrchu koule resp. polokoule v rovině. Nejběžnější je tzv. sinusoidální zobrazení povrchu polokoule do rovinného diagramu. Na Obr. 5-3 je do sinusoidální sítě poloviny poloprostoru zakreslen příklad izokandelového diagramu. Plochy uzavřené jednotlivými izokandelami jsou v sinusoidálním diagramu rovny prostorovým úhlům, do nichž zdroj či svítidlo vyzařuje se svítivostí odpovídající té které izokandele. Proto je možné těchto diagramů využít ke snadnému stanovení světelného toku zdroje nebo svítidla.[2][5]

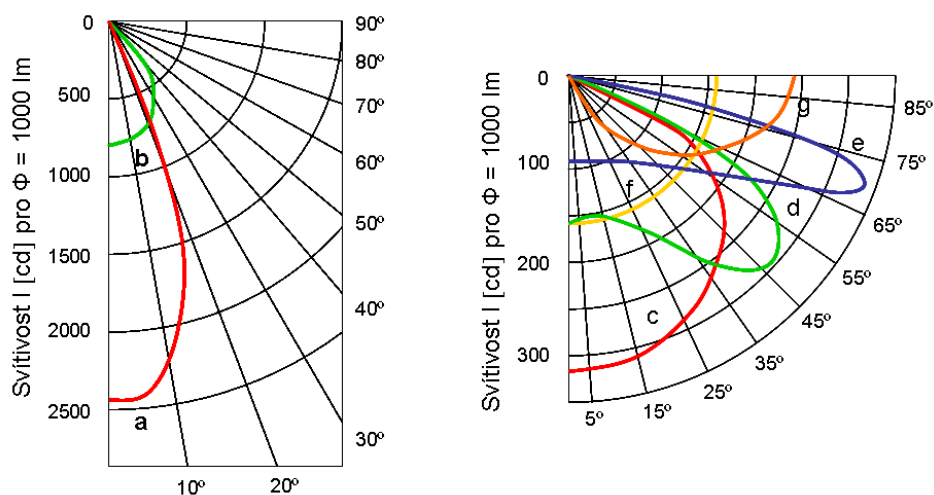


Obr. 5-3 Příklad izokandelového diagramu [2]

Svítlidla lze rozdělit podle několika kritérií. Jedním z kritérií je rozdělení svítidel podle světelně technických vlastností, kam patří mimo rozložení světelného toku svítidla také tvar křivky svítivosti svítidla. Na Obr. 5-4 jsou znázorněny různé typy křivek svítivosti svítidel. K vystižení tvaru křivky svítivosti se využívá úhlového pásma maximální svítivosti. Rozdělení svítidel podle tvaru křivky svítivosti a úhlového pásma maximální svítivosti je zřejmé z Tab. 5-1. [2][6]

Tab. 5-1 Rozdělení svítidel podle tvaru křivky svítivosti [2]

Tvar křivky svítivosti (viz Obr. 5-4)		Úhlové pásmo maximální svítivosti
Označení	Název	
a	koncentrovaná	0 - 15
b	hluboká	0 - 30, 150 - 180
c	kosinusová	0 - 35, 145 - 180
d	pološiroká	35 - 55, 125 - 145
e	široká	55 - 85, 95 - 125
f	rovnoměrná	0 - 180
g	sinusová	70 - 90, 90 - 100



Obr. 5-4 Tvary křivek svítivosti svítidel [6]

6 METODY MĚŘENÍ KŘIVEK SVÍTIVOSTI

Jak již bylo výše uvedeno, křivky svítivosti jsou důležitým světelně technickým parametrem světelných zdrojů a svítidel. Abychom je mohli vizuálně, či matematicky vyjádřit musejí být změřeny. Tato kapitola popisuje konvenční a nekonvenční metody měření křivek svítivosti světelných zdrojů a svítidel. Dále jsou v kapitole nastíněny nedostatky jednotlivých metod a vznik chyb, které během měření vznikají.

6.1 Konvenční metody měření křivek svítivosti

Konvenční metody či postupy měření křivek svítivosti jsou využívány řadu let a stále patří k nejčastěji používaným. Při měření na konvenčních zařízeních vzniká množství chyb zejména při odečítání měřených údajů z přístrojů a nastavováním úhlů natočení zdrojů. Postupnou modernizací přístrojů a zautomatizováním měření se docílilo zmenšení vzniklých chyb.

Svítivost je fotometrická veličina, která není při objektivním měření měřena přímo, ale je převáděna na měření osvětlenosti. Osvětlenost je měřena luxmetrem jehož čidlem je fotočlánek. Naměřená osvětlenost je rovna podílu hledané svítivosti a čtverce vzdálenosti fotočláneku od světelného středu svítidla. Pro osvětlenost platí vztah (4.6). Po zkorigování naměřených hodnot osvětlenosti podle kalibračního listu použitého luxmetru lze užít rovnice (4.6) a pro konkrétní úhel vypočítat svítivost dle vzorce[2][7]:

$$I_{\gamma} = E_{\gamma} \cdot l^2 \quad [\text{cd; lx, m}] \quad (6.1)$$

6.1.1 Měření křivek svítivosti na fotometrické lavici

Fotometrická lavice je laboratorní zařízení, které se především používá k měření svítivosti, porovnání svítivosti světelných zdrojů, ověřování fotočláneků a v některých případech i k měření rozložení svítivosti.[8] K měření křivek svítivosti světelných zdrojů na fotometrické lavici je nutný otočný systém upevnění měřeného zdroje případně i etalonu. Fotometrická lavice umožňuje měření svítivosti v různých směrech subjektivní i objektivní metodou.[7]

Fotometrická lavice se skládá z vodicích tyčí či kolejniček, po kterých pojíždějí vozíky se světelnými zdroji a fotočlánekem. Vzdálenosti mezi fotočlánekem a zdroji se odečítají na měřítku upevněném na lavici. Středů zdrojů i fotočláneků musejí být nastaveny přesně v optické ose. Vyzařovací plochy zdrojů a rovina přijímací plošky fotočláneku musí být kolmé k optické ose fotometrické lavice.[7]

Subjektivní měření porovnává buď přímo svítivost měřeného zdroje s normálem svítivosti, nebo obvykleji se měří substituční metodou s použitím srovnávacího světelného zdroje.[2]

U subjektivního měření přímým pozorováním *Obr. 6-1* je na jednom konci lavice umístěn měřený zdroj Z a na druhém konci etalon N svítivosti. Mezi měřeným zdrojem a etalonem je fotometrická hlavice H s fotometrem, která popojíždí mezi oběma zdroji a tím vyrovnává jas nebo kontrast obou částí fotometrického pole. Následným odečtením vzdálenosti l_N normálu I_N a l_Z měřeného zdroje I_Z lze určit měřená svítivost ze vztahu (6.2). Aby byly zajištěny stejné optické podmínky pro oba zdroje, opakuje se měření ještě jednou při otočeném fotometru o 180° a z obou měření se následně stanoví střední hodnota.[2]

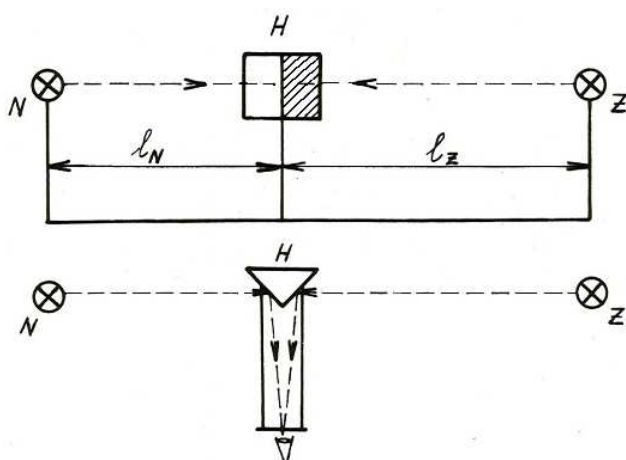
$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{l_Z^2}{l_N^2} [\text{cd, cd; m, m}] \quad (6.2)$$

Pokud je subjektivní měření prováděno substituční metodou, dává se etalon svítivosti i měřený zdroj na tutéž stranu fotometru a oba tyto zdroje se porovnávají s vhodným srovnávacím zdrojem, který je umístěn na druhé straně fotometru. Svítivost srovnávacího zdroje nemusí být známa, ale musí být alespoň v průběhu jednoho měření konstantní. Po vyrovnání jasu obou částí fotometrického pole se postupně pro etalon svítivosti I_N a měřený zdroj I_Z na měřítku světelné lavice odečtou vzdálenosti l_N a l_Z a svítivost se určí ze vztahu (6.2). Při měření zůstává vzdálenost fotometru od srovnávacího zdroje konstantní a posouvá se buď vozík s etalonem či měřeným zdrojem nebo vozík fotometru s pevně připojeným vozíkem srovnávacího zdroje. Tato metoda vylučuje vliv nesymetrie fotometrické destičky a pracuje s konstantním jasnem srovnávacího pole.[2]

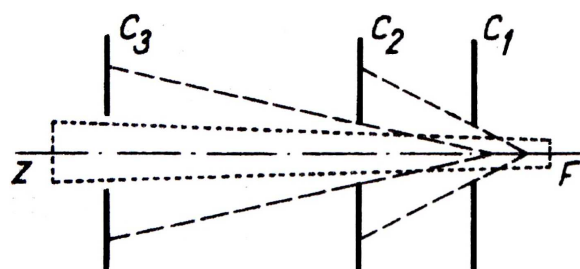
Při objektivním měření svítivosti I_Z se fotočlánek osvětluje postupně etalonem svítivosti I_N a následně měřeným zdrojem I_Z . Nejčastěji se měří při konstantní osvětlenosti fotočlánek, kdy se vylučuje vliv nelinearity závislosti fotoproudu fotonky na osvětlení. Mění se vzdálenost l_Z měřeného zdroje od fotočlánek do okamžiku, kdy je výchylna měřicího přístroje stejná jako při osvětlení fotočlánek etalonem svítivosti I_N ze vzdálenosti l_N . Hledaná svítivost se opět vypočítá ze vztahu (6.2). Pokud by se měřilo při různé osvětlenosti fotočlánek, bylo by nutno ověřit linearitu fotočlánek a počítat s korekčními činiteli. Při objektivním měření musí být citlivá plocha fotočlánek zcela a rovnoměrně osvětlena.[2][7]

Při měření dochází k působení rozptylného světla na fotočlánek. K zamezení působení rozptylného světla jsou na fotometrické lavici umístěny stínící clony tak, aby na fotočlánek dopadalo pouze světlo od měřeného zdroje, viz Obr 6-2. Velikost otvorů v clonách musí být taková, aby žádná aktivní část zdroje nebyla zastíněna.[2][7]

Jelikož je měření křivek svítivosti na fotometrické lavici složité a zatížené značnými chybami měření, zejména při subjektivním měření svítivosti, není tato metoda vhodnou volbou pro přesné určování směrových charakteristik zdrojů a svítidel.



Obr. 6-1 Schematické uspořádání subjektivního fotometru na fotometrické lavici [2]



Obr. 6-2 Uspořádání stínících clon na fotometrické lavici [2]

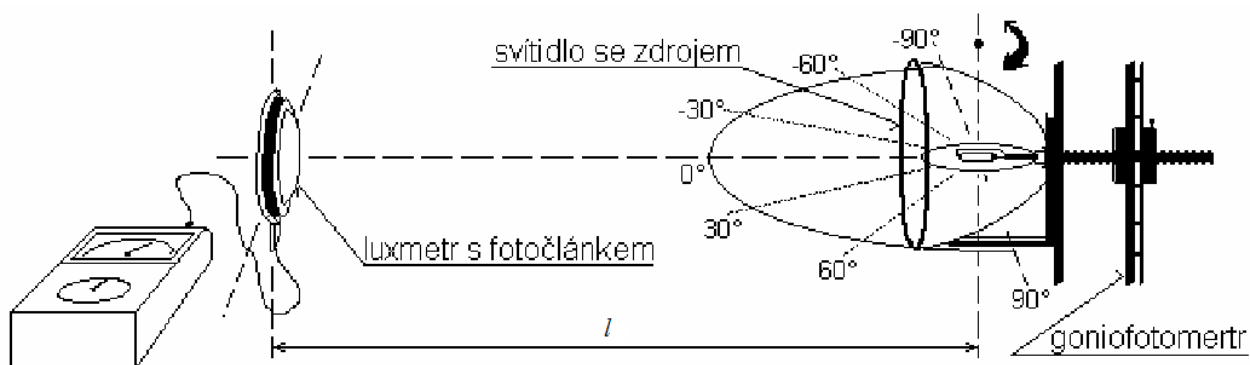
6.1.2 Měření křivek svítivosti na goniofotometru s fotometrem

K měření křivek svítivosti zdrojů a svítidel se nejběžněji využívají goniofotometry. Goniofotometr je zařízení umožňující měřit svítivost světelného zdroje či svítidla v různých rovinách a pod různými úhly. Konstrukčně může být goniofotometr proveden ve třech variantách.[7]

Goniofotometry s otočným zdrojem a pevným fotometrem

Uspořádání goniofotometru s otočným zdrojem světla či svítidlem a pevným fotometrem je znázorněno na *Obr. 6-3*. Střed fotočlánku a měřeného zdroje se nastavují přesně do optické osy. Zkoumaný objekt se postupně natáčí ve zvoleném kroku a na měřicím přístroji se odečítají měřené údaje.

Toto uspořádání goniofotometru není vhodným řešením, neboť u některých světelných zdrojů je světelný tok závislý i na poloze zdroje.[7]



Obr. 6-3 Uspořádání goniofotometru s otočným zdrojem a pevným fotometrem [9]

Goniofotometry s pevným zdrojem a otočným fotometrem

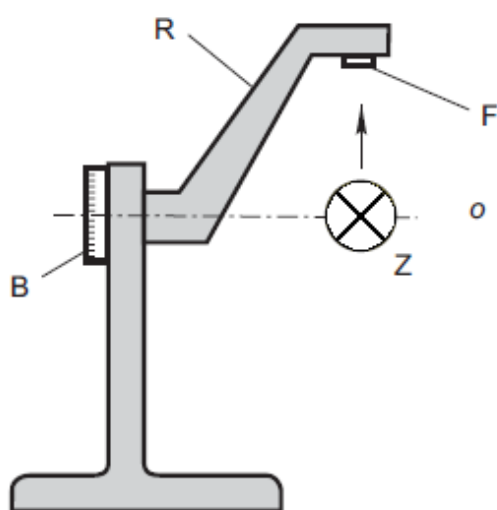
Přístroje druhé skupiny lze použít pouze pro objektivní měření. Na otočném rameni je umístěn fotočlánek, který se otáčí kolem měřeného zdroje či svítidla. Výhodou tohoto řešení je skutečnost, že měřená svítidla či světelné zdroje jsou zavěšeny v normální provozní poloze.[7]

Goniofotometr s pevným zdrojem a otočným fotometrem je znázorněn na *Obr. 6-4*. Přístroj se skládá z ramene R , na němž je upevněn fotočlánek F . Rameno R se otáčí kolem měřeného zdroje (svítidla) Z umístěného v ose otáčení o . Úhel natočení se odečítá na bubínku B . Změna roviny, ve které se měří křivka svítivosti, se provádí natočením zdroje či svítidla.[7]

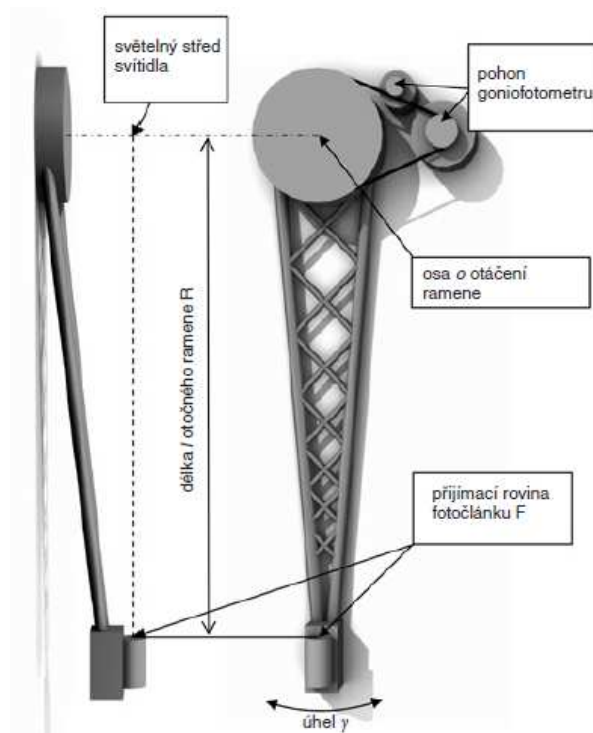
Obr. 6-5 vystihuje modernizované řešení goniofotometru s pevně umístěným zdrojem a otočným fotometrem. Účelem modernizace bylo zajištění laboratorní přesnosti a zautomatizování měření křivek svítivosti. K dosažení laboratorní přesnosti je důležité snížit nejistotu nastavení úhlu γ natočení ramene R goniofotometru, a to i při kroku měření po 2° . Toho je dosaženo použitím krokového pohonu goniofotometru a řetězové převodovky. Základní krok ramene lze dále pomocí zvolené řídicí jednotky dělit na mikrokroky v řádech jednotek úhlové vteřiny. Řídicí jednotka krokového motoru s patentovaným omezením rezonancí eliminuje oscilace při středních rychlostech v pracovní oblasti. Další funkcí řídicí jednotky je umožnění plynulého rozjezdu a zastavení, čímž je zamezeno kmitání při zastavení během měření. Pro přesné nastavení polohy je součástí pohonu inkrementální čidlo.[10]

Řídicí jednotka pohonu goniometru je propojena s počítačem s využitím analogově digitálního převodníku připojeného na sběrnici USB. Měření osvětlenosti je zajištěno fotočlánkem digitálního luxmetru s analogovým i digitálním datovým výstupem, který je také připojen na sběrnici USB. Propojení s počítačem pomocí sběrnice USB značně zjednodušuje obsluhu zařízení a urychluje vyhodnocení naměřených dat. Aby bylo možné ovládat pohon goniometru přes počítač musel být vyvinut software, který umožňuje zpracování naměřených dat do tabulek či grafické formy.[10]

Zmíněná modernizace goniometru byla provedena v laboratoři světelné techniky katedry elektroenergetiky FEL ČVUT v Praze. Na základě provedeného rozboru nejistoty měření bylo prokázáno, že měření čar svítivosti modernizovaným goniometrem je v toleranci běžných přesných měření fotometrických laboratoří.[10]



Obr. 6-4 Konstruktivní řešení goniometru s pevně umístěným zdrojem a otočným fotometrem [7]



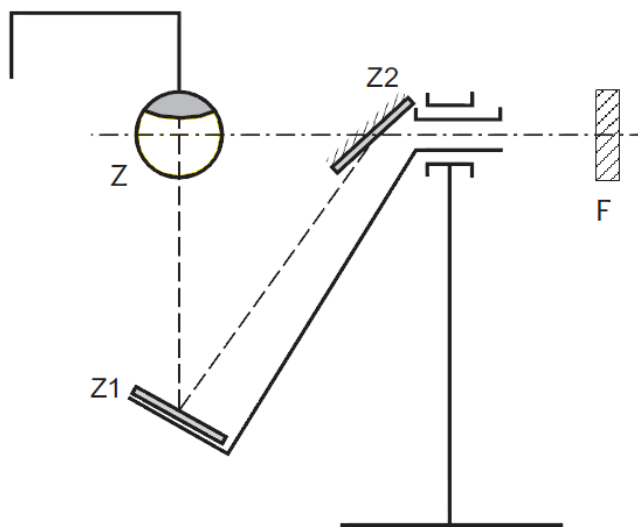
Obr. 6-5 Princip modernizovaného goniometru s pevně umístěným zdrojem a otočným fotometrem [10]

Goniometry s pevným zdrojem i fotometrem a otočným zrcadlovým systémem

U těchto goniometrů lze provádět měření v libovolné vzdálenosti. Fotometrická vzdálenost je dána součtem vzdáleností od měřeného zdroje přes systém zrcadel až k fotočlánku. Konstruktivní řešení je oproti předchozím typům daleko složitější kvůli systému zrcadel. Nevýhodou použití zrcadlového systému je i degradace povlaku zrcadel a postupné snižování odrazivosti světelného záření. U tohoto přístroje by bylo možno provádět absolutní měření svítivosti, ale bylo by zapotřebí znát činitele absorpce zrcadel, který se časem díky stárnutí povlaku zrcadel zvětšuje.[7]

Schematické uspořádání goniometru s otočným zrcadlovým systémem je znázorněno na Obr. 6-6. Okolo svítidla Z se na pevném rameni otáčí zrcadlo Z1. Odražené světlo zrcadlem

Z1 dopadá na zrcadlo Z2 od kterého se opět odráží ve směru otáčení do pevně stojícího vizuálního nebo fyzikálního fotometru F.[7]



Obr. 6-6 Konstrukční řešení goniofotometru s otočným zrcadlovým systémem [7]

Aby se zabránilo kmitání či deformaci nosných částí během otáčení zdroje, ramene nebo zrcadlového systému, musí být konstrukce goniofotometrů dostatečně tuhá. Pevnost konstrukce goniofotometru má totiž významný vliv na vznik přídavné chyby měření.[7]

Svítivost se obvykle v různých směrech neměří absolutně, ale stačí relativní měření, které dovoluje nakreslit tvar zjištěné křivky v polárních souřadnicích. Diagram svítivosti je cejchován zjištěním jedné absolutní hodnoty svítivosti, například ve směru svislé osy svítidla, a to zvláštním měřením buď přímo na goniofotometru nebo na fotometrické lavici.[7]

Goniofotometry pro hromadná měření automaticky ukládají naměřené a zkorigované hodnoty do datových souborů. Taktéž je možné goniofotometry vybavit zařízením pro samočinné zakreslování čar svítivosti přímo na polární papír.[7]

6.1.3 Výpočet a zdroje nejistot při měření konvenčními metodami

Žádné měření, žádná metoda ani žádný měřicí přístroj nejsou absolutně přesné, což se v reálném měřicím procesu projevuje vznikem odchylky mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny, v tomto případě křivky svítivosti zdroje světla. Výsledná hodnota měřené veličiny má určitou toleranci, vzhledem ke skutečné hodnotě a téměř nikdy nenastane rovnost obou hodnot. Dříve používaný způsob určování chyb měření byl nahrazen v současnosti běžně používanou metodou nejistot měření. Nejistotu měření lze obvykle stanovit jako nejistotu typu A nebo nejistotu typu B. Oba typy nejistot se dále skládají z dílčích nejistot. Dílčí nejistoty představují jednotlivé příčiny vzniku výsledné nejistoty daného typu, kterými jsou např. přístroje, metody, pozorování a vyhodnocení. Na výslednou velikost nejistoty měření má obecně vliv soubor původců, kde množství a velikosti jednotlivých dílčích nejistot se liší měření od měření.[10][11]

Nejistota měření se označuje malým písmenem u . Dolní index udává informaci o zvoleném typu nejistoty A nebo B. Další použitý symbol v indexu odlišuje v případě dílčí nejistoty

jednotlivé dílčí nejistoty stejného typu, například podle zdroje chyby. Vypočítaná hodnota nejistoty měření se zaokrouhluje na dvě platná místa, přednostně nahoru a obvykle se vyjadřuje v procentech.

Nejistoty měření typu A

Metoda vyhodnocení tohoto typu vychází ze statického rozdělení výsledku dostatečně velkého množství opakovaní série měření téže veličiny za stejných podmínek, což je v mnoha případech obtížné realizovat. Pokud jsou k dispozici výsledky n opakovaní ($n > 1$) měřené veličiny X bude dán výsledný odhad nejistoty jako směrodatná odchylka střední hodnoty \bar{X} měřené veličiny X podle rovnice (6.4). Střední hodnota \bar{X} je stanovena aritmetickým průměrem podle vztahu (6.3).[10][11]

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad [-] \quad (6.3)$$

$$u_A = \frac{100}{\bar{X}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [\%] \quad (6.4)$$

Tato metoda zjištění nejistoty založená na kolísání měřených údajů při opakovaném měření má v případě malého počtu měření ($n < 10$) klesající spolehlivost.[11]

Nejistoty měření typu B

Vyhodnocení nejistoty typu B je založeno na známých, identifikovatelných a kvantifikovatelných zdrojích chyb. Výpočet nejistoty se stanoví na základě podrobného rozboru všech možných a dostupných informací o zdrojích sledovaných chyb, racionálního odhadu maximální možné odchylky a předpokládaného rozdělení pravděpodobnosti výskytu.[10][11] K získání dostatečných informací o sledovaných zdrojích chyb mohou posloužit[12]:

- informace o měřicích prostředcích a podmínkách jejich použití získané od výrobců;
- zkušenosti z předchozích sérií měření;
- zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicím prostředí a podmínkách měření;
- údaje získané při kalibraci, z certifikátů, ověřovacích listů apod.;
- nejistoty referenčních údajů v příručkách;

Ocenění a zpracování získaných informací závisí do značné míry na zkušenostech a znalostech experimentátora.[12]

Při určování nejistoty typu B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů. Pokud je známa maximální odchylka určitého posuzovaného i -tého zdroje nejistoty $z_{i \max}$ vypočítá se dílčí nejistota u_{Bi} dle výrazu[11][12]:

$$u_{Bi} = \frac{z_{i \max}}{k} \quad [\%] \quad (6.5)$$

kde k - je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, kterým se daný zdroj nejistoty řídí

Celková nejistota metodou typu B se určí sloučením všech dílčích nejistot typu B dle rovnice pro n zdrojů[11][12]:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 \cdot u_{Bi}^2} \quad [\%] \quad (6.6)$$

kde u_{Bi} - jsou nejistoty jednotlivých zdrojů chyb

A_i - je součinitel citlivosti jednotlivých zdrojů chyb

Kombinovaná nejistota typu C

Často si nevystačíme jen s jedním nebo druhým typem nejistoty samostatně, proto je celková nejistota dána kombinací obou typů nejistoty. Výsledná kombinovaná nejistota sledované veličiny se určí odmocninou ze součtu čtverců obou typů nejistot A a B podle vztahu[11][12]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [\%] \quad (6.7)$$

Pravděpodobnost, že odchylka naměřené hodnoty od skutečné hodnoty nepřekročí hranici standardní nejistoty, závisí na rozdělení náhodné proměnné. Pro rovnoměrné rozdělení je tato pravděpodobnost 57,7 % a pro normální rozdělení 68,3 %. Tato hodnota pravděpodobnosti je většinou nedostatečná, protože skutečná odchylka může být větší než stanovený interval nejistoty. Proto je zaváděna rozšířená nejistota U definovaná jako[10][12]:

$$U = k_U \cdot u_C \quad [\%] \quad (6.8)$$

kde k_U - je koeficient rozšíření

Koeficient rozšíření nabývá nejčastěji hodnoty 2. Při rozšíření $k_U=2$ je u normálního rozdělení pravděpodobnost 95,5 %, že se skutečná hodnota nachází v intervalu vypočítané nejistoty. V případě rovnoměrného rozdělení je pravděpodobnost rovna 100 %.[10][11]

Zdroje nejistot při měření křivek svítivosti na goniofotometru

Tab. 6-1 Hlavní zdroje chyb při měření křivek svítivosti svítidla (zdroje) na goniofotometru [10]

Číslo chyby	Popis zdroje chyb	Označení dílčí nejistoty
1	Nepřesnost nastavení úhlu γ ramene goniofotometru či měřeného svítidla (zdroje)	$u_{B\gamma}$
2	Chyba použitého digitálního či analogového luxmetru	u_{BE}
3	Určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku od světelného středu svítidla	u_{Bl}
4	Nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}
5	Vliv konečných rozměrů vyzařovací plochy svítidla (zdroje) a přijímací plochy fotočlánku	u_{Bk}
6	Nastavení spojnice středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla	u_{Bp}

V Tab. 6-1 jsou uvedeny hlavní zdroje nejistot a jim odpovídající dílčí nejistoty při měření křivek svítivosti na goniofotometru. K určení dílčích nejistot se v tomto případě používá ve všech bodech metoda typu B.

K tomu, aby bylo vůbec možné správně měřit směrové charakteristiky zdrojů (svítidel) je zapotřebí světelná laboratoř, která je uzpůsobena k měření světelně technických vlastností zdrojů a svítidel. Světelná laboratoř je opatřena matně černým nátěrem všech stěn, dveří případně jiných vybavení, aby nedocházelo k ovlivnění měření rozptýleným světlem. Okna v této místnosti buď nejsou, nebo jsou dokonale zatemněná.

Při změně polohy natočení měřeného svítidla či ramene goniofotometru vzniká odchylka měření, jejíž velikost je závislá na způsobu nastavení a odečítání úhlu γ . Pokud je úhel γ nastavován manuálně a odečítán vizuálně, je nejistota výrazně větší, než v případě automatizovaného pohonu goniofotometru s čidlem polohy a následným vyhodnocením v počítači. Na velikost nejistoty nastavovaného úhlu má vliv i krok, ve kterém měření provádíme. Měření probíhá nejčastěji v kroku po 10° , 5° a pro přesnější měření po 2° .

Značnou nejistotu do měření křivek svítivosti vnáší nepřesnost použitého měřicího přístroje tj. luxmetru. Podle mezinárodních norem se luxmetry dělí do čtyř tříd označovaných číslicemi 1, 2, 3, 4, případně písmeny L, A, B, C. Každé třídě odpovídá největší dovolená celková chyba luxmetru 2, 5, 10 a 20 %. Luxmetry patřící do třídy přesnosti 1 a 2 se používají pro přesná laboratorní měření. Pro běžná provozní a orientační měření postačují přístroje třídy přesnosti 3 a 4. Při měření luxmetry je důležité, aby nedošlo k překročení měřicího rozsahu přístroje a k nadměrnému osvětlení fotočlánku. V případě analogového indikátoru se doporučuje zvolit citlivost měření, tak aby odečítaný údaj byl až za jednou pětinou stupnice, aby nedošlo k navýšení nejistoty měření, která je již tak dost vysoká.[2]

Vzdálenost mezi měřeným zdrojem (svítidlem) a fotočlánkem je dána v případě goniofotometru s otočným ramenem pevným nastavením délky ramene, kde v případě dalších měření můžeme dílčí nejistotu považovat za konstantní. Při měření na goniofotometru s otočným zdrojem se vzdálenost, měřená metrem, může v závislosti na požadavcích měnit. V případě fotometrické lavice je fotometrická vzdálenost odměřena na měřítku, které je součástí lavice. Dílčí nejistota určení vzdálenosti je dána největší předpokládanou odchylkou vzdálenosti středu fotočlánku a světelného středu zdroje světla (svítidla).[10]

Dílčí nejistota nestability použitých zařízení, je způsobena stárnutím fotočlánku a nestabilitou napájecího zdroje. S kolísáním napájecího napětí se mění i světelný tok a to má negativní vliv na výsledek měření.

Dílčí nejistota konečných rozměrů zkoušeného zdroje (svítidla) a fotočlánku zohledňuje fakt, že neměříme bodový zdroj. Tomu se snažíme přiblížit tím, že fotočlánek a měřený zdroj (svítidlo) od sebe umístíme ve vzdálenosti nejméně pětinasobku nejdelšího rozměru vyzařovací plochy svítidla.

Při nastavení polohy fotočlánku vzhledem ke světelnému středu zkoumaného svítidla může dojít k vyosení fotočlánku od spojnice se světelným středem svítidla. Tomu nelze výrazně zabránit a počítá se s maximálním vyosením 2° . [10]

Před začátkem měření křivek svítivosti světelného zdroje (svítidla) je důležité, aby zkoumaný zdroj (svítidlo) byl čistý, nepoškozený a správně umístěný. Nový světelný zdroj musí před měřením svítit alespoň 100 h (u výbojkového zdroje) a alespoň 6 h (u žárovky).

Pro dostatečné ustálení světelných vlastností je důležité světelný zdroj před každým měřením po nějakou dobu nechat nepřetržitě svítit. Fotočlánky je třeba před měřením osvětlit po dobu 5 až 15 min přibližně stejnou hladinou osvětlenosti, jaká bude měřena. U některých zdrojů je světelný tok závislý na teplotě, proto je nutné udržovat stabilní teplotu okolí.[2]

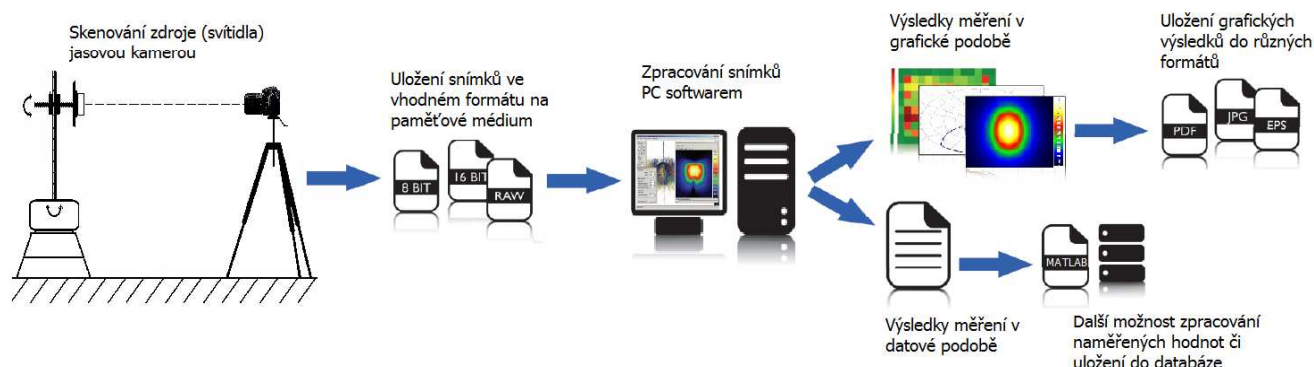
6.2 Nekonvenční metody měření křivek svítivosti

Při měření křivek svítivosti zdrojů (svítidel) nekonvenčními metodami je důležitým zařízením digitální fotoaparát. Digitální fotoaparát nahrazuje luxmetr, který se používá při klasickém měření křivek svítivosti. Výsledkem měření je soubor digitálních fotografií, které jsou dále zpracovány v počítači specializovaným softwarem. Jasovou analýzou zkoumaného zdroje (svítidla) získáme jasovou mapu zdroje v jednotlivých úhlech natočení. Z takto určené hodnoty jasu zdroje a z informace o geometrickém uspořádání fotoaparátu a měřeného zdroje můžeme stanovit křivku svítivosti měřeného zdroje. Tu můžeme stanovit buď nepřímo z odrazu od difúzní plochy, nebo přímým skenováním zdroje (svítidla).

Je zřejmé, že i v případě nekonvenční metody měření křivek svítivosti vzniknou více či méně závažné odchylky měření. Abychom minimalizovali chyby při měření, je důležité seznámit se s jasovým analyzátozem, který budeme při nekonvenčním měření křivek svítivosti používat.

6.2.1 Jasová analýza měřeného zdroje (svítidla) s využitím digitální fotografie

Nekonvenční metody se odlišují od klasických metod tím, že měřenou světelnou veličinou není osvětlenost, ale jas, který je přepočítán na svítivost. Jas není v tomto případě měřen klasickým jasměrem, ale pomocí moderního zařízení nazývané jasový analyzátor. Jasový analyzátor se skládá z jasové kamery (digitálního fotoaparátu) a softwaru, který dokáže z pořízené digitální fotografie vyhodnotit jasové rozložení. Pomocí jasových kamer je možné měřit kromě jasu scény také geometrické vlastnosti dané scény, pokud je fotoaparát řádně kalibrován, což je pro určení výsledných křivek svítivosti velmi důležité. Obr. 6-7 znázorňuje jednotlivé operace, kterými při jasové analýze zkoumaný zdroj projde, než dosáhneme hledaného výsledku.



Obr. 6-7 Postup při jasové analýze světelného zdroje (svítidla)

6.2.1.1 Princip digitálních fotoaparátů a jejich senzorů

Digitální fotoaparát je zařízení, které primárně slouží k záznamu statického obrazu. Obraz je zaznamenán v digitální podobě (digitální fotografii), která umožňuje další zpracování. Kromě základní funkce jsou digitální fotoaparáty již běžně vybaveny dalšími rozšiřujícími funkcemi, které souvisejí ať už přímo či nepřímo se zpracováváním obrazovými daty.[13]

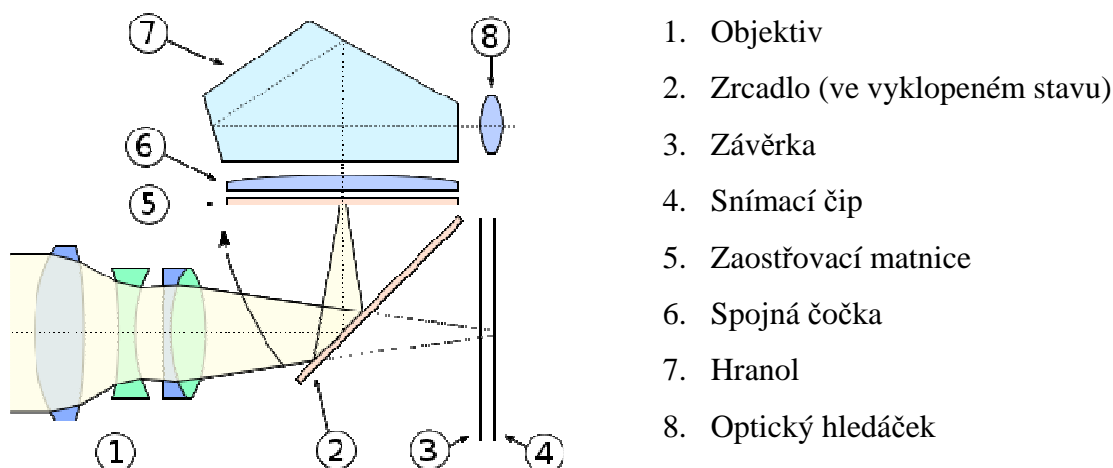
Typy digitálních fotoaparátů

Současný trh s digitálními fotoaparáty nabízí nepřehledné množství těchto zařízení v široké škále cenových kategorií, tvarů a schopností. Digitální fotoaparáty jsou tedy vyráběny v různých třídách, od čehož se odráží i výsledná kvalita digitální fotografie. Základními typy digitálních fotoaparátů jsou: kompaktní digitální fotoaparáty, digitální zrcadlovky DSLR (Digital Single-Lens Reflex camera) a speciální fotoaparáty sloužící pro vědecké, vojenské, lékařské a jiné speciální účely.[13] Pro nás je směrodatný typ fotoaparátu digitální zrcadlovka, kterou budeme používat při měření.

Konstrukce a princip digitální zrcadlovky

Digitální zrcadlovky se od kompaktních digitálních fotoaparátů liší zejména použitím pohyblivého zrcadla, umožňujícího překlápet obraz vytvořený objektivem mezi matnicí hledáčku a snímacím čipem. Optický hledáček slouží k pozorování reálného obrazu. Mezi další odlišnosti od kompaktních digitálních fotoaparátů patří výměnný objektiv, větší rozměry těla, větší hmotnost, větší snímací čip i rozlišení, přímé ovládání funkčních prvků, mnoho funkcí, široká nabídka příslušenství.[14]

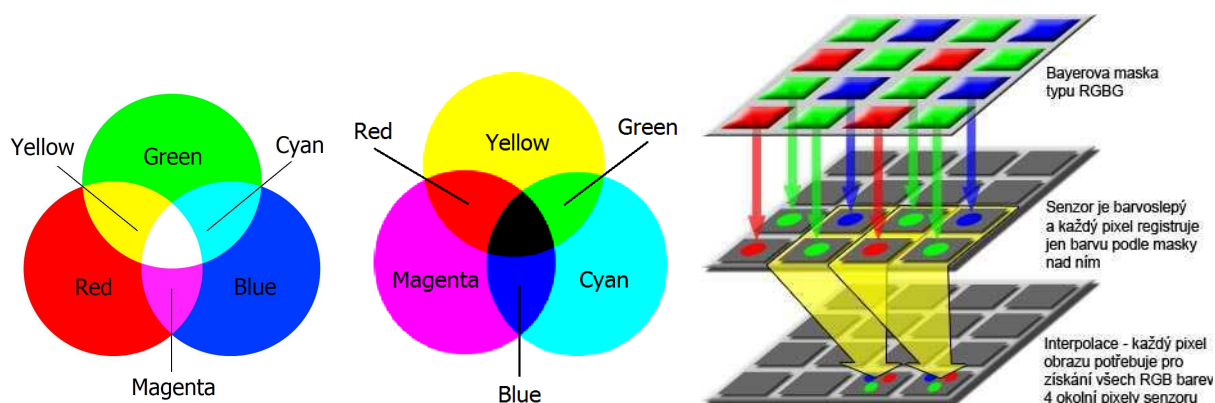
Konstrukce digitální zrcadlovky viz *Obr. 6-8* je podobná konstrukci klasického analogového fotoaparátu s tím rozdílem, že nepoužívá film, ale světlocitlivý snímač. Abychom získali výslednou digitální fotografii, musí světlo, které z fotografované scény vyšlo nebo se z ní odrazilo, projít objektivem se systémem čoček a po zaostření dopadne na snímací čip. Světelný tok snímané scény je v jednotlivých pixelech (obrazových bodech) převáděn na elektrický signál a uložen v podobě vázaného náboje (u technologie CCD). Časový interval působení světla na čip je závislý na době otevření závěrky. Po uzavření závěrky jsou vygenerované náboje z čipu postupně odváděny a měřeny speciálním zesilovačem. Získaný signál v podobě napětí je dále převeden A/D převodníkem na binární kód. Digitální data o dané fotografii jsou pak pomocí mikroprocesoru fotoaparátu různě upravována a převedena do některého grafického formátu a uložena na paměťové médium.[13][15]



Obr. 6-8 Příčný řez digitální zrcadlovkou [15]

Snímací čipy digitálního fotoaparátu

Snímací čip patří mezi základní prvky digitálního fotoaparátu a zaujímá místo dříve užívaného světlocitlivého filmu. Obvykle se používají snímače typu CCD nebo CMOS. Snímací čip obsahuje miliony světlocitlivých buněk tzv. pixelů. Maticе pixelů vytváří výsledné efektivní rozlišení obrazu. Dopadající paprsky světla jsou na jednotlivých pixelech převáděny na elektrický náboj. K tomu, aby byla fotografie barevná, nám nestačí pouze informace o velikosti náboje, ale je k tomu potřeba znát ještě velikost náboje jednotlivých složek RGB viz *Obr. 6-9 a*). Proto se před snímací čip umísťuje barevná maska (filtr), která propouští na jednotlivé pixely červenou (R-red), zelenou (G-green) a modrou (B-blue) barvu. Užitím masky je zajištěno, že jednotlivé pixely reagují pouze na jedinou ze tří barev. V praxi se běžně používá tzv. Bajerova maska, v níž jsou ze čtveřice pixelů snímače dva překryty zeleným filtrem, jeden červeným a jeden modrým. Výsledná barva pixelu je tedy výsledkem interpolace čtyř okolních pixelů. Interpolace v Bayerově masce je naznačena na *Obr. 6-9 c*). Obsazení dvou zelených filtrů je dáno spektrální citlivostí lidského zraku, který je v oblasti zelené barvy nejcitlivější. Někteří výrobci digitálních fotoaparátů používají masku s barvami soustavy CMY viz *Obr. 6-9 b*), která bývá doplněna o zelenou barvu pro vyšší citlivost. Maska je pak složena z barev azurová (C-cyan), zelená (G-green), purpurová (M-magenta) a žlutá (Y-yellow) tedy CGMY. [13][14][16]



Obr. 6-9 a) Soustava barev RGB b) Soustava barev CMY c) Interpolace v Bayerově masce [21]

Snímač charakterizují zejména tři základní parametry:

- **Rozlišení snímače** – označuje množství efektivních pixelů obsazených ve výsledné fotografii a udává se v mega pixelech. U dnešních kompaktních fotoaparátů je rozlišení od 5 do 12 Mpx (milionů pixelů), profesionální zrcadlovky mívají i více než 20 Mpx.[13][17]
- **Velikost snímače** – udává informaci o fyzické velikosti snímače. Digitální zrcadlovky mají senzory od velikosti 18×13,5 mm (systém 4/3") až po rozměry filmového políčka 36×24 mm tzv. full frame.[13][17]
- **Citlivost snímače** – nastavenou citlivost vyjadřuje tzv. ISO číslo, což představuje zesílení signálu A/D převodníkem. Citlivost ISO se pohybuje obvykle v rozmezí od 100 do 3200. Čím větší citlivost je nastavena, tím méně světla a času potřebujeme k získání snímku. S větší citlivostí se zkracuje i doba expozice. Zvyšováním citlivosti ISO však dochází i k zesílení šumu.[13][17]

CCD (Charged Coupled Device) v českém překladu znamená zařízení s vázaným nábojem, což je obdobou posuvného registru, na který působí světelné záření. Světlocitlivý snímač CCD využívá pro svou funkci fyzikální jev známý jako fotoefekt. Fotoefekt nastává právě, když částice světla (foton) narazí do atomu, přičemž mu odevzdá svou energii. Důsledkem toho dojde k přemístění některého z jeho elektronů ze základního do tzv. excitovaného stavu. Uvolněný elektron by bylo možné odvést pomocí elektrod, jak je tomu u fotodiody. V tomto případě jsou ovšem elektrony zadržovány vrstvou oxidu křemičitého SiO_2 a dochází k jejich hromadění. Po uzavření závěrky je na systém elektrod přiváděn hodinový signál s dvoufázovým, s trojfázovým nebo s čtyřfázovým čtením (dle počtu elektrod). To znamená, že se na jednotlivé elektrody přivádí postupně napětí a tím se nahromaděné elektrony posouvají pod elektrody, na kterých je zrovna napětí. Elektrony se tímto způsobem posouvají stále dokola, elektroda po elektrodě, pixel po pixelu, až se dostanou k zesilovači. Zesilovač malé napětí, odpovídající množství zachycených elektronů v jednotlivých pixelech, zesílí na vyšší úroveň. Zesílený analogový signál je digitalizován v A/D převodníku, odkud dále putuje k dalšímu zpracování obrazu.[13][16][17]

Dle konstrukčního řešení se CCD snímače dělí na dvě základní kategorie a to lineární (čtečky čárových kódů) a plošné (digitální fotoaparáty, kamery atd.). Dále se CCD snímače dělí podle jejich přístupu k čtení nahromaděných elektronů v jednotlivých pixelech na progresivní (FF – Full Frame), plošný (FT – Frame Transfer) a prokládaný (IT – Interline Transfer). Každý ze tří způsobů čtení má své klady a zápory a užití toho či onoho systému čtení v praxi je dáno ekonomickými nebo kvalitativními požadavky na dané zařízení.[16]

Uspořádání pixelů nemusí být jen do čtverce, může mít i jinou strukturu než je výše popsána. Existují různá řešení CCD snímačů např. Super CCD, Super CCD SR, Super CCD SR II atd. Výrobce snímačů vede k vývoji dalších řešení čipů snaha o přiblížení se k co nejuvěhodnějšímu snímku pořízeného z dané scény. To však ve výsledku nemusí mít jen pozitivní efekt, ale také záporný, v podobě složitějšího výrobního procesu čipu či zhoršení některého z parametrů CCD snímače.[16][18]

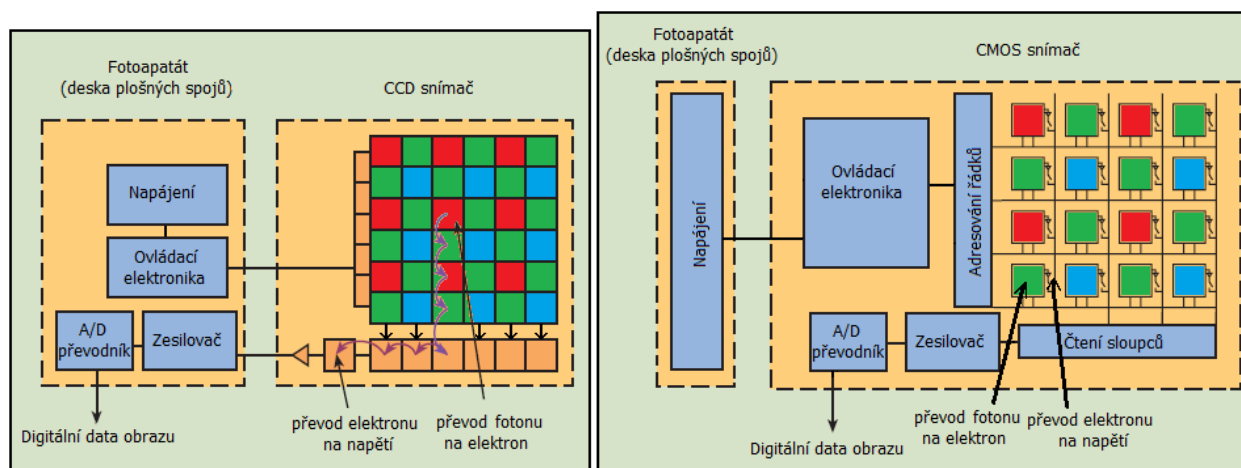
CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor) jsou snímače, u kterých se využívá technologie polovodičových součástek, řízených elektrickým polem. Výrobní technologie je obdobná jako u integrovaných obvodů a je tedy poměrně dobře propracovaná a levná. Pro napájení postačuje jedna napěťová úroveň, což je příznivé pro celkovou spotřebu energie. Čtení úrovně nábojů nahromaděných v jednotlivých pixelech probíhá z každého pixelu zvlášť, což je hlavní rozdíl oproti CCD snímačům. U CMOS snímače se používá zesilovačů, které jsou integrovány přímo ve snímači. Podle toho, jak jsou zesilovače do struktury snímače integrovány, jsou rozděleny na pasivní a aktivní. Pasivní zesilovače jsou v oblasti sloupcových obvodů a signál je zesilován jednotným zesílením. Naproti tomu aktivní zesilovače jsou součástí každého pixelu, což umožňuje individuálně řídit zesílení signálu z jednotlivých pixelů a tím lépe eliminovat vzniklý šum. Zavedení zesilovacích obvodů do každého pixelu mělo za následek snížení světelné citlivosti a zvětšení rozměrů pixelu. Problém byl vyřešen použitím miniaturních čoček nad každý pixel a minimalizací zesilovacích obvodů.[17][18]

V *Tab. 6-2* jsou porovnány důležité parametry CCD a CMOS snímačů. CMOS snímače měly dříve své uplatnění zejména ve fotoaparátech mobilních telefonů, ale s vývojem technologie a zlepšením parametrů se čím dál častěji objevují i v digitálních zrcadlovkách, kde se kompenzují jejich nevýhody (malá citlivost na dopadající světlo, vysoký šum) převažujícími výhodami

(nízká spotřeba elektrické energie, nízká výrobní cena). Na Obr. 6-10 je vidět konstrukční řešení CCD a CMOS snímačů a princip přeměny fotonu na digitální signál.[17]

Tab. 6-2 Srovnání CCD a CMOS snímačů[17]

Snímací čip/parametry	CCD	CMOS
Cena	vysoká	nízká
Rozměry	vyšší	nízké
Spotřeba	vysoká	nízká
Kvalita obrazu	vysoká	střední
Rozlišení	vysoké	střední
Fill faktor (činná plocha)	vysoký	nízký až střední
Digitální šum	nízký	střední
Rychlost	nízká	vysoká
Dynamický rozsah	vysoký	střední



Obr. 6-10 Architektura CCD a CMOS snímače [27]

Foveon X3 je název nového snímacího čipu, který používá zcela jinou technologii zaznamenávání barevné informace ze snímané scény. Rozdíl oproti CCD a CMOS snímačům spočívá ve struktuře fotocitlivé matice bodů. Snímací čip je složen ze tří vrstev. V každé vrstvě se zachycuje jiná barevná složka světla podle toho, do jaké hloubky jsou různé barvy schopny pronikat. Barvy s delší vlnovou délkou (červená) proniknou hlouběji než barvy s kratší vlnovou délkou (modrá). Tomu je přizpůsobeno pořadí (modrá, zelená a červená) a síla jednotlivých vrstev snímače. Signály ze tří vrstev jsou zpracovány zesilovacími obvody tak, jak je tomu v CMOS snímači a podle zastoupení jednotlivých barev soustavy RGB je složena výsledná barva daného pixelu. Každá ze tří barevných vrstev v podstatě představuje jeden snímač, což v sobě nese nevýhodu trojitého zaznamenávání obrazového bodu a tím i delšího času zpracování informací. Výhodou ovšem je, že zde není použita barevná maska a tudíž výsledná barva není dána interpolací barev se sousedními pixely. Výrobce počítá celkové rozlišení jako *počet horizontálních pixelů* x *počet vertikálních pixelů* x *3 vrstvy*. Tento typ snímače není v současnosti příliš rozšířen a je používán jen u fotoaparátů společnosti Sigma, která vlastní tuto technologii.[19]

6.2.1.2 Zpracování a ukládání digitální fotografie

Každý pixel z matice pixelů snímače nese informaci o dynamice vybuzení. Úroveň vybuzení, tzv. barevná hloubka, závisí na typu A/D převodníku použitého ve fotoaparátu. V současnosti jsou digitální fotoaparáty vybaveny A/D převodníky s 12, 14 nebo 16 bitovou barevnou hloubkou pro každou ze tří barev soustav RGB či CMY. S rozvojem technologie lze očekávat, že barevná hloubka bude v budoucnu ještě vyšší. Barevná hloubka určuje celkový počet barev, které ve výsledné fotografii můžeme nalézt. Každá z RGB barev je kódována 3 čísly, která vyjadřují jas jednotlivých RGB složek. Barva pixelu se kóduje buď 1 bytem, nebo 2 byty (byte je základní jednotka počítačové informace a je tvořena 8 bity, kde bit nese informaci „0“ nebo „1“). Byte umí zakódovat jen celá čísla od 0 do 255, což znamená, že každá barva soustavy RGB má jen 256 úrovní jasu (0 - nesvítí, 255 - maximum). To v tomto případě představuje barevnou hloubku 8 bitů na kanál neboli $3 \times 8 = 24$ bitů na pixel. Pro 16 bitovou hloubku s 2 byty na kanál je to $3 \times 16 = 48$ bitů na pixel. V Tab. 6-3 jsou uvedeny informace o počtu barev pro různé barevné hloubky.[20][21][22]

Tab. 6-3 Datová náročnost a počet barev pro různé barevné hloubky [22]

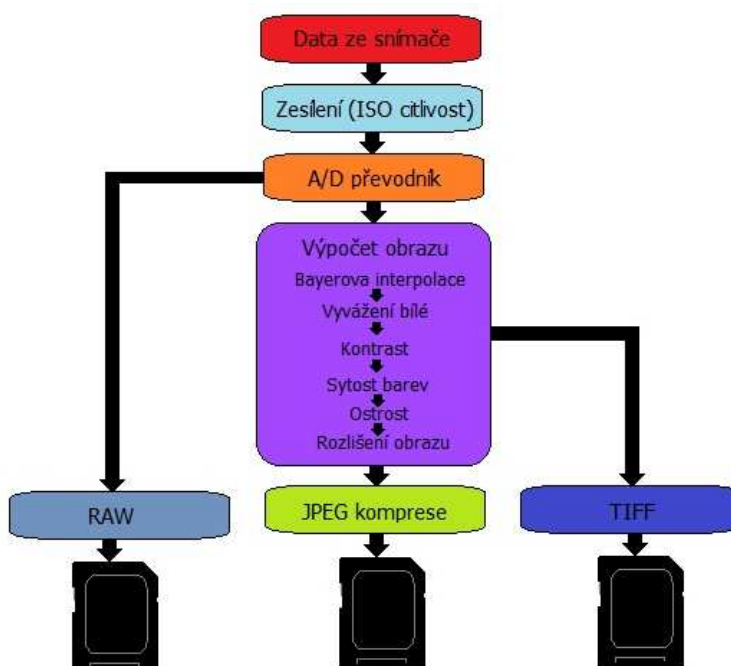
Počet bitů/pixel	Počet bitů/kanál	Počet barev/kanál	Celkový počet barev pixelu
$3 \times 8 = 24$	8	$2^8 = 256$	$2^{24} = 16\,777\,216$
[1]	10	$2^{10} = 1024$	[1]
[1]	12	$2^{12} = 4096$	[1]
[1]	14	$2^{14} = 16384$	[1]
$3 \times 16 = 48$	$2 \times 8 = 16$	$2^{16} = 65\,536$	$2^{48} = 281\,474\,976\,710\,656$

Pro lidské oko je rozsah 16 milionů barev plně dostačující, neboť je schopno rozpoznat pouze 10 milionů barev. Pokud však bude fotografie pořízená v 8 bitové barevné hloubce významně upravována, můžou se některé barvy vytratit a ve fotografii se mohou objevit hrubé a viditelné skoky barev tzv. posterizace a to především v jemných barevných přechodech např. v obloze, na jednolitěm pozadí atp.[21][22]

Digitální fotografie se ukládá nejčastěji na paměťové médium. Velikost jedné digitální fotografie se odvíjí od celkového počtu pixelů tvořících fotografii a barevné hloubky. Platí, že čím větší bude rozlišení snímacího čipu a barevná hloubka A/D převodníku, tím bude digitální fotografie datově objemnější a ukládání pomalejší. Ukládání snímku probíhá obvykle do jednoho ze tří typů formátů (RAW, TIFF, JPEG).[20][22]

K provedení kvalitní jasové analýzy je nezbytné, aby pořízený digitální snímek byl co nejvíce autentický a uložený v nekomprimované podobě. Snímky by mohly být uloženy v kterémkoliv ze zmíněných formátů, ovšem formáty JPEG a TIFF nejsou vhodné z důvodu výpočtu obrazu přímo ve fotoaparátu. Navíc formát JPEG využívá ztrátové metody komprese pro zmenšení objemu dat, což vede ke ztrátě části grafické informace. Tyto modifikace fotografie by značně zkomplikovaly převod na původní data ze senzoru a proto je pro ukládání snímků k jasové analýze nejvhodnějším obrazovým formátem typ RAW. Název formátu RAW v českém jazyce znamená surový, neupravený. Formát RAW ukládá data přímo z A/D převodníku, kde data nejsou ještě nijak upravována. Výpočet výsledné fotografie neprovádí obrazový procesor fotoaparátu, ale až příslušný program v počítači. Obrazový procesor fotoaparátu provede výpočet obrazu jen pro náhled snímku na LCD displeji fotoaparátu, který je následně přibalen k RAW. Souborový RAW formát není nijak standardizován a výrobci si definují vlastní RAW formáty dle svých potřeb. Rozdíly jsou mnohdy velké a pro výpočet výsledné fotografie je třeba použít programy určené ke konkrétní značce, někdy i k danému modelu fotoaparátu.

RAW pracuje obvykle s 12 či 14 bitovou hloubkou, což je daleko více než u JPEGu, který více než 8 bitovou barevnou hloubkou uložit nedokáže. Na Obr. 6-11 je zobrazen postup, jakým jsou data ze snímače zpracována a ukládána do jednotlivých obrazových formátů.[20][21][22]



Obr. 6-11 Ukládání dat ze snímače do obrazových formátů RAW, JPEG a TIFF [17]

6.2.1.3 Jasový analyzátor LumiDISP - LDA

LumiDISP (Luminance DIStribution Processing) je software, který byl původně navržen k ověření možnosti analýzy jasových poměrů pomocí dat pořízených z digitální fotografie. Program byl dále rozšířen o další funkce a přepracován do podoby pro praktické použití. Na vývoji programu se podílel tým pracovníků z Ústavu elektroenergetiky Vysokého učení technického v Brně. Díky financování z prostředků Ústavu elektroenergetiky, komerčního prodeje programu a poskytování služeb s programem souvisejících je systém LumiDISP i nadále průběžně vylepšován a rozšiřován o další funkce využitelné ve světelné technice.[23]

Původní návrh programu, jako jasového analyzátoru s běžně dostupnými digitálními fotoaparáty, se ukázal jako vyhovující. Použití libovolného digitálního fotoaparátu je možné díky kalibračním funkcím. Ovšem z finanční náročnosti na získávání kalibračních funkcí pro různé digitální fotoaparáty je program uzpůsoben jen na vybrané typy digitálních fotoaparátů. Systém LumiDISP - LDA je v současnosti nabízen jako kompletní jasový analyzátor, který tvoří následující prvky[23]:

- měřicí fotoaparát NIKON D7000 kalibrovaný na základní zdroje světla - dle požadavků;
- program LumiDISP, případně jeho adaptace na konkrétní aplikaci;
- databázový stroj FireBird;
- nápověda k programu a příručka v tištěné podobě;
- kufřík, který obsahuje další doplňky (kabely, baterie, nabíječku, filtry, čtečku, popruhy, instalační CD.



Obr. 6-12 Obsah kufříku jasového analyzátoru LumiDISP - LDA[20]

Součástí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA je i digitální zrcadlovka Nikon D7000 s objektivem AF-S DX NIKKOR 18-105 f/3,5-5,6G ED VR a sadou filtrů, které řeší přizpůsobení ke křivce spektrální citlivosti normálního pozorovatele $V(\lambda)$. Všechny části jasového analyzátoru jsou uloženy v praktickém kufříku, jak je znázorněno na Obr. 6-12. V Tab. 6-4 a Tab. 6-5 jsou uvedeny základní parametry digitální zrcadlovky Nikon D7000 a objektivu.

Tab. 6-4 Technické parametry digitální jednooké zrcadlovky Nikon D7000 [24]

Snímací čip	CMOS formátu DX (APS-C)
Velikost snímacího čipu	23,6 x 15,6 mm
Počet efektivních pixelů	16,2 MPix
Maximální velikost fotografie (rozlišení)	4928 x 3264
Formát fotografie	NEF (RAW) 12 nebo 14 bitů, JPEG
Rozsah citlivosti ISO	100 - 6400, manuální nastavení 100 - 25600
Rozsah závěrky	1/8000 s až 30 s + režim Bulb.
Rozhraní připojení	USB2, HDMI

Tab. 6-5 Technické parametry objektivu AF-S DX NIKKOR 18-105 f/3,5-5,6G ED VR [24]

Ohnisková vzdálenost	18 - 105 mm
Světelnost	f/3,5 - 5,6
Optický zoom	5,8x
Nejvyšší clonové číslo	f/22 - 38
Konstrukce	15 čoček/11 členů

Systém LumiDISP - LDA umožňuje měření s dynamickým rozsahem scény (rozdíl mezi nejsvětlejším a nejtmačším místem fotografie) přibližně 1:4000 na jedno měření. V případě užití HDR fotografie (High Dynamic Range - obraz s vysokým dynamickým rozsahem) lze dynamický rozsah rozšířit až na 1:3200000000.[20]

Maximální chyba měření u jasového analyzátoru LumiDISP - LDA, způsobená vlivem přizpůsobení ke křivce $V(\lambda)$ je přibližně ± 3 % pro všechny normalizované i nenormalizované typy světla. U normalizovaného světla A se maximální chyba měření pohybuje kolem $\pm 1,5$ %.[20]

Jasový analyzátor LumiDISP - LDA lze v současnosti použít k těmto aplikacím [23]:

Měření jasu a jeho distribuce – měření je zaměřeno na rozložení jasu, kde výsledkem je jasová mapa, ze které se získají hodnoty jasu v libovolném bodě nebo oblasti.

Rovnoměrnost jasu, jasové řezy – v případě hodnocení jasového rozložení je nejčastějším ukazatelem rovnoměrnost jasů. Zkoumané jasy v zorném poli by měly být rovnoměrné, tedy ani malé ani velké, vzhledem k průměrné hodnotě. Jasový řez neboli jas na určité čáře udává průběh jasu v daném směru a souřadnici.

Osvětlení komunikací – měření rovnoměrnosti rozložení jasu je možné aplikovat k hodnocení osvětlení komunikací. Velká výhoda tohoto měření spočívá v rychlosti měření. Klasické měření může trvat hodiny, ale měření jasovým analyzátozem trvá jen několik sekund. Další předností je rychlé vyhodnocení naměřených informací v počítači.

Osvětlení přechodů pro chodce – aplikace jasového analyzátoru na tuto situaci vychází z rozlišování kontrastu chodců vzhledem k osvětlené silnici. Osvětlení (kontrast) chodce musí být takové, aby řidič včas zpozoroval chodce z určité vzdálenosti.

Hodnocení zobrazovacích zařízení – uplatnění najde systém jasového snímání taktéž v zobrazovací technice, při hodnocení kvality světelných parametrů různých displejů, monitorů, palubních přístrojů apod.

Hodnocení svítidel – z jasového rozložení světelného toku svítidla lze za pomoci speciálních výpočtů stanovit křivky svítivosti daného svítidla.

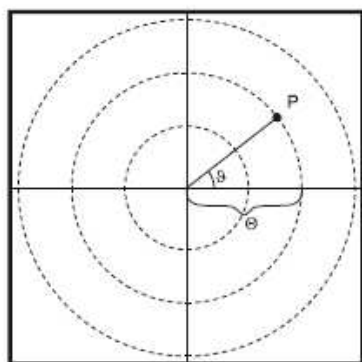
Posuzování světelných zdrojů – jelikož jasový analyzátor umožňuje pozorování velmi vysokého jasu, je vhodný k měření světelných zdrojů s velmi intenzivním jasem (např. LED diody). Jasový analyzátor je schopen zaznamenávat děje probíhající ve světelném zdroji, což klasický jasoměr neumožňuje.

Z uvedeného výčtu možných aplikací lze usoudit, že tento laboratorně cejchovaný jasový analyzátor má v praxi velmi univerzální využití. Taktéž jeho variabilita, umožňující použití prakticky libovolného digitálního fotoaparátu, je velmi výhodná. Existují i další obdobné specializované jasové analyzátozem pracující s přesnými jasovými kamerami. Ovšem tyto analyzátozem jsou mnohem dražší a nenabízejí takovou všestrannou aplikovatelnost jako je tomu u jasového analyzátoru LumiDISP - LDA.

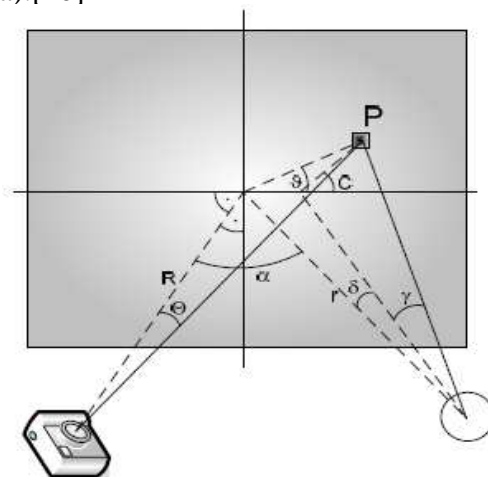
6.2.2 Měření křivek svítivosti pomocí odrazu světla od srovnávací roviny

Jednou z nekonvenčních metod měření křivek svítivosti je rekonstrukce vyzařovacích charakteristik zdroje světla (svítidla) z odrazu světelného záření od srovnávací plochy. Jelikož má srovnávací plocha konečné rozměry, není možné křivku svítivosti změřit z jednoho snímku. Měřený zdroj (svítidlo) musí být vůči srovnávací ploše postupně natočen do poloh, ze kterých lze stanovit kompletní křivku svítivosti. Digitální fotoaparát je ve stabilní pozici naproti srovnávací ploše a zaznamenává jas paprsků od této plochy odražený. Pořízené digitální snímky se následně nechají jasově analyzovat například v programu LumiDISP.[20]

Jasový analyzátor LumiDISP převede pořízený snímek na jasovou mapu. V této jasové mapě má každý pixel zaznamenanu informaci o jasu, úhlu dopadu paprsku do objektivu a azimutu na fotografii viz *Obr. 6-13*. Pokud jsou známy i informace o geometrickém uspořádání digitálního fotoaparátu, srovnávací plochy a měřeného svítidla *Obr. 6-14* lze matematickými operacemi stanovit geometrické parametry bodu P , který je součástí srovnávací plochy. Z geometrických parametrů bodu P je možné vypočítat vektory svítivosti a následně rekonstruovat křivku svítivosti měřeného zdroje (svítidla).[20]



Obr. 6-13 Geometrické parametry bodu P [20]



Obr. 6-14 Geometrické uspořádání fotoaparátu, srovnávací plochy a měřeného zdroje (svítidla) [20]

Při rekonstrukci křivek svítivosti ze srovnávací plochy nastává problém v podobě správného definování směrového koeficientu odrazivosti srovnávací roviny. Koeficient odrazivosti matematicky popisuje rozložení odraženého světla od srovnávací roviny. Dle povrchových vlastností rovinné srovnávací plochy se světelný paprsek může odrazet jednoduchými nebo složenými odrazy. Rozlišujeme tři jednoduché odrazy a to zrcadlový odraz, rozptýlený zrcadlový odraz a rozptyl. Ideální zrcadlový odraz vzniká na leštěném povrchu, rozptýlený zrcadlový odraz je vytvářen na drsném povrchu a rozptyl je výsledkem matného povrchu. Složené odrazy představují superpozici jednoduchých odrazů. Vznik složených odrazů je způsoben složitější interakcí světla na povrchu materiálu plochy. Odraz svítivosti na izotropním povrchu srovnávací roviny je složen ze zrcadlové a rozptylné složky svítivosti viz vztah (6.9). Tento povrch se vyznačuje stejnými odraznými vlastnosti v každém směru dopadu paprsku.[5][20]

$$I_v = I_s + I_d \text{ [cd; cd, cd]} \quad (6.9)$$

kde I_s - je zrcadlová složka svítivosti

I_d - je rozptylná složka svítivosti

Jednotlivé složky svítivosti je možné dále rozložit na rovnice (6.10) a (6.11).[20]

$$I_s = I_L \cdot r_s \cdot \cos^h(\Theta_0 + \Theta) \text{ [cd; cd, -, -, °, °]} \quad (6.10)$$

kde I_L - je svítivost dopadajícího paprsku

r_s - je koeficient zastoupení zrcadlové složky v celkovém odraženém světle

h - je exponent vyjadřující rozptyl zrcadlového odrazu

Θ_0 - je parametr funkce

Θ - je natočení směrově difúzního odrazu

$$I_d = I_L \cdot r_d \cdot \cos(\Theta_0) \text{ [cd; cd, -, °]} \quad (6.11)$$

kde I_L - je svítivost dopadajícího paprsku

r_s - je koeficient zastoupení difúzní složky v celkovém odraženém světle

Θ_0 - je parametr funkce

Pokud je srovnávací plocha z anizotropního materiálu, pak je popis odrazu svítivosti komplikovanější. Při popisu odrazivosti u těchto materiálů lze vycházet z funkce BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function), která matematicky popisuje vztah mezi světelnými zdroji a odraznými vlastnostmi povrchů těles. Obecný tvar funkce je uveden v rovnici (6.12).[20]

$$f_\lambda(\theta_r, \Phi_r, \theta_i, \Phi_i) = \frac{I_{r\lambda}(\theta_r, \Phi_r)}{E_{i\lambda}(\theta_i, \Phi_i)} = \frac{I_{r\lambda}(\theta_r, \Phi_r)}{I_{i\lambda}(\theta_i, \Phi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} \quad (6.12)$$

kde θ, ϕ - jsou úhel a azimut dopadajících paprsků

I - je svítivost

E - je osvětlenost

$\cos \theta$ - je kosinus úhlu mezi dopadajícím paprskem a normálou povrchu plochy

$d\omega$ - je prostorový úhel

i - je index označující dopadající paprsek

r - je index označující odražený paprsek

Jelikož reálné povrchy nemají ideální odrazné vlastnosti, je nutné popsat jejich odrazivost pro jakýkoliv dopadající světelný paprsek. Proto je nezbytné odvodit vztahy pro spektrálně nezávislé izotropní a anizotropní odrazivé povrchy.[20]

Z předpokladů o známých odrazných vlastnostech izotropních a anizotropních materiálů a z geometrických informací dopadajícího paprsku na snímač lze odvodit v kartézském souřadnicovém systému koeficient odrazivosti reálných povrchů. Potom výsledná svítivost odraženého paprsku je reprezentována vztahem 6.13.[20]

$$I_v = I_L \cdot r_v \text{ [cd; cd, -]} \quad (6.13)$$

kde r_v - je odvozený koeficient odrazivosti reálného povrchu

Při měření křivek svítivosti touto metodou musíme počítat s tím, že výsledky měření budou i při sebestřednějších určení koeficientu odrazivosti povrchu zatíženy chybou. Další odchylka měření je způsobena samotným principem měření, kdy světelné hodnoty zdroje světla určujeme z jednoho bodu, čímž považujeme světelný zdroj (svítidlo) za bodový zdroj. Tato odchylka se vyskytuje i u klasických metod měření a velikost odchylky je závislá na vzdálenosti měřeného zdroje (svítidla) od srovnávací plochy či snímacího přístroje. Taktéž tvar křivky svítivosti

světelného zdroje (svítidla) ovlivňuje výsledky měření a to zejména při měřicí vzdálenosti menší než je nejdelší rozměr svítivé plochy měřeného zdroje (svítidla). Ve větších měřicích vzdálenostech je ovlivnění naměřených výsledků prakticky nulové.[20]

Pro návrh osvětlovacích soustav se v současnosti užívají zejména počítačové programy, které pracují s naměřenými světelnými daty jednotlivých světelných zdrojů a svítidel. Tato tzv. raydata obsahují i informaci o křivkách svítivosti konkrétních světelných zdrojů a svítidel. Ovšem tyto křivky svítivosti jsou měřeny v různých vzdálenostech tak, aby odchylka měření byla co nejmenší s ohledem na nebodový zdroj (svítidlo). Pokud program počítá hladinu osvětlení na srovnávací rovině, je velmi pravděpodobné, že data o křivce svítivosti svítidla byla naměřena ve větší vzdálenosti, než jak je tomu v návrhu osvětlovací soustavy a tudíž křivka svítivosti neodpovídá skutečnosti. Návrhové programy problém řeší tak, že nebodové svítidlo rozdělí na n shodných částí, u kterých se použije změřená křivka svítivosti daného zdroje (svítidla) n -krát zmenšená. Avšak ani tato transformace úplně nevykompenzuje odlišnost průběhu osvětlení na srovnávací rovině. Je zřejmé, že výpočet osvětlenosti bude i u sofistikovaných programů zatížen chybou, neboť křivka svítivosti uložená ve raydatech by musela být změřena pro různé fotometrické vzdálenosti, což je nereálné.[20]

Z výše uvedeného textu vyplývá, že i nekonvenční měření křivek svítivosti pomocí odrazu světla od srovnávací roviny nepřináší zpřesnění výpočtu v návrhu osvětlení. Taktéž určení koeficientu odrazivosti výsledky měření křivek svítivosti komplikuje a tak tato metoda má výhodu zejména ve výrazně rychlejších měření díky malému počtu snímků. Díky urychlenému měření je vhodné použít tuto metodu při měření světelných zdrojů (svítidel) u kterých je svítivost ovlivňována okolními podmínkami.[20]

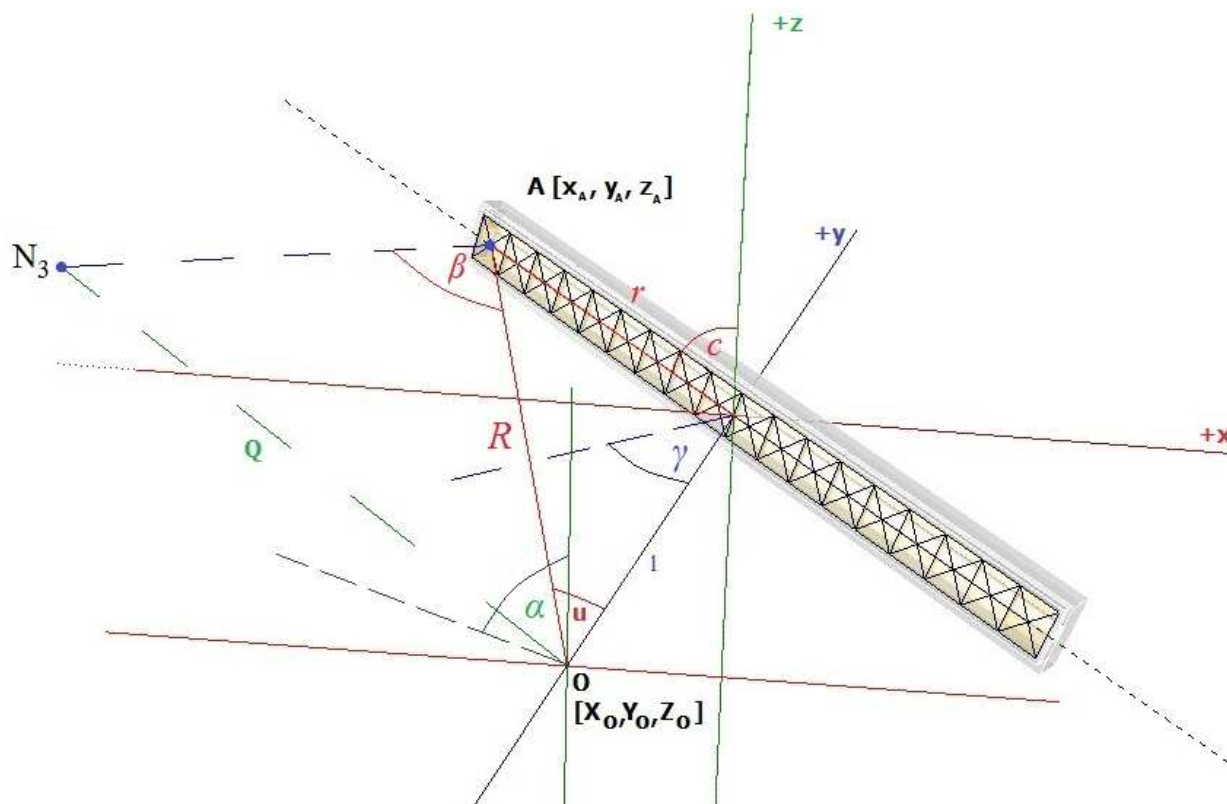
6.2.3 Měření křivek svítivosti svítidla pomocí jasového skenování

Měření intenzity světla v blízkém poli, jak je tato metoda v zahraničí nazývána, má ve srovnání s klasickým měřením několik velmi důležitých výhod. Při konvenčním měření s goniofotometrem jsou značné požadavky na velké měřicí prostory. V případě měření svítivosti v blízkém poli jsou vyžadovány prostory, které jsou dvakrát větší, než jsou rozměry měřeného objektu.[25] Měření probíhá taktéž na goniofotometru, ovšem jako měřicí přístroj je použit digitální fotoaparát, který snímá zkoumaný zdroj (svítidlo) v definovaných pozicích z malé vzdálenosti. Goniofotometr může být jakéhokoliv typu, avšak jako nejvhodnější se jeví měření, kdy je světelný zdroj umístěn v pracovní pozici a kolem něj se otáčí měřicí přístroj. Ovšem my máme k dispozici goniofotometr, kdy se otáčí zkoumaný zdroj (svítidlo) a měřicí přístroj je v klidu. Proto návrh realizace této metody bude vycházet z výše uvedené skutečnosti.

Díky kalibrovanému digitálnímu fotoaparátu lze pořízené snímky svítidla převést do jasové mapy pomocí vhodného programu například LumiDISP. V tomto jasovém obraze nese každý pixel informaci o jasu, úhlu dopadu paprsku do objektivu a azimutu na fotografii. Vzhledem k tomu, že je každý snímek vytvořen z milionů pixelů, můžeme předpokládat, že je zachyceno velké množství paprsků pocházejících právě ze zkoumaného světelného zdroje (svítidla). Pokud jsou známy geometrické údaje o focených elementárních ploškách svítidla lze jas přepočítat na svítivost.

Paprsek nesoucí informaci o jasu, který vychází z elementární plošky a následně dopadá na snímací čip, definují čtyři parametry $L(x, y, u, \alpha)$. Tyto údaje poskytují veškeré informace o světelném výkonu světelného zdroje (svítidla) kromě spektrální distribuce. Učlením těchto parametrů paprsků z jednotlivých snímků do jednoho souboru jsou vytvořena raydata.

Pokud je ploška A součástí foceného svítidla jsme u ní schopni stanovit úhel β , který svírá normála plošky A a paprsek dopadající do objektivu fotoaparátu. Úhel β lze stanovit na základě rozměrů a úhlů zobrazených v *Obr. 6-15*. V tomto případě lze úhel β stanovit dvěma způsoby. Jedna z možností výpočtu úhlu β je jeho výpočet ze zaznamenaných informací o každé elementární plošce a to konkrétně pomocí rozměrů dané plošky, azimutu a úhlu dopadu paprsku do objektivu. Další postup, jak lze odvodit úhel β vychází ze změřených vzdáleností r a l . Odvození úhlu β provedeme pomocí druhého postupu, jelikož je pro tento případ výhodnější.



Obr. 6-15 Geometrické uspořádání snímaného svítidla a objektivu digitální zrcadlovky

Pro plošku A odvodíme kartézské souřadnice na základě známých úhlů natočení c , γ a známé vzdálenosti r mezi počátkem souřadnicového systému a ploškou A .

$$\begin{aligned}x_A &= -r \cdot \sin c \cdot \cos \gamma \\y_A &= r \cdot \sin c \cdot \sin \gamma \\z_A &= r \cdot \cos c\end{aligned}\quad (6.14)$$

Pokud jednotlivé složky souřadnic plošky A odečteme od souřadnic objektivu fotoaparátu O na základě platnosti Pythagorovy věty v prostoru, pak získáme délku úsečky R , která představuje vzdálenost, kterou paprsek urazí od středu plošky A do objektivu O . Souřadnice Y_O představuje fotometrickou vzdálenost mezi světelným středem svítidla a objektivem fotoaparátu se zápornou hodnotou. Souřadnice X_O a Z_O jsou nulové.

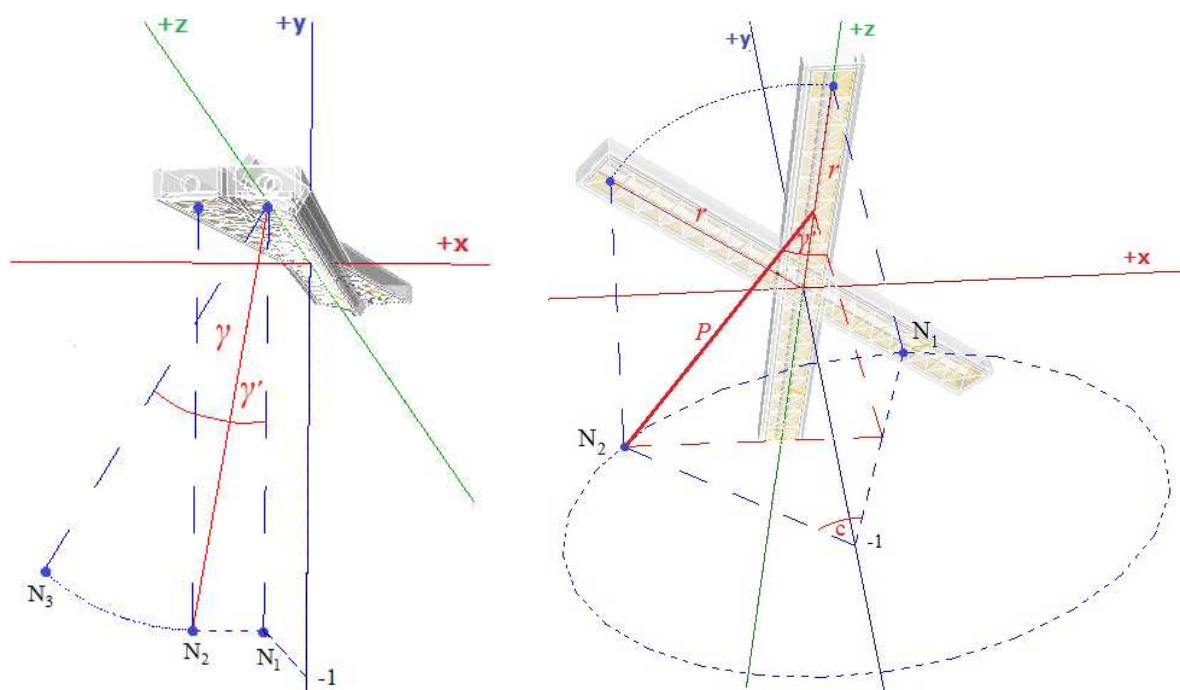
$$R = \sqrt{(X_O - x_A)^2 + (Y_O - x_A)^2 + (Z_O - x_A)^2} \quad (6.15)$$

Úhel u , pod kterým dopadá paprsek na snímací čip lze zjistit buď z informací ze snímku, nebo pomocí výpočtu na základě kosinové věty (6.16).

$$r^2 = l^2 + R^2 - 2 \cdot l \cdot R \cdot \cos u \Rightarrow u = \arccos \frac{r^2 - l^2 - R^2}{-2 \cdot l \cdot R} \quad (6.16)$$

Abychom stanovili úhel β je nutné nadefinovat souřadnice normály plošky A . Nejprve určíme souřadnice normály, kdy ploška A není nijak vychýlená. Souřadnice jsou označeny jako N_1 . Pokud se bude ploška A otáčet kolem osy y , jsou souřadnice normály značeny N_2 . V případě pootočení plošky A okolo osy z , jsou souřadnice normály popsány pomocí N_3 . Uvedené odvození souřadnic normály je znázorněno na Obr. 6-16.

$$\begin{array}{lll} N_{1x}=0 & N_{2x} = -r \cdot \sin c & N_{3x} = -P \cdot \sin(\gamma + \gamma') \\ N_{1y} = -1 & N_{2y} = 1 & N_{3y} = -P \cdot \cos(\gamma + \gamma') \\ N_{1z} = r & N_{2z} = r \cdot \cos c & N_{3z} = N_{2z} = r \cdot \cos c \end{array} \quad (6.17)$$



Obr. 6-16 Stanovení souřadnic normály plošky A

Pro určení úhlu γ' je potřeba znát vzdálenost P , kterou stanovíme na základě platnosti Pythagorovy věty.

$$P = \sqrt{N_{2x}^2 + N_{2y}^2} \quad (6.18)$$

Pak úhel γ' vypočítáme dle vztahu (6.19), kde N_{2y} představuje vzdálenost 1 m.

$$\gamma' = \arccos \left(\frac{N_{2y}}{P} \right) \quad (6.19)$$

Vzdálenost Q mezi objektivem digitální zrcadlovky a koncovým bodem normály plošky A je určena dle následujícího vztahu (6.20).

$$Q = \sqrt{(X_o - N_{3x})^2 + (Y_o - N_{3y})^2 + (Z_o - N_{3z})^2} \quad (6.20)$$

Poté lze podle kosinové věty vypočítat vzájemný úhel β , který svírá paprsek dopadající do objektivu fotoaparátu a normála plošky A .

$$Q^2 = I^2 + R^2 - 2 \cdot R \cdot I \cdot \cos \beta \Rightarrow \beta = \arccos \frac{Q^2 - I^2 - R^2}{-2 \cdot R \cdot I} \quad (6.21)$$

Na základě zjištěných parametrů o velikosti úhlu β , jasu L a ploše A lze vypočítat normálovou svítivost I_o dané plošky. Pomocí vzorce (6.22) můžeme stanovit normálovou svítivost jednotlivých plošek, které ve výsledku reprezentují celkovou světelnou plochu zkoumaného svítidla.

$$I_{o_A} = L_A \cdot A_A \cdot \cos \beta \left[\text{cd}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}^2, - \right] \quad (6.22)$$

K tomu aby bylo možné stanovit celkovou svítivost svítidla je nutné jednotlivé normálové svítivosti plošek přepočítat na osvětlenost dle vztahu (6.23).

$$E_{n_A} = \frac{I_{o_A}}{R^2} \cdot \cos u \left[\text{lx}; \text{cd}, \text{m}, - \right] \quad (6.23)$$

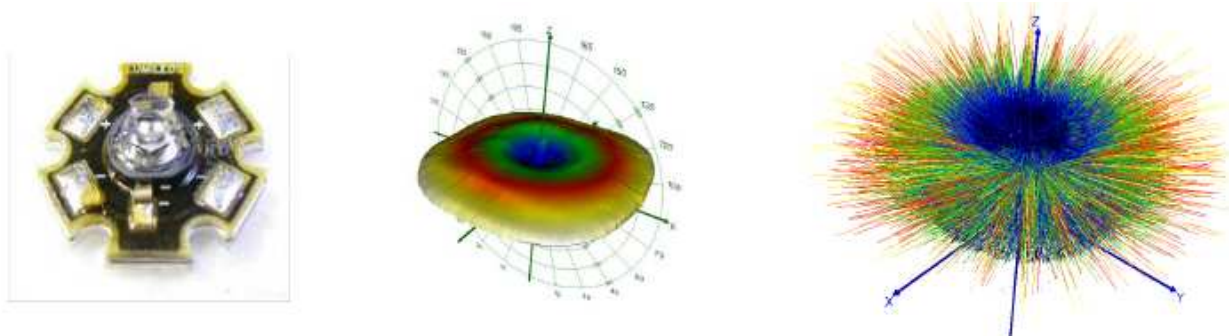
kde $\cos u$ - je kosinus úhlu, který svírá paprsek dopadající do objektivu s osou y

R - je vzdálenost mezi světelným středem plošky a bodem ve kterém se zkoumá osvětlenost

Pokud známe příspěvek osvětlenosti od přímé složky světla, vycházející z každé plošky svítidla, lze na základě aditivního zákona, jak naznačuje vzorec (6.24), stanovit výsledné osvětlení v měřeném bodě při dané vzdálenosti od světelného středu svítidla. Jestliže sečteme jednotlivé příspěvky osvětlení z plošek i v různých polohách natočení těchto plošek, pak můžeme po přepočtu na svítivost dle vztahu (6.1) vynést svítivosti do křivek.

$$E = \sum_{i=1}^n E_{n_{A_i}} \left[\text{lx}; \text{lx} \right] \quad (6.24)$$

Jestliže je naměřeno dostatečné množství hodnot lze svítivost daného světelného zdroje (svítidla) zobrazit v 3D. Na *Obr. 6-17* je vyobrazena 3D křivka svítivosti výkonové LED. V *Obr. 6-17* můžeme dále vidět paprskový model jasů, ze kterých je 3D křivka svítivosti vypočtena.



Obr. 6-17 3D křivka svítivosti výkonové LED a znázornění paprskového modelu LED [25]

6.2.4 Nejistoty měření nekonvenčních metod měření křivek svítivosti

Tak jako u konvenčních metod, tak i u nekonvenčních metod měření křivek svítivosti se vyskytují nejistoty měření. U nekonvenčních metod se k měření směrových charakteristik používá jasový analyzátor a proto je jedním ze zdrojů nejistoty měření digitální fotoaparát a výpočetní software. Při nekonvenčním měření se objevují i zdroje nejistot, které jsou shodné se zdroji nejistot při měření konvenčními metodami, např. nepřesnost nastavení úhlu natočení svítidla (senzoru), nastavení pozice fotoaparátu (fotočlánku) vzhledem ke světelnému středu zkoumaného svítidla (srovnávací plochy) atd. V této kapitole jsou uvedeny zejména zdroje nejistot měření ovlivňující měření jasovým analyzátozem. Je zde proveden rozbor nastavení konkrétních parametrů digitálního fotoaparátu, které mohou do výsledku měření křivek svítivosti vnést určitou odchylku.

Nastavení clony a expozičního času

Přesnost nastavení clony a expozičního času jsou sjednocené parametry při určování přípustné tolerance, jak uvádí německá norma DIN 19016 a 4522-16,7. Odchylku doby expozice můžeme zjistit měřením, kdy pro přesnější výsledek použijeme dvě digitální zrcadlovky a následně změříme expoziční časy, které porovnáme s nastaveným časem fotoaparátů. Při měření expozičního času je výhodné focení několika LED zdrojů, které se rozsvěčují po sobě, s nastavenou frekvencí. Uvedeným způsobem měření snadno zjistíme reálný čas závěrky. Tento test ukazuje, že fotoaparát má nastavenou dobu závěrky například na 1/250 s, ale ve skutečnosti je doba osvětlení čipu 1/200 s. V metadatech je ovšem uvedena nastavená hodnota závěrky a ne reálný čas. Tato odchylka je ovšem v rámci povolených limitů, které uvádí DIN 190166. Nastavení elektronické závěrky je mnohem přesnější, než je tomu u mechanické závěrky. Digitální fotoaparáty s elektronickou závěrkou mívají expoziční časy uvedeny velmi přesně (např. 1/7,5 s, 1/28 s, 1/58 s). Měření skutečné hodnoty vstupní pupily (clony) vyžaduje daleko složitější přístup a proto se neprovádí. Tyto nepřesnosti nastavení závěrky a clony způsobují chybu ve výpočtu expozičního času a tím i výsledného jasu.[26][27]

Nastavení citlivosti ISO

Definování citlivosti ISO digitálního fotoaparátu je podobné způsobu definování citlivosti světlocitlivého filmu, používaného u analogových fotoaparátů. Stanovení citlivosti digitálního fotoaparátu popisuje ISO 122328. Snímače CCD a CMOS digitálních fotoaparátů mají přirozenou citlivost, která závisí na základní kvantové účinnosti (přeměně fotonů na elektrony), fyzické velikosti pixelů a hloubce potenciálu použitého pro sbírání elektronů. Pokud je zapotřebí zvýšit úroveň citlivosti na vyšší hodnotu, než je vlastní citlivost snímacího čipu, dochází k zesílení elektronů nahromaděných ve snímači a tím se ve výsledku jakoby zvýší citlivost samotného snímače. Z toho plyne, že přirozená citlivost se nemění, ale mění se způsob, jakým fotoaparát naloží s nahromaděnými informacemi o snímku. Násobením světelných informací daného snímku se současně násobí i šum, který při expozici na snímači vzniká. Šum má stále stejný odstup od signálu, a pokud budeme zvyšovat citlivost ISO, začne se ve výsledné fotografii projevovat i šum daleko více. Vzniklý šum ve výsledku negativně ovlivňuje i měření jasu. Hlavní problém ovšem tkví v přesném zesílení signálu a v uložení skutečné hodnoty nastavení citlivosti. Proto ovládání automatického řízení zesílení musí být důkladně kalibrováno. Pokud, tomu tak není, může se stát, že například citlivost ISO 100 ve skutečnosti odpovídá ISO 80, ale tato reálná hodnota není uvedena v metadatech. Tento fakt vede k chybám výpočtu jasu, kdy program počítá s nesprávnou hodnotou citlivosti.[26][27]

Stálost expozice

Stálost expozice závisí především na schopnosti přesně reprodukovat nastavení clony a závěrky. Clona a závěrka nemají při opakovaném měření přesně stejné hodnoty nastavení, i když expozice byly pořízeny za naprosto stejných podmínek. Průměr vstupní pupily a expoziční čas se mohou lišit, což je způsobeno omezenou přesností mechanických komponentů.[26][27]

A/D převodník

A/D převodník slouží, jak je uvedeno v předcházejících kapitolách, k převodu analogového signálu na digitální signál. A/D převodník převádí průběžné hodnoty napětí do několika diskrétních číselných digitálních hodnot. Tento krok nevyhnutelně vede ke ztrátě dat a k zaokrouhlovací chybě, která je nazývána kvantovací chyba. Kvantovací chyba může být snížena zvětšením kvantovací hloubky, která je přesně určena počtem bitů tedy barevnou hloubkou. Toto řešení však může být omezeno dynamickým rozsahem snímače, kde platí, že čím je vyšší dynamický rozsah, tím i hloubka kvantování musí být vyšší, aby se zabránilo ztrátě informací. Většina digitálních fotoaparátů je vybavena 10 až 14 bitovými A/D převodníky. Výsledkem vyšší barevné hloubky je jemnější odstupňování barev a tím i plynulejší barevné přechody. Výpočet jasu může tedy ovlivnit i nesprávně převedený digitální signál (z důvodu zaokrouhlování).[26][27]

Vyvážení bílé

Vyvážení bílé označuje úkon spočívající v barevném vyvážení snímané scény vzhledem k jeho světelným podmínkám tak, aby se zachycený obraz co nejlépe shodoval s podáním barev, tak jak je vidí lidské oko. Světelné podmínky mohou být různé a každý světelný zdroj může mít jinou barevnou teplotu (teplotu chromatičnosti). Zatímco lidské oko se těmito podmínkám umí do značné míry subjektivně přizpůsobit, u snímacího čipu tomu tak není a v případě manuálního nastavení se může projevit odchylka od světelných podmínek, na které je přístroj v ten který okamžik nastaven.[28] Proto je vhodné nastavení automatického vyvážení bílé. U odhadu jasu scény při automatickém vyvážení bílé jsou užity algoritmy, které jsou vyvinuté tak, aby správně a přirozeně zobrazily zaznamenanou scénu tak, jak by ji vnímalo samotné lidské oko. Tyto algoritmy automatického vyvážení bílé byly testovány a téměř odpovídají vnímání lidského oka.[26][27]

Šum

I přes veškerou snahu výrobců není snímací čip ideální zařízení a potýká se s šumem v každém kroku transformace fotonů na výsledný obraz. Šumy v digitálním fotoaparátu lze rozdělit na dlouhodobý šum a náhodný šum. Dlouhodobý šum je způsoben nedokonalostí výroby snímačů, kdy jednotlivé pixely mají vůči sobě nepatrné rozdíly v citlivosti. Tento šum se nijak výrazně ve snímcích nemění, a proto je možné jej redukovat. Redukce se provádí pořízením snímku bez signálu a komparací tohoto snímku s reálným snímkem dojde k odfiltrování vzniklého šumu. Zdrojem náhodného šumu jsou například šum fotonového záběru, šum tmavého záběru a tepelný šum. Náhodný šum vzniká nepředvídatelně, a tudíž jeho redukce je složitá. Zdroje šumu obecně závisí na určitých parametrech a provozních podmínkách jako je teplota, doba expozice a signál. Měření jasu po jednotlivých pixelech může mít za následek vznik chyby, protože daný pixel může mít špatný odstín vlivem šumu. Aby se vliv šumu v měření jasu redukoval, musíme zprůměrovat několik sousedních pixelů.[26][27]

Barevné transformace

U digitálního fotoaparátu existují dvě barevné transformace. Smyslem dekodování barvy scény je reprezentace závislých údajů na přístroji do kolorimetrického prostoru nezávislého na přístroji. Tato transformace je lineární: $RGB_{cam} \rightarrow M(3 \times 3) \rightarrow RGB_{unred}$. Vzhledem k tomu, že odezva fotoaparátu (RGB_{cam}) je nekolorimetrická, můžeme předpokládat, že lineárně transformované hodnoty z fotoaparátu neodpovídají přesně hodnotám chromatického diagramu (kolorimetrický trojúhelník). Lineární transformace je užita zejména proto, že je jednodušší. Výrobci digitálních fotoaparátů se snaží docílit optimální matice $M(3 \times 3)$, která by měla jen minimální rozdíl mezi oběma barevnými prostory. Ovšem výsledkem je většinou jen přiblížení k reálným hodnotám a proto nejsou výsledné informace (RGB_{unred}) přesně kolorimetrické, což má vliv na přesnost měření jasu.[26][27]

Vinětace

Vinětace se objevuje u optických soustav a projevuje se tím, že na snímací čip dopadá méně světelných paprsků. Pokud bude zachycený objekt mimo osu objektivu, dochází k poklesu jasu na okrajích zobrazovaného obrazu. Tento efekt se nazývá vinětace. Ztmavení rohů obrazu způsobuje přírodní a umělá vinětace. Příčinou přírodní vinětace je pohltivost materiálu čoček. Paprsky, které dopadají na okraj obrazu, musejí projít větší tloušťkou optiky, čímž dochází k pohlcení většího množství světla. Pokles dopadajícího světla na čip je úměrný čtvrté mocnině kosinu úhlu vyosení. Z tohoto důvodu jsou přirozenou vinětací nejvíce postižené širokoúhlé čočky. Umělá vinětace vzniká proto, že světelné paprsky dopadají šikmo a ztlumí se na rámech objektivu. Tuto vinětaci lze odstranit několika způsoby. Jestliže například objektiv silně vinětuje při plném odclonění, pak zacloněním o jednu či dvě pracovní pozice clony tento efekt můžeme částečně potlačit nebo zcela odstranit. Potlačit vliv umělé vinětace lze i při konverzi do RAWu nebo při dalším zpracování nějakým sofistikovaným programem. Existuje ještě další typ vinětace tzv. pixelové stínění, které vzniká vlivem toho, že světlocitlivé fotodiody se lisují mezi stěny. Šikmo dopadající paprsky dopadají na tuto stěnu a tím nedosáhnou světlocitlivé oblasti a k tomu ještě stěna vrhá stín na fotodiody. Vzhledem k tomu, že všechny objektivy jsou ovlivněny vinětací (některé více než ostatní), není vhodné měřit jas na vnějších okrajích obrazu. Proto při měření jasu bereme v potaz, že měřené oblasti by neměly ležet na vnějším okraji obrázku.[26][27]

Rozptyl světla

Rozptyl světla vzniká ve většině systémů, které vytvářejí obraz scény. Rozptylem světla vzniká rušivé světlo, což negativně ovlivňuje výstupní data pro výpočet měřeného jasu. Rozptyl světla v digitálním fotoaparátu způsobují různé faktory. Částečný odraz dopadajícího světla vzniká zejména v objektivu na rozhraní dvou optických prostředí, skla a vzduchu. Objektivy, které obsahují větší množství optických čoček, mají relativně vyšší míru rušivého světla. Rovněž ochranné sklo před silikonovým snímacím čipem má vysokou odrazivost. Ochranné sklo odráží příchozí světlo a toto rozptýlené světlo způsobuje rušení v těle fotoaparátu a objektivu. Rušivé světlo snižuje kontrast obrazu. Rušivý rozptyl světla lze snížit nanesením speciální povrchové vrstvy na čočky v objektivu a na povrch skla obrazového snímače. Měřená scéna může produkovat velké množství světla, které do objektivu nedopadá jen v zorném poli, ale i šikmo. Tento vliv okolního světla lze minimalizovat pomocí sluneční clony.[26][27]

6.3 Srovnání konvenční a nekonvenční metody

V předchozích kapitolách byly popsány možné principy měření křivek svítivosti. Jak název napovídá, provedeme v této kapitole srovnání konvenční a nekonvenční metody. Porovnávat budeme klasické měření vyzařovacích charakteristik na goniofotometru s fotometrem a měření pomocí jasových skenů. Tyto metody byly vybrány, neboť budou použity i v praktické části této práce jako srovnávací měření. Srovnání obou metod je uvedeno v Tab. 6-6.

Tab. 6-6 Srovnání konvenční a nekonvenční metody měření křivek svítivosti

Základní parametry a vlastnosti	Měření na goniofotometru s fotometrem		Měření pomocí jasových skenů	
	Hodnocení	Popis	Hodnocení	Popis
Přesnost měřicího přístroje	<i>střední</i>	záleží na použitém luxmetru, laboratoř je vybavena luxmetrem třídy přesnosti A tedy s max. chybou 5%	<i>vysoká</i>	přesnost jasového analyzátoru Lumidisp – LDA není uvedena, ale můžeme předpokládat, že jde o přesné cejchované zařízení, vhodné pro laboratorní účely
Přesnost metody	<i>střední</i>	svítidlo je považováno za bodový zdroj světla	<i>vysoká</i>	svítidlo je reprezentováno miliony svítícími body
Přesnost goniofotometru	<i>vysoká</i>	závisí na úhlovém kroku motoru a rozlišovací schopnosti čidla polohy	<i>vysoká</i>	závisí na úhlovém kroku motoru a rozlišovací schopnosti čidla polohy
Náročnost metody na přístrojové a softwarové vybavení	<i>střední</i>	goniofotometr, fotočlánek s digitálním indikátorem, PC	<i>vysoká</i>	goniofotometr, digitální zrcadlovka, kalibrační data k fotoaparátu, speciální software pro vyhodnocení, PC
Hodnota zařízení	<i>vysoká</i>	v řádech statisíců Kč	<i>vysoká</i>	v řádech statisíců Kč
Možnost dalšího využití měřicího zařízení	<i>nízká</i>	luxmetr umožňuje měřit jen osvětlenost	<i>vysoká</i>	jasový analyzátor lze aplikovat i na další měření spojená s jasem
Náročnost zpracování naměřených hodnot	<i>snadná</i>	zaznamenané hodnoty osvětlenosti je nutné přepočítat na svítivost	<i>náročná</i>	pořízené snímky je nutné jasově analyzovat a ze získaných informací vypočítat výslednou svítivost
Časová náročnost metody	<i>středně náročná</i>	v řádech jednotek hodin	<i>náročná</i>	v řádech desítek hodin
Prostorová náročnost	<i>velká</i>	pro měření je potřeba prostory, které mají na délku nejméně pětinašobku nejdelší světelněčinné plochy měřeného objektu	<i>malá</i>	pro měření je potřeba prostory o dvojnásobné velikosti, jako jsou rozměry měřeného objektu
Uzpůsobení měření	<i>snadné</i>	je potřeba vystředit svítidlo a nastavit rozsah natáčení svítidla v úhlech c a γ	<i>středně náročná</i>	je potřeba vystředit svítidlo a nastavit rozsah natáčení svítidla v úhlech c a γ , dále je třeba nastavení expozičních hodnot a vložení kalibračních dat, řádného upevnění fotoaparátu atd.

7 SROVNÁVACÍ MĚŘENÍ

Tato kapitola pojednává o provedených měřeních křivek svítivosti svítidla. Měření konvenční a nekonvenční metodou bylo provedeno za účelem srovnání daných metod a přispělo k ověření realizace měření křivek svítivosti nekonvenční metodou pomocí jasového skenování. Měření je zpracováno ve formě elaborátů.

7.1 Měření křivek svítivosti na goniofotometru s otočným svítidlem a pevným fotometrem

Měření bylo uskutečněno 6. 3. 2013 v 10:00 v laboratoři světelné techniky na ústavu UEEN fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, při okolní teplotě 23 °C.

Cíl měření:

Cílem laboratorního měření je znázornit křivky svítivosti svítidla změřené na goniofotometru s otočným svítidlem a pevným fotometrem. Dalším bodem je zhodnocení přesnosti dané metody měření pomocí výpočtu nejistot měření. Výsledkem měření by měly být grafické průběhy křivek svítivosti svítidla v různých rovinách, 3D znázornění svítivosti daného svítidla a výsledná nejistota této metody.

Teoretický rozbor měření:

Světelné zdroje se většinou umisťují do svítidel, neboť při použití samotného světelného zdroje v osvětlovacích systémech by měly nevhodné rozdělení světelného toku do prostoru. Existuje řada typů světelných zdrojů s různými tvary a vlastnostmi. V závislosti na parametrech a druhu světelného zdroje je voleno i svítidlo, které světelný tok vhodně rozmístí do okolního prostoru tak, aby bylo dosaženo optimální osvětlenosti. Prostorové rozložení toku se obecně popisuje fotometrickou plochou svítivosti, která vznikne zjištěním hodnoty svítivosti zdroje (svítidla) ve všech směrech prostoru. Tyto svítivosti se pak vynesou od bodu zdroje jako vektory a vytvoří fotometrickou plochu svítivosti. Obvykle stačí znát jen některé řezy touto plochou a vzniknou tak roviny s křivkami svítivosti v polárních souřadnicích.[9] Více o křivkách svítivosti je uvedeno v kapitole 5.

Na následujícím obrázku *Obr. 7-1* je uvedeno orientační schéma systému měření křivek svítivosti ve fotometrických rovinách pomocí goniofotometru a detektoru (fotočlásku s luxmetrem). Tato problematika je podrobněji popsána v kapitole 6.1.2.

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Automatizovaný goniofotometr;

Digitální luxmetr RadioLux 111;

PC s nainstalovaným softwarem EMLux pro komunikaci s goniofotometrem a luxmetrem;

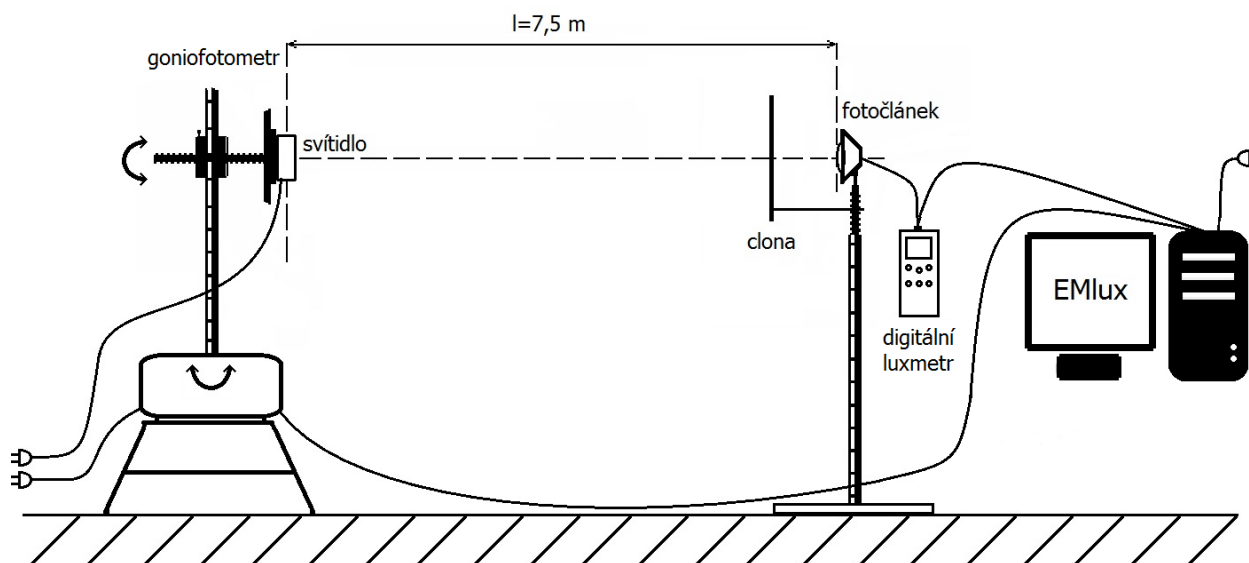
Svinovací metr, propojovací kabely, vodní váha, laserový zaměřovač;

Měřené zářivkové svítidlo se stínicí mřížkou: LIGHT FITTINE, model LLX136ALPP2, výrobce Modus spol. s.r.o.;

Zdroj ve svítidle: zářivková trubice Osram T8 L 36W/840 LUMILUX Cool White G13, jmenovitý výkon 36 W, světelný tok 3350 lm, teplota chromatičnosti 4000 K, index barevného podání 80 – 89, průměr 26 mm, celková délka 1200 mm, životnost 20000 h;

Schéma zapojení:

Obr. 7-1 vystihuje rozmístění použitých měřicích přístrojů a jejich propojení.



Obr. 7-1 Schéma zapojení a uspořádání pracoviště pro měření křivek svítivosti na goniofotometru s otočným svítidlem a pevným fotometrem

Postup měření v jednotlivých krocích:

1. Uspořádání pracoviště a zapojení přístrojů
2. Provedení měření
3. Výpočet svítivosti a nejistoty měření
4. Grafické znázornění výsledků
5. Zhodnocení měření

1. Uspořádání pracoviště a zapojení přístrojů - v prvním kroku bylo nutné uzpůsobit pracoviště pro možné měření. Do svítidla bylo nutné vložit světelný zdroj a připojit přívodní kabel. Následně jsme museli svítidlo připevnit na lyžinu goniofotometru pomocí přípravku. V další fázi bylo důležité svítidlo správně ustavit tak, aby bylo v optické ose s fotočlánekem. Ověření nastavení správné polohy bylo provedeno pomocí vodní váhy a pomocí laserového zaměřovače. Případné odchylky od osy byly zkorigovány při kalibraci výchozí polohy v programu EMLux. Vzdálenost svítidla a fotočláneku byla 7,5 m, což vyhovuje požadavku, kde minimální vzdálenost nemá být menší, než pětinásobek nejdelší aktivní strany svítidla. Námi měřené svítidlo mělo nejdelší aktivní stranu v délce 1200 mm. Aby byly měřené hodnoty korektní, bylo nutné před měřením svítidlo cca 20 minut nechat svítit, z důvodu ustálení světelného toku. Taktéž fotočlánek byl před měřením cca 20 minut osvětlován světelným tokem, který přibližně odpovídal světelnému toku při měření. Samotné měření probíhalo při zatažených roletách a zhasnutém osvětlení, aby měření nebylo ovlivněno paprsky světla z jiných zdrojů světla.

2. Provedení měření - Měření probíhalo automaticky, díky modernímu automatizovanému goniofotometru s příslušným ovládacím programem EMLux. Těsně před zahájením měření jsme museli nastavit v programu výchozí souřadnice, aby bylo svítidlo

v kalibrované poloze. Dále jsme v programu museli nastavit úhlové kroky, ve kterých měření následně probíhalo. Pro otáčení v úhlu γ byl zvolen krok po 5° a v úhlu c byl zvolen krok 15° . Výsledný počet poloh měření byl programem vypočten na 888. Během měření došlo několikrát k problému s volně visícími kabely, které se zachytávaly za rohy stojanu goniofotometru a tím způsobily zadrhnutí goniofotometru. To zapříčinilo přeskočení jedné pozice natočení svítidla, a proto se měření muselo opakovat. Proměření 888 poloh trvalo goniofotometru cca 1,5 hodiny. Naměřené hodnoty program EMLux zaznamenal do excelovské tabulky.

3. Výpočet svítivosti a nejistot měření - jelikož každé z 888 poloh natočení svítidla, odpovídá jedna naměřená hodnota osvětlenosti, není tento soubor hodnot z důvodu velkého množství dat v práci uveden. K tomu, abychom mohli sestavit křivku svítivosti, je nutné přepočítat naměřenou osvětlenost na svítivost dle vztahu (6.1). Fotometrická vzdálenost mezi měřeným svítidlem a luxmetrem byla 7,5 m. Výpočet standardní nejistoty měření typu B je proveden dle vztahů uvedených v kapitole 6.1.3. Z naměřených hodnot by bylo možné vypočítat i nejistotu typu A, jelikož hodnoty svítivosti svítidla byly prakticky změřeny dvakrát a z těchto duplicitních hodnot byla vypočtena průměrná svítivost pro každou polohu natočení svítidla. Ovšem výpočet standardní nejistoty typu A s malým počtem opakovaných měření ($n < 10$) má klesající spolehlivost a z tohoto důvodu nebyla stanovena. Zprůměrováním svítivostí se částečně zredukuje chyba, která vzniká v důsledku změny pracovní polohy svítidla se zářivkovým zdrojem. Otáčení svítidla má za následek změnu odvádění tepla, což se projevuje ve výsledném tvaru křivky svítivosti.

Při stanovení dílčích relativních nejistot měření typu B budeme vycházet ze vztahů a předpokladů uvedených v [10].

Dílčí relativní standardní nejistoty $u_{B\gamma}$ a u_{Bc} odpovídají možné odchylce vznikající při určování polohy svítidla při jeho natáčení podle úhlů γ a c . Svítidlo se může na goniofotometru otáčet o 630° . Pomocí řídicí jednotky lze rozsah otáčení rozdělit až na 65536 mikrokroků o velikosti $0,58'$. Ovšem výchozí nastavení polohy zajišťuje inkrementální čidlo nulovým pulzem a za maximální možnou odchylku úhlů $\Delta\gamma_{max}$ a Δc_{max} budeme tedy uvažovat $0,03^\circ$.

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{\gamma_{krok} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{0,03}{5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,35 \% \quad (7.1)$$

$$u_{Bc} = \frac{\Delta c_{max}}{c_{krok} \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{0,03}{15 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,12 \% \quad (7.2)$$

kde $\Delta\gamma_{max}$, Δc_{max} - je největší uvažovaná odchylka úhlů γ a c [$^\circ$]

γ_{krok} , c_{krok} - je základní krok nastavování úhlů γ a c [$^\circ$]

Dílčí relativní nejistotu způsobenou nepřesností měřicího přístroje tj. digitálního luxmetru můžeme stanovit ze vztahu (6.6). Použitý digitální luxmetr patří do třídy přesnosti A a jde tedy o přístroj vhodný pro laboratorní měření. Největší dovolená celková chyba luxmetru třídy přesnosti A je 5 %. Z technických dat uváděných výrobcem viz Tab. 7-1 můžeme stanovit dílčí nejistotu způsobenou měřicím přístrojem při uvažování rovnoměrného rozdělení $k = \sqrt{3}$.

Tab. 7-1 Stanovení nejistoty digitálního luxmetru Radio Lux 111 [29]

Označení	Popis zdroje chyby	u [%]	u/k [%]	$(u/k)^2$ [%]
$u_{B\lambda}$	odchylka od $V(\lambda)$	3	1,73	2,99
u_{BuV}	UV - citlivost	1	0,58	0,34
u_{BiR}	IR - citlivost	1	0,58	0,34
u_{BCos}	chyba kosinového nástavce	1,5	0,87	0,76
u_{Blin}	chyba linearity	1	0,58	0,34
u_{Bzob}	chyba zobrazení na displeji	3	1,73	2,99
u_{Bst}	chyba stárnutí fotočlánku	0,5	0,29	0,08
u_{Bmod}	chyba modulace světla	0,2	0,12	0,01
u_{Bkal}	chyba kalibrace	0,5	0,29	0,08

Z vypočítaných dílčích nejistot typu B uvedených v Tab. 7-1 můžeme určit nejistotu použitého digitálního luxmetru.

$$u_{Blux} = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} = \sqrt{2,99 + 0,34 + 0,34 + 0,76 + 0,34 + 2,99 + 0,08 + 0,01 + 0,08} = 2,82 \%$$

Dílčí relativní standardní nejistotu u_{Bl} , odpovídající odchylce v určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla můžeme stanovit dle výrazu (7.3). Předpokládáme, že maximální odchylka nepřekročí hodnotu $Z_{lmax}=0,02$ m při vzdálenosti $l_d=7,5$ m.

$$u_{Bl} = \frac{Z_{lmax}}{l_z \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{0,02}{7,5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,15 \%$$
 (7.3)

kde Z_{lmax} - je největší předpokládaná odchylka vzdálenosti fotočlánku a zkoumaného svítidla [m]

l_z - je změřená vzdálenost mezi světelným středem svítidla a středem plochy fotočlánku [m]

Dílčí relativní standardní nejistotu u_{Bns} , která odpovídá vlivům nestability použitých zařízení, vypočítáme podle výrazu (7.4). Odchylka je způsobena nestabilitou světelného zdroje a nestabilitou napájecího napětí. Nejistota způsobená nestabilitou se určuje ze změny údaje luxmetru během určité doby svícení měřeného svítidla.

$$u_{Bns} = \frac{\left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{\left| \frac{10,21 \text{ lx}}{10,16 \text{ lx}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 = 0,28 \%$$
 (7.4)

kde Y_{max} - je maximální hodnota údaje luxmetru během určitého časového intervalu [lx]

Y_{min} - je minimální hodnota údaje luxmetru během určitého časového intervalu [lx]

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bkr} která je způsobena vlivem konečných rozměrů měřeného svítidla a fotočlánku je dána vztahem (7.5).

$$u_{Bkr} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{\left| 1 - \left(\frac{7,5}{\sqrt{7,5^2 + (0,6+0,004)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 = 0,56 \% \quad (7.5)$$

kde r_0 - je osová vzdálenost mezi světelným středem svítidla a středem plochy fotočlánku [m]

a - je polovina charakteristického rozměru svítidla [m]

b - je poloměr přijímacího povrchu fotočlánku [m]

Dílčí relativní standardní nejistota nastavení polohy fotočlánku vzhledem ke světelnému středu svítidla je určena vztahem (7.6). Uvažujeme, že úhel vyosení od spojnice fotočlánku se světelným středem měřeného svítidla nepřekročí 2° .

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot 100 = \frac{1 - \cos 2^\circ}{2} \cdot 100 = 0,03 \% \quad (7.6)$$

Výslednou standardní nejistotu měření typu B použité konvenční metody při měření rozložení svítivosti svítidla lze na základě platnosti vzorce (6.6) určit takto:

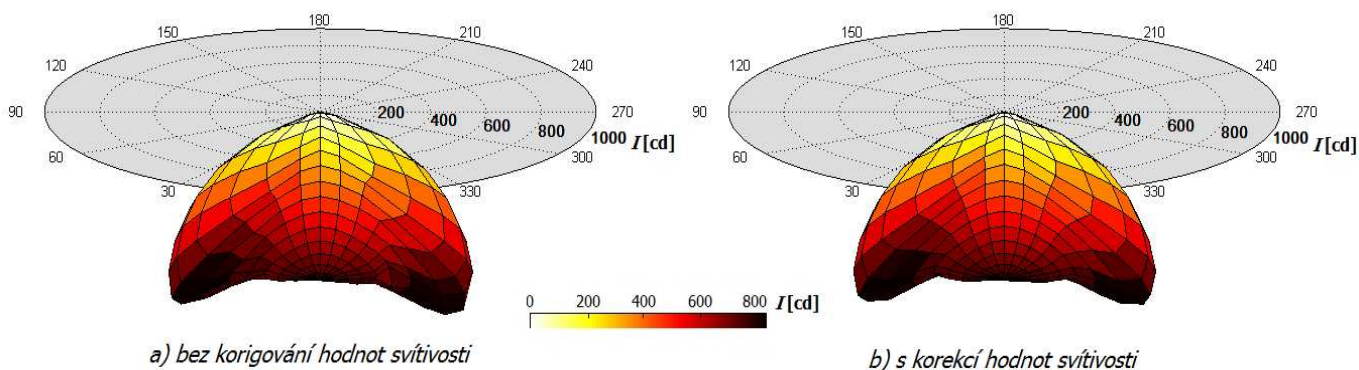
$$u_{BG} = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} = \sqrt{0,35^2 + 0,12^2 + 2,82^2 + 0,15^2 + 0,28^2 + 0,56^2 + 0,03^2} = 2,92 \%$$

Rozšířením výsledné standardní nejistoty měření typu B o koeficient rozšíření $k_U=2$ získáme dle vzorce (6.8) výslednou rozšířenou hodnotu nejistoty měření.

$$U_G = k_U \cdot u_{BG} = 2 \cdot 2,92 = 5,84 \%$$

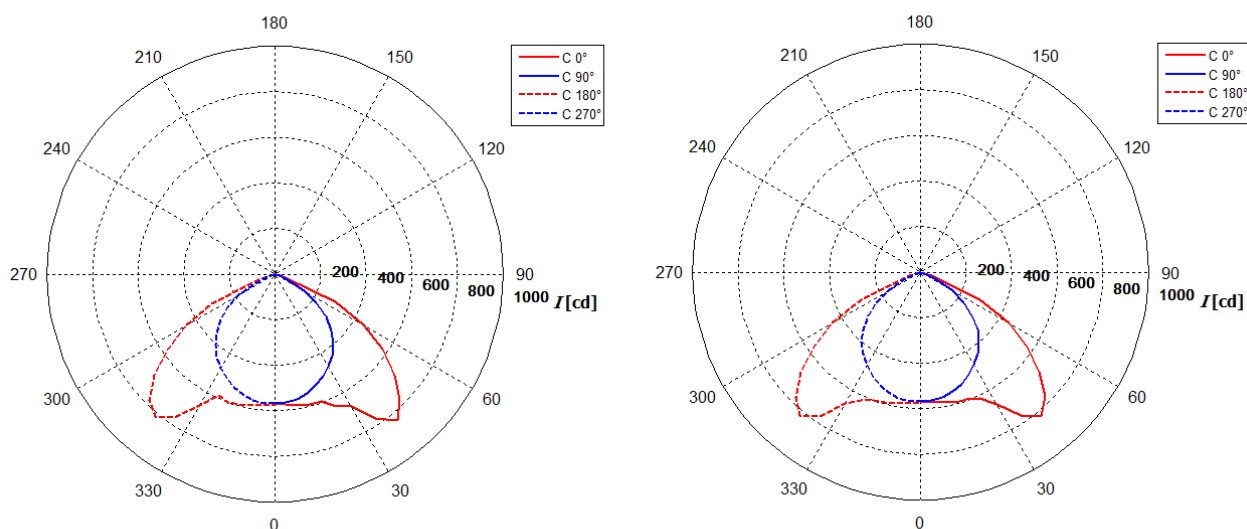
4. Grafické znázornění výsledků – z vypočítaných a zprůměrovaných hodnot svítivosti byly sestrojeny následující průběhy křivek svítivosti zkoumaného svítidla.

3D křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubící Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 7,5 m



Obr. 7-2 3D křivka svítivosti měřeného svítidla změřená na goniofotometru pomocí luxmetru

Polární křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubicí Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 7,5 m



a) bez korigování hodnot svítivosti

b) s korekcí hodnot svítivosti

Obr. 7-3 Polární křivka svítivosti měřeného svítidla změřená na goniofotometru pomocí luxmetru

5. Zhodnocení měření – toto laboratorní měření má ukázat, jakým způsobem probíhá konvenční měření křivek svítivosti svítidla, a výsledky získané z tohoto měření budou sloužit k porovnání s nekonvenčním způsobem měření křivek svítivosti totožného svítidla s týmž světelným zdrojem.

Za účelem srovnání z pohledu přesnosti byla vypočítána nejistota této metody, která vyšla 2,92 %. Po aplikaci koeficientu rozšíření vyšla výsledná nejistota měření rozložení svítivosti na goniofotometru s luxmetrem 5,84 %. Výsledná hodnota nejistoty měření se skládá z několika dílčích standardních nejistot, kde největším zdrojem nejistoty se ukázal měřicí přístroj tedy luxmetr, jehož nejistota v tomto měření činí 2,82 %. I tak je nejistota měřicího přístroje příznivá a svědčí o kvalitním zařízení. Značný podíl na tom, že výsledná hodnota nejistoty je poměrně nízká má samotný automatizovaný goniofotometr. V případě vizuálního nastavování a odečítání úhlů natočení svítidla by byla nejistota měření daleko vyšší a měření samotné časově náročnější.

Na Obr. 7-2 a Obr. 7-3 jsou zobrazeny výsledné křivky svítivosti. Tvar těchto křivek svítivosti odpovídá měřené vzdálenosti 7,5 m. V Obr. 7-2 je vidět celkové rozložení svítivosti zkoumaného svítidla v prostoru. Zvolená barevná paleta udává, že nejmenší svítivost je u samotného svítidla a postupným vzdalováním od svítidla roste. Na Obr. 7-3 je znázorněn polární diagram s křivkami svítivosti v rovinách C 0°/C 180° a C 90°/C 270°, který je výsledkem prostorového rozložení svítivosti zkoumaného svítidla. Z tohoto diagramu lze odečíst maximální hodnota svítivosti, která je přibližně 820 cd. Z nekorigovaných a korigovaných průběhů křivek svítivosti je patrný rozdíl hodnot svítivosti, který je nejvíce zřetelný v polorovině C 180°. Tato odlišnost od poloroviny C 0° je způsobena právě změnou polohy svítidla při měření.

Toto měření prokázalo, že i konvenční měření křivek svítivosti svítidla s použitím kvalitních měřicích pomůcek a zařízení může být dostatečně přesné.

7.2 Měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů svítidla

Toto měření bylo uskutečněno 13. 3. 2013 v 10:00 v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, při okolní teplotě 23 °C.

Cíl měření:

Hlavním cílem tohoto nekonvenčního laboratorního měření je ověření možnosti měření křivek svítivosti svítidla jasovým analyzátozem LumiDISP - LDA. Dále je dílčím bodem výpočet nejistoty měření této metodiky a upozornění na hlavní zdroje chyb.

Teoretický rozbor měření:

Křivky svítivosti popisují prostorové rozložení vyzařovaného světla svítidel a světelných zdrojů do prostoru. Tvar křivek svítivosti se odvíjí od rozměrů a vlastního tvarového provedení aktivní plochy svítidla či tvaru světelného zdroje, případně dle použitých stínidel. Na Obr. 5-4 v kapitole 5 jsou znázorněny křivky svítivosti, které vyzařují svítidla, která se běžně používají pro osvětlování prostor. Při volbě svítidla a světelného zdroje v návrhu osvětlovací soustavy je potřeba zvážit mnoho aspektů jakými jsou například: druh pracovního úkonu vykonávaného v daném prostoru, výška prostoru, klasifikace prostředí, apod. V současné době je stále větší důraz kladen i na design svítidel. Různé tvarové provedení svítidel ovšem komplikuje návrh osvětlovací soustavy, neboť reálné osvětlení pracovní plochy nemusí být rovnoměrné, tedy nevyhovující hygienické normě pro osvětlení. Jelikož je tvar křivky svítivosti závislý i na vzdálenosti, ze které je svítidlo měřeno musí být v návrhovém programu křivka svítivosti uložená v raydatech upravena na danou vzdálenost mezi svítidlem a srovnávací rovinou. Toho dosáhneme tím, že se svítidlo rozdělí na n plošek a každé plošce je následně přiřazena n -krát zmenšená křivka svítivosti, zaznamenaná v raydatech. Ovšem tato transformace odpovídá jen částečně skutečné křivce svítivosti a je tím nepřesnější, čím je tvar křivky svítivosti nepravidelnější. Proto je podstatné, aby při návrhu osvětlovacích soustav křivky svítivosti svítidla odpovídaly reálnému tvaru, čímž se zamezí případnému nedodržení rovnoměrnosti rozložení osvětlení při následné realizaci osvětlení v daném prostoru. K tomu abychom k takovému výsledku dospěli je zapotřebí mít křivky svítivosti, které lze transformovat v závislosti na vzdálenosti srovnávací roviny a samotného svítidla, se zachováním tvaru křivky svítivosti, uložené v raydatech. Způsob, kterým lze takové křivky svítivosti získat, popisuje právě nová metodika měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů. Více o této metodě je uvedeno v kapitole 6.2.3.

Použité měřicí přístroje a pomůcky:

Automatizovaný goniofotometr;

Digitální fotoaparát Nikon D7000, objektiv, stativ, filtr $V(\lambda)$;

PC s nainstalovaným softwarem LumiDISP;

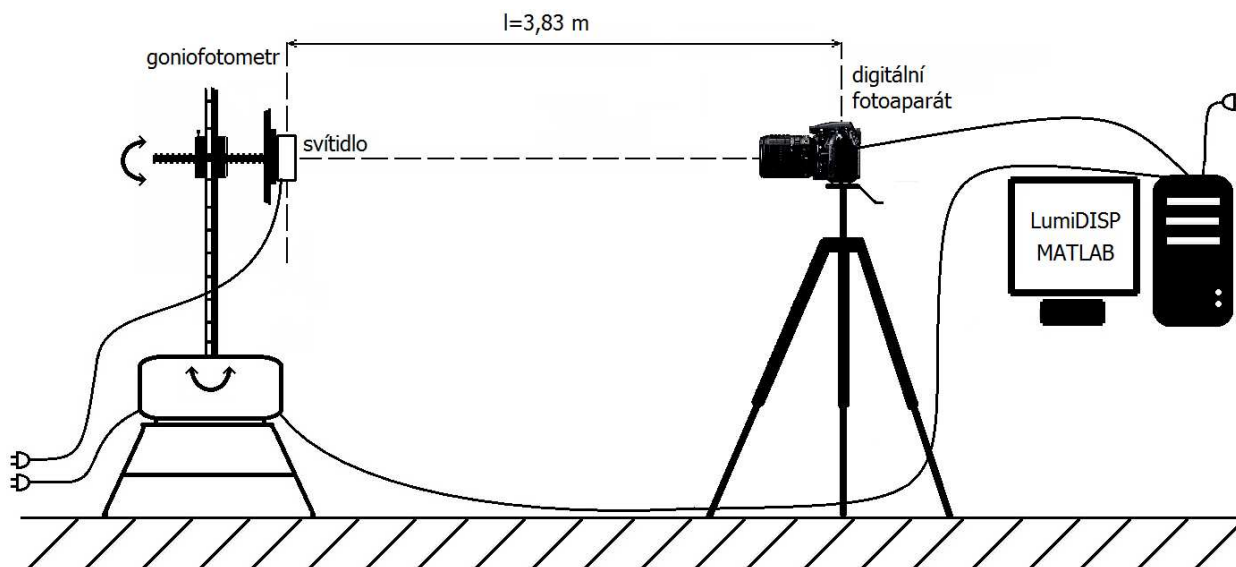
Svinovací metr, propojovací kabely, vodní váha, laserový zaměřovač;

Měřené zářivkové svítidlo se stínicí mřížkou: LIGHT FITTINE, model LLX136ALPP2, výrobce Modus spol. s.r.o.;

Zdroj ve svítidle: zářivková trubice Osram T8 L 36W/840 LUMILUX Cool White G13, jmenovitý výkon 36 W, světelný tok 3350 lm, teplota chromatičnosti 4000 K, index barevného podání 80 – 89, průměr 26 mm, celková délka 1200 mm, životnost 20000 h;

Schéma zapojení:

Obr. 7-4 znázorňuje rozmístnění použitých měřicích přístrojů a jejich propojení.



Obr. 7-4 Schéma zapojení a uspořádání pracoviště pro měření křivek svítivosti pomocí jasového skenování svítidla

Postup měření v jednotlivých krocích:

1. Uspořádání pracoviště a zapojení přístrojů
2. Provedení měření
3. Výpočet svítivosti a nejistoty měření
4. Grafické znázornění výsledků
5. Zhodnocení měření

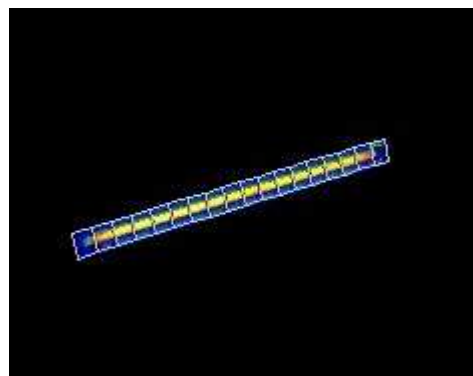
1. Uspořádání pracoviště a zapojení přístrojů - v tomto kroku bylo nutné správně ustavit svítidlo na otočném goniofotometru vzhledem k digitálnímu fotoaparátu upevněnému na stativu tak, aby středy svítidla a objektivu byly v optické ose. K tomu byly použity pracovní pomůcky: vodní váha a laserový zaměřovač. Při tomto měření bylo použito totožného svítidla se stejnou zářivkovou trubicí, jako tomu bylo v případě měření na goniofotometru s fotometrem. Fotometrická vzdálenost byla však 3,83 m. Před měřením bylo svítidlo rozsvíceno asi 20 minut, aby se ustálily světelné parametry. Měření probíhalo v zatemněné místnosti a bez osvětlení.

2. Provedení měření - měření bylo realizováno pomocí jasového analyzátoru LumiDISP – LDA. V programu LumiDISP byl založen nový projekt s názvem „Sevcik“ do kterého se zaznamenávala veškerá data z měření. Před zahájením měření bylo nutné vložit do LumiDISPu kalibrační data k dané digitální zrcadlovce Nikon D7000 a nastavit parametry fotoaparátu tak, aby snímky nebyly rozmazané a přesvětlené. Jelikož byl fotoaparát přímo propojen s počítačem, bylo možné uskutečnit několik zkušebních snímků s různým nastavením expozičního času, clony a citlivosti ISO. Z těchto několika zkušebních fotografií bylo určeno optimální nastavení parametrů fotoaparátu pro zkoumané svítidlo. Nejpriznivější nastavení fotoaparátu bylo zjištěno při expozičním času 1/10 s, clonovém čísle 25 a citlivosti ISO 100. Snímky byly ukládány do formátu RAW o rozlišení 4928x3264. Všechny parametry nastavení fotoaparátu byly po zbytek měření neměnné a byly zaznamenány do metadat každého pořízeného snímku. Aby bylo možné následně z daného snímku určit úhel a azimut dopadajícího paprsku

ze svítidla na snímací čip, musel být světelný střed svítidla shodný se středem objektivu fotoaparátu, což minimalizovalo i ovlivnění snímku vinětací, neboť měřené svítidlo bylo umístěno ve středu scény. Počítač byl propojen nejen s fotoaparátem, ale i s goniofotometrem a dalším úkonem tedy bylo nadefinování otáčení goniofotometru s připevněným svítidlem. LumiDISP zajišťuje přímou komunikaci s goniofotometrem a tak pozice otáčení byly nastaveny přímo v programu. Otáčení svítidla v úhlu γ bylo po 5° a krok otáčení v úhlu c byl 15° . Skenování svítidla bylo provedeno jen z jedné poloviny, neboť i při polovičním počtu snímků bylo následné zpracování hodnot velmi zdlouhavé. Zkoumané svítidlo bylo osově souměrné, a tak mohly být doplněny i chybějící hodnoty, neboť druhé polovině hodnot odpovídají i naměřené hodnoty z první poloviny. Zachycení 259 snímků svítidla v definovaných pozicích trvalo přibližně 105 minut. Všechny snímky byly prostřednictvím pomocného programu „Image to L“ v LumiDISPu přepočítány na jasový kanál a uloženy do databáze výsledků. V každém jasovém snímku bylo následně orámováno svítidlo i s jednotlivými mřížkami speciálním nástrojem „Strip“, což trvalo přibližně 20 hodin. Nástroj „Strip“ představuje síť, u které si lze nadefinovat počet sloupců a řádků. V tomto případě se jednalo o jeden řádek, ve kterém bylo 18 buněk. Pro každou buňku v síti lze pak stanovit průměrný jas, průměrný úhel dopadu paprsku na čip, průměrný azimut a průměrný prostorový úhel. Po orámování všech snímků se musely nechat tyto konečné snímky opět přepočítat, abychom docílili výsledných průměrných hodnot. Výpočet byl velmi náročný na hardwarové požadavky počítače. V našem případě trval 30 hodin. Vypočítané hodnoty byly následně uloženy do excelovské tabulky pro možnost dalšího zpracování. Na Obr. 7-5 je znázorněno, jak takový snímek měřeného svítidla vypadá. Obr. 7-6 zobrazuje snímek převedený do jasového kanálu a orámování zkoumaného svítidla.



Obr. 7-5 Pořízený snímek svítidla



Obr. 7-6 Pořízený snímek převedený na jasový kanál s orámováním svítidla

3. Výpočet svítivosti a nejistot měření – aby bylo možné ze získaných údajů vypočítat svítivost, bylo nutné uložené informace v excelu roztřídit a vyfiltrovat jen na potřebné údaje. Následný výpočet svítivosti byl proveden dvěma způsoby. První způsob výpočtu svítivosti byl proveden dle vzorce (4.8), kde po vyjádření svítivosti má vztah tvar:

$$I_{\gamma} = L \cdot dA \cdot \cos \gamma \left[\text{cd}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{m}^2, - \right] \quad (7.7)$$

Svítivost I_{γ} byla stanovena na základě dosažení hodnot, kde za jas L byla dosazena vypočítaná průměrná hodnota jasu, vycházející z celkové aktivní plochy A svítidla při jeho natočení v úhlu γ . Tímto způsobem byl proveden výpočet svítivosti pro všechny pozice natočení svítidla a následně byla vykreslena křivka svítivosti. Tvar a hodnoty svítivosti této křivky svítivosti odpovídají měření ve vzdálenosti 3,83 m od světelného středu svítidla.

Druhý způsob výpočtu svítivosti vychází z navrženého postupu v kapitole 6.2.3. Svítidlo je v tomto případě rozděleno na 18 plošek a pro každou z plošek je stanovena křivka svítivosti zvlášť. Přepočítáním jednotlivých křivek svítivosti na osvětlenost a následným sečtením příspěvků osvětlení od jednotlivých plošek o rozměru 0,080 x 0,066 m dostaneme celkovou osvětlenost v bodě, vzdáleném od světelného středu svítidla 3,83 m. Opětovným přepočtem na svítivost dostaneme výslednou matici hodnot svítivostí pro vykreslení křivky svítivosti svítidla ve zvolené vzdálenosti. Tímto postupem byly stanoveny křivky svítivosti i pro body vzdálené 7,5 m a 10 m od světelného středu svítidla.

Výpočet standardní nejistoty typu B měření pomocí jasových skenů svítidla je proveden dle vztahů uvedených v kapitole 6.1.3.

Při stanovování dílčích relativních nejistot typu B budeme vycházet ze vztahů a předpokladů uvedených v [10].

Jelikož byl použit totožný goniofotometr jsou hodnoty dílčích relativních standardních nejistot u_{By} a u_{Bc} totožné jako v případě měření na goniofotometru s luxmetrem.

$$u_{By} = 0,35 \% ; u_{Bc} = 0,12 \%$$

Dílčí relativní nejistotu typu B způsobenou nepřesností měřicího přístroje tj. jasovým analyzátozem LumiDISP – LDA lze určit obdobným způsobem, jako při určení nejistoty luxmetru. V tomto případě však nejsou zdroje nejistot přesně definovány a stanoveny výrobcem. Proto budeme vycházet z možných zdrojů nejistot uvedených v kapitole 6.2.4. a jejich velikost určíme odhadem. Rozložení nejistoty bylo uvažováno rovnoměrné $k=\sqrt{3}$.

Tab. 7-2 Stanovení nejistoty jasového analyzátoru LumiDISP - LDA

Označení	Popis zdroje chyby	u [%]	u/k [%]	$(u/k)^2$ [%]
$u_{B\lambda}$	chyba vlivem odchylky od $V(\lambda)$	3	1,73	2,99
u_{Bsn}	chyba snímače	0,6	0,35	0,12
u_{Bkv}	chyba kvantování A/D převodníku	0,2	0,12	0,01
$u_{Bš}$	chyba vlivem šumu	0,3	0,17	0,03
u_{Bj}	chyba transformace barev na jas	0,4	0,23	0,05
u_{Bex}	chyba stálosti expozice	0,3	0,17	0,03
u_{Bv}	chyba vlivem vinětace	0,2	0,12	0,01
u_{Bkal}	chyba kalibrace ISO, clony a závěrky	2	1,15	1,32
u_{Broz}	chyba vlivem rozptylu světla	0,3	0,17	0,03

Z určených dílčích nejistot typu B uvedených v Tab. 7-2 můžeme určit nejistotu jasového analyzátoru LumiDISP - LDA.

$$u_{Bjas.analyz.} = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} = \sqrt{2,99 + 0,12 + 0,01 + 0,03 + 0,05 + 0,03 + 0,01 + 1,32 + 0,03} = 2,14 \%$$

Dílčí relativní standardní nejistotu u_{Bl} , odpovídající odchylce v určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla, můžeme stanovit dle výrazu (7.3). Předpokládáme, že maximální odchylka nepřekročí hodnotu $Z_{lmax}=0,02$ m při vzdálenosti $l_d=3,83$ m.

$$u_{Bl} = \frac{Z_{lmax}}{l_z \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{0,02}{3,83 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,30 \%$$

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bns} , která odpovídá vlivům nestability použitých zařízení, budeme uvažovat stejnou jako v předchozím měření, kde byla stanovena dle výrazu (7.4).

$$u_{Bns} = 0,28 \%$$

Dílčí relativní standardní nejistota konečných rozměrů u_{Bkr} v tomto případě neuvažujeme, neboť u této metody principiálně nezáleží na vzdálenosti mezi zkoumaným svítidlem a měřícím přístrojem.

Dílčí relativní standardní nejistota nastavení polohy fotoaparátu vzhledem ke světelnému středu svítidla stanovíme podle vztahu (7.6). Úhel vyosení od fotometrické osy v tomto případě uvažujeme 1° .

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot 100 = \frac{1 - \cos 1^\circ}{2} \cdot 100 = 0,01 \%$$

Výslednou standardní nejistotu měření typu B při měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů můžeme vypočítat dle vzorce (6.6).

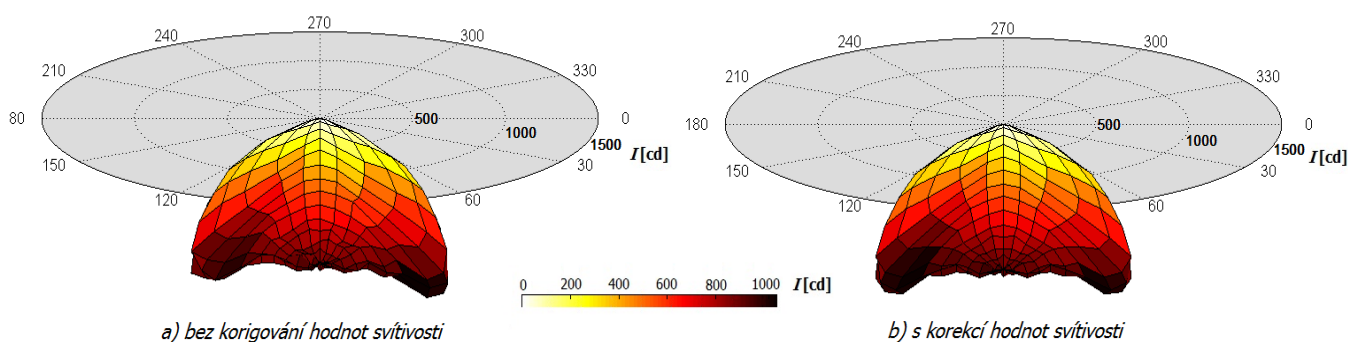
$$u_{Bjas.sken.} = \sqrt{\sum u_{Bi}^2} = \sqrt{0,35^2 + 0,12^2 + 2,14^2 + 0,30^2 + 0,28^2 + 0,01^2} = 2,21 \%$$

Rozšířená výsledná nejistota měření prostorového rozložení svítivosti změřená pomocí jasového skenování svítidla je při rozšíření koeficientem $k_U=2$ rovna:

$$U_{jas.sken.} = k_U \cdot u_{Bjas.sken.} = 2 \cdot 2,17 = 4,42 \%$$

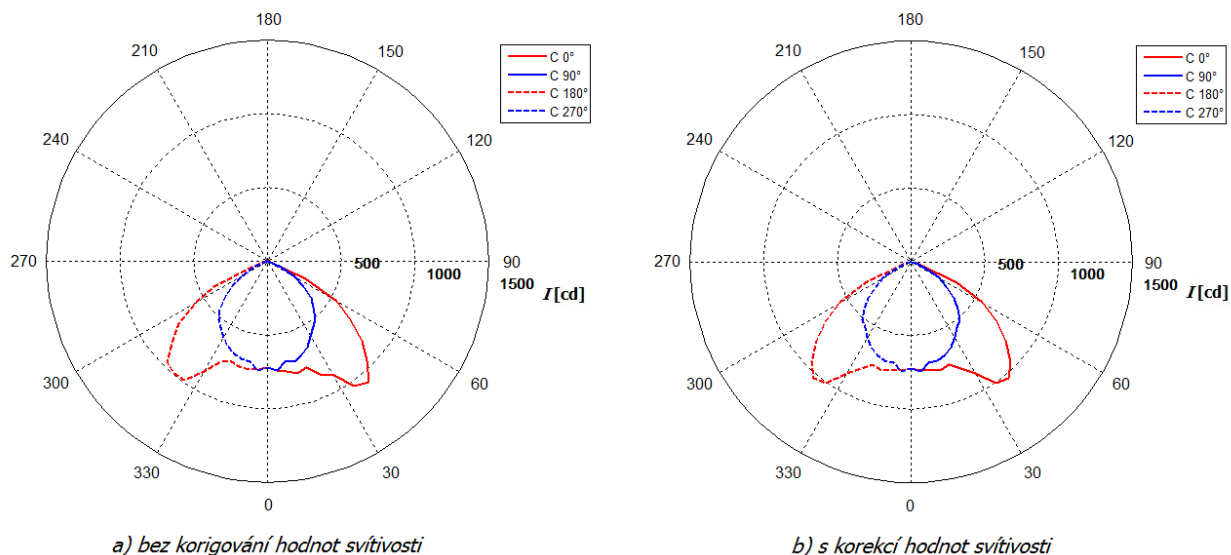
4. Grafické znázornění výsledků – z vypočítaných hodnot svítivosti byly sestrojeny následující průběhy křivek svítivosti zkoumaného svítidla.

3D křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubici Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 3,83 m a vytvořená z průměrných hodnot jasu celé světelné plochy svítidla



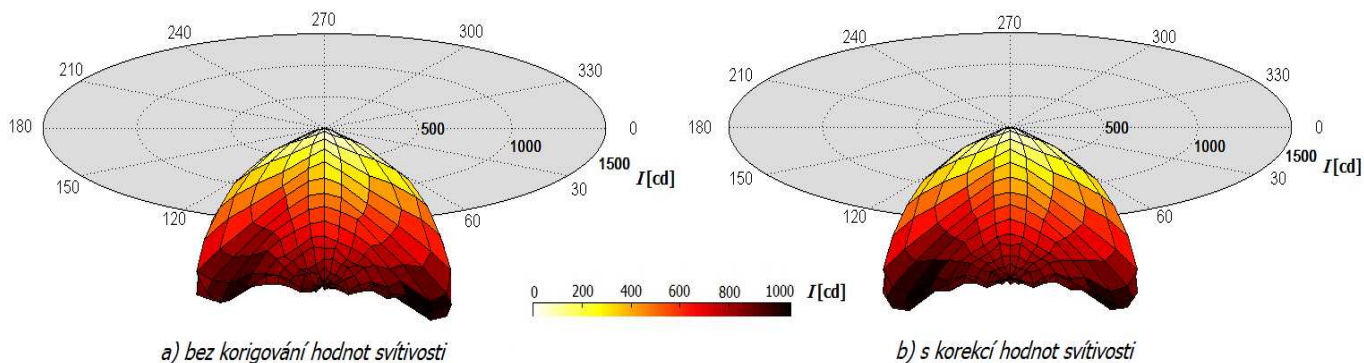
Obr. 7-7 3D křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestřená z průměrných hodnot jasu celkové světelné plochy svítidla

Polární křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubicí Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 3,83 m a vytvořená z průměrných hodnot jasu celé světelné plochy svítidla



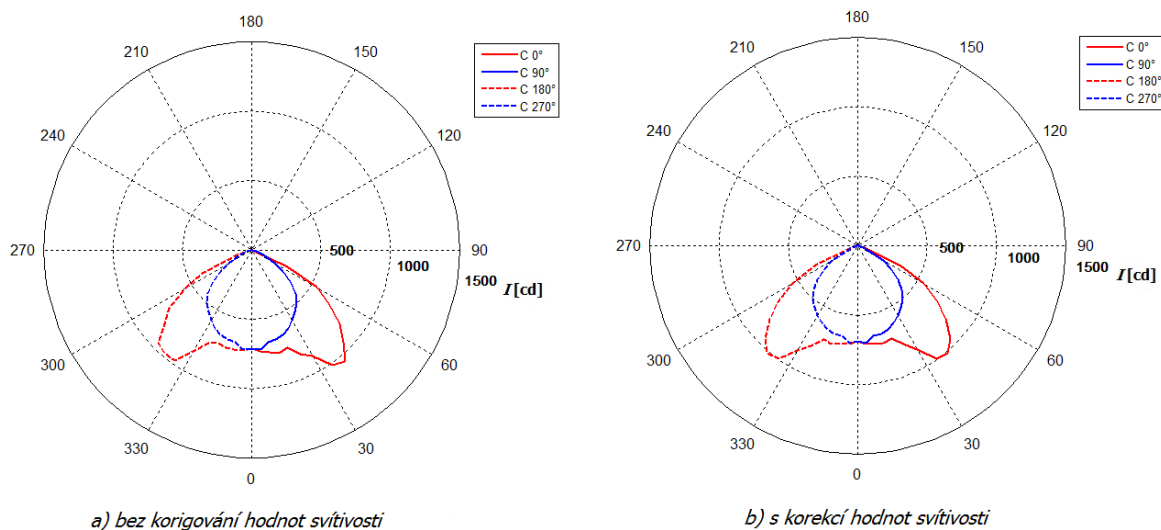
Obr. 7-8 Polární křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestavená z průměrných hodnot jasu celkové světelné plochy svítidla

3D křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubicí Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 3,83 m a vytvořená z průměrných hodnot jasu jednotlivých elementů světelné plochy svítidla



Obr. 7-9 3D křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestavená z průměrných hodnot jasu jednotlivých plošek světelné plochy svítidla

Polární křivka svítivosti zářivkového svítidla s lineární trubící Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840) měřená ze vzdálenosti 3,83 m a vytvořená z průměrných hodnot jasu jednotlivých elementů světelné plochy svítidla



Obr. 7-10 Polární křivka svítivosti zkoumaného svítidla změřená pomocí jasového analyzátoru LumiDISP - LDA a sestavená z průměrných hodnot jasu jednotlivých plošek světelné plochy svítidla

6. Zhodnocení měření – toto laboratorní měření mělo ověřit možnost rekonstrukce křivek svítivosti svítidla z jasových skenů a mělo objasnit postup, jakým lze změřit křivky svítivosti jinak, než konvenční metodou. Aby bylo možné naměřené výsledky z obou měření porovnat, bylo měření křivek svítivosti provedeno na stejném svítidle, s totožným světelným zdrojem.

Pro metodu měření křivek svítivosti jasovým analyzátozem vyšla hodnota standardní nejistoty 2,21 % a hodnota výsledné rozšířené nejistoty činí 4,42 %. Norma ČSN 36 0011-1 uvádí, že výsledná rozšířená nejistota přesného laboratorního měření musí být do 8%. [2] Z toho vyplývá, že měření uvedenou metodou je přesné a je vhodné pro laboratorní účely. Ovšem hodnotu vypočítané rozšířené nejistoty měření musíme brát s určitou rezervou, jelikož výpočet nejistoty měřicího přístroje byl proveden z odhadnutých velikostí zdrojů chyb. Aby tato hodnota nejistoty měřicího přístroje byla určena správně, bylo by nutné mít údaje o zdrojích nejistot a jejich velikosti buď přímo od výrobce, či informace získat řadou porovnávacích měření a z výsledků následně stanovit velikosti jednotlivých zdrojů nejistot. Při odhadu velikosti jednotlivých zdrojů nejistot jsme předpokládali nižší hodnoty zdrojů nejistot, jelikož pro výpočet jasů byla do programu LumiDISP vložena kalibrační data k použité digitální zrcadlovce. Z výpočtu standardní nejistoty měření je zřejmé, že největším dílčím zdrojem nejistoty je měřicí přístroj, tedy digitální zrcadlovka, která do výsledků měření vnáší nejistotu 2,14 %. Pokud jde o výpočet nejistoty samotného přístroje, je nejvýznamnějším zdrojem nejistoty měřicího přístroje nedokonalá shoda s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního pozorovatele a to konkrétně 2,99 %.

Na *Obr. 7-7*, *Obr. 7-8*, *Obr. 7-9* a *Obr. 7-10* jsou zobrazeny výsledné křivky svítivosti, jejichž tvar a hodnota svítivosti je úměrná vzdálenosti 3,83 m mezi světelným středem svítidla a bodem měření.

Na *Obr. 7-7* jsou znázorněny 3D křivky svítivosti, které byly sestrojeny z naměřených průměrných hodnot jasů celé světelné plochy svítidla.

Další 3D křivky svítivosti na *Obr. 7-9* pak byly zkonstruovány na základě navrženého postupu, z průměrných hodnot jasů jednotlivých plošek svítidla.

Na *Obr. 7-8 a Obr. 7-10* jsou znázorněny polární diagramy s křivkami svítivosti v polorovinách $C\ 0^\circ/C\ 180^\circ$ a $C\ 90^\circ/C\ 270^\circ$ pro oba způsoby rekonstrukce křivek svítivosti pomocí jasových skenů. Z uvedených diagramů můžeme vyčíst, že maximální hodnoty svítivosti se v případě korigovaných hodnot svítivosti mezi sebou liší přibližně o 50 cd a tvarově si jsou velmi podobné.

Pokud porovnáme tvar křivek před korekcí hodnot svítivosti a po ní, pak je patrné, jak velký vliv na výsledky měření má natáčení zářivkového svítidla. Jestliže srovnáme hladinu svítivosti poloroviny $C\ 0^\circ$ a $C\ 180^\circ$ na *Obr. 7-8*, je rozdíl mezi maximálními hodnotami svítivosti asi 70 cd. Podobnou hodnotu rozdílu můžeme zjistit i v případě druhého způsobu měření křivek svítivosti.

Měření prokázalo, že křivky svítivosti lze rekonstruovat z jasových snímků a to dvěma způsoby. První způsob výpočtu křivky svítivosti ovšem neumožňuje výslednou křivku svítivosti přetrasformovat na jinou vzdálenost, než ve které byla změřena a tím se podobá konvenční metodě měření rozložení svítivosti. Druhý způsob umožňuje změřenou křivku svítivosti změnit v závislosti na vzdálenosti mezi svítidlem a srovnávacím bodem, což je vhodné pro návrhové programy osvětlovacích soustav.

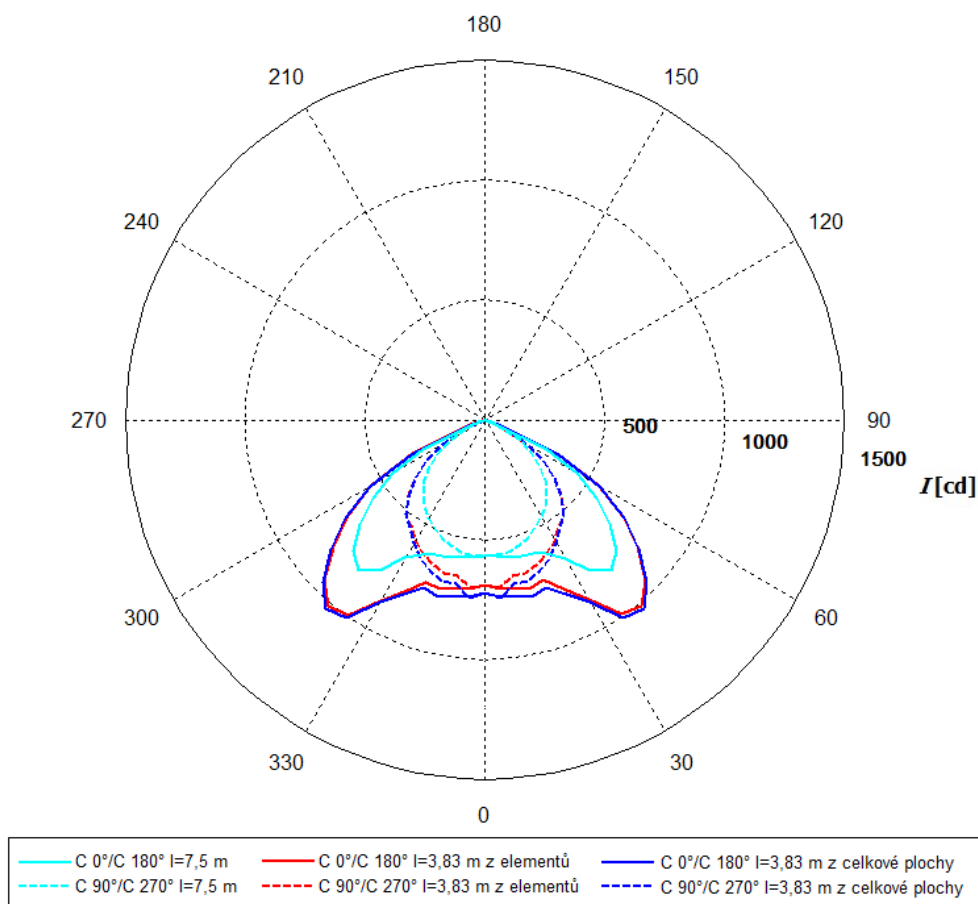
7.3 Srovnání výsledků měření konvenční a nekonvenční metody měření křivek svítivosti svítidla

Účelem těchto dvou laboratorních měření bylo porovnání použitých metod sloužících k měření křivek svítivosti svítidla, jak z hlediska přesnosti a naměřených výsledků, tak z hlediska srovnání jejich výhod a nevýhod.

Pokud metody srovnáme z pohledu přesnosti měření pomocí vypočítané nejistoty měření, která udává interval, ve kterém se naměřené hodnoty můžou objevit, lze na základě normy ČSN 36 0011-1[2] konstatovat, že obě měření patří mezi přesná laboratorní měření. Pro konvenční metodu je ovšem interval nejistoty o něco větší, než je tomu u nekonvenční metody. Hodnota výsledné rozšířené nejistoty měření konvenční metodou byla stanovena na 5,84 % a pro nekonvenční metodu 4,42 %.

Z časového hlediska měření a vyhodnocení naměřených hodnot byla konvenční metoda měření křivek svítivosti jednoznačně méně časově náročná. Bylo tomu tak zejména proto, že nekonvenční metoda není programově urychlena. Orámování všech snímků se svítidlem probíhalo ručně a trvalo kolem 20 hodin. I samotné výpočty, které prováděl počítač, byly zdlouhavé, protože byla zpracovávána velká množství dat. Celkový čas, který byl potřeba pro vytvoření výsledných průběhů, se pohybuje v desítkách hodin. Naproti tomu konvenční měření trvalo 1,5 hodiny a naměřené hodnoty osvětlenosti byly následně jednoduše přepočítány na svítivost a vloženy do předem přichystaného kódu v programu Matlab, který hodnoty převedl do grafické podoby.

**Srovnání polárních křivek svítivosti zářivkového svítidla
s lineární trubcí Osram T8 LUMILUX Cool White (L 36W/840)
měřených konvenční a nekonvenční metodou**



Obr. 7-11 Odlišnost křivek svítivosti zkoumaného svítidla měřených v různých fotometrických vzdálenostech pomocí konvenční a nekonvenční metody

Na *Obr. 7-11* jsou zobrazeny tři křivky svítivosti zářivkového svítidla, které byly změřeny. Pokud je mezi sebou porovnáme z pohledu hodnot svítivosti, je zřejmé, že nejmenší hodnoty svítivosti jsou zaznamenány v případě konvenčního měření při fotometrické vzdálenosti 7,5 m. Naproti tomu největší hodnoty svítivosti byly změřeny při nekonvenčním měření při fotometrické vzdálenosti 3,83 m, kdy byly křivky svítivosti sestaveny z průměrných hodnot jasu celé světelné plochy. Tyto křivky by měly být shodné s křivkami svítivosti vytvořenými z jednotlivých elementů světelné plochy. Na *Obr. 7-11* ovšem můžeme vidět, že se tyto křivky svítivosti liší, hlavně ve střední části. Tato odchylka je způsobena tím, že v případě křivek svítivosti sestavených z průměrných hodnot jasu celé světelné plochy je tato aktivní plocha svítidla považována za bodový zdroj. U křivek svítivosti složených z průměrných jasů jednotlivých elementů tomu tak není. Zářivkové svítidlo je reprezentováno 18 elementy a výsledná křivka svítivosti z těchto jednotlivých zdrojů světla vytváří celkovou křivku svítivosti, která by měla nejpřesněji odpovídat skutečnosti.

Výhoda konvenčního měření tedy spočívá v rychlosti měření s dostatečnou přesností naměřených výsledků, ovšem bez možnosti transformace křivek svítivosti do skutečných hodnot. Transformaci lze provést u nekonvenční metody z jednotlivých elementů s vysokou přesností, ale podstatně náročnějším způsobem a v delším čase.

8 ZÁVĚR

8.1 Závěry práce a její přínos

Hlavním cílem práce bylo navrhnout postup měření a výpočtu křivek svítivosti měřených pomocí jasových skenů svítidla a následně porovnat toto nekonvenční měření s konvenční metodou měření křivek svítivosti. Úvodní tři kapitoly, související s následnými výpočty a měřením, které byly sepsány na základě nutné znalosti teoretických základů, pojednávají o fyziologii zrakového systému, o fotometrických veličinách a křivkách svítivosti.

V kapitole 6 jsou uvedeny možné způsoby měření křivek svítivosti a nejčastější zdroje nejistot. Tato kapitola je věnována jak konvenčním metodám měření směrových charakteristik, tak i nekonvenčním metodám. U nekonvenční metody je proveden podrobnější rozbor principu a hlavních součástí digitální zrcadlovky, neboť je tento přístroj použit jako měřicí zařízení u jasového analyzátoru. Jelikož je hlavním zdrojem nejistoty právě digitální zrcadlovka, jsou uvedeny i hlavní zdroje chyb, které nejčastěji ovlivňují měření jasů, jimiž jsou špatná kalibrace citlivosti ISO, nepřesné nastavení clony a času závěrky. Důležitým kritériem pro správný výpočet jasů je, aby v metadatech dané scény byly uvedeny skutečné informace o expozici. V této kapitole je rovněž uveden návrh postupu pro měření křivek svítivosti svítidla pomocí jasových skenů. Na konci zmíněné kapitoly je uvedena tabulka se srovnáním konvenční a nekonvenční metody měření křivek svítivosti, kde jsou uvedeny klady a zápory obou metod. Porovnání parametrů a vlastností uvedených metod v tabulce bylo provedeno na základě dostupných informací, literatury, příruček atd. Tato tabulka navazuje na praktické srovnávací měření provedené v následující kapitole.

Hlavním účelem praktického měření bylo ověření navrženého postupu rekonstrukce křivek svítivosti svítidla z plošného jasového skenování. Pro možnost srovnání výsledků bylo provedeno i konvenční měření křivek svítivosti na goniofotometru s otočným svítidlem a pevným fotometrem. Součástí obou měření je výpočet nejistoty měření pro použité metody. Při určování nejistot měření se vycházelo jak z deklarovaných velikostí chyb, tak z předpokladů. Pro konvenční metodu byla vypočtena rozšířená nejistota měření 5,84 %. Tuto hodnotu můžeme pokládat za správnou, neboť pro určování velikostí jednotlivých zdrojů chyb bylo dostatek kvalitních informací. V případě nekonvenční metody byla stanovena výsledná rozšířená nejistota měření 4,42 %. Vzhledem k odhadu velikostí a zdrojů chyb při výpočtu nejistoty samotné digitální zrcadlovky nelze považovat stanovenou hodnotu nejistoty za úplně korektní. Dle velikostí vypočítaných nejistot měření, je můžeme zařadit do přesných laboratorních měření, u kterých nejistota nepřesahuje 8 %. Výsledky měření byly porovnány na základě grafických průběhů svítivosti. Z naměřených křivek svítivosti zářivkového svítidla můžeme vyvodit závěry na základě jejich tvaru a hodnot svítivosti. Každá ze tří uvedených křivek byla sestavena odlišným způsobem. Nejpřesnější by měla být křivka svítivosti změřená pomocí jasových skenů a vytvořená z jednotlivých elementů světelné plochy. Dále bylo zjištěno, že konvenčním měřením, provedeným na automatizovaném goniofotometru pomocí přesného luxmetru, lze celkem snadno dosáhnout dostatečně korektních hodnot svítivosti a tím i křivek svítivosti v relativně krátkém čase.

Přínos této práce spočívá v navrženém teoretickém postupu měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů a praktickém ověření tohoto návrhu, které prokázalo, že směrové charakteristiky svítidla lze tímto způsobem rekonstruovat s velkou přesností.

8.2 Návrh dalšího postupu

K tomu, abychom mohli metodu měření křivek svítivosti pomocí jasových skenů považovat za standard, je potřeba ještě velké množství práce. Následně by bylo potřebné ověřit možnost transformace změřených křivek svítivosti jednotlivých elementů světelné plochy svítidla pro jinou než změřenou vzdálenost. Taktéž by se další vývoj měl zaměřit na prostorové 3D skenování zkoumaného světelného zdroje či svítidla, kde by skenování probíhalo pomocí dvou jasových kamer, čímž by bylo docíleno nejen informace o dané ploše, ale i o její hloubce. Prostorové skenování by přineslo i informaci o vzdálenosti zkoumaného objektu, která se u plošného skenování musí ručně změřit. Aby se měření urychlilo, je potřeba uzpůsobit software tak, aby byly přepočty skenů do jasové mapy co nejrychlejší a rozdělení světelného zdroje či svítidla na jednotlivé elementy prováděl samotný program.

Dále je nezbytné vytvořit vhodný formát pro ukládání raydat, jelikož stávající formáty nepočítají s touto novou koncepcí vytváření křivek svítivosti z jasů. Formát by měl být navržen tak, aby umožňoval rozšíření o další parametry, při zachování kompatibility s návrhovými programy. Taktéž by bylo vhodné tento formát definovat jako mezinárodní standard. Ten v současnosti chybí.

Tato nekonvenční metoda měření křivek svítivosti má vysoký potenciál a v budoucnu bude mít nejspíš zásadní vliv při hodnocení osvětlovacích soustav. Proto má smysl pokračovat ve vývoji a zdokonalení této metody.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, J. *Světelná technika*. ČVUT v Praze, 1990, 76 stran, ISBN 80-01-00407-7.
- [2] HABEL, J. *Osvětlování*. ČVUT v Praze, 1998, 328 stran, ISBN 80-01-01770-2.
- [3] WIKIPEDIA : ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM, [on line]. 2012, [cit. 2012-10-27]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetické_spektrum>.
- [4] BAXANT, P. *Světelná technika*, VUT v Brně, 2008, 82 stran.
- [5] BAXANT, P. *Osvětlovací soustavy*, VUT v Brně, 2006, 47 stran.
- [6] FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM : *Umělé osvětlení*, UTB Zlín, [on line]. 2011, [cit. 2013-01-27]. Dostupný z WWW: <http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_09.pdf>.
- [7] HABEL, J. *Základy světelné techniky (část 2)* - Odborný časopis Světlo [online]. 2009, č.4, [cit. 2013-02-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39391.pdf>>.
- [8] WIKIPEDIA : GONIOFOTOMETR, [on line]. 2010, [cit. 2013-02-01]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Goniofotometr>>.
- [9] LABORATORNÍ CVIČENÍ : *Měření křivek svítivosti parabolického svítidla*, VUT v Brně, [on line]. 2002, [cit. 2013-02-04]. Dostupný z WWW: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/12_Mereni_krivek_svitivosti_parabolickeho_svitidla.pdf>.
- [10] BÁLSKÝ, M., HABEL, J. *Modernizace goniofotometru* - Odborný časopis Světlo [online]. 2009, č.4, [cit. 2013-02-09]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39390.pdf>>.
- [11] BALENČÁR, R., VDOLEČEK, F., HALAJ, M. *Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot* - Odborný časopis Světlo [online]. 2001, č.7, [cit. 2013-02-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>>
- [12] VDOLEČEK, F., HALAJ, M. *Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření* - Odborný časopis Světlo [online]. 2001, č.10, [cit. 2013-02-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>>.
- [13] WIKIPEDIA : DIGITÁLNÍ FOTOAPARÁT, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Digitální_fotoaparát>.
- [14] WIKIPEDIA : DIGITAL CAMERA, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_camera>.
- [15] WIKIPEDIA : DIGITÁLNÍ ZRCADLOVKA, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Digitální_zrcadlovka>.
- [16] WIKIPEDIA : CCD, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device>.
- [17] RASZKOVÁ I., *Tvorba a zpracování digitální fotografie*, [on line]. 2009, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://hucak.osu.cz/digifoto/technika/fotoaparaty.php>>.
- [18] MATERIÁLY PRO VÝUKU FELD ČVUT : OBRAZOVÉ SENZORY, [on line]. 2008, [cit. 2013-03-12]. Dostupný z WWW:

- <<http://radio.feld.cvut.cz/courses/D37LBR/materialy.php?akce=dlf&zdroj=vpm&fkey=18&xtgt=2f686f6d652f53657276696365732f7777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f2f5833374f4246>>.
- [19] WIKIPEDIA : FOVEON X3, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-01]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Foveon_X3>.
- [20] ŠKODA, J. *Nekonvenční metody měření ve fotometrii*. Disertační práce. FEKT VUT v Brně, 2011, 106 stran.
- [21] ŠEDIVÝ, J. *Digitální fotografie*, [on line]. 2010, [cit. 2013-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://black-hole.cz/cental/wp-content/uploads/2010/10/Digit%C3%A1ln%C3%AD-fotografie.pdf>>.
- [22] FOTOSLOVNÍK : BAREVNÁ HLOUBKA, [on line]. 2011, [cit. 2013-03-13]. Dostupný z WWW: <<http://www.phototv.cz/index.php?page=cataltxt&grouptxt=1&recid=38&lang=CZ>>.
- [23] LUMIDISP : JASOVÝ ANALYZÁTOR, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.lumidisp.eu>>.
- [24] KATALOGOVÝ LIST VÝROBCE : NIKON, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-16]. Dostupný z WWW: <http://nikon.cz/cs_CZ/product/digital-cameras/slr/consumer/d7000>.
- [25] SCHMIDT, F. *Messen von Srahlendaten von LED - Nahfeldgoniophotometer*, [on line]. 2011, [cit. 2013-03-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.optence.de/dakom-2011/nahfeldgoniophotometer.pdf/view?searchterm=Franz%20Schmidt>>.
- [26] WÜLLER, D., GABELE, H. *The usage of digital cameras as luminale meters*, [on line]. 2007, [cit. 2013-03-19]. Dostupný z WWW: <http://www.image-engineering.de/index.php?option=com_content&view=article&id=550&Itemid=145>.
- [27] SVOBODA, M. *Srovnání konvenčních a nových metod měření a hodnocení jasů*. Diplomová práce. FEKT VUT v Brně, 2012, 84 stran.
- [28] WIKIPEDIA : VYVÁŽENÍ BÍLÉ, [on line]. 2013, [cit. 2013-03-21]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Vyvážení_bílé>.
- [29] KATALOGOVÝ LIST VÝROBCE : PRC KROCHMANN, [on line]. 2013, [cit. 2013-04-28]. Dostupný z WWW: <<http://www.prc-krochmann.com/images/Downloads/111eneu.pdf>>.

Elektronické programy

- [30] LUMIDISP : JASOVÝ ANALYZÁTOR, [počítačový program, pevný disk]. 2013, [cit. 2013-03-13].
- [31] MS EXCEL : TABULKOVÝ PROGRAM, [počítačový program, pevný disk]. 2007, [cit. 2013-03-06].
- [32] MATLAB : SOFTWARE PRO VĚDECKOTECHNICKÉ VÝPOČTY, [počítačový program, pevný disk]. 2010, [cit. 2013-03-25].
- [33] SKETCH UP 8 : SOFTWARE PRO TVORBU 3D MODELŮ, [počítačový program, pevný disk]. 2013, [cit. 2013-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.sketchup.com/download/gsu.html>>.