



Příprava normálů světelného toku a svítivosti

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Autor: **Bc. Theodor Terrich**

Vedoucí práce: **Ing. Marek Bálský**

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Electrical Engineering

Department of Power Engineering



**Preparation of Standard Light Sources of Luminous Flux and
Luminous Intensity**

Master Thesis

Author: **Bc. Theodor Terrich**

Supervisor: **Ing. Marek Bálský**

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Theodor Terrich**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Příprava normálů světelného toku a svítivosti**

Pokyny pro vypracování:

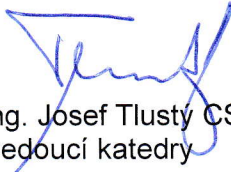
1. Analýza postupu přípravy normálů světelného toku a svítivosti
2. Výběr světelných zdrojů pro normály světelného toku a svítivosti
3. Ověření světelnotechnických parametrů vybraných světelných zdrojů pro normály světelného toku a svítivosti

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel
- [2] ČSN 36 0010 Měření světla
- [3] HABEL, Jiří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

Vedoucí: Ing. Marek Bálský

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 12. 2. 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám námitky proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000Sb., o autorských právech a právech souvisejících, ve smyslu pozdějších znění tohoto zákona.

V Praze dne: 5. 5. 2014

Toušek

.....
podpis

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval Ing. Marku Bálskému za cenné rady, připomínky a pomoc při měření v laboratoři. Dále bych rád poděkoval Prof. Ing. Jiřímu Habelovi, DrSc za nabídnuté téma diplomové práce a pomoc při hledání vhodných vzorků světelných zdrojů.

Abstrakt

Práce je zaměřena na tvorbu odvozených světelných normálů z komerčně vyráběných světelných zdrojů. Podrobně se zabývá měřením fotometrických veličin, zejména svítivosti a světelného toku, přístrojovým vybavením fotometrické laboratoře a podmínkami pro úspěšné měření těchto veličin. Velký důraz je kladen na výběr vhodného světelného zdroje pro tvorbu těchto odvozených normálů. Rozbor vlastností všech typů světelných zdrojů je proveden především z hlediska kvalitativních parametrů.

Klíčová slova:

Světelný normál; světelný tok, svítivost, světelné zdroje; měření světla; fotometrie

Abstract

The work is focused on the creation of derived light normals of commercially produced light sources. Further, this work deals with the measurement of photometric quantities, namely luminous intensity and luminous flux. The thesis describes the instrumentation photometric laboratory and measurement conditions for these physical units. The work deals with the selection of a suitable light source for creating these derived light standards and analysis of properties of all types of light sources with regard quality parameters.

Key words:

Light standard; luminous intensity; luminous flux; light sources; light measurement; photometry;

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Zásady měření světelného toku a svítivosti	13
2.1 Fotometrie a fotometrické veličiny.....	13
2.1.1 Světelný tok	14
2.1.2 Svítivost.....	15
2.1.3 Prostorový úhel.....	16
2.1.4 Osvětlenost	17
2.1.5 Jas.....	19
2.2 Všeobecné podmínky měření	21
2.3 Metody měření světelného toku	21
2.4 Metody měření svítivosti	25
3. Měřicí přístroje	27
3.1 Luxmetr	27
3.2 Fotometrická lavice	30
3.3 Goniofotometr	33
3.4 Fotometrický kulový integrátor (Ulbrichtova koule)	35
4. Výběr vhodného světelné zdroje.....	38
4.1 Světelné normály – specifikace vlastností	38
4.1.1 Normály svítivosti	39
4.1.2 Normály světelného toku	40
4.2 Světelnětechnické parametry	41
4.3 Vlastnosti světelných zdrojů	43
4.3.1 Teplotní zdroje světla.....	43
4.3.2 Výbojové zdroje světla.....	45
4.3.3 Elektroluminiscenční zdroje.....	51
5. Nejistoty světelnětechnických měření	54
5.1 Dílčí nejistoty měření na fotometrické lavici	56
5.1.1 Výsledná nejistota měření na fotometrické lavici	59
5.2 Dílčí nejistoty měření na goniofotometru.....	60
5.2.1 Výsledná nejistota měření na goniofotometru	62

5.3	Dílčí nejistoty měření v kulovém integrátoru	63
5.3.1	Výsledná nejistota měření v kulovém integrátoru	66
6.	Vlastní fotometrická měření.....	67
6.1	Vybrané světelné zdroje.....	67
6.2	Příprava normálu svítivosti	70
6.2.1	Použité přístroje.....	71
6.2.2	Výpočet svítivosti normálů	73
6.2.3	Výpočet výsledných hodnot svítivosti a kombinované nejistoty	77
6.3	Příprava normálu světelného toku.....	78
6.3.1	Použité přístroje.....	79
6.3.2	Výpočet světelného toku normálů z naměřených čar svítivosti.....	79
6.3.3	Výpočet světelného toku normálů z naměřených dat v kulovém integrátoru	85
6.3.4	Výpočet výsledných hodnot světelného toku a kombinované nejistoty.....	87
7.	Závěr, vyhodnocení výsledků	91
7.1	Normály svítivosti.....	91
7.2	Normály světelného toku.....	91
8.	Citovaná literatura.....	95
9.	Seznam obrázků.....	98
10.	Seznam tabulek.....	100
11.	Symbole a zkratky	101
12.	Přílohy	102

Seznam příloh

- P – 1** Naměřená data normálu svítivosti 13-1
- P – 2** Naměřená data normálu svítivosti 13-2
- P – 3** Naměřená data normálu svítivosti 13-3
- P – 4** Naměřená data normálu světelného toku 13-4
- P – 5** Naměřená data normálu světelného toku 13-5
- P – 6** Naměřená data normálu světelného toku 13-6
- P – 7** Naměřená data normálu světelného toku 13-7
- P – 8** Výpočet světelného toku normálu 13-4 z naměřených dat metodou pásmových toků
- P – 9** Výpočet světelného toku normálu 13-5 z naměřených dat metodou pásmových toků
- P – 10** Výpočet světelného toku normálu 13-6 z naměřených dat metodou pásmových toků
- P – 11** Výpočet světelného toku normálu 13-7 z naměřených dat metodou pásmových toků

1. Úvod

Světlo člověka provází po celou jeho dobu existence a je pro existenci nejen člověka, ale i většiny organismů na planetě nesmírně důležité. Sluneční svit řídí lidský biorytmus, podílí se na tvorbě hormonů v lidském těle a v neposlední řadě umožňuje zrakový vjem, jenž je nezbytný pro orientaci a rozpoznávání okolí. Během evoluce lidstva se světlo stávalo stále důležitějším i mimo přirozený denní cyklus – ve tmě. Postupem času přestalo světlo měsíce, louče, či svíčky splňovat naše požadavky na zrakovou pohodu nejen během noci. Navození zrakové pohody je pro člověka zásadní během celodenní aktivity. Pokud je přirozeného světla nedostatek, je třeba jej nahradit zdroji umělého osvětlení. Lidstvo vynalezlo celou řadu světelných zdrojů, zejména elektrických. Pro posuzování kvality světelných zdrojů se vyvinula samostatná vědní disciplína – fotometrie, která objektivně posuzuje a klasifikuje světelnotechnické parametry všech zdrojů světla a jejich působení na zrakový systém.

Světelný tok spolu se svítivostí patří mezi nejdůležitější světelnotechnické veličiny, s jejichž pomocí lze posuzovat kvantitativní vlastnosti světelných zdrojů. Proto je důležité tyto parametry nejen znát, ale také je umět snadno měřit. Pro účely zjišťování daných veličin u světelných zdrojů s neznámými parametry se využívá měření pomocí světelného normálu (etalonu) s definovanými parametry v součinnosti přístrojů určených pro měření fotometrických veličin.

Bez znalosti parametrů konkrétního světelného zdroje, především jeho vyzářovací charakteristiky nelze dobře navrhnout svítidlo a tím není možné zajistit kvalitní světelné podmínky v požadovaném místě zrakového úkonu. Neznámost světelnotechnických parametrů daného zdroje světla instalovaného v osvětlovací soustavě má tak za následek nevyhovění normám pro osvětlení (vnitřní i venkovní) a ve výsledku může být osvětlovaný prostor dokonce až nebezpečný pro pobyt osob.

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu odvozených normálů světelného toku a svítivosti z komerčně vyráběných světelných zdrojů (pro všeobecné osvětlování) pro účely provozního měření v laboratoři světelné techniky na FEL.

Světelné normály mají při napájení jmenovitým napětím či proudem přesně definované hodnoty světelného toku či svítivosti ve vztáhném směru. Cílem je u světelných zdrojů vybraných k tvorbě odvozených normálů změřit tyto fotometrické parametry co nejpřesněji a posoudit vhodnost jejich užívání v laboratorních měřeních ke stanoveným účelům.

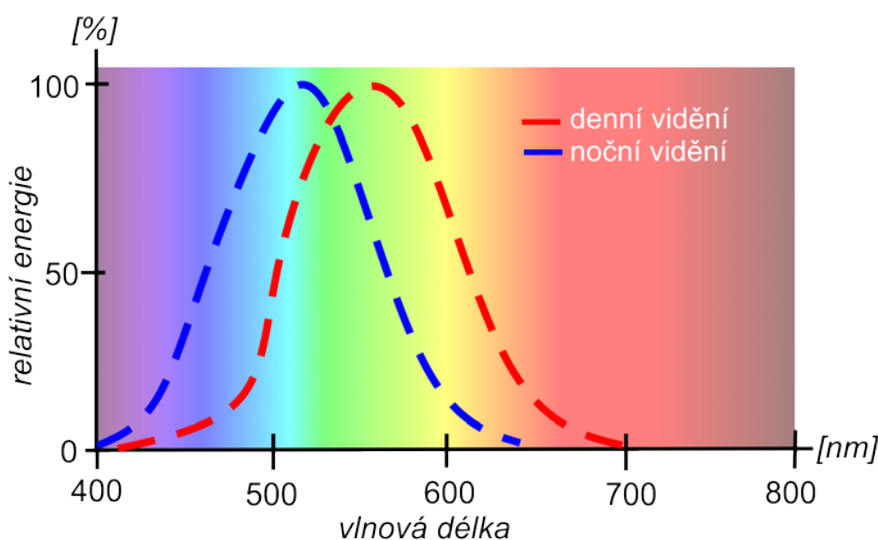
Normálů světelného toku se užívá k ověřování či zjišťování hodnoty světelného toku u jiných zdrojů světla. Rovněž normály svítivosti se uplatňují při měření svítivosti směrových světelných zdrojů a ověřování přesnosti luxmetrů.

2. Zásady měření světelného toku a svítivosti

2.1 Fotometrie a fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny se dají zařadit do podskupiny radiometrických veličin. Fotometrie se vymezuje pouze na zkoumání elektromagnetického záření ve viditelné oblasti. Fotometrie se zabývá světelnětechnickým měřením, tak aby se výsledky měření blížily co nejvěrněji zrakovému vjemu normálního fotometrického pozorovatele. Radiometrie objektivně zkoumá množství přenesené energie v celém rozsahu elektromagnetického záření [1].

Pro lidský zrakový orgán není rozhodující kvantita zdrojem vyzářené světelné energie za čas. Oko vnímá zářivý tok (výkon) světelného zdroje a různé vlnové délky viditelného světelného záření vnímá s rozdílnou citlivostí. Poměrná spektrální citlivost lidského zraku se u jednotlivých jedinců liší. Pro reprodukovatelnost výsledků světelnětechnických měření byl mezinárodní komisí pro osvětlování CIE přijat pojem normální fotometrický pozorovatel a byla vytvořena charakteristika poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele pro fotopické (denní) a skotopické (noční) vidění. Křivka poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele se také nazývá „ $V(\lambda)$ čára“ [2].



Obrázek 1 - poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele

Fotometrické veličiny jsou reprezentovány světelným tokem, svítivostí, osvětleností a jasem.

2.1.1 Světelný tok

Světelný tok Φ [lm] vyjadřuje množství světla vyzářeného do prostoru. Světelný tok udává schopnost vyvolat zrakový vjem na množství energie přenesené zářivým tokem Φ_e [W].

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda = \int_0^\infty \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot d\lambda \approx \sum_{i=1}^n \Phi_{ei}(\lambda_i) \quad [W; W \cdot m^{-1}, m] \quad (1.)$$

kde: $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ - spektrální hustota zářivého toku [$W \cdot m^{-1}$]

Vztah vyjádřený rovnicí (1.) lze aplikovat na spojitě spektrum záření. V případě záření čárového je integrální tvar nahrazen sumačním, kde se sčítají příspěvky monochromatického záření od jednotlivých spektrálních čar. Jelikož lidské oko vnímá různé vlnové délky s jinou intenzitou, jak již bylo řečeno výše, zavádí fotometrie vztah (2.) pro vyjádření světelné účinnosti viditelného záření $V(\lambda)$, která odpovídá průběhu poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele [2], [3].

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad [-; lm \cdot W^{-1}, lm \cdot W^{-1}] \quad (2.)$$

Kde: $V(\lambda)$ – poměrná světelná účinnost monochromatického záření

$K(\lambda)$ – světelný účinek záření vlnové délky λ

K_m - maximum světelného účinku záření²

Světelný tok monochromatického záření se určí dle vztahu (3.). Výsledný světelný tok Φ bude poté vyjádřen rovnicí (4.).

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad [lm; lm \cdot W^{-1}, -, W] \quad (3.)$$

Kde: $\Phi_e(\lambda)$ - zářivý tok vlnové délky λ

$$\Phi = K_m \cdot \int_0^\infty \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [lm; lm \cdot W^{-1}, W \cdot m^{-1}, m] \quad (4.)$$

Kde: $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda$ – spektrální hustota zářivého toku dané vlnové délky

² Maximální světelná účinnost $K_m = 683 \text{ lm} \cdot W^{-1}$

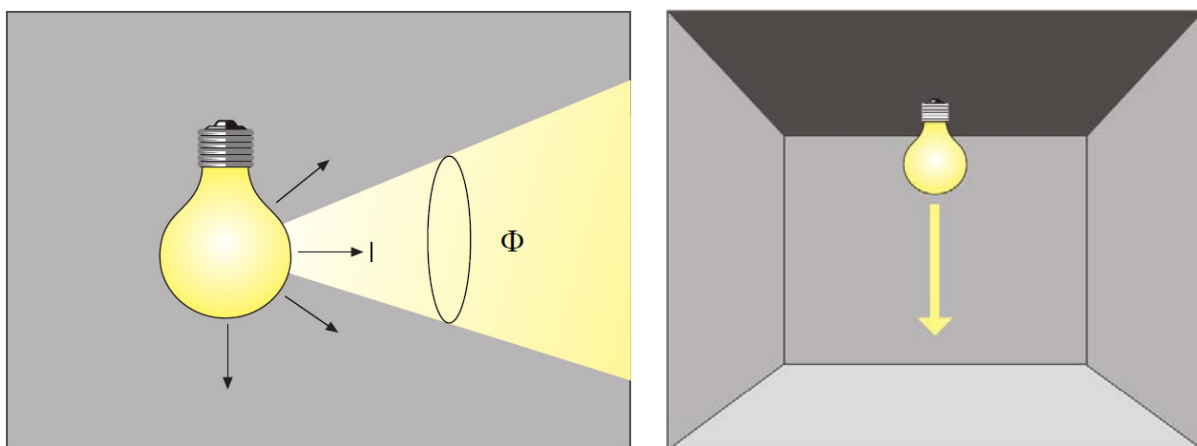
2.1.2 Svítivost

Svítivost udává hustotu světelného toku v konkrétním směru $I_{\gamma\vartheta}$ vyzařování do prostoru (5.). Jednotkou svítivosti je kandela $I[cd]$, která patří k sedmi základním jednotkám *SI* soustavy. Svítivost zdroje v daném směru udána úhly γ a ϑ lze chápat jako prostorovou hustotu světelného toku Φ vyzářeného do určitého prostorového úhlu Ω . (Obrázek 2)

$$I_{\gamma\vartheta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\vartheta}} \quad [cd; lm, sr] \quad (5.)$$

Kde: $d\Omega_{\gamma\vartheta}$ - prostorový úhel vymezený úhly γ, ϑ

$d\Phi$ – vyzářovaný světelný tok do daného prostorového úhlu



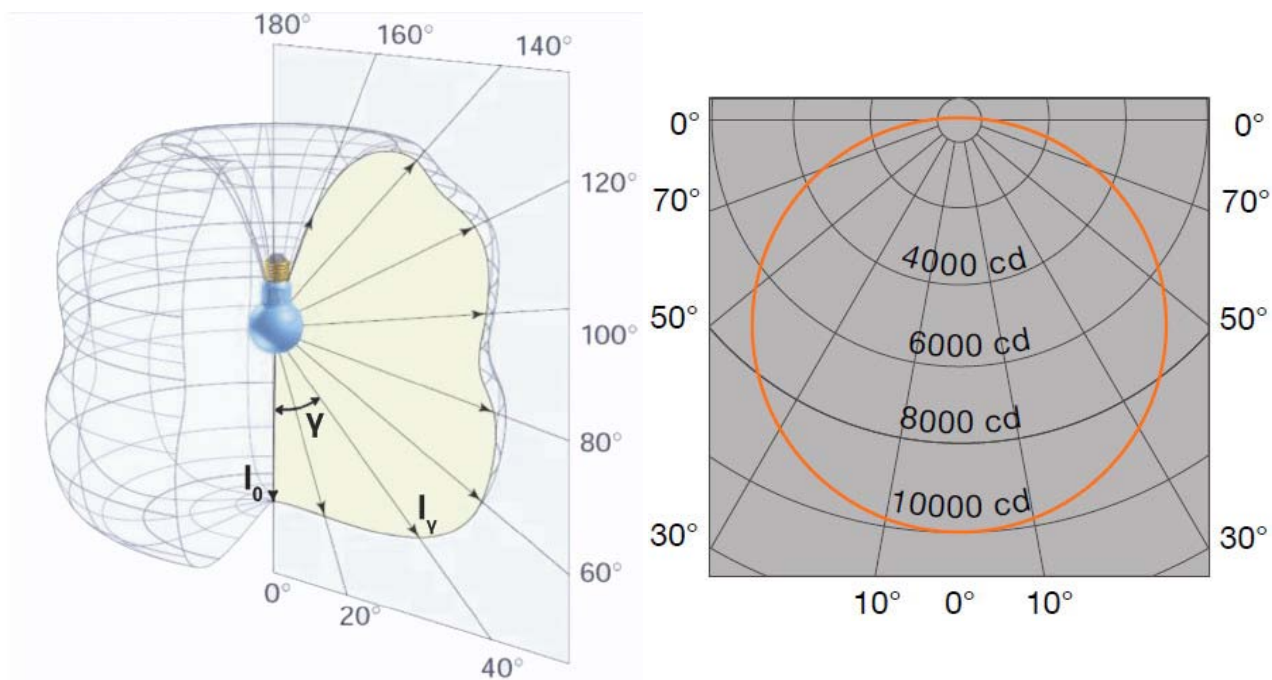
Obrázek 2 - Definice svítivosti, vztah s prostorovým úhlem a světelným tokem [4]

Svítivost je možné určovat pouze pro bodový zdroj a uplatní se zejména pro nerovnoměrně vyzařující zdroj světla do různých směrů. Aby bylo možné prohlásit zdroj světla za bodový, musí být zdroj pozorován z bodu, jehož poloha (v ideálním případě) je vůči největšímu geometrickému rozměru zdroje vzdálena desetinásobně. Tzn., že zdroj má vůči pozorovateli (bodu měření) zanedbatelné rozměry. V praxi toto ovšem lze dosáhnout jen obtížně a pro měření svítivosti bodového zdroje platí podmínka vyjádřená rovnicí (6.), která říká, že poměr vzdálenosti r ze které je pozorován zdroj o rozměru a má být minimálně pětinašobný. [1]

$$\frac{r}{a} \geq 5 \quad [m, m; -] \quad (6.)$$

Změřením hodnot svítivosti zdroje ve všech směrech vznikne fotometrická plocha svítivosti. Ta je tvořena prostorově orientovanými radiusvektory směřujícími od fotometrického středu zdroje. Provedením řezu (procházejícím fotometrickým středem zdroje) fotometrické

plochy svítivosti vzniká obrazec křivky svítivosti (příklad viz [Obrázek 3](#)), která se vynáší do polárních souřadnic. Polární diagramy svítivosti v kandelách se pro využití v praxi a univerzálnější užití přepočítávají na hodnoty světelného toku zdroje světla a jsou přikládány k datovým listům svítidel. Vztažný směr svítivosti je totožný s hlavní (dominantní) vyzařovací plochou zdroje. Vztažná svítivost se označuje I_0 a v polárním diagramu se nachází na úhlu 0° , standardně orientována k nadiru. [3]



Obrázek 3 - a) Prostorové rozložení svítivosti zdroje [3]; b) Polární diagram svítivosti, [4]

Měření křivek svítivosti se provádí goniometrem ([kapitola 3.3](#)) a vynáší se v několika rovinách (více: [kapitola 2.3](#)).

2.1.3 Prostorový úhel

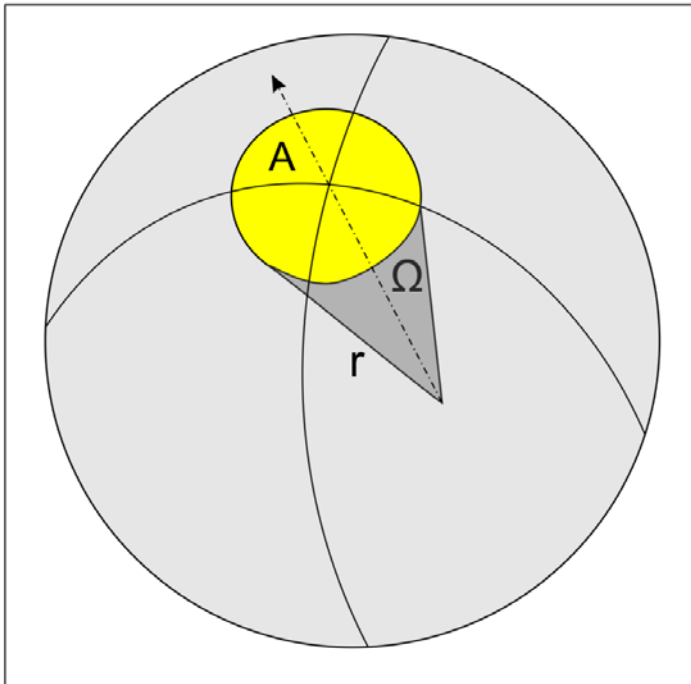
V předchozích odstavcích byl zaveden pojem prostorového úhlu, ten má ve světelné technice svůj neopomenutelný význam. Prostorový úhel Ω [sr] představuje kuželovou výseč jednotkové koule ([Obrázek 4](#)), která na plášti jednotkové koule (poloměru $r = 1\text{ m}$) vytíná plochu 1 m^2 . Vrchol kužele je totožný se středem koule. Velikost prostorového úhlu se vypočítá ze vztahu (7.).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [\text{sr}; m, m^2] \quad (7.)$$

Pro výpočet elementu prostorového úhlu dA , který vychází z fotometrického středu zdroje umístěného ve vzdálenosti l , se užije rovnice (8.), která zohledňuje úhel (β), pod kterým na elementární plochu dA dopadá zdrojem vyzářený paprsek.

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} \quad [\text{sr}; m^2, -, m] \quad (8.)$$

$$\Omega = \iint \frac{\cos \beta}{l^2} \cdot dA \quad [\text{sr}; m^2, -, m] \quad (9.)$$



Obrázek 4 - Definice prostorového úhlu

2.1.4 Osvětlenost

Fotometrická veličina osvětlenost $E[lx]$ udává plošnou hustotu světelného toku $d\Phi$ dopadajícího na jednotkovou plochu $dA = 1 m^2$ [2], popisuje [Obrázek 5](#) a rovnice (10.). V případě paprsků dopadajících z bodového zdroje na plochu náležící rovině p pod učitým úhlem (β), vypočítá se osvětlenost v okolí bodu P dle čtvercového zákona vzdálenosti (12.), kdy

s rostoucí vzdáleností od zdroje klesá osvětlenost (Obrázek 6). V osvětlenosti se dále uplatňuje Lambertův (kosinový) zákon (11.), který popisuje závislost svítivosti s měnícím se úhlem γ od vztažné svítivosti zdroje a důsledkem toho je svítivost závislá na úhlu dopadu β . Výraz (12.) je odvozen dosazením z rovnic (5.) a (8.) do rovnice (10.).

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [lx; lm, m^2] \quad (10.)$$

$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma \quad [cd; cd, -] \quad (11.)$$

$$E_{p\rho} = \frac{I_\gamma \cdot \cos \beta}{l^2} \quad [lx; cd, -, m] \quad (12.)$$

Kde: $E, E_{p\rho}$ - osvětlenost (roviny v bodě P)

dA - plocha (v okolí bodu P)

$d\Phi$ - světelný tok dopadající na plochu

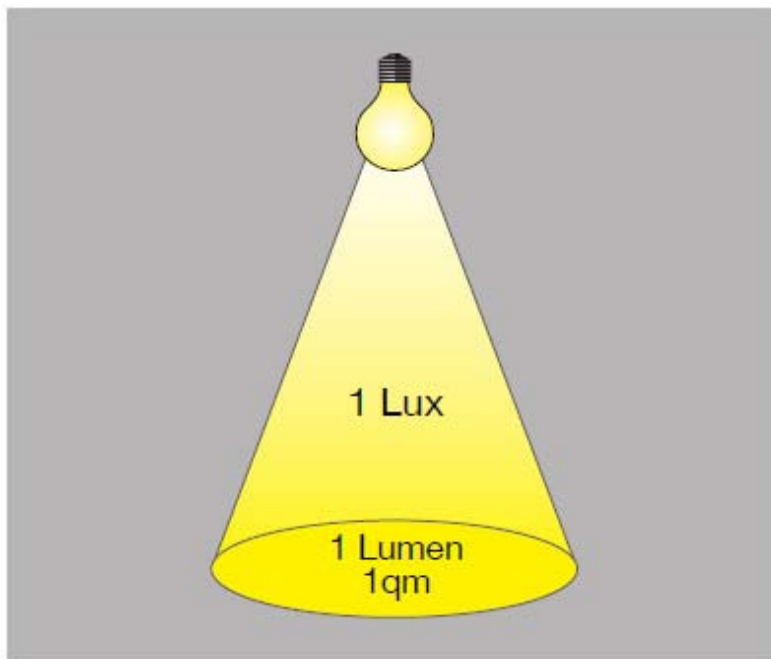
I_γ - svítivost

I_0 - vztažná svítivost

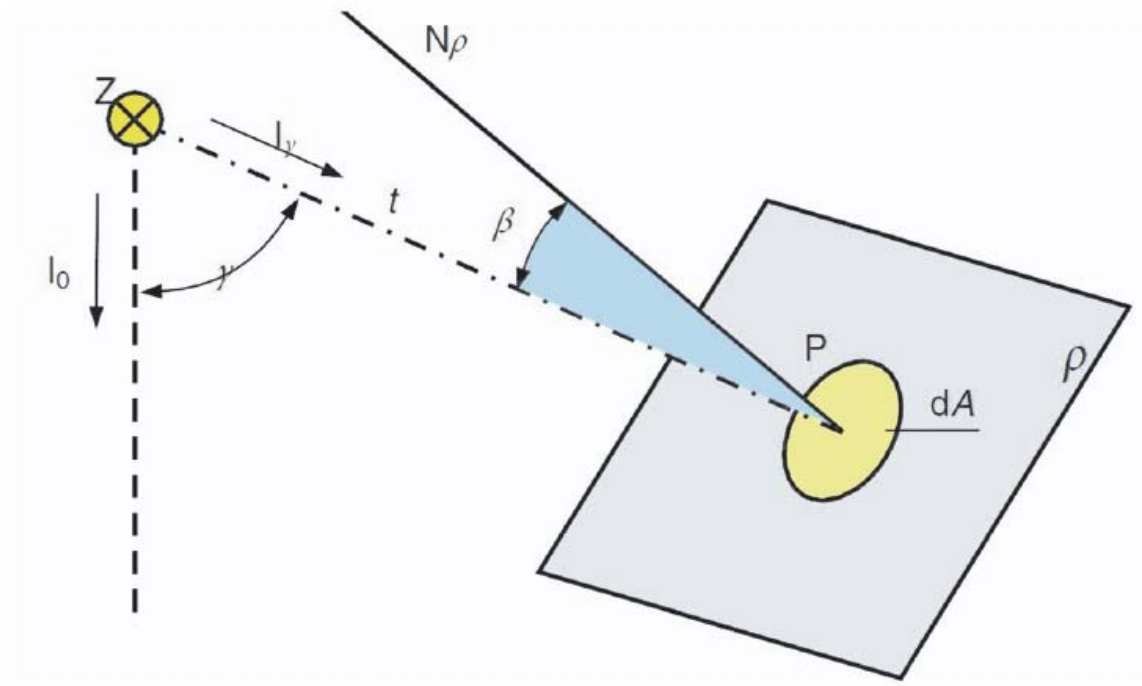
γ - úhel mezi dopadajícím paprskem na rovinu ρ a vztažnou svítivostí

β - úhel mezi dopadajícím paprskem a normálou roviny ρ

l - vzdálenost zdroje od bodu P



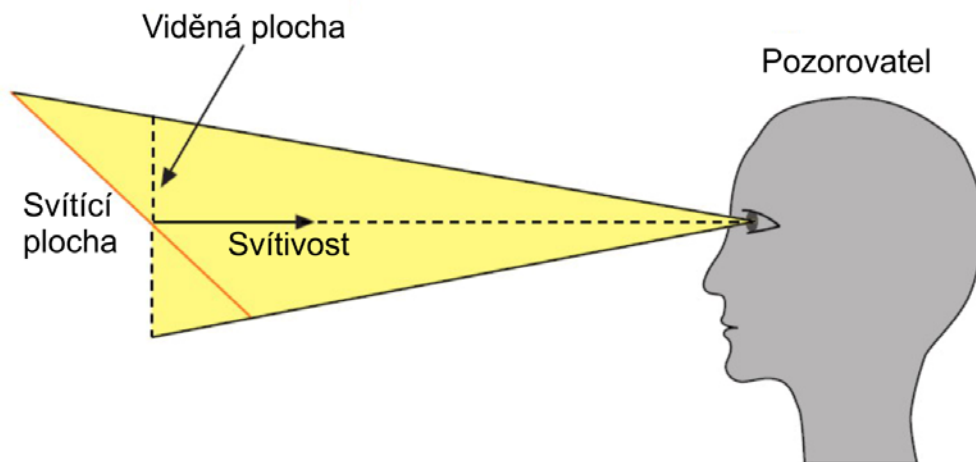
Obrázek 5 - Definice osvětlenosti [4]



Obrázek 6 - Osvětlenost roviny bodovým zdrojem [3]

2.1.5 Jas

Jas, respektive kontrast jasů je jedinou fotometrickou veličinou, kterou zrakový systém člověka přímo vnímá a reaguje na ni. Definice jasu, $L[\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}]$, vychází z prostorového rozložení plošné hustoty světelného toku.



Obrázek 7 - Definice jasu [4]

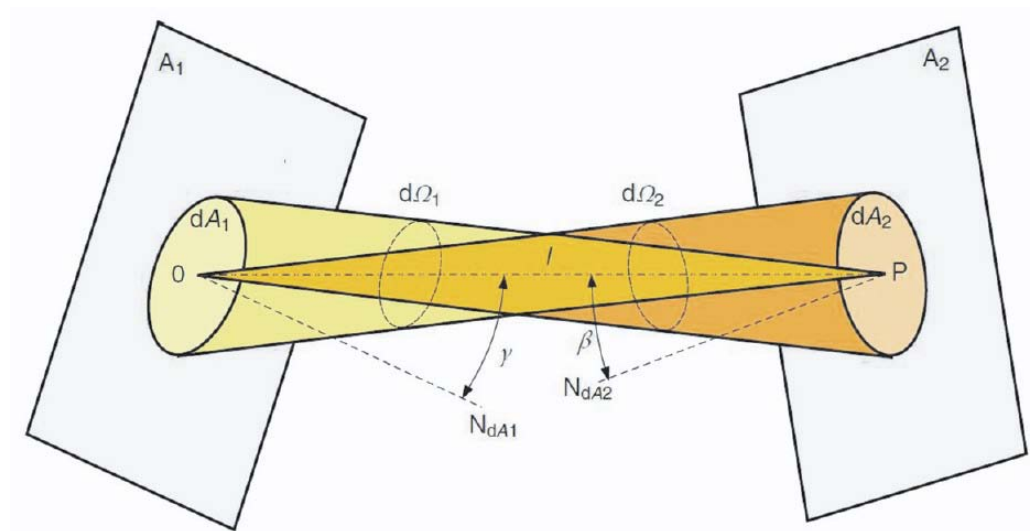
Světelný tok se přenáší svazkem paprsků mezi dvěma body v prostoru, kde dochází k rozptýlení, vyzáření nebo pohlcení světla. Tím se mění světelný tok a zároveň i jas svazku paprsků. Pokud svazek paprsků vycházející z otvorů zanedbatelného průměru dopadá na dvě navzájem libovolně umístěné roviny A_1 a A_2 ve vzdálenosti l , platí pro stanovení velikosti jasu vzorec (13.). Podmínkou je, aby průměry otvorů (O, P) , jimiž prochází paprsek, byly zanedbatelné vůči vzdálenosti mezi nimi.

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_N} \quad [cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2] \quad (13.)$$

Situace zachycuje **Obrázek 8**. Z pohledu na uvedený obrázek je možné, aby nastaly dvě různé situace. Jas svazku paprsků se v prostorovém úhlu Ω_1 sbíhá anebo se v prostorovém úhlu Ω_2 rozbíhá. Pro případ sbíhajících se paprsků, platí pro stanovení jasu L_{OP} rovnice (16.). V případě rozbíhajících se paprsků pak rovnice (17.).

$$d\Omega_1 = dA_1 \cdot \cos \gamma \cdot l^2 \quad [sr; m^2, -, m] \quad (14.)$$

$$d\Omega_2 = dA_2 \cdot \cos \beta \cdot l^2 \quad [sr; m^2, -, m] \quad (15.)$$



Obrázek 8 - Jas svazku sbíhajících se a rozbíhajících se paprsků [3]

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_N} = \frac{d^2\phi}{d\Omega_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad [cd \cdot m^{-2}; lx, sr] \quad (16.)$$

$$L_{OP} = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_N} = \frac{d^2\phi}{d\Omega_2 \cdot dA_1 \cdot \cos \gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cdot \cos \gamma} \quad [cd \cdot m^{-2}; cd, m^2, -] \quad (17.)$$

2.2 Všeobecné podmínky měření

Světelnětechnická měření probíhají při napájení střídavým proudem s frekvencí 50 Hz. Teplotní zdroje lze napájet proudem stejnosměrným. Kolísání napětí je dovoleno jen v mezích $\pm 2\%$. Z těchto důvodů je nezbytné, aby světelné zdroje byly napájeny přes stabilizátor napětí a frekvence. Zkušební napětí musí být rovno jmenovitému napětí světelného zdroje. Pro stanovení napětí na měřeném světelném zdroji se užívají čtyřpólové měřicí objímky. Obsah vyšších harmonických nesmí přesahovat 3 %. Před vlastním měření světelnětechnických parametrů musí být světelný zdroj zahořený, tj. podroben minimální době stárnutí. U teplotních zdrojů světla (žárovek) je minimální doba zahoření 6 h, u výbojových zdrojů 100 h.

V laboratoři je nutné zajistit, aby svazek paprsků světla dopadl pouze přímo nebo úmyslným odrazem. Musí být zamezeno vniku parazitního světla z okolí či nechtěným odrazem. Z toho důvodu jsou všechny plochy v měřicí laboratoři černé a matné, mimo světločinných povrchů. Dále musí být dodržena teplota okolí v průběhu měření. Měří se při zapnutém zdroji světla maximálně 1,5 m od povrchu světelného zdroje. Teplota se pohybuje v rozmezí 20 – 27 °C a v průběhu měření nesmí kolísat o více než 3 °C. Během měření, musí být eliminováno proudění vzduchu v okolí měřeného světelného zdroje, které má za následek snižování světelného toku. (Proudění vzduchu způsobené vlastním ohřevem světelným zdrojem se zanedbává) [5], [6].

2.3 Metody měření světelného toku

Měření světelného toku vlastního světelného zdroje se provádí standardně v kulovém integrátoru světelného toku, tzv. Ulbrichtově kouli (viz [kapitola 3.4](#)). Měření v kulovém integrátoru je poměrně rychlé, avšak vyžaduje druhý světelný zdroj s definovanými fotometrickými vlastnostmi – normál světelného toku. Výsledný světelný tok měřeného světelného zdroje se určí z následujících vztahů [7].

$$\Phi = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \Phi_Z \quad [lm; -, -, lm] \quad (18.)$$

kde: Φ - výsledný světelný tok dopadající na fotometr

Φ_Z - světelný tok měřeného zdroje

ρ - činitel odrazu vnitřního povrchu integrátoru

$$E = \frac{\Phi}{\pi \cdot D^2} [lx; lm, -, m] \quad (19.)$$

kde: E - výsledná osvětlenost v místě umístění fotometru

D - průměr koule integrátoru

$$k_i = \frac{\rho}{\pi \cdot D^2 \cdot (1 - \rho)} [lx \cdot lm^{-1}; -, m] \quad (20.)$$

kde: k_i - konstanta kulového integrátoru

Dosažením z jednotlivých vzorců dostaneme výsledný vztah (21.) pro osvětlenost v místě uložení fotometru na kulovém integrátoru.

$$\Phi = k_i \cdot \Phi_Z [lm; -, lm] \quad (21.)$$

Světelný tok měřeného zdroje světla se určí ze vztahu (22.). Podrobné vysvětlení způsobu měření světelného toku v kulovém integrátoru bude obsaženo v následující kapitole 3.4.

$$\Phi_Z = \Phi_N \cdot \frac{E_Z}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kZ}} [lm; lm, lx, lx, lx, lx] \quad (22.)$$

kde: Φ_Z výsledný světelný tok měřeného (neznámého) světelného zdroje

Φ_N světelný tok normálu

E_N naměřená osvětlenost normálu

E_Z naměřená osvětlenost neznámého světelného zdroje

E_{kN} hodnota osvětlenosti korekčního zdroje při zhasnutém normálu

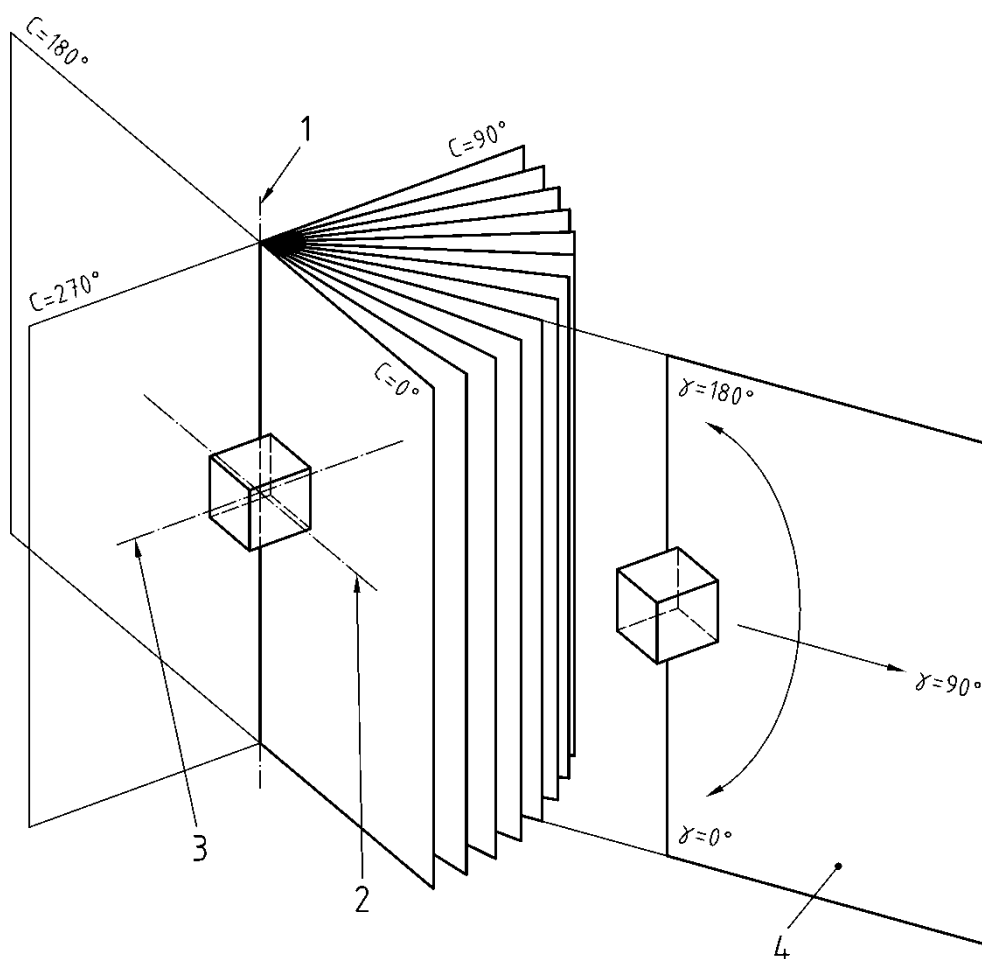
E_{kZ} hodnota osvětlenosti korekčního zdroje při zhasnutém měřeném zdroji

Dalším způsobem, jak lze měřit světelný tok, je pomocí goniofotometru, s jehož pomocí se měří rozložení svítivosti v okolí světelného zdroje. (více *odstavce 3.3.*). Rozložení svítivosti vyjadřují čáry svítivosti. Čára svítivosti je prostorově orientovaný radiusvektor směřující od fotometrického středu zdroje ke konkrétnímu bodu v prostoru (s pevnou vzdáleností l danou délkou ramene goniofotometru), kde se nachází zjištěná hodnota svítivosti. Svítivost je měřena

nepřímo pomocí výpočtu z naměřené normálové osvětlenosti v konstantní vzdálenosti l podle rovnice (23.), která je odvozena z rovnice (12.).

$$I_{\gamma\vartheta} = E_{\gamma\vartheta} \cdot l^2 \quad [\text{cd}; \text{lx}, \text{m}] \quad (23.)$$

Čáry svítivosti jsou promítány do polárních souřadnic, nejčastěji systému $C - \gamma$ podle kterých se metodou pásmových toků vypočítají dílčí příspěvky toku do kulového prostoru a následnou integrací je vypočítán světelný tok měřeného zdroje.



1, 2, 3 – číslo osy; 4 – C-rovina

Obrázek 9 - Soustava C-rovin [5]

Systém soustavy C-rovin (Obrázek 9) tvoří svazek rovin, kde osa svazku je svislá přímka protínající fotometrický střed světelného zdroje. C-roviny se označují úhly C_x v rozsahu $0^\circ \leq C \leq 360^\circ$. V dané C_x rovině jsou směry určeny úhly γ v rozsahu $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, směr $\gamma = 0^\circ$ odpovídá bodu na vodorovné ploše pod fotometrickým středem světelného zdroje [5].

Pro stanovení hodnoty světelného toku zdroje světla se porovnávají výsledky měření v kulovém integrátoru s výsledky měření goniofotometrem. Výsledné hodnoty se od sebe nesmí odlišovat o více než 2 % [5].

Metoda pásmových toků

Základní předpoklad užití metody pásmových toků pro výpočet světelného toku je známost rozložení svítivosti světelného zdroje v celém prostoru. Svítivost měřeného světelného zdroje $I_{\gamma\vartheta}$ v určitém směru, který udávají uhly γ a ϑ v prostoru popsaným prostorovým úhlem $\Omega_{\gamma\vartheta}$ vyvolává světelný tok $d\Phi$ vyzařovaný do vymezeného prostoru. Situaci popisuje následující rovnice (24.).

$$d\Phi = I_{\gamma\vartheta} \cdot d\Omega_{\gamma\vartheta} \quad [lm; cd, sr] \quad (24.)$$

Integrací a po mírné upravě rovnice (24.) dostáváme celkový světelný tok měřeného světelného zdroje ve dvou možných tvarech, pro symetricky (25.) a nesymetricky vyzařující světelný zdroj (26.).

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I_{\gamma\vartheta} \cdot d\Omega_{\gamma\vartheta} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I_{\gamma\vartheta} \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot d\vartheta \quad [lm, cd, -, rad, rad] \quad (25.)$$

$$\Phi = 2\pi \cdot \int_0^{\pi} I_{\gamma} \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma \quad [lm; cd, -, rad] \quad (26.)$$

Pro numerické výpočty světelného toku světelných zdrojů s rotačně symetrickým vyzařováním lze rovnici (26.) přepsat do tvaru rovnice (28.), ve které jsou sčítány dílčí pásmové toky $\Delta\Phi_{\gamma}$ do prostorového úhlu $\Delta\Omega_{\gamma}$, který vymezuje řada stejných kulových pásů, jehož šíře závisí na zvoleném kroku úhlu $\Delta\gamma$. Hranice jednotlivých kulových pásů jsou učeny v závislosti na úhlu γ prostorovým úhlem ($\Delta\Omega_{\gamma}$) vymezeného úhly $\gamma \pm \Delta\gamma$ (27.).

$$\Delta\Omega_{\gamma} = 2 \cdot \pi \cdot [\cos(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] = 2 \cdot \pi \cdot \sin \Delta\gamma \cdot \sin \gamma \quad [sr] \quad (27.)$$

$$\Delta\Phi_{\gamma} = \Delta\Omega_{\gamma} \cdot I_{\gamma} \quad [lm; sr, cd] \quad (28.)$$

Protože jsou dílčí příspěvky světelného toku vyzařovaného do prostoru měřeny diskrétně s určitým krokem, pro přesná měření je krok $\Delta\gamma = 2^\circ$, je celkový světelný tok zdroje součet

dílčích světelných toků naměřených v jednotlivých C-rovinách. Pro symetricky vyzařující světelný zdroj je postačující proměřit čáry svítivosti jen v základních C-rovinách (C0, C90, C180, C270) s krokem úhlu $\Delta\theta = 2^\circ$. Z rovnice (26.) je tak odvozen vzorec pro výsledný světelný tok vyjádřený rovnicí (29.).

$$\Phi = \sum_{\gamma}^{\pi} \Phi_{(0^\circ-90^\circ)\gamma} + \sum_{\gamma}^{\pi} \Phi_{(90^\circ-180^\circ)\gamma} + \sum_{\gamma}^{\pi} \Phi_{(180^\circ-270^\circ)\gamma} + \sum_{\gamma}^{\pi} \Phi_{(270^\circ-360^\circ)\gamma} \quad [lm] \quad (29.)$$

Pro případ světelného zdroje blížíící se ideálně symetrické vyzařovací charakteristice by platil vzorec (30.). Čáry svítivosti světelného zdroje je tedy možné proměřit pouze v jedné C-rovině se zachováním kroku úhlu $\Delta\gamma$ [2].

$$\Phi = 4 \cdot \sum_{\gamma}^{\pi} \Phi_{(0^\circ-90^\circ)\gamma} \quad [lm] \quad (30.)$$

2.4 Metody měření svítivosti

Jedinou možností jak lze měřit svítivost zkoumaného světelného zdroje je s pomocí fotometrické lavice. Tomuto zařízení bude věnována pozornost v podkapitole zabývající se měřicími přístroji (kapitola 3.2). Svítivost se měří nepřímo, a to výpočtem z naměřených hodnot osvětlenosti dle čtvercového zákona vyzařování (12.). Vyjádřením svítivosti z tohoto vztahu vznikne rovnice pro výpočet svítivosti.

$$I = E \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot l^2 = E_N \cdot l^2 \quad [cd; lx, m] \quad (31.)$$

Kde: E – osvětlenost

E_N – normálová osvětlenost

l – vzdálenost mezi světelným zdrojem a místem měření osvětlenosti

β – úhel dopadu světelných paprsků od zdroje v místě měření osvětlenosti

Na rozdíl od měření svítivosti goniometrem v celých fotometrických rovinách se svítivost zdroje na fotometrické lavici měří vždy v jednom určitém směru vyzařování světelných paprsků. V případě teplotních světelných zdrojů (žárovka) probíhá měření kolmo na osu vlákna.

U světelných normálů je nutné dodržet kolmou rovinu ve svislém i vodorovném směru. Tomuto požadavku vyhovují jen některé žárovky se specifickou konstrukcí uchycení wolframového vlákna uvnitř baňky.

U světelného zdroje, u něhož má být zkoumána svítivost z důvodu pozdějšího využití jako normálu svítivosti, se postupně proměří svítivost ve všech směrech vyzařování dominantní plochy zdroje (platí pro světelné zdroje s všesměrovou vyzařovací charakteristikou). Směr vyzařování, ve kterém byla zjištěna nejvyšší svítivost, se prohlásí za vztažnou a další měření probíhá pouze v tomto zvoleném směru, ve směru vztažné svítivosti I_0 . Pro světelné zdroje se směrovou vyzařovací charakteristikou (reflektorové světelné zdroje) se vztažná svítivost nachází ve směru osy reflektoru.

3. Měřicí přístroje

Při světelnotechnických měřeních se uplatňuje celá řada specializovaných přístrojů a měřidel. V následujících odstavcích budou probrány pouze přístroje pro zkoumání fotometrických veličin potřebných pro tvorbu světelných normálů. Jedná se o přístroje, které slouží pro měření světelného toku a svítivosti.

3.1 Luxmetr

Luxmetr patří k nejpoužívanějším přístrojům ve světelné technice vůbec. Jeho nepostradatelnost při měřeních pramení z všestrannosti přístroje. Již ze samotného názvu přístroje je patrné, že se užívá k měření osvětlenosti ([kapitola 2.1.4.](#)).

Luxmetr má své využití při měření osvětlenosti pracovních ploch a místností z hlediska technických a hygienických norem pro pobyt osob ve vnitřních prostorech. Normy rovněž upravují osvětlenost pro určité zrakové úkony z důvodu zajištění zrakové pohody a bezpečnosti. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, měří se, respektive vypočítává se pomocí osvětlenosti i svítivost. Tím pádem se luxmetr používá při měřeních svítivosti světelných zdrojů na fotometrické lavici, měření čar svítivosti na goniofotometru a také k zjišťování jasu svazku paprsků.



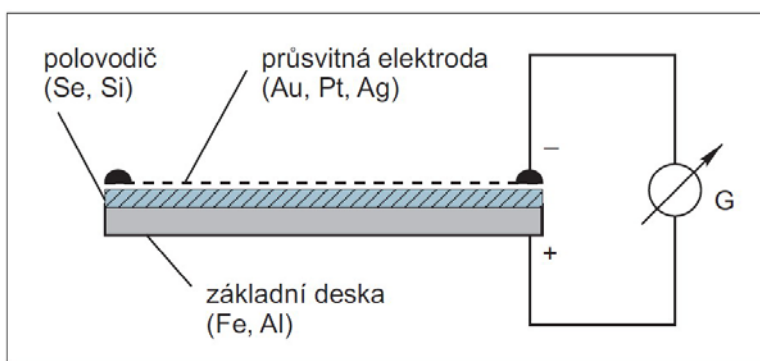
Obrázek 10 - Luxmetr Minolta T10 (třída B)



Obrázek 11 - Laboratorní radioluxmetr PRC Krochmann 211 s nástavci

Základem luxmetru je fotočlánek. ([Obrázek 14](#)), tedy fyzikální čidlo. Měření osvětlenosti luxmetrem se tak řadí do kategorie fyzikálních měření světelnotechnických veličin. Přijímač světelného záření, fotoelektrický článek, se svými vlastnostmi musí co nejvěrněji blížit lidskému

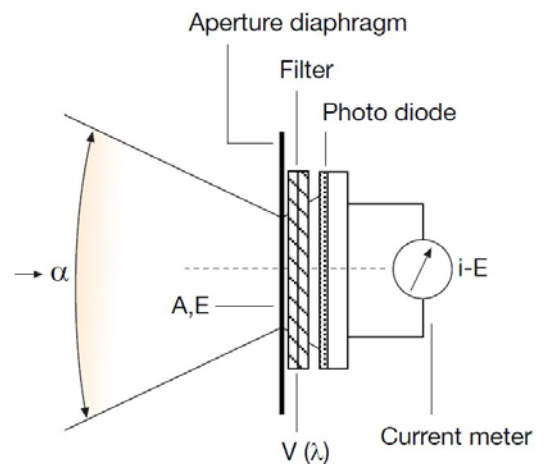
zrakovému orgánu, který svým vnímáním světla spadá do kategorie vizuálních měření. Svou poměrnou spektrální citlivostí se fotoelektrický článek musí shodovat v co nejširším rozsahu vlnové délky záření s jakou je vnímáno normálním fotometrickým pozorovatelem $V(\lambda)$. Nejrozšířenějšími (fyzikálními) přijímači jsou hradlové fotočlánky z křemíku nebo selenu. V dřívějších dobách se k měření osvětlenosti užívaly emisní fotonky. Nákres křemíkového fotočlánku znázorňuje [Obrázek 12](#). Dopadající světelné záření na fotočlánek vyvolává vznik fotoproudu, který je v přístroji zesílen, částečně kompenzován a převeden na požadované jednotky měřené veličiny.



Obrázek 12 - Konstrukce fotoelektrického článku



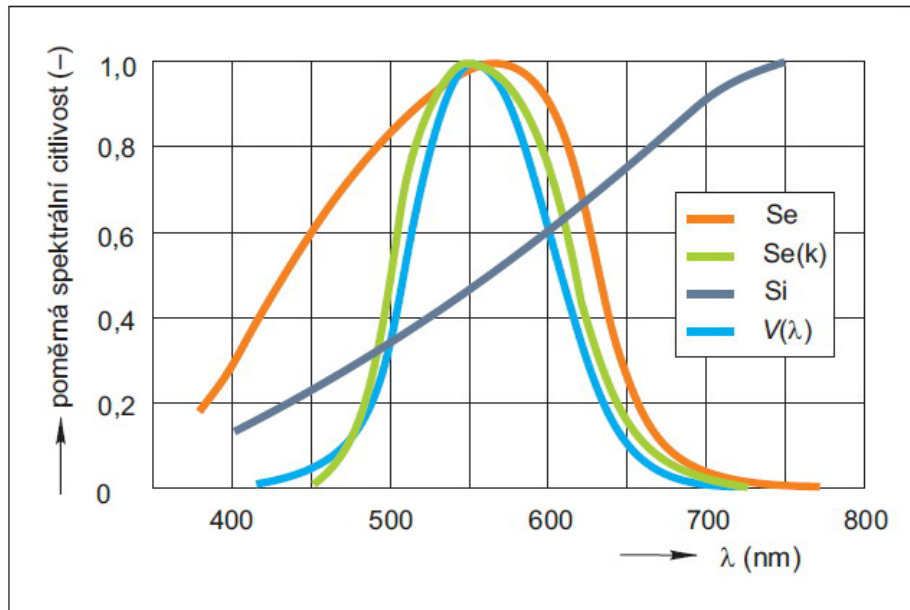
Obrázek 14 - Detail fotometrického čidla [4]



Obrázek 13 - Schematický nákres fotometrického čidla [4]

Aby naměřená data co nejvěrohodněji odpovídala průběhu $V(\lambda)$ křivky normálního fotometrického pozorovatele, fotočlánky se korigují. Korekce se při vyhodnocování naměřených údajů osvětlenosti provádí násobením korekčních činitelů v závislosti na druhu měřeného světelného spektra. Příklady porovnání průběhů citlivostí různých fotočlánků ukazuje [Obrázek 15](#). Korekční činitele se uvádějí pro světelné zdroje se spojitým spektrem (teplotní) a

s čárovým spektrem (výbojové zdroje), u kterých také záleží na náhradní teplotě chromatičnosti (kapitola 4.2) daného typu zdroje. Luxmetry jsou kalibrovány na žárovkové světlo (přesně na teplotu chromatičnosti 2856 K) a pro tuto hodnotu je korekční koeficient roven jedné. Ke každému luxmetru (a jeho fotočlátku) jsou uvedeny korekční koeficienty pro světlo „bílé“ zářivky, vysokotlaké rtuťové výbojky s luminoforem, sodíkové výbojky a denní světlo.



Obrázek 15 - Průběhy poměrné spektrální citlivosti různých typů fotočlátek v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí normálního fotometrického pozorovatele $V(\lambda)$ [8]

Křemíkové fotočlátky jsou relativně stabilní i při dlouhodobých měřeních, kdy může vlivem únavy fotočlátku (hlavně u selenových) docházet k poklesu fotoproudu při zachování konstantní osvětlenosti čidla. Fotoproud indikovaný fotočlátkem může být ovlivněn kolísáním světelného toku zdroje podle frekvence střídavého napětí. Nejvýznamnější chybu způsobuje nedodržení normálové osvětlenosti fotočlátku, ty jsou kalibrovány na kolmo dopadající světelné záření. Osvětlenost člátku je úměrná kosinu úhlu dopadu, jak vypovídá Lambertův (kosinový) zákon (vyjádřeno rovnicí (12.)), ale výsledná hodnota osvětlenosti fotočlátku tomuto zákonu neodpovídá z důvodu vznikajících odrazů na povrchu člátku částečnému zastínění přijímací plochy obrubou. Pro eliminaci chyby vzniklé dopadem paprsku odchylovajícího se od normály roviny fotočlátku se používají kosinové nástavce. Různě tvarované nástavce se používají pro měření různých typů osvětleností jako střední poloválcové, střední válcové, střední kulové či měření rovinné osvětlenosti.

Dle nejvyšší přípustné souhrnné chyby měření jsou luxmetry rozděleny do čtyř tříd přesnosti. Třídy přesnosti se označují jako L, A, B, C , kde třída L je nejpřesnější (chyba do 2 %) a spolu s třídou A (chyba do 5 %) se užívají pro laboratorní měření. Třída B je určena pro provozní měření a třída C pouze pro orientační (chyba 10 %, resp. 20 %). Přesnost luxmetrů je důležité pravidelně kontrolovat a každé dva roky musí být provedena kalibrace přístroje v certifikované laboratoři (EZÚ, ČMI), která vydá k přístroji ověřovací list s korekčními koeficienty pro jednotlivé měřicí rozsahy. Výsledná naměřená hodnota osvětlenosti se koriguje dle vztahu (32.).

$$E_i = E_m \cdot k_i \cdot K_d \quad [lx; lx, -, -] \quad (32.)$$

Kde: E_i – skutečná hodnota osvětlenosti

E_m – naměřená hodnota osvětlenosti

k_i – korekční koeficient pro daný rozsah osvětlenosti i

K_d – korekční faktor dle typu světelného zdroje³

3.2 Fotometrická lavice

Fotometrická lavice slouží k měření svítivosti světelných zdrojů. Svítivost lze na fotometrické lavici měřit jak objektivní (fyzikální) metodou, tak subjektivní (vizuální) metodou fotometrie. Svítivost (kapitola 2.1.2) se přímo neměří, ale převádí se z měření osvětlenosti (při objektivním měření) nebo z měření jasu (při subjektivním měření).

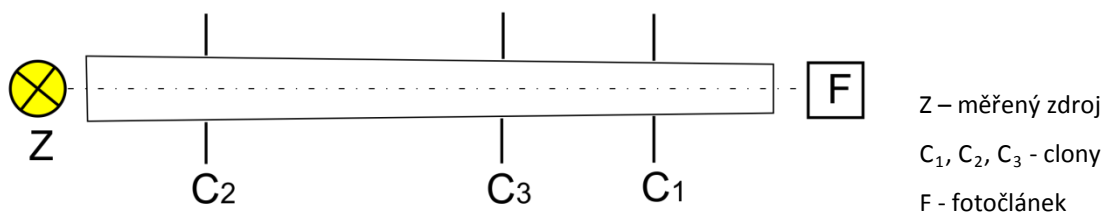
³ Při měření jiného světelného zdroje, než zdroje s teplotou chromatičnosti 2856 K odpovídající žárovkovému světlu, je nutné použít korekční koeficient odpovídající měřenému typu světelného zdroje.

Pro žárovkové světlo je koeficient $K_d = 1$. (Denní světlo $K_d = 0,995$)



Obrázek 16 - Fotometrická lavice

Při měření svítivosti se uplatňuje čtvercový zákon (31.), který využívá poklesu osvětlenosti při rostoucí vzdálenosti od zdroje. Během měření je důležité zajistit, aby se světelný střed zdroje a geometrický střed čidla fotočlátku nacházely v ose ve vodorovné rovině, a zároveň bylo čidlo na tuto osu kolmé v horizontální i vertikální poloze. Tím je zajištěna normálová osvětlenost fotočlátku a ve vztahu pro výpočet svítivosti může být zanedbán kosinus úhlu dopadajících světelných paprsků (rovnice (35.)). Neméně důležité je použití stínících clon na fotometrické lavici pro eliminaci dopadu rozptýleného světla na hlavici fotočlátku. Stínění musí být provedeno tak, aby nedošlo k clonění aktivní vyzařovací části měřeného světelného zdroje a osvětlenost čidla byla rovnoměrná. Uspořádání stínících clon naznačuje Obrázek 17.



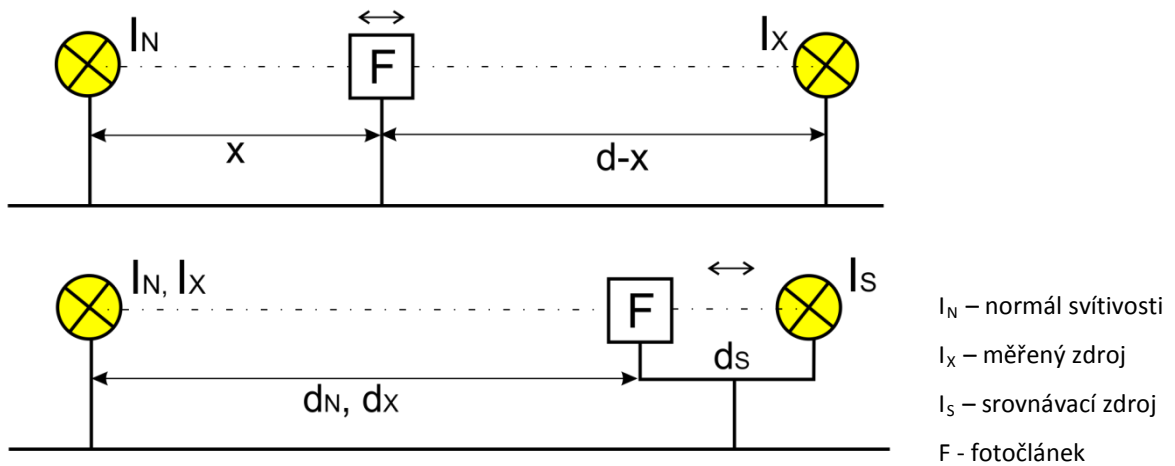
Obrázek 17 - Uspořádání clon na fotometrické lavici

Při subjektivním měření se porovnává měřený světelný zdroj s etalonovou žárovkou přímým porovnáváním, kdy se posouváním fotometru mezi zdroji hledá vyrovnaný jas nebo kontrast na obou stranách fotometru (rovnice (33.)). Další možností je spolu s etalonem použít ještě srovnávací zdroj, tzv. substituční metodu. U substitučního srovnávacího měření se na téže straně fotometrické lavice postupně zaměňuje etalon svítivosti s měřeným zdrojem umístěným před fotometrem a porovnávají se se srovnávacím zdrojem umístěným na druhé straně

fotometrické lavice (Obrázek 18). Po vyrovnání jasu obou stran fotometru platí pro měřený zdroj a etalon rovnice (34.).

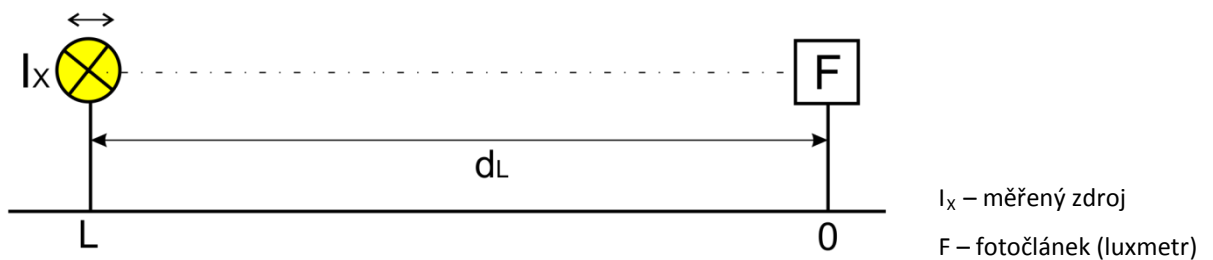
$$\frac{I_X}{I_N} = \frac{(d-x)^2}{x^2} \quad [cd, cd; m, m, m] \quad (33.)$$

$$\frac{I_X}{I_N} = \frac{dx^2}{dn^2} \quad [cd, cd; m, m] \quad (34.)$$



Obrázek 18 – Subjektivní měření svítivosti porovnávací (nahore) a substituční (dole) metodou

Objektivní měření spočívá na osvětlování čidla fotometru měřeným zdrojem, kde je fotočlánek (nebo světelný zdroj) zafixován a na vymezené vzdálenosti se postupně mění umístění světelného zdroje (nebo fotočlánu). Svítivost zdroje se vypočítá ze čtvercového zákona vzdálenosti.



Obrázek 19 - Objektivní měření svítivosti pomocí luxmetru

$$I_X = E \cdot dl^2 \quad [cd; lx, m] \quad (35.)$$

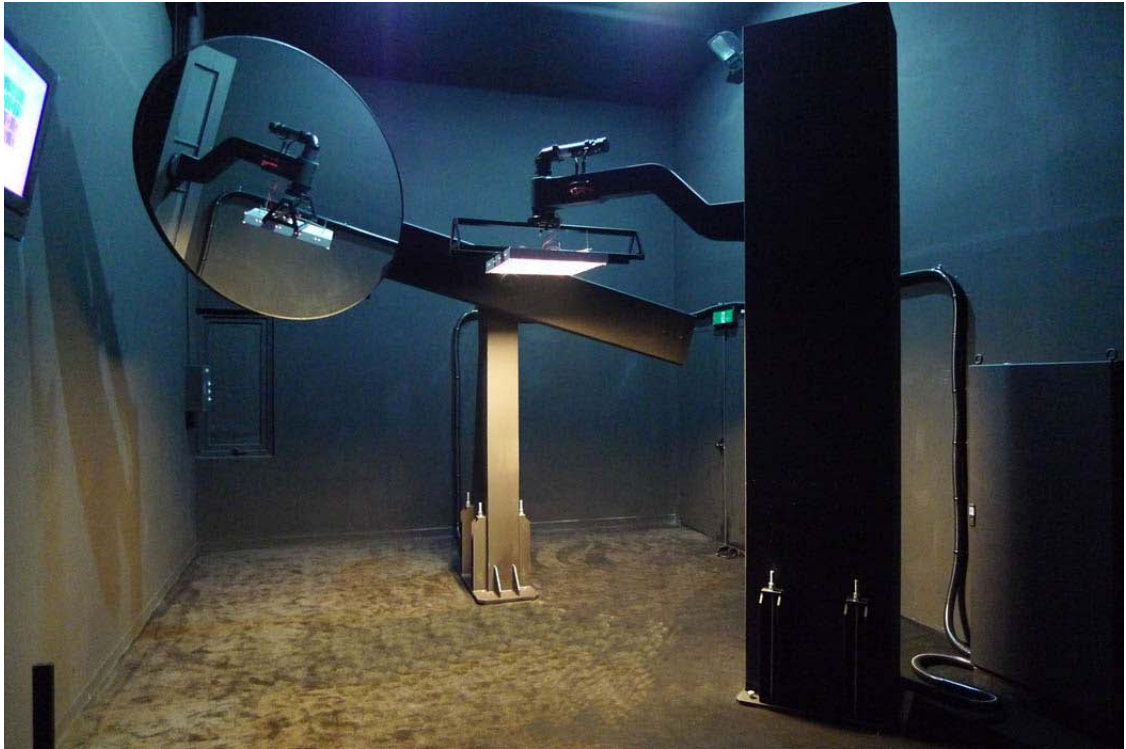
3.3 Goniofotometr

Goniofotometr umožňuje měřit svítivost v různých rovinách v různých úhlech. Přístroj slouží k měření čar svítivosti svítidel a samotných světelných zdrojů. Čáry svítivosti informují o rozložení svítivosti v okolí svítidla (světelného zdroje) v různých fotometrických rovinách a v různých prostorových úhlech. Rozložení svítivosti vyjadřuje polární diagram svítivosti (Obrázek 3) a jeho znalost je nezbytná pro návrh osvětlovacích soustav či vývoje světelně činných ploch svítidel. Z naměřených křivek svítivosti lze stanovit metodou pásmových toků (kapitola 2.3) světelný tok zdroje. Goniofotometry lze rozdělit do několika skupin dle způsobu vyhotovení konstrukce.

- zdroj světla je otočný kolem vertikální a horizontální osy, hlavice fotočlánku je pevná
- zdroj světla je otočný kolem vertikální osy, hlavice fotočlánku je pevná s otočnou soustavou zrcadel (Obrázek 20)
- zdroj světla je otočný kolem vertikální osy, hlavice fotočlánku je pohyblivá (Obrázek 22)
- zdroj světla je pevně umístěn ve středu a hlavice fotočlánku je pohyblivá po fiktivní kulové ploše (Obrázek 21)

Výhodnější je užívání goniofotometru s pevně umístěným světelným zdrojem a pohyblivým ramenem s fotočlánkem, protože je tak zajištěna předepsaná provozní poloha světelného zdroje. Při měření je třeba dbát na to, aby byla splněna podmínka bodového zdroje, tj. minimální vzdálenost mezi fotometrickým středem světelného zdroje a fotočlánku, jak uvádí rovnice (6.). Rameno goniofotometru se pohybuje ve vymezené fotometrické rovině s určitým úhlovým krokem.

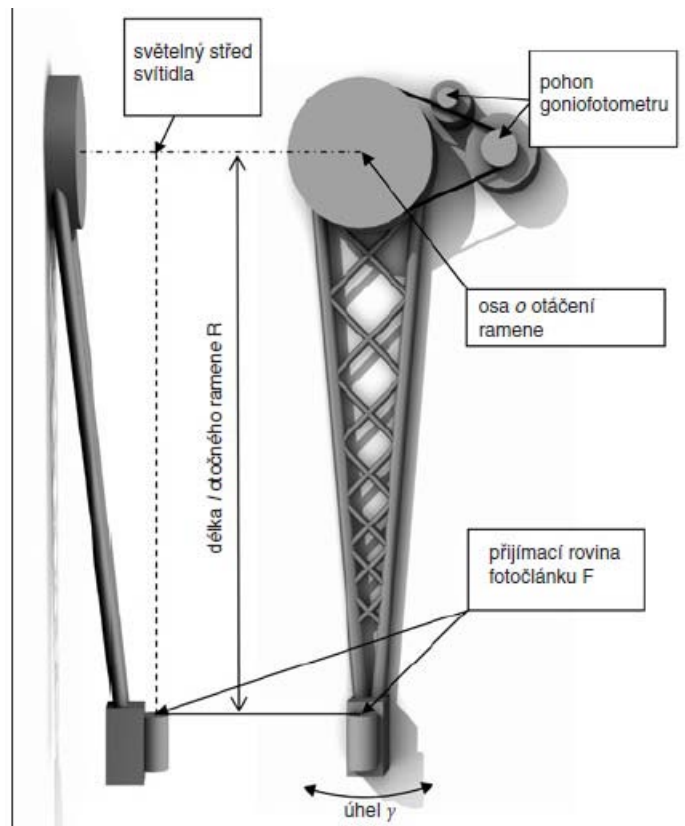
Dle požadované přesnosti se měří svítivost v jednotlivých fotometrických rovinách s krokem 2° , 5° nebo 10° . Rameno s fotočlánkem se kolem měřeného světelného zdroje pohybuje po kruhové dráze s konstantním poloměrem. Aby byla dosažena velká přesnost a také rychlost měření, je posun ramene, se stanoveným úhlovým krokem, zajištěn krokovým motorem, řízeným počítačem. Měření probíhá zcela automatizovaně a naměřená data se ukládají a pomocí software přímo vyhodnocují během procesu měření.



Obrázek 20 - Goniofotometr s otočnou soustavou zrcadel (Photometric Solutions LG 2.0)



Obrázek 21 - Goniofotometr s všesměrově pohyblivou fotometrickou hlaví (Opto Design)



Obrázek 22 - Goniofotometr s otočným ramenem na FEL ČVUT [9]

3.4 Fotometrický kulový integrátor (Ulbrichtova koule)

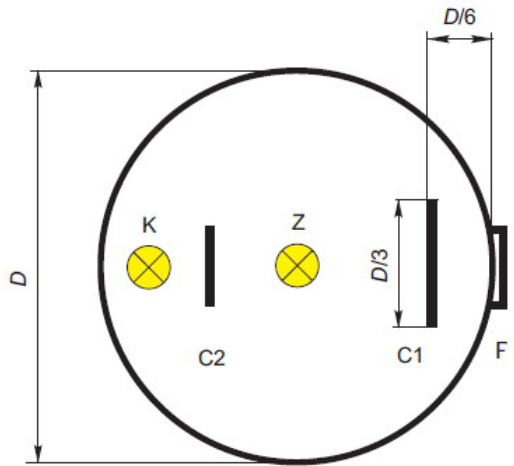
Kulový integrátor slouží k měření světelného toku (kapitola 2.1.1) zdrojů a svítidel. K měření je zapotřebí použít normál světelného toku (kapitola 4.1). Průměr integrátoru záleží na velikosti měřených světelných zdrojů. Pro žárovky a výbojky je průměr minimálně 6 (ideálně 10) násobek jejich délky [10]. Základní schéma uspořádání kulového integrátoru ukazuje [Obrázek 25](#). Průměry kulových integrátoru nabývají hodnot 0,3 m – 3 m.



Obrázek 23 - Ulbrichtova koule (Instrument Systems ISP 2000)

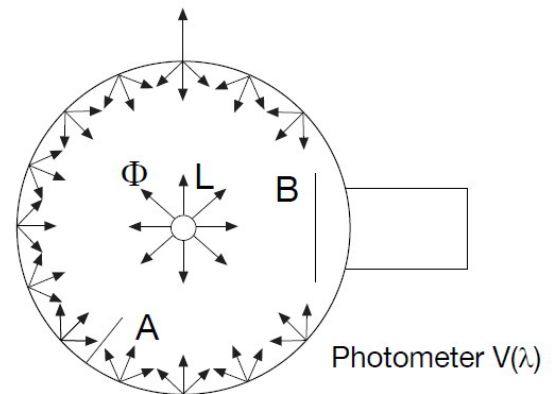
Měření světelného toku v Ulbrichtově kouli je založeno na mnohonásobných odrazech světelných paprsků. Vnitřní strana integrátoru je opřena rozptýlným matným nátěrem s vysokým činitelem odrazu ($\rho = 0,75 - 0,8$) [10]. Tím se dosáhne rovnoměrné osvětlenosti na celém vnitřním povrchu a její hodnota je měřena fotometrem umístěným v měřícím okénku koule za clonou a kouřovým filtrem, aby bylo zamezeno přímému dopadu světla na fotočlánek. V místě okénka je pak osvětlenost rovna světelnému toku zdroje násobena konstantou integrátoru, viz. [Kapitola 2.3](#). Rozptýlným nátěrem jsou opatřeny rovněž všechny vnitřní

konstrukční části jako clony a objímky. Objímky jsou vybaveny svorkami pro přímě měření elektrických parametrů světelných zdrojů, aby byl zajištěn jejich provoz na jmenovité hodnoty napájecího napětí.



Z – měřený světelný zdroj
K – korekční žárovka
C₁, C₂ – clona fotometru / korekční žárovky
F – fotometr

Obrázek 25 - Náčrt vnitřního uspořádání kulového integrátoru
[7]



Φ – světelný tok
L – světelný zdroj
B – clona fotometru
A – reflexní nátěr s činitelem odrazu 75 až 80 %

Obrázek 24 - Princip měření světelného toku v integrátoru [11]

V kulovém integrátoru se využívá substitučního principu měření. Do středu integrátoru se nejprve umístí normál se známým světelným tokem (Φ_N), stanoví se konstanta integrátoru a poté se změří osvětlenost zkoumaného světelného zdroje. Pro vyloučení zkreslení naměřené osvětlenosti vlivem pohlcení (zastínění) části světelného toku na měřeném zdroji se používá korekční žárovka. Ta se nachází na kraji koule za clonou v ose fotočlánku. Korekční zdroj ani normál by se od měřeného světelného zdroje neměly příliš odlišovat svou hodnotou světelného toku. Také druhy použitých světelných zdrojů (normál a korekční žárovka) by se měly shodovat s měřeným světelným zdrojem. Výsledný světelný tok měřeného zdroje Φ_Z , se vypočítá ze vztahu (22.). Pro přehlednost je uveden opět pod textem. Po dobu měření se musí vně koule udržovat rovnoměrné rozložení teploty. Rovněž poloha clon i světelných zdrojů se během měření nesmí měnit, proto je nutné se vyvarovat otřesům, které by způsobily rozkmitání clon či vláknů žárovky a vnesly tak do měření chybu.

$$\Phi_Z = \Phi_N \cdot \frac{E_Z}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kZ}} \quad [lm] \quad (36.)$$

Postup měření v Ulbrichtově kouli

Světelný tok měřeného světelného zdroje Φ_Z se vypočítá substituční metodou za použití normálu světelného toku se známou hodnotou světelného toku Φ_N .

- a) Při rozsvíceném normálu a zhasnuté korekční žárovce se změří E_N
- b) Při zhasnutém normálu a rozsvícené korekční žárovce se změří E_{kN}
- c) Při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvícené korekční žárovce se změří E_{kZ}
- d) Při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnuté korekční žárovce se změří E_Z

Čidlo fotometru je přes převodník fotoproudu (vyvolaného dopadajícím světelným zářením na plochu čidla) napojeno na zobrazovací zařízení. Výstupem měřidla nemusí být nutně jednotky osvětlenosti (lx). Jak je ze vzorce (36.) patrné, mohou být dosazovány naměřené hodnoty v libovolných jednotkách. Měřit lze rovnou vyvolaný fotoproud (μA) mikroampérmetrem nebo optický výkon (μW) a jej přímo dosazovat do vzorce pro výpočet světelného toku.

Světelné zdroje umístěné v kulovém integrátoru mají určitou pohltivost (svou plochou částečně brání dopadu veškerého světelného záření na fotometr), což zapříčiňuje zkreslení naměřených hodnot E_Z a E_N . Z důvodu eliminace nepřesností vnášených do měření se užívá korekční žárovka. Korekční žárovka se pomocí regulace napětí nastaví na hodnotu, při které vyvolá její světelný tok stejnou velikost ozáření fotometru (E_{kZ}), jako byla velikost jeho velikost při rozsvíceném normálu (E_N).

4. Výběr vhodného světelné zdroje

4.1 Světelné normály – specifikace vlastností

Pro přesná fotometrická měření je nezbytné užití světelných zdrojů s definovanými parametry. Světelnětechnická laboratoř by měla být vybavena sadou světelných normálů pokrývajících široký rozsah měřené veličiny. Hodnota veličiny etalonu by se při měřeních neměla příliš odlišovat od hodnoty téže veličiny u měřeného zdroje. Mezi nepostradatelné vybavení laboratoře patří normál svítivosti. Světelné etalony v laboratořích (státních zkušebnách) jsou odvozené od základního etalonu svítivosti, který vlastní pouze několik laboratoří ve světě. Z důvodu zachování dlouhé životnosti pracovních etalonů (normálů) se pro běžné měření užívají srovnávací. Pracovní etalony a srovnávací světelné zdroje zastupují převážně žárovky vhodné konstrukce a typu. Jako světelné normály lze také využít některé výbojové zdroje světla. [6]

Světelné zdroje, užívané jako normály, musí mít maximálně stálé fotometrické parametry. Jako u všech světelných zdrojů se určité stálosti světelnětechnických parametrů dosáhne po podrobení zdroje předběžnému stárnutí, tj. po zahoření světelného zdroje. U teplotních světelných zdrojů (žárovek) odpovídá doba zahoření 10 h provozu (u žárovek s dobou života $T < 1\,000\text{ h}$ odpovídá čas zahoření 5 % doby života). U výbojových zdrojů je ustálení světelnětechnických parametrů dosaženo po 100 h hoření. Dalším provozováním světelného zdroje se jeho parametry dále mění, což je způsobeno postupnou degradací zdroje, až dojde k ukončení jeho života (viz [kapitola 4.2](#), definice doby života). Během doby života již neprobíhá změna fotometrických veličin takovou rychlostí jak je tomu během doby zahořování. Míru s jakou probíhají degradační procesy světelného zdroje, vyjadřuje činitel stárnutí.

Světelné normály jsou z důvodu snadné identifikace a možnosti vedení záznamů o jejich užívání opatřeny nezáměnným značením (kódem z číslic a písmen). Normály se musí pravidelně kontrolovat, zda se jejich fotometrické parametry neodlišují od jmenovitých a o jejich používání (době svícení) se vedou laboratorní záznamy. Žárovkové normály s dobou života 1 000 h by se měly ověřovat po 15 h provozu, nejméně však jednou do roka [6].

Před zahájením měření se musí světelné normály (žárovky) nechat 1 – 5 minut svítit, aby se stabilizovaly jejich parametry. U výbojových zdrojů je tato doba 20 minut. U normálů je

nezbytné dodržovat konstantní jmenovité napájecí podmínky po celou dobu měření. Z toho důvodu se světelné normály připojují na zdroj napětí prostřednictvím napěťového a frekvenčního stabilizátoru. V případě výbojových zdrojů je nutné použít kalibrované předřadné přístroje. Světelné normály se provozují v kalibrovaných objímkách zajišťující minimální hodnotu přechodového odporu. Kalibrované objímky (Obrázek 27) jsou vybaveny přímými vstupy pro měření elektrických veličin přímo na patici zdroje. Žárovkové normály se na jmenovité napájecí hodny nastavují pozvolna a rovněž plynulým snižováním se vypínají. Výbojové zdroje se připojují přímo na nastavené jmenovité hodnoty napětí a proudu. [12]

4.1.1 Normály svítivosti

Světelný zdroj - žárovka, který se má stát normálem svítivosti, musí splňovat určité specifické vlastnosti. Nejdůležitější je, aby vlákno bylo zavěšené v jedné rovině, pokud možno na co nejmenší ploše (znázorňuje Obrázek 26). Jedině tak je možné přesně změřit vzdálenost mezi vláknem (světelným středem) a fotočlánkem, a posléze určit svítivost zdroje.



Obrázek 26 - Normál svítivosti OSRAM WI 40/G



Obrázek 27 - Normál svítivosti s maskováním v kalibrované objímce PRC Krochmann

Svítivost se měří vždy v ose kolmé k rovině vlákna v definované poloze světelného zdroje. Poloha, ve které má daný světelný normál maximální hodnotu svítivosti, se označí jako směr vztažné svítivosti (I_0). Normál se může ve směru vztažné svítivosti opatřit neprůsvitnou

maskou s průzorem pro snazší zaměření světelného středu (Obrázek 27). Svítivost normálu se udává pro konkrétní teplotu chromatičnosti a přesně stanovené hodnotě napájecího napětí [2].

Baňka normálů svítivosti bývá výhradně čirá, aby bylo možné nalézt světelný střed a nedocházelo k rozptýlení světla způsobené difúzní vrstvou u matovaných žárovek.

4.1.2 Normály světelného toku

Na žárovkové normály světelného toku jsou kladeny menší požadavky, co se týče konstrukce zavěšení vlákna. Jediným důležitým rysem je, aby baňka žárovky byla opatřena difúzní vrstvou, tzv. opalizované žárovky. Světlorozptylující vrstva musí být homogenní bez výrazných přechodů tloušťky na celém vnitřním povrchu baňky. V případě, že nátěr difúzní vrstvy končí daleko nad patičí, je potřeba tuto průsvitnou část baňky zatemnit, aby světlo pronikající touto mezerou nezpůsobovalo během měření nepřesnosti.



Obrázek 28 - Normál světelného toku – žárovka s opalizovanou baňkou



Obrázek 29 – Normál světelného toku užívaný v Tesle Holešovice (čirá vysokotlaká rtuťová výbojka)

V některých případech se užívá jako normálu světelného toku žárovek s čirou baňkou. V případě výbojových světelných zdrojů lze použít například pečlivě vybrané vysokotlaké rtuťové výbojky s čirou baňkou bez luminoforu.

4.2 Světelnětechnické parametry

Pro objektivní posuzování světelných zdrojů se vychází z kvalitativních a kvantitativních parametrů, které určují jejich vlastnosti.

kvantitativní parametry světelných zdrojů

- světelný tok Φ [lm]
- příkon zdroje P [W]
- měrný světelný výkon η [$lm \cdot W^{-1}$] vyjadřuje účinnost světelného zdroje a je jeden z nejdůležitějších parametrů pro srovnání světelných zdrojů

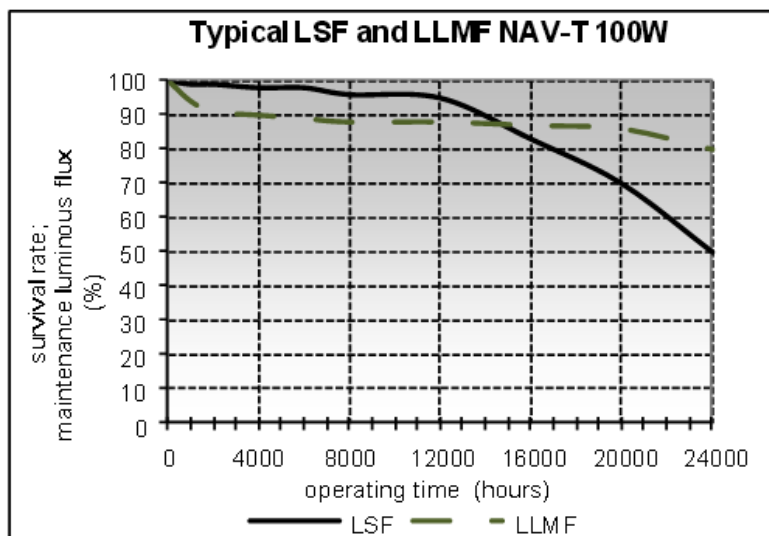
kvalitativní parametry světelných zdrojů

Do skupiny kvalitativních parametrů patří doba života, všeobecný index barevného podání, teplota chromatičnosti nebo náhradní teplota chromatičnosti, činitel stárnutí.

- Doba života T [h] světelných zdrojů se udává buď jako celková doba fyzického života (teplotní zdroje) nebo jako užitečný život (výbojové zdroje), kdy je požadováno, aby po uplynutí 70 % doby života nepoklesl světelný tok o více jak 30 % z původní hodnoty jmenovitého světelného toku (LSF). Jmenovitý světelný tok se udává po 100 h svícení – tzv. zahoření. Dnes většina výrobců udává dobu života při 50 % selhání, tj. doba, kdy z množiny testovaných zdrojů zůstává 50 % funkčních – *střední doba života*. V praxi se lze setkat s pojmem *servisní doba života*, ta odpovídá době, po které přežívá 90 % světelných zdrojů (tj. 10 % selhání).
- Všeobecný index barevného podání R_a [–] také označován jako CRI je účinek světelného zdroje, jaký má na osvětlované předměty a je porovnáván s normalizovaným (smluvním) druhem světla. Index podání barev číselně udává stupeň shodnosti vnímání barev stejného předmětu osvětlovaným daným zdrojem a normalizovaným zdrojem. Index nabývá hodnot

$< 0; 100 >$, přičemž 100 je maximum rozpoznávaných barev. *Všeobecný index podání barev je odvozen jako průměr osmi hodnot zkušebních barevných vzorků (růžová, žlutá, žlutozelená, zelená, světle modrá, blankytně modrá, fialová a světle purpurová) [13].*

- Teplota chromatičnosti $T_c [K]$ se používá k popisu barevných vlastností světla teplotních zdrojů. *...je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření [2].* Pro světelné zdroje s čárovým spektrem vyzařovaného světla se k popisu barvy užívá náhradní teplota chromatičnosti.
- Náhradní teplota chromatičnosti $T_n [K]$ je definována teplotou chromatičnosti odpovídající bodu, který leží na čáře teplotních zářičů nejbližše bodu, který znázorňuje chromatičnost uvažovaného světla, za předpokladu, že vzdálenost sleduje v rovnoměrném obrazci chromatičnosti [14].
- Činitel stárnutí světelné zdroje $Z_z [-]$ neboli *LLMF [%]* vyjadřuje míru poklesu světelného toku během doby užitečného života.



Obrázek 30 - Příklad závislosti přeživších kusů (LSF) a závislosti poklesu světelného toku (LLMF) na době hoření u vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W [15]

Dalšími parametry jsou geometrické rozměry zdroje, patice, předepsaná poloha svícení a další provozní vlastnosti jakými jsou například závislost světelného toku na teplotě okolí či na napájecím napětí, doba náběhu - ustálení jmenovitých parametrů zdroje, doba opětného zapálení po přerušení napájení a jiné.

4.3 Vlastnosti světelných zdrojů

Světelné zdroje lze rozdělovat podle způsobu fyzikální přeměny elektrické energie na viditelné světlo. Základní dělení je tedy na světelné zdroje teplotní, výbojové a polovodičové. Výbojové zdroje se dále rozdělují dle hodnoty pracovního tlaku ve výbojové trubici a pak dle pracovního média.

Cílem této kapitoly je zevrubný rozbor jednotlivých zdrojů světla a základní popis jejich funkce. Na následujících stranách je uveden jen výčet základních parametrů, doplněný výhodami a nevýhodami užití v aplikaci světelných normálů.

4.3.1 Teplotní zdroje světla

Teplotní světelné zdroje jsou nejstaršími elektrickými zdroji světla. Představiteli této skupiny světelných zdrojů jsou klasická a halogenová žárovka. Přes jejich legislativní omezení jsou stále hojně rozšířené.

Princip vyzařování světla (elektrických) teplotních zdrojů spočívá v rozžhavení wolframového vlákna procházejícím elektrickým proudem na vysokou teplotu (2 500 °C). Velikou předností těchto světelných zdrojů je vyzařování spojitého spektra. Ovšem, jak název skupiny napovídá, většina vyzařené energie se nachází v infračervené oblasti záření a tudíž celková účinnost přeměny elektrické energie na světelnou je velmi nízká. Energetická účinnost pouhých 10 % vedla k postupnému vytlačování těchto zdrojů z běžných aplikací.

Teplotní světelné zdroje jsou velmi háklivé na dodržování jmenovitých napájecích parametrů. Při podpětí dochází k menšímu žhavení vlákna a tím podstatně klesá světelný tok. Při přepětí zase rapidně klesá doba života. Obecně je tato závislost vyjádřena rovnicemi (37.) a (38.).

$$\Phi = \Phi_n \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^{3,5} \quad [lm; lm, V, V] \quad (37.)$$

$$T = T_n \cdot \left(\frac{U}{U_n}\right)^{-14} \quad [h; h, V, V] \quad (38.)$$

Žárovky klasické

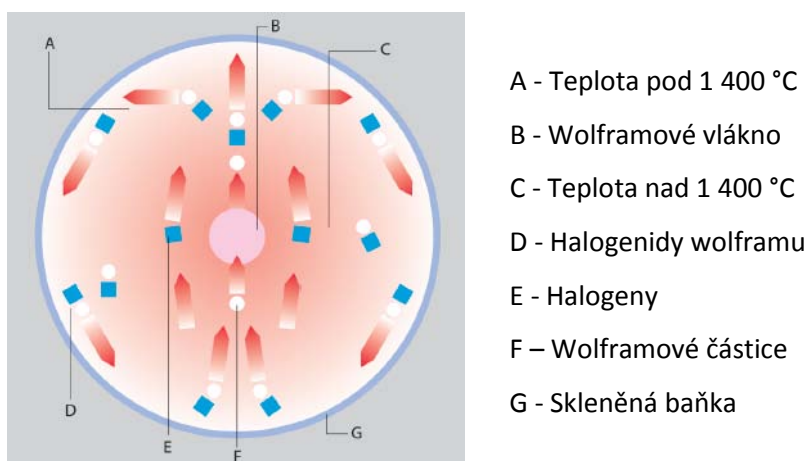
Základním prvkem žárovky je dvoušroubovitě vinutá spirála z wolframu umístěná v skleněné baňce plněné inertním plynem. Žárovky, jako všechny teplotní zdroje, dosahují díky spojitému vyzařovanému spektru indexu podání barev $R_a = 100$. Teplota chromatičnosti se u běžných typů žárovek pohybuje mezi $T_n = 2\,700 - 2\,800\text{ K}$ a jmenovitá doba života je zpravidla 1000 h (napájecí napětí 230 V). Žárovky dlouhoživotnostní se záměrným podžhavením vlákna dosahují doby života 2 000 – 5 000 h. Naopak je tomu u žárovek optických či žárovek pro fotografické účely, kde je doba života zkrácena na několik jednotek či desítek hodin z důvodu velkého přezhavení vlákna. Teplota chromatičnosti u vysoce žhavených žárovek sahá až na 3 000 K. Měrný výkon obyčejných žárovek je 14 – 18 lm · W⁻¹. Žárovky jsou vyráběny v širokém rozsahu příkonů a napájecího napětí. Na změnu jmenovité hodnoty napájecího napětí jsou tyto zdroje velmi choulostivé. Změnou napájecího napětí se mění pochopitelně všechny parametry zdroje, zejména ale doba života. *Při změně napětí o 1 % se doba života změní o 13 %* [2]. Baňky žárovek jsou plněny směsí dusíku a argonu. Nahrazením argonu za krypton dojde ke zpomalení odpařování wolframu a vlákno může být při zachování doby života více žhaveno, čímž se docílí lepší účinnosti (vzroste měrný výkon). [16]

Žárovky halogenové

Svým principem jsou shodné s obyčejnými žárovkami. Halogenové žárovky obsahují v baňce kromě inertního plynu ještě směs halogenidů, která vylepšuje jejich provozní vlastnosti. V žárovce probíhá během jejího provozu tzv. Halogenový regenerační cyklus. Ten nastává při dodržení určité teploty stěny baňky a konstrukčních podmínek.

Halogenový regenerační cyklus (Obrázek 31) omezuje rychlost vypařování molekul wolframu. Odpařené molekuly wolframu se slučují v blízkosti baňky s halogenidem a vracejí se zpět k rozžhavenému vláknu, kde se halogenid wolframu štěpí na halogen příslušného prvku obsaženého v náplni a wolfram. Tím dochází ke zvýšení koncentrace atomů wolframu v blízkosti vlákna a další odpařování kovu z vlákna se tak částečně zpomalí. Díky této skutečnosti se výrazně prodlužuje doba života světelného zdroje a také se může vlákno více žhavit elektrickým proudem, čímž se zvýší teplota chromatičnosti. [13], [17].

Užití žárovky, zejména halogenové, na tvorbu světelného normálu je velmi výhodné. Hlavním důvodem je poměrná stálost světelnotechnických parametrů po celou dobu života. Dále odpadá nutnost užití předřadných přístrojů pro jejich provoz a z toho vyplývající snadná a rychlá manipulace.



Obrázek 31 - Schéma halogenového regeneračního cyklu [18]

4.3.2 Výbojové zdroje světla

Výbojové zdroje světla jsou takové zdroje, které ke vzniku světla využívají výboj v nasycených nebo nenasycených parách kovů a plynech. Lze je dělit podle různých hledisek. A to podle velikosti pracovního tlaku na nízkotlaké, vysokotlaké a velmi vysokotlaké. Toto členění bývá nejčastější. S velikostí tlaku náplně velmi úzce souvisí konstrukce výbojového zdroje a jeho technické parametry. Další dělení je možné z pohledu druhu výboje, který je obloukový, doutnavý nebo vysokofrekvenční. Jiné dělení je možné z hlediska místa vzniku výboje.

Některé světelné zdroje využívají luminiscenci, která je využívána některými výbojovými zdroji. Typ luminiscence záleží na způsobu buzení. Pro světelné zdroje se využívá fotoluminiscence, která je buzena ultrafialovým zářením vznikajícím ve výboji. *Fotoluminiscence se dělí na fosforescenci a fluorescenci.* Ve světelných zdrojích (zářivky a rtuťové výbojky) se uplatňuje fluorescence. Vlnovou délku emitovaného záření udává Stokesův zákon. Ten říká, že emitovaný foton má menší energii než foton absorbovaný a zbytek energie se přemění na teplo. [13] Vyzářené fotony v oblasti viditelného světla mohou mít jen určitou vlnovou délku a tudíž je luminiscenční záření čárové. Této vlastnosti se využívá při výrobě vícepásmových luminoforů. Složením jednotlivých vrstev luminoforu lze ovlivnit výslednou barvu světla.

Všechny výbojové zdroje musí být zapojeny s předřadníkem. Předřadníky jsou nezbytnou součástí pro provoz výbojových zdrojů. Toto zařízení má za úkol nejen udržet a stabilizovat výboj, ale také nažhavit elektrody a následně zapálit výboj. Použití správného předřadníku má vliv na fungování zdroje a také jeho dobu života. Pro provoz každého světelného zdroje vyžadující předřadník je důležitá jeho vlastní spotřeba elektrické energie, čili příkon výbojky včetně předřadníku. Existují dva druhy, elektromagnetický (indukční) a elektronický. Elektromagnetický se skládá z tlumivky, ze zapalovacího zařízení a kompenzačního kondenzátoru kvůli účinníku. Tyto předřadníky pracují se sítovou frekvencí 50 Hz. Novějším typem je předřadník elektronický, který v sobě slučuje všechny potřebné komponenty. Elektronické předřadníky pracují s vysokou frekvencí (30 kHz), která je vhodná pro zápal výbojových zdrojů. Díky vysoké frekvenci téměř odstraňují pro člověka registrovatelné míhání světla způsobené zhášením a opětovným zapalováním výboje při průchodu proudu nulou, jež je dané periodou sítě resp. frekvenčního měniče. Mezi nevýhody patří zkreslování napájecí sítě vyššími harmonickými. Elektronické předřadníky našli své uplatnění zejména u nízkotlakých výbojových zdrojů. [1]

Nízkotlaké rtuťové výbojky

Do této kategorie zdrojů se zahrnují jednak zářivky (lineární a kompaktní), tak i indukční výbojky, též nazývané bezelektrodové výbojky.

- ***Zářivky lineární (klasické)***

V zářivce hoří nízkotlaký rtuťový výboj (400 Pa), který vyzařuje více jak 50 % energie v ultrafialové oblasti elektromagnetického záření. Toto záření s využitím luminoforu naneseného na vnitřní stěně výbojové trubice převádí na viditelné světlo. [13]

Zářivky se vyznačují velkou účinností současně s dobrým indexem barevného podání. Zářivky s třípásmovým luminoforem dosahují měrného výkonu přesahující hodnotu $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ při dobrém indexu podání barev $R_a \sim 80 - 90$ [19]. Měrný výkon standardních zářivek je $60 - 70 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Zářivky s úzkopásmovými luminofoxy dosahují $R_a > 90$. Doba života standardních lineárních zářivek se pohybuje do 10 000 hodin. K všeobecnému osvětlování se užívají především zářivky T8 s kolíkovou patičí G13. Zářivky typu T5 se mohou

provozovat jen v horizontální poloze, z důvodu stability výboje v trubici, respektive stabilitě světelného toku.

- **Kompaktní zářivky**

Kompaktní zářivky se vyvinuly ze zářivek klasických. Vyznačují se menšími geometrickými rozměry. Zpravidla jsou jednopaticové. Jejich měrný světelný výkon se pohybuje v rozmezí 50 – 90 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ a doba života v rozmezí 7 – 20 tisíc hodin. Charakteristickým znakem je úzká tvarovaná výbojová trubice často složená z více vzájemně propojených úseků ve tvaru písmene „U“ Nebo se segment skládá ze dvou rovnoběžných trubic spojenými můstkem. Tímto uspořádáním je docíleno dlouhého výbojového prostoru v celkově kratší délce zdroje. Neoddělitelnou součástí většiny kompaktních zářivek bývá startér (doutnavkový zapalovač) zabudovaný v patici. Pro kompaktní zářivky se výhradně užívají úzkopásmové luminofory. [20]

Kvůli větším geometrickým rozměrům lineárních zářivek se jejich světelný tok hůře usměrňuje. Světelný tok zářivky se vyznačuje závislostí na teplotě okolí. Spolu s výrazným poklesem světelného toku během doby života (činitel stárnutí $Z_z = 0,7$) se tyto zdroje světla jednoznačně nehodí pro použití jako světelného normálu

- **Indukční výbojky**

Měrný výkon indukčních výbojek dosahuje hodnoty 70 až 96 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ a index barevného podání je obdobný jako u zářivek – $R_a \sim 85$. Náhradní teplota chromatičnosti se pohybuje v širokém rozmezí. $T_c = 2\,700 - 6\,500$ K. Světelný tok výbojky se ustálí během cca. 20 sekund. Díky bezelektrodové konstrukci je doba opětovného startu téměř okamžitá. Jejich hlavní předností je extrémně dlouhá doba života a to až 60 000 hodin a schopnost zápalu při velmi nízkých teplotách (-40 °C), což je předurčuje pro použití na špatně přístupných místech. Nevýhodou tohoto zdroje je značný pokles světelného toku ke konci života a značné geometrické rozměry. [21]

Nízkotlaké sodíkové výbojky

Veškerá vyzařovaná energie výbojky se nachází v sodíkovém dubletu 589,0 nm a 589,6 nm. Tato vlnová délka vyzařovaného světla leží v blízkosti maximální citlivosti lidského

oka. Tímto se z nízkotlaké sodíkové výbojky stává výbojový zdroj s maximální (technicky) možnou účinností – měrný výkon výbojky je $140 - 200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Doba života je 14 – 18 tisíc hodin. Plného svitu dosáhne výbojka po 7 až 15 minutách hoření. Znovuzapálení je možné během několika sekund. Zásadním nedostatkem je vyzařování monochromatického žlutého světla. Index barevného podání se rovná nule (osvětlované předměty se tedy jeví jako černožluté). Z důvodu vyzařování monochromatického světla a velkým geometrickým rozměrům baňky se výbojka nehodí pro použití při fotometrických měřeních. [13]

Vysokotlaké rtuťové výbojky

Vysokotlaká rtuťová výbojka je světelný zdroj, který ke vzniku světla využívá obloukový výboj v přehřátých nasycených parách rtuti o středním a vysokém tlaku. Pracovní tlak přesahuje hodnotu 100 kPa. Zvýšením pracovního tlaku dojde k posunu vlnové délky vyzařovaného světla z ultrafialové oblasti směrem k viditelnému světlu. Spektrum záření leží z části v oblasti ultrafialové a viditelné, zejména v modro-fialové a zelené barvě světla. Ve spektru rtuťových výbojek zcela chybí červená složka, proto je vnější baňka výbojky pokryta vrstvou luminoforu (vanadičitan yttritý), která část ultrafialového záření transformuje do viditelné červené oblasti a tak zlepšuje její barevné podání. (obsah červené složky spektra se zvýší na 12 %). [22] Svou konstrukcí patří mezi nejjednodušší výbojové světelné zdroje, ke svému provozu nepotřebují zapalovací zařízení. Měrný výkon vysokotlakých rtuťových výbojek dosahuje hodnoty $50 - 60 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Ve srovnání s „moderními“ světelnými zdroji je účinnost přeměny elektrické energie na viditelné světlo velmi malá a podle direktivy evropské komise (*směrnice EuP 2009/125/ES*) je stihne stejný osud jako klasické žárovky. V roce 2015 bude ukončena výroba vysokotlakých rtuťových výbojek pro všeobecné osvětlování. Index podání barev $R_a \sim 40$ až 59. Náběhová doba je 3 – 5 min. Doba života je 12 – 15 tisíc hodin. [13]

Pro účely laboratorních měření a užití výbojky jako světelného normálu lze tento světelný zdroj použít. Vhodnější je provedení s čirou baňkou bez luminoforu, který by svou nehomogenní vrstvou nanesenou na vnitřní straně baňky způsoboval nerovnoměrné prostorové rozložení světelného toku. Dnes jsou vysokotlaké rtuťové výbojky s čirou baňkou nabízeny jen několika málo výrobci, většinou na zakázkovou výrobu.

Halogenidové výbojky

Vysokotlaké halogenidové výbojky se vyvinuly z vysokotlakých výbojek rtuťových, kde jsou do hořáku obsahující rtuť zavlečeny halogenidy kovů nebo kovů vzácných zemin. Vedle halogenidových výbojek s křemenným hořákem, vyvinutých v 60. letech 20. století, existují halogenidové výbojky s hořákem korundovým (korundová keramika). Ten je oproti křemennému sklu odolnější vůči agresivnímu působení některých halogenidů. Použití polykrystalického korundu na zhotovení výbojové trubice přineslo další výhody jako zvýšení měrného výkonu, jednotný odstín světla ve všech vyrobených sériích, snížení příkonu výbojek a v neposlední řadě možnost výroby tzv. kompaktních halogenidových výbojek. Index podání barev a měrný výkon je závislý na kombinaci halogenidů v hořáku. Různým složením náplně hořáku je dosahováno velmi širokého intervalu náhradní teploty chromatičnosti 2 800K – 7 200 K. Nejběžnější náplní hořáků výbojek bývá směs jodidů india, thallia, sodíku dále pomocného zážehového plynu (Xe) a nezbytným malým množstvím rtuti pro stabilizaci výboje. Dosahovaný měrný výkon se pohybuje kolem $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Dle složení halogenidů je rovněž dosahováno širokého pásma indexu podání barev. Začíná na hodnotě $R_a = 65$ u standardních halogenidových výbojek a končí na hodnotě $R_a = 98$ u výbojek s obsahem bromidů a jodidů cínu. Vnikající index barevného podání je vykoupen nižším měrným výkonem ($60 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$) těchto výbojek. Kompromisem mezi měrným výkonem a dobrým barevným podáním jsou halogenidové výbojky s obsahem dysprosia, svým spektrálním složením a výslednou barevnou teplotou se velmi blíží dennímu světlu. [23]

Halogenidové výbojky s křemenným hořákem mají standardně příkon od 150 W do 3 500 W. Výbojky s vysokým příkonem ($\geq 2 \text{ kW}$) se připojují na sdružené napětí 400 V. Doba života výbojek se pohybuje v rozmezí 8 – 12 tisíc hodin a měrný výkon výbojek je v rozmezí 60 – 100 $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Výbojky mívají často předepsanou polohu svícení. [24]

Halogenidové výbojky s keramickým hořákem jsou svou konstrukcí blízké vysokotlakým výbojkám sodíkovým, jejíž hořák je vyhotoven také z polykrystalického korundu (Al_2O_3). Použití keramických hořáků, chemicky odolných vůči působení kovových par, umožnilo zvýšit pracovní teplotu hořáku a tím dosáhnou vyššího pracovního tlaku. To vedlo ke zvýšení měrného výkonu až na $120 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Využití korundových hořáků také umožnilo výrobu halogenidových výbojek s nižšími příkony. Příkonová řada těchto halogenidových výbojek začíná již na 20 W a

v současnosti končí na 400 Watech. Výbojky se vyznačují velkou stálostí provozně-technických parametrů, především teplotou chromatičnosti po celou dobu života. Velikou nevýhodou je výrazný činitel stárnutí, což znemožňuje je aplikovat ve fotometrických měřeních.

Vysokotlaké sodíkové výbojky

U vysokotlakých sodíkových výbojek je světlo vyzařováno horkými sodíkovými parami. Provozní tlak výbojek se pohybuje od 26 kPa do 66 kPa. Zvýšením tlaku se docílilo spojitého záření oproti výbojkám nízkotlakým. Zároveň mírně poklesla účinnost [13]. Vysokotlaké sodíkové výbojky se vyznačují velkým měrným výkonem až $150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ při současném přijatelném barevném podání $R_a \sim 25$ (standardní výbojky). Doba života se pohybuje v rozmezí 20 000 až 30 000h. Náhradní teplota chromatičnosti $T_c = 2\,000 \text{ K}$. Příkon sahá od 50 do 1 000 Wattů. Sodíkové výbojky se vyrábějí v různých modifikacích. Výroba standardních sodíkových výbojek byla z důvodu nízké energetické účinnosti v roce 2012 v EU ukončena a definitivně nahrazena sodíkovými výbojkami se zvýšeným tlakem xenonu, které dosahují vyšší účinnosti. Tyto výbojky kladou větší nároky na tyristorové VN zapalovače. Ke svému zápalu vyžadují vysokonapěťové pulzy ($4,5 \text{ kV}$) v širším pásmu obou půlperiod sinusového průběhu napětí.

Rozšířené jsou výbojky s Penningovou směsí plynů v hořáku (99,5 % Ne + 0,5 % Ar) [25], která usnadňuje zápal a výbojku lze provozovat bez VN zapalovače na předřadnicích určených původně pro provoz vysokotlakých rtuťových výbojek. K zápalu výboje dochází, stejně jako u výbojek rtuťových, prostřednictvím pomocné zapalovací elektrody obepínající hořák.

Modifikací sodíkových výbojek jsou výbojky se zlepšeným barevným podáním dosaženým zvýšením tlaku sodíkových par. Nárůst provozního tlaku vede ke značnému poklesu účinnosti, což zapříčinilo postupný útlum výroby těchto výbojek a jejich místo zaujaly kompaktní halogenidové výbojky. Dalším vývojovým stupněm jsou sodíkové výbojky, jejichž hořáky jsou dozované větším množstvím xenonu z důvodu vyšší barevné teploty $T_c = 2\,500 \text{ K}$, tzv. sodíko-xenonové výbojky. Tyto výbojky jsou komerčně označovány jako bílý sodík a svou konstrukcí se velmi blíží kompaktním halogenidovým výbojkám s korundovými hořáky. Jejich měrný výkon je přibližně $50 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [18]. Pro aplikace vyžadující dlouhé servisní intervaly se vyrábějí

dvouhořákové (Twinarc) sodíkové výbojky s dobou života přes 50 000 h a možností okamžitého znovuzápalu bez speciální VN zapalovačů.

Aplikace vysokotlaké sodíkové výbojky jako světelného normálu není příliš vhodná z důvodu jejího rozdílného vyzařovaného spektra a příliš velkého světelného toku i u malých příkonů. To ovšem neplatí pro případ, že by normál v podobě vysokotlaké sodíkové výbojky sloužil pro posuzování parametrů jiných sodíkových výbojek. Největším nedostatkem je velký činitel stárnutí ($Z_z = 0,75 - 0,8$).

4.3.3 Elektroluminiscenční zdroje

Elektroluminiscenčním zdrojem světla je světlo emitující dioda (LED). Zdrojem optického záření se stává PN přechod buzený procházejícím elektrickým proudem. *Při rekombinaci každého páru elektron-díra se uvolní určité kvantum energie, která se může vyzářit mimo krystal* [26]. Emitované světlo se pohybuje v úzké oblasti barevného spektra, které odpovídá jedné barvě (červená, zelená, oranžová nebo modrá). Pro účely osvětlování se začaly LED používat až po vyvinutí modře svítící LED, což následně umožnilo vyrábět bílé světelné diody. Bílá barva světla je vytvořena pomocí RGB barevného modelu. Tato technologie není nejvhodnější, protože se stářím LED modulu dochází k nerovnoměrnému opotřebení jednotlivých diod. To má za následek změnu barevného spektra. Druhou možností, jak dosáhnout bílého světla, je použití modré LED s luminoforem (energeticky nejúčinnější) nebo kombinace LED s ultrafialovým zářením a třípásmovým luminoforem využívající fluorescenci. Poslední zmiňovaný typ bílých LED má nejlepší index barevného podání – $R_a > 80$. Náhradní teplota chromatičnosti bílých led se pohybuje v intervalu 2 500 K – 8 000 K.

Světelné diody našly od prvopočátku své uplatnění zejména signalizačních zařízení a dekorativním osvětlení. Výkonové LED se postupně stále ve větší míře zavádějí do sektoru všeobecného osvětlování, zejména pak v oblasti veřejného osvětlení v podobě LED modulů. Příkon LED modulů aplikovaných ve svítidlech VO dosahuje až 150 W. Výkonový modul v sobě obsahuje několik výkonových LED čipů. Vyhotovení LED modulu může být dvěma způsoby. Buď jsou jednotlivé čipy umístěny na společné základně a překryty ochrannou čirou deskou z polykarbonátu popřípadě má každá LED svou vlastní rozptylovou čočku. Nebo je celý modul

opatřen společným difúzním krytem s naneseným luminoforem. Světlo vyzařované jednotlivými čipy prochází směšovací komorou a poté difuzorem, kde je transformováno luminoforem na světlo s větší vlnovou délkou. Základna modulu je zhotovena z hliníku pro dobrý odvod tepla přes přídavný chladič. Napájení jednotlivých modulů zajišťuje předřadník – zdroj konstantního proudu (pro výkonové LED obvykle 350 mA nebo 700 mA). Napájecí zdroje LED jsou zdrojem harmonického zkreslení síťových veličin a negativně ovlivňují napájecí soustavu.

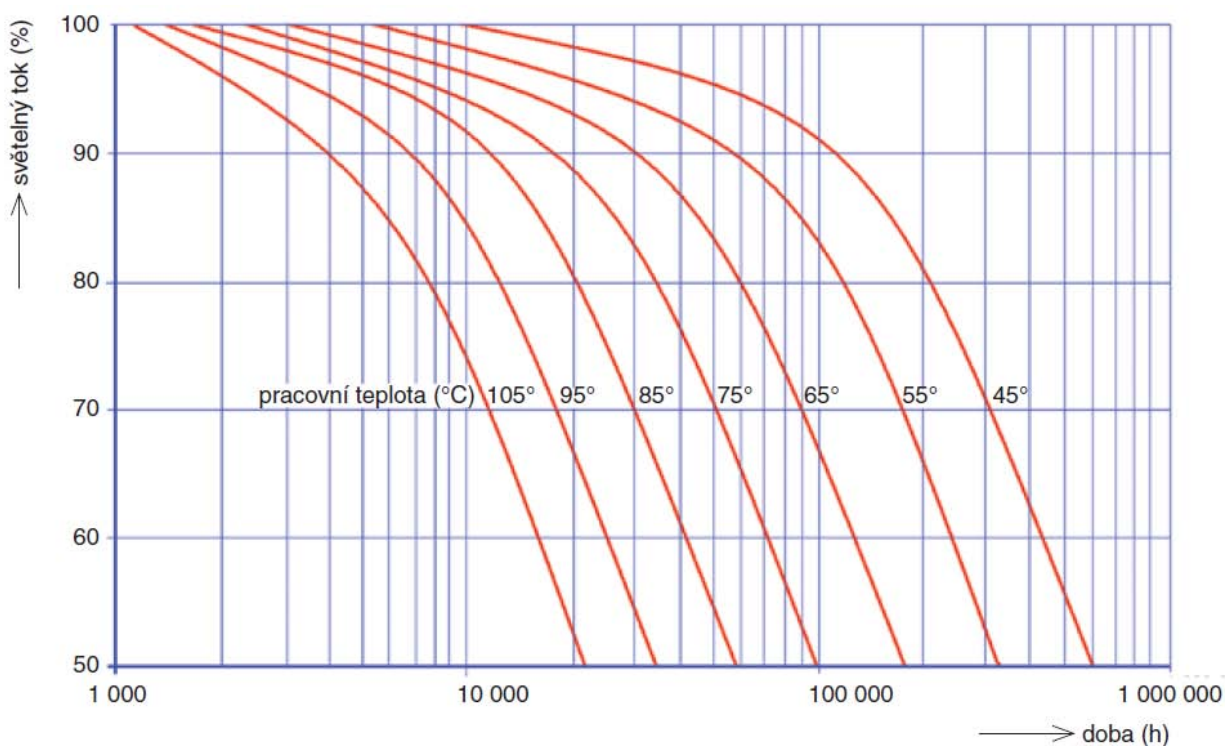
Pro méně náročné aplikace v osvětlování z hlediska potřebného světelného toku se užívají led moduly s příkonem jednotek wattů. LED modul může být tvořen několika SMD LED čipy, či samostatným výkonovým COB LED čipem. Technologie COB obsahuje mnoho LED čipů nanesených na společné základně – křemíkovém substrátu. Toto řešení umožňuje lepší odvod ztrátového tepla a tím zvýšení měrného výkonu LED. Další, novější, modifikací této technologie je MCOB LED (Multi Chip On Board). Světelné LED zdroje, které využívají SMD či COB technologii se v hojné míře aplikují jako náhrady teplotních světelných zdrojů (klasických žárovek) v interiérovém osvětlení. [27], [28]

Významnou roli pro zajištění dlouhé doby života světelného zdroje hraje chlazení. Zvýšená pracovní teplota, kromě rapidního poklesu doby života ([Obrázek 32](#)) rovněž nepříznivě ovlivňuje světelný tok. Díky malým rozměrům lze světlo snadno usměrnit a relativně efektivně využít. Ve svítidlech se aplikují dvě konstrukční řešení. LED jsou seskupeny do modulu a ten je zabudován v optickém systému svítidla. U druhého řešení mají jednotlivé LED vlastní optické systémy (optické čočky nebo reflektory).

Světelné diody jsou velmi perspektivním zdrojem, který se stále vyvíjí. Měrný výkon LED se stále navyšuje, v současnosti se u běžně dostupných LED svítidel měrný výkon světelných diod pohybuje okolo $100 - 150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. V laboratorních podmínkách je dosahováno účinnosti vyšší. V roce 2013 byl jednou z vůdčích společností na poli LED, *Cree, Inc*, oznámen dosavadní rekord v dosaženém měrném výkonu LED. V laboratorních podmínkách bylo u LED napájené proudem 350 mA s náhradní teplotou chromatičnosti $4\,400 \text{ K}$ dosaženo měrného výkonu $276 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [29]. O rok později (duben 2014) se podařilo překonat hranici měrného výkonu $300 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ u LED diod vyzařující bílé světlo. Konkrétně bylo u výkonové LED s náhradní teplotou chromatičnosti $5\,150 \text{ K}$ dosaženo měrného výkonu $303 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ [30]. Doba života

LED je dle typu 60 – 100 tisíc hodin. V současné době je vývoj velmi rychlý a parametry se stále zlepšují.

Pro vytváření normálu svítivosti, by byl čip výkonové LED naprosto optimálním zdrojem. Jedná se takřka o ideální bodový zdroj světla a s využitím optické čočky lze docílit nerozbíhajícího se paprsku. Hlavní překážkou LED pro využití jako normálu svítivosti je jejich rychlé stárnutí. Činitel stárnutí výkonové LED $Z_z = 0,7$. Ze stejného důvodu se stává nepoužitelný i normál světelného toku, který by navíc musel být vyhotoven z mnoha LED čipů, tak aby bylo zajištěno všesměrové vyzařování modulu. U jednotlivých LED čipů tvořící jeden modul navíc nelze zaručit stejné provozní podmínky, zejména stejná teplota PN přechodu, všech použitých LED a tím i míru stárnutí světelného zdroje.



Obrázek 32 - Závislost doby života LED na teplotě P-N přechodu (zdroj CREE) [31]

V odstavcích 4.2, 4.3.2 a 4.3.3 této kapitoly byly použity pasáže textu z [32].

5. Nejistoty světelnotechnických měření

Každé měření určité veličiny bývá zatíženo chybou. Soubor měřených hodnot bývá zkreslen náhodnou chybou, systematickou chybou a vlastní chybou měřících přístrojů. Střed Intervalu hodnot, v němž se nachází výsledek měřené veličiny, udává standardní nejistota měření označována písmenem u .

Nejistota měření se udává jako relativní hodnota v procentech (relativní standardní nejistota) nebo v absolutní hodnotě stejného rozměru, jako je měřená veličina. Podle způsobu vyhodnocování se standardní nejistota rozlišuje na nejistoty typu A (označováno u_A), která se získá vyhodnocením řady shodně provedených měření za shodných podmínek. *Standardní nejistota typu A* (rovnice (39.)) odpovídá pravděpodobnostnímu rozložení výsledku hledané veličiny z naměřeného souboru dat.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad [-] \quad (39.)$$

Kde: n – počet opakování měření

X_i – hodnota měřené veličiny i -tého měření

\bar{X} – střední hodnota měřené veličiny (aritmetický průměr)

$$u_B = \frac{Z_{Xmax}}{\chi \cdot X_{vz}} \quad [-] \quad (40.)$$

Kde: Z_{Xmax} – maximálně možná odchylka / maximální dovolená chyba přístroje

X_{vz} – vztažná hodnota měřené veličiny

χ – koeficient pravděpodobnostního rozdělení měřené veličiny⁴

Dalším typem je *standardní nejistota typu B* (označováno u_B), která je souhrnem vzniklých nepřesností při měření, které ovlivňují výslednou hodnotu a odpovídá dílčím standardním nejistotám typu B. Dílčí nejistoty se sčítají dle Gaussova principu sčítání nejistot (rovnice (41.)). Nejistoty typu B v sobě obsahují jak systematickou chybu měřících přístrojů, tak chyby způsobené nepřesným odečítáním a zobrazováním údajů z měřidel. Nelze je ovlivnit

⁴ V případě rovnoměrného rozdělení je koeficient $\chi = \sqrt{3}$ a u normálního rozdělení je $\chi = 3$. [33]

počtem opakování měření. U měřicích přístrojů je pravděpodobnostní rozdělení náhodné veličiny, v rámci intervalu tolerance chyby přístroje, rovnoměrné. Dále se při některých měřeních uplatňuje normální rozdělení pravděpodobnosti, jako je například umístování fotometrických hlavic do osy fotometrického středu světelného zdroje. Pokud nelze zajistit shodné podmínky měření a opakovat tak měření sledované veličiny vícekrát, nejistota typu A se neurčuje a do výsledné nejistoty se uvedou pouze všechny dílčí nejistoty typu B [33].

Sloučením obou druhů nejistot, vzniká *kombinovaná nejistota* u_c . Z důvodu eliminace možnosti, že skutečná odchylka od přesného výsledku měřené veličiny překročí interval celkové nejistoty, zavádí se standardní rozšířená nejistota označována písmenem U (rovnice (43.)). *Rozšířená nejistota* je součinem kombinované standardní nejistoty a koeficientu rozšíření k_r . (Obvykle se volí $k_r = 2$).

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{Bn}^2} \quad [-] \quad (41.)$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad [-] \quad (42.)$$

$$U = u_c \cdot k_r \quad [-] \quad (43.)$$

Pokud je zjišťovaná veličina měřena nepřímou, vypočítá se standardní nejistota typu A shodným způsobem, jako při přímém měření dle vzorce (39.). V případě standardní nejistoty typu B se výsledná nejistota měřené veličiny, respektive vypočítávané, určí z funkční závislosti dané veličiny. Ve výsledné nejistotě nepřímou měřené veličiny se podle Gaussova principu sčítají součiny všech nejistot veličin vstupujících s příslušnou parciální derivací funkční závislosti vypočítávané funkce. Výpočet nejistoty nepřímou měřené veličiny udává vztah (44.). Uvedený vzorec platí za předpokladu, že je zjišťovaná veličina Y definována funkčním předpisem $Y = f(X_1 \dots X_n)$, ve kterém se vyskytují přímo měřené veličiny X_i .

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u_{Bxi} \right)^2} \quad [-] \quad (44.)$$

5.1 Dílčí nejistoty měření na fotometrické lavici

Na fotometrické lavici se nepřímým měřením zjišťuje svítivost testovaného světelného zdroje. Měření svítivosti probíhá pomocí měření osvětlenosti v různých vzdálenostech od světelného zdroje. Princip měření byl popsán v kapitole 3.2. Výsledné naměřené parametry ovlivňují následující faktory:

- stabilita parametrů světelného zdroje
- podmínka bodového zdroje – vliv konečných rozměrů
- chyba měřicího přístroje - luxmetru
- nastavení vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku
- určení vzdálenosti mezi světelným středem zdroje a středem fotočlánku

Stabilita parametrů světelného zdroje u_{Bs}

Stabilita parametrů světelného zdroje v sobě zahrnuje nestabilitu napájecích parametrů sítě, únavu fotočlánku a vlastní nestabilita světelného zdroje způsobenou velmi pozvolnou degradací během doby života. Z důvodu provázanosti těchto vlivů se tyto vlivy popisují jednou dílčí nejistotou nestability použitých zařízení z údajů luxmetru během doby měření. [9]

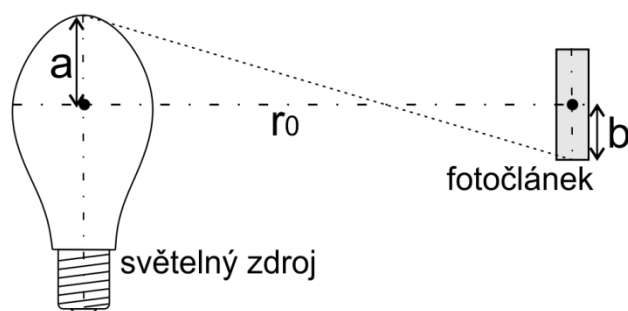
$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right| \cdot 100\% \quad [\%] \quad (45.)$$

Kde: Y_{max} – maximální hodnota osvětlenosti zobrazená fotometrem v průběhu měření

Y_{min} – minimální hodnota osvětlenosti zobrazená fotometrem v průběhu měření

Podmínka bodového zdroje - vliv konečných rozměrů u_{Bb}

Za bodový zdroj je ve světelné technice považován zdroj světla vzdálen od přijímací plochy pětinašobek jeho charakteristického rozměru (vztah (6.)). U reálného světelného zdroje je třeba zohlednit konečné rozměry světelného zdroje a fotočlánku, které mají vliv na výslednou dílčí nejistotu podmínky bodového zdroje. [9]



Obrázek 33 - Grafické zobrazení důsledku konečných rozměrů světelného zdroje na dílčí standardní nejistotu

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100\% \quad [\%] \quad (46.)$$

Kde: r_0 - přímá vzdálenost světelného středu zdroje a fotočláčku⁵

a - polovina největšího (charakteristického) rozměru vyzařovací plochy světelného zdroje, tj. bez patice

b - poloměr přijímací plochy fotočláčku

Chyba měřicího přístroje u_{BE}

Nepřesnost použitého měřicího přístroje – digitálního luxmetru vyjadřuje vztah (47.), za předpokladu, že je známa chyba luxmetru a počet zobrazených číslic s možnou chybou. Pokud je znám údaj o chybě luxmetru a chybě z měřicího rozsahu, platí pro výpočet dílčí standardní nejistoty vzorec (48.). Výsledná dílčí nejistota záleží na použitém rozsahu a velikosti měřené veličiny. O aplikaci konkrétního vzorce pro výpočet nejistoty jsou rozhodující údaje poskytnuté výrobcem k danému přístroji.

Do chyb měřicího přístroje se zahrnuje také chyba spektrální citlivosti fotočláčku a chyby způsobené zářením v infračervené a ultrafialové oblasti spektra elektromagnetického záření. Nejistoty měření vyvolané těmito chybami nejsou v případě měření světelného záření teplotních zdrojů relevantní. Luxmetry se kalibrují na žárovkové světlo a tudíž se nejistota způsobená výše uvedenými chybami neprojeví. Při zachování dostatečné vzdálenosti od měřeného světelného zdroje není nutné uvažovat ani chyby měření způsobené tepelným namáháním fotočláčku.

⁵ Pro měření na fotometrické lavici je do vzorce dosazena hodnota nejmenší vzdálenosti mezi fotočláčkem a světelným zdrojem v průběhu měření, což je 1 m. U goniometru vzdálenost r_0 odpovídá délce ramene (2 m).

$$u_{BE} = \frac{\delta_1 + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (47.)$$

$$u_{BE} = \frac{\delta_1 + \frac{\delta_2 \cdot M}{100 \cdot X}}{\sqrt{3}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (48.)$$

Kde: δ_1 – chyba luxmetru v %

δ_2 – chyba z měřicího rozsahu v %

M – maximální hodnota na měřícím rozsahu

N – počet zobrazených číslic s možnou chybou

R – rozlišení přístroje, hodnota číslice s nejmenší vahou

X – naměřená hodnota

Nastavení vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bo}

Poloha světelného středu zdroje musí být v ose rovnoběžné s rovinou fotometrické lavice a středem přijímací plochy fotočlánku. Vyosení fotočlánku z upínacího stojanu v horizontálním či vertikálním směru způsobí odklon od normály roviny fotočlánku a tím nebude zajištěna jeho normálová osvětlenost. Do chyby způsobené odklonem fotočlánku od rovnoběžné osy lze zahrnout chybu způsobenou rozdílnou výškou světelného středu zdroje a středu fotočlánku od roviny fotometrické lavice, protože v konečném důsledku se tato chyba projeví stejně jako vyosení fotočlánku v upínací hlavici. Dílčí nejistotu vyjadřuje rovnice (49.) uvedená v [9].

$$u_{Bo} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (49.)$$

Kde: β – maximální úhel vyosení fotočlánku od osy světelného středu zdroje

U fotometrické lavice lze rovnoběžnost spojnice osy mezi světelným středem zdroje a středem fotočlánku zajistit pomocí stavěcích šroubů se stupnicí s vysokou přesností. Uchycení fotočlánku a vyrovnání v upínací hlavici s osou světelného středu se provádí ručně. Maximální vyosení fotočlánku v upínací hlavici lze při ručním nastavování předpokládat maximálně 3°. Pro tuto maximální odchylku lze stanovit výslednou dílčí nejistotu (50.).

$$u_{Bo} = \frac{1 - \cos 3^\circ}{2} \cdot 100\% = 0,069\% \quad (50.)$$

Určení vzdálenosti mezi světelným středem zdroje a středem fotočlánku u_{Bl}

Nejistota určení vzdálenosti fotočlánku od světelného zdroje je dána nepřesností nastavení posuvného stojanu na fotometrické lavici zapříčiněným chybným odečtením hodnoty ze stupnice pravítka na fotometrické lavici. Dílčí nejistota odečítání ze stupnice pravítka vyjadřuje následující rovnice.

$$u_{Bl} = \frac{Z_{d \max}}{d_l \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (51.)$$

Kde: $Z_{d \max}$ - největší přepokládaná chyba odečtu dílků ze stupnice

d_l - vzažná hodnota počtu dílků na 1 m

Pro maximálně možnou přesnost nastavení a určení vzdálenosti je ukazatel pohybující se po stupnici vybaven zvětšovací sklem. Proto je možné stanovit maximální mylně odečtenou hodnotu na pravítku fotometrické lavice s milimetrovou stupnicí na 0,25 dílků. Dosazením do rovnice (51.) se určí dílčí nejistota vzdálenosti.

$$u_{Bl} = \frac{0,25}{1000 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,014 \quad \% \quad (52.)$$

5.1.1 Výsledná nejistota měření na fotometrické lavici

Standardní nejistota určení svítivosti se vypočítá dle vztahu (44.) pro výpočet nejistoty nepřímo měřených veličin. Svítivost se zjišťuje na fotometrické lavici pomocí měření osvětlenosti a délky (více v kapitole 3.2). Dílčí standardní nejistota měření svítivosti je dána vztahem (53.).

$$\begin{aligned} u_{Bl} &= \sqrt{\left(\frac{\partial(E \cdot l^2)}{\partial E} \cdot u_{BE}\right)^2 + \left(\frac{\partial(E \cdot l^2)}{\partial l} \cdot u_{Bl}\right)^2} = \sqrt{(l^2 \cdot u_{BE})^2 + (2 \cdot E \cdot l \cdot u_{Bl})^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{l^2 \cdot u_{BE}}{E \cdot l^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot E \cdot l \cdot u_{Bl}}{E \cdot l^2}\right)^2} \cdot 100\% = \sqrt{\left(\frac{u_{BE}}{E}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{u_{Bl}}{l}\right)^2} \cdot 100\% = \quad (53.) \\ &= \sqrt{u_{BE(\%)}^2 + 4 \cdot u_{Bl(\%)}^2} \quad [\%] \end{aligned}$$

Sloučením dílčích nejistot měření vznikne standardní nejistota typu B pro měření svítivosti na fotometrické lavici (54.).

$$u_{BFL} = \sqrt{u_{B_l}^2 + u_{B_o}^2 + u_{B_b}^2 + u_{B_s}^2} = \sqrt{u_{B_E}^2 + 4 \cdot u_{B_l}^2 + u_{B_o}^2 + u_{B_b}^2 + u_{B_s}^2} \quad [\%] \quad (54.)$$

Kde: u_{B_l} – dílčí nejistota nepřímého měření svítivosti

u_{B_l} – dílčí nejistota vzdálenosti středu fotočlánku a světelného středu zdroje

u_{B_E} – dílčí nejistota nepřesnosti použitého luxmetru

u_{B_o} – dílčí nejistota vzájemné polohy fotočlánku a světelného středu zdroje

u_{B_b} – dílčí nejistota způsobena konečnými rozměry světelného zdroje

u_{B_s} – dílčí nejistota stability zařízení

5.2 Dílčí nejistoty měření na goniofotometru

Goniofotometrem se stejně jako v případě fotometrické lavice nepřímo měří svítivost zdroje v různých prostorových úhlech. Měřenou veličinou je osvětlenost v konstantní vzdálenosti od světelného zdroje, která závisí na délce ramene goniofotometru. Celý princip měření popisuje kapitola 3.3. Výsledné naměřené hodnoty ovlivňují následující faktory:

- nastavení výchylky ramene goniofotometru
- nastavení vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku
- určení vzdálenosti mezi světelným středem zdroje a středem fotočlánku
- stabilita parametrů světelného zdroje
- podmínka bodového zdroje
- chyba měřicího přístroje – luxmetru

Nastavení výchylky ramene goniofotometru u_{B_γ}

Pohon goniofotometru je zajištěn krokovým motorem řízeným frekvenčním měničem. Nastavení úhlového kroku ramene je automatizováno řídicím softwarem. Goniofotometr v laboratoři světelné techniky na FEL má maximální možnou odchylku v nastavení požadované úhlové výchylky ramene $\Delta\gamma_{max} = 0,025^\circ$ [9]. Dílčí standardní nejistota je dána vztahem

$$u_{By} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{\gamma_v \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (55.)$$

Kde: $\Delta\gamma_{max}$ - maximální odchylka nastavení výchylky ramene goniofotometru
 γ_v - vztážná hodnota úhlového kroku

Měření čar svítivosti goniofotometrem probíhá v základním kroku 2° , což je zároveň hodnota vztážného úhlového kroku γ_v . Dosazením do rovnice (55.) vychází dílčí standardní nejistota nastavení výchylky ramene goniofotometru z rovnice (56.)

$$u_{By} = \frac{0,025}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,77 \quad \% \quad (56.)$$

Nastavení vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bo}

Odklon (vyosení) fotočlánku vnáší chybu do měření. Nebude platit podmínka kolmého dopadu světelných paprsků na plochu fotočlánku. Tento úkaz je stejně jako v případě fotometrické lavice popsán rovnicí (49.). U goniofotometru lze předpokládat maximální vyosení fotočlánku o 2° . Po dosazení do rovnice (49.) je dílčí nejistota vypočítána v následující rovnici.

$$u_{Bo} = \frac{1 - \cos 2^\circ}{2} \cdot 100\% = 0,03 \quad \% \quad (57.)$$

Určení vzdálenosti mezi světelným středem zdroje a středem fotočlánku u_{Bl}

Dílčí nejistota určení vzdálenosti mezi měřeným světelným zdrojem a fotočlánkem na goniofotometru s ramenem konstantní délky $l_r = 2 \text{ m}$ se určí z rovnice (58.). Na základě zkušeností z předchozích měření lze předpokládat, že maximální odchylka nepřekročí hodnotu $Z_{l \max} = 0,01 \text{ m}$ [9].

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l \max}}{l_r \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (58.)$$

Kde: $Z_{l \max}$ - maximální odchylka vzdálenosti světelného středu zdroje a fotočlánku
 l_r - délka ramene goniofotometru

$$u_{Bl} = \frac{0,01}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100 = 0,29 \quad \% \quad (59.)$$

Stabilita parametrů světelného zdroje u_{Bs}

Pro výpočet platí stejný vzorec (45.) jako v případě fotometrické lavice. Velikost nejistoty lze stanovit na 0,5 % na základě zkušeností v laboratorních měřeních [9].

Podmínka bodového zdroje u_{Bo}

Dílčí nejistota vyplývající z konečných rozměrů světelného zdroje se spočítá podle vzorce (46.) uvedeného v odstavci 5.1, který se týká dílčích nejistot při měření na fotometrické lavici.

Chyba měřicího přístroje – luxmetru u_{BE}

Dílčí nejistota způsobená chybou luxmetru se určí z obecně platných vzorců (47.) nebo (48.) uvedených rovněž v odstavci 5.1.

5.2.1 Výsledná nejistota měření na goniofotometru

Výsledná standardní nejistota typu B při měření čar svítivosti goniofotometrem se určí z obecného vztahu (41.) a bude odpovídat celkové nejistotě měření. Na goniofotometru nelze zajistit identické podmínky měření pro vícenásobné opakování měření. Zejména je to neschopnost nastavit měřený světelný zdroj do identické polohy a měřit tak přesně tutéž rovinnu. Proto se standardní nejistota typu A neurčuje a do kombinované standardní nejistoty (u_C) ji nelze zahrnout. Výsledná nejistota měření určená jen nejistotou typu B, do které vstupují dílčí nejistoty typu B.

$$u_{B_{gof}} = \sqrt{u_{By}^2 + u_{Bo}^2 + u_{Bl}^2 + u_{BE}^2 + u_{Bb}^2 + u_{Bs}^2} \quad [\%] \quad (60.)$$

Kde: u_{By} – dílčí nejistota výchylky ramene

u_{Bo} – dílčí nejistota vzájemné polohy fotočlánku a světelného středu zdroje

u_{Bl} – dílčí nejistota vzdálenosti fotočlánku a světelného zdroje

u_{BE} – dílčí nejistota nepřesnosti použitého luxmetru

u_{Bb} – dílčí nejistota způsobena konečnými rozměry světelného zdroje

u_{Bs} – dílčí nejistota stability zařízení

5.3 Dílčí nejistoty měření v kulovém integrátoru

Kulovým integrátorem je měřen světelný tok určitého zdroje s pomocí normálu (etalonu) světelného toku. Princip měření v kulovém integrátoru je popsán v kapitole 3.4. Výsledný světelný tok měřeného zdroje je ovlivněn následujícími chybami:

- stabilita parametrů měřeného světelného zdroje použitého normálu
- chyba měřicího přístroje – fotometru
- rozdílné prostorové rozložení světelného toku měřeného zdroje a normálu
- rozdílná pohltivost povrchu cizích těles vně integrátoru

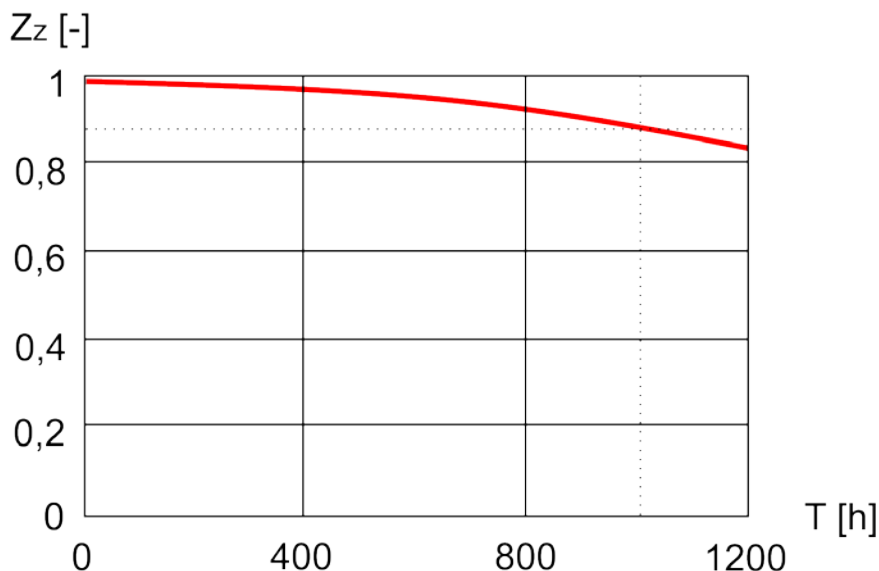
Stabilita parametrů světelných zdrojů u_{BS_k}

Měření v integrační kouli probíhá při rozsvíceném světelném zdroji napájeným jmenovitým napětím. Během měření se velikost napětí ani poloha světelného zdroje nemění a tedy velikost fotoproudu vyvolaného dopadajícím zářením na snímací plochu fotometru se mění pouze v důsledku nestability světelného toku zdroje. Světelný zdroj je napájen jmenovitým stabilizovaným napětím. Dle údaje výrobce stabilizátoru napětí smí hodnota požadovaného napětí kolísat maximálně o 0,1 %. Pro výpočet dílčí nejistoty způsobené nestabilitou použitých zařízení platí vzorec (45.). Údaj na displeji fotometru (*Optical Power Meter MVOZ-03*) se mění jen v malém rozsahu, což je zapříčiněno nestabilitou měřidla a částečně chvěním clon a dalších konstrukčních částí uvnitř kulového integrátoru. Měření světelného toku zdrojů probíhalo za stejných podmínek pouze jednou. Z důvodu malého rozdílu v odchylky měřené veličiny během prováděného měření se vzorec pro výpočet nestability dá jen obtížně aplikovat. Údaje o chybě zobrazení použitého zařízení nejsou známy. Dílčí nejistotu, způsobenou všemi výše zmiňovanými příčinami, lze jen odhadnout a to na 0,5 %, jak uvádí [9]. Tato hodnota je obdobná jako v případě nestability použitých zařízení při měření na goniofotometru.

$$u_{BS_z} = 0,5 \% \tag{61.}$$

K této dílčí nejistotě je nutné připočítat nejistotu udávaného jmenovitého světelného toku normálu u_{B_N} (62.), pomocí kterého se měření v kulovém integrátoru provádí. Světelný tok normálu světelného toku (klasická žárovka) vykazuje pokles světelného toku za dobu života v důsledku stárnutí, jako všechny světelné zdroje. Činitel stárnutí (Z_z) žárovek s dobou života

1 000 h je 0,85. (Obrázek 34). Světelný tok zdroje tedy za dobu života poklesne o 15 %. V průběhu hoření žárovky se mění světelný tok v intervalu < 100 %; 85 % >.



Obrázek 34 - Pokles světelného toku obyčejných žárovek během doby života (dle [34])

Dílčí nejistota jmenovitého světelného toku normálu se vypočítá ze vztahu (40.). Protože světelný tok žárovky nemůže nikdy během doby života vzrůst (při dodržení jmenovitého napájecího napětí), musí se do vzorce (40.) dosadit za Z_{max} střední hodnota z intervalu přípustných hodnot poklesu světelného toku zdroje. Stárnutí světelných zdrojů odpovídá normálnímu rozdělení pravděpodobnosti.

$$u_{B_N} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (100 - 85)}{3} = 2,5 \% \quad (62.)$$

Dílčí nejistota stability parametrů měřeného světelného zdroje ($u_{B_{SZ}}$) a světelného toku použitého normálu (u_{B_N}) je tak dána geometrickým průměrem obou nejistot, jejíž výslednou hodnotu udává rovnice (63.).

$$u_{B_{Sk}} = \sqrt{u_{B_{SZ}}^2 + u_{B_N}^2} = \sqrt{0,5^2 + 2,5^2} = 2,5495 \% \quad (63.)$$

Chyba měřicího přístroje

Měření v kulovém integrátoru probíhá substituční metodou (podrobněji v kapitole 3.4.). Hodnoty světelného toku normálu a daného světelného zdroje jsou měřeny fotometrem za stejných podmínek. Oba světelné zdroje jsou umístěny v kulovém integrátoru na stejné pozici. Všechny naměřené hodnoty fotometrem budou zatíženy stejnou chybou měřicího přístroje.

Kulový integrátor je osazen fotometrem *OSRAM CENTRA V(λ) Si-Photometer*, jehož nepřesnost není uvedena. Dílčí nejistota chyby měřicího zařízení lze zahrnout do dílčí standardní nejistoty typu B způsobenou nestabilitou zařízení.

Relevantní nejistotu by způsobilo rozdílné spektrální složení vyzařovaného světla normálu a měřeného světelného zdroje. Tato situace ovšem v případě mého měření nenastává. Rovněž obecně platná zásada, že měřený světelný zdroj a normál světelného toku by měly být shodného druhu, byla dodržena.

Rozdílné prostorové rozložení světelného toku měřeného zdroje a normálu

Nátěr vnitřní strany kulového integrátoru není zcela homogenní. Odrazivost povrchu není proto ve všech místech stejná. Citlivost integrátoru se mění s prostorovým rozložením svítivosti zdroje. Světelné paprsky se uvnitř koule odrážejí od clon, pomocných konstrukcí ([Obrázek 25](#)) a do okénka s umístěným fotometrem dopadá v závislosti na vyzařovací charakteristice světelného zdroje rozdílné množství světelného záření. Absolutní množství odraženého toku se liší i v rámci obou polokoulí.

Pokud se vyzařovací charakteristika normálu a měřeného světelného zdroje liší, zvláště nejsou-li oba světelné zdroje shodného druhu (např. žárovka vs. zářivková trubice) je rozdíl markantní.

V případně měření světelného toku normálu a srovnávaného světelného zdroje shodného druhu, zvláště je-li všesměrově vyzařující (žárovka), je rozdílná odrazivost povrchů v rámci obou polokoulí zanedbatelná. Dílčí nejistotu způsobenou rozdílným prostorovým rozložením světelného toku měřeného zdroje a světelného normálu lze zanedbat.

Rozdílná pohltivost povrchu cizích těles vně integrátoru

Konstrukční díly i vlastní světelné zdroje mají rozdílnou pohltivost a dochází ke zkreslení naměřených hodnot. Míra, se kterou se tyto faktory podílejí na výsledné chybě měření, je stěží zjistitelná. Pro eliminaci vlivu rozdílné pohltivosti předmětů umístěných vně integrátoru se při měření světelného toku užívá korekční žárovka. Rozdíl v pohltivosti měřeného světelného zdroje a normálu není ve srovnání normálu s povrchem celého svítidla, umístěného uvnitř koule, tak výrazný.

Po provedení korekce se opět výsledné chyby dle vzorce (36.) vzájemně vyruší. Jak tomu je i v případě určování nejistoty měřicího přístroje, výsledná dílčí nejistota zapříčiněná rozdílnou pohltivostí nebude relevantní.

5.3.1 Výsledná nejistota měření v kulovém integrátoru

Jak vyplývá z rozboru dílčích nejistot při měření světelného toku v kulovém integrátoru, uplatní se ve výsledné standardní nejistotě typu B pouze dílčí nejistota způsobena nestabilitou použitých zařízení. To platí ovšem jen v případě, že navzájem porovnávanými světelnými zdroji budou světelné zdroje (normál a měřený) podobného druhu, prostorové rozložení svítivosti a shodného vyzařovaného spektra. Celkovou nejistotu typu B pro měření v kulovém integrátoru (u_{BKl}) lze uvažovat pouze nejistotu způsobenou nestabilitou měřeného světelného zdroje a nejistotou udávané jmenovité hodnoty světelného toku použitého normálu. Nejistota typu A se neudává z důvodu jednorázového měření.

$$u_{BKl} = u_{Bsk} = 2,5495 \% \quad (64.)$$

6. Vlastní fotometrická měření

Před zahájením měření světelnotechnických parametrů komerčně vyráběných světelných zdrojů a započítáním tvorby světelných normálů, které budou mít na konci procesu jednoznačně definované parametry světelného toku či svítivosti ve vztažném směru, je nutné věnovat náležitou pozornost výběru konkrétních druhů a typů světelných zdrojů. Světelné zdroje je nutno vybírat s ohledem na budoucí specifické účely užívání. Požadavky na světelné normály byly probrány v kapitole 4.1.

6.1 Vybrané světelné zdroje

Nejvhodnější světelné zdroje pro tvorbu normálů světelného toku a svítivosti jsou teplotní světelné zdroje. Teplotní světelné zdroje jsou velmi nenáročné na provoz, nevyžadují předřadné přístroje jako výbojové zdroje světla.

Pro přípravu normálu svítivosti i světelného toku jsem vybral halogenové žárovky. Použití halogenových žárovek je vhodné z několika hledisek:

- nenáročnosti provozu
- spojitým spektrem záření
- odpadá závislost světelného toku na teplotě
- libovolná poloha hoření
- malý činitel stárnutí
- relativně dlouhé doby života (2 000 h)
- svými rozměry vlákna se blíží bodovému zdroji

Dle finálního využití jsem z komerčních světelných zdrojů pro všeobecné osvětlování vybral zdroje konkrétního provedení. Z důvodu platné směrnice vydané evropskou komisí *EuP 2009/125/ES* jsem měl poněkud zúžené možnosti při výběru halogenových žárovek na přípravu normálů světelného toku (požadavky jsou popsány v kapitole 4.1.2). Tato směrnice upravuje mimo jiné výrobu neefektivních světelných zdrojů, kam spadají veškeré obyčejné žárovky a některé halogenové žárovky, zejména ty v matovaném provedení. Žárovky používané

jako normály svítivosti kladou specifické požadavky na konstrukci uchycení vlákna (podrobněji v kapitole 4.1.1).

Žárovky určené k přípravě normálů svítivosti

Žárovky vyhovující konstrukcí závěsu vlákna se dají nalézt mezi žárovkami pro speciální aplikace osvětlování, jako jsou např. žárovky projekční či žárovky určené do spotových reflektorů k osvětlování podíí. Z této kategorie jsem vybral halogenovou žárovku o příkonu 500 W (detaily v [Tabulka 1](#)). Sloužící jako normál pro měření svítivosti výbojových zdrojů světla. Pro světelné zdroje s menšími očekávanými hodnotami svítivosti a ověřování luxmetrů jsem vybral dva kusy vysoce žhavených (3 000 K) halogenových žárovek se zachovanou obvyklou dobou života halogenových žárovek 2 000 h.

Tabulka 1 - Technické parametry žárovek určených pro normály svítivosti

Výrobce	Osram	Osram
Obchodní název	Halolux Ceram Eco	Studio lamp M40
Kód výrobce	64404 ECO	64672 M/40
Jmenovité napětí [V]	230	230
Garantovaný světelný tok [lm]	4 200	8 500
příkon [W]	205	500
Doba života [h]	2 000	2 000
Teplota chromatičnosti [K]	3 000	2 900
Patice	E27	GY9.5
Rozměry průměr [mm]	32	---
výška [mm]	105	85
Číslo normálu	13-1; 13-2	13-3

Žárovka určená pro studiové osvětlení je opatřena kolíkovou patičkou. Aby bylo možné provést měření svítivosti na fotometrické lavici, jež disponuje kalibrovanou objímkou pro čtyřbodové měření obvodových veličin se závitem E27, bylo nutné vyrobiť k této žárovce redukci.



Obrázek 35 - Halogenová žárovka
OSRAM Haloxux Ceram Eco 205 W



Obrázek 36 - Halogenová žárovka OSRAM M40 500 W



Žárovky určené k přípravě normálů světelného toku

Žárovky s opalizovanou baňkou o dostatečném světelném toku, jejichž světlorozptylující vrstva je dostatečně difuzní v provedení baňky A60 (klasická žárovková baňka hruškového tvaru), nejsou na trhu dostupné.

Pro měření jsem proto vybral tři kusy halogenové žárovky s opálovou baňkou hříbkového tvaru, který je typický pro kryptonové žárovky (baňka E60). Dále jsem vybral halogenovou matovanou žárovku s tubulární baňkou. Z důvodu tenké vrstvy oxidu křemičitého naneseného na vnitřní straně baňky má žárovka světlorozptylující vrstvu velmi průsvitnou a nemusela by být pro normál světelného toku zcela vhodná. Vhodnost použití této žárovky jako normálu světelného toku se prokáže (resp. vyvrátí) až po provedení měření čar svítivosti na goniofotometru, zda nebude vykazovat asymetrické rozložení světelného toku. Přehled parametrů vybraných žárovek s přiřazenými identifikačními čísly normálů je uveden v tabulce (Tabulka 2).

Tabulka 2 - Technické parametry žárovek určených pro normály světelného toku

Výrobce		Philips	Osram
Obchodní název		Halogena Krypton E 60	Halolux Ceram
Kód výrobce		493378-25	64480 IM
Jmenovité napětí	[V]	230	230
Garantovaný světelný tok	[lm]	1 480	4 210
příkon	[W]	100	230
Doba života	[h]	2 000	2 000
Teplota chromatičnosti	[K]	2 900	2 900
Patice		E27	E27
Rozměry	průměr	[mm]	61
	délka	[mm]	107
Číslo normálu		13-4; 13-5; 13-6	13-7



Obrázek 37 - Halogenová žárovka
PHILIPS Halogena krypton E60 100 W



Obrázek 38 - Halogenová žárovka OSRAM Halolux Ceram 230 W

6.2 Příprava normálu svítivosti

Žárovky vybrané pro tvorbu odvozených normálů svítivosti jsem nejprve podrobil předběžnému stárnutí (zahoření). Každý světelný zdroj jsem opatřil jedinečným identifikačním číslem pro snadné rozpoznání a z důvodu vedení evidence záznamů o měření a jejím používání. Žárovky byly očíslovány ve formátu rok zařazení do laboratoře a pořadové číslo. Poté jsem přistoupil k měření svítivosti, respektive osvětlenosti na fotometrické lavici. U všech vzorků halogenových žárovek jsem předběžně proměřil luxmetrem osvětlenost (vždy ve stejné

vzdálenosti) z obou stran vlákna žárovky, abych zjistil, která strana roviny vlákna vyzařuje více světelného záření. Tento jev je způsoben různými nehomogenitami při výrobním procesu žárovky a nesymetrickým zavěšením vlákna uvnitř žárovkové baňky. U komerčně vyráběných žárovek, které nejsou určeny pro optické účely, je mírná nesymetrie vyzařování zcela normální. Poté co jsem zjistil dominantnější polovinu vyzařování, proměřil jsem tuto část žárovky luxmetrem z mnoha směrů, daných pootočením žárovky kolem podélné osy závitu vůči fotočlánku, abych odhalil místo s nejvyšší svítivostí, respektive osvětleností na konstantní vzdálenosti mezi světelným zdrojem a čidlem luxmetru. Místo s maximálním vyzařováním viditelného světelného záření v toto směru jsem viditelně a označil za bod vztažné svítivosti I_0 .

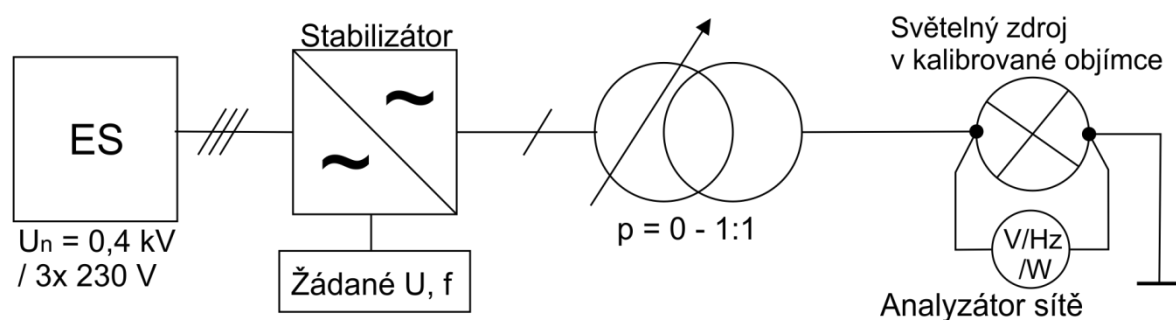
6.2.1 Použité přístroje

Žárovky, které budou používány jako normály svítivosti, je nezbytné proměřit co možná nejpečlivěji. Aby výsledná určená hodnota vztažné svítivosti byla dostatečně přesná, musí být měření provedeno dvěma měřicími přístroji – luxmetry. Náčrt uspořádání fotometrické lavice pro objektivní měření svítivosti znázorňuje [Obrázek 17](#) v kapitole 3.2 věnované fotometrické lavici.

Světelné zdroje jsou napájeny stabilizátorem napětí a frekvence doplněného regulačním snižovacím autotransformátorem pro plynulý nájezd síťového napětí na jmenovitou hodnotu napětí měřené halogenové žárovky. Veškeré použité přístroje při měření na fotometrické lavici jsou sepsány v tabulce.

Tabulka 3 - Seznam použitých přístrojů

Luxmetry	PRC Krochmann UV-Radiometer 211 (class L)
	PRC Krochmann Radiolux 111 (class A)
	Luxmetr Minolta T10 (class B)
Analyzátor sítě	Chauvin Arnoux C.A 8220
Stabilizátor napětí a frekvence	Pacific Smart Source 125-AMX
Regulační autotransformátor	Křížík RAT 10 - 0 - 250 V, 10 A
Fotometrická lavice s clonami	



Obrázek 39 - Schéma zapojení měřeného světelného zdroje

Přesné nastavení jmenovitých parametrů světelného zdroje umožňuje kalibrovaná objímka, kterou je fotometrická lavice vybavena. Kalibrovaná objímka zabezpečuje minimální přechodový odpor a umožňuje měření obvodových veličin přímo na přívodních kontaktech (závitu) světelného zdroje. Objímka je vybavena čtveřicí svorek, dvě svorky jsou napěťové pro připojení k elektrické síti a dvě jsou měřicí. V měřicích svorkách je po dobu měření připojen digitální analyzátor sítě, který udává velikost napětí přímo na světelném zdroji. Díky tomu lze upravit napájení světelného zdroje stabilizátorem napětí a frekvence na přesnou hodnotu jmenovitých parametrů. V případě, že by jako referenční údaj o napětí, byla brána hodnota nastavená na stabilizátoru, nebyl by světelný zdroj napájen svým jmenovitým napětím z důvodu napěťových úbytků v přívodních kabelech. Schéma zapojení přístrojů ukazuje [Obrázek 39](#).

Pro výpočet výsledných naměřených hodnot a nejistot měření jsou podstatné parametry použitých měřicích přístrojů. Potřebné parametry luxmetrů převzaté z datových listů výrobce daného zařízení uvádí [Tabulka 4](#).

Tabulka 4 - Přehled parametrů použitých luxmetrů

Výrobce	Minolta	PRC Krochmann	
		UV Radiometer 211	Radiolux 111
Model	Illuminance meter T 10	UV Radiometer 211	Radiolux 111
Chyba měření	2 %	2 %	1,5 %
Chyba rozlišení	± 1 digit	$\pm 0,1$ digitu	± 3 digity
Počet zobraz. číslic	4	8	4
Rozsah Přístroje	0,01 lx - 300 klx	0,001 lx - 200 klx	0,01 lx – 360 klx
Průměr fotočlánku	16,5 mm	12 mm	12 mm

6.2.2 Výpočet svítivosti normálů

Svítivost se vypočítá na základě platnosti čtvercového zákona ze vztahu (35.) pomocí měření osvětlenosti v definované vzdálenosti od světelného zdroje, jak již bylo popsáno v kapitole 2.4 resp. 3.2 věnující se měření svítivosti a měření na fotometrické lavici. Na fotometrické lavici o celkové délce 3 m jsem měřil osvětlenost ve vzdálenosti 3 m až 2 m od zdroje ve směru jeho vztažné svítivosti I_0 . Technické parametry dané výrobcem světelných zdrojů uvádí Tabulka 1.

Normál svítivosti 13-1

Normál, halogenová žárovka, pod označením 13 – 1 byl měřen následujícími přístroji, jejichž parametry uvádí Tabulka 4.

- Minolta Illuminance meter T10, třída přesnosti B
- PRC Krochmann UV-Radiometer 211, třída přesnosti L

Naměřené hodnoty pro výpočet svítivosti ve vztažném směru jsou v příloze P-1. S přístrojem *Minolta T 10* jsem naměřil výslednou průměrnou hodnotu svítivosti 429,46 cd. Přístrojem *PRC Krochmann UV-Radiometer 211* je průměrná hodnota svítivosti 427,52 cd.

S použitím vzorců pro výpočet dílčích standardních nejistot typu B v kapitole 5.1 jsem vypočítal dílčí nejistotu způsobenou nestabilitou světelného zdroje (45.) vlivem konečných rozměrů světelného zdroje (46.) a chybou použitého měřidla (47.) pro oba použité přístroje během měření. Dílčí nejistoty, na něž nemá použitý přístroj vliv, jsou vypočítány přímo v kapitole 5.1 věnující se rozboru nejistot. Výsledné dílčí nejistoty udává Tabulka 5.

Výpočet dílčích nejistot typu B pro měření s luxmetrem *T10* uvádí rovnice (65.), (66.), (67.) a pro přístroj *UV-Radiometr 211* pak rovnice (68.), (69.), (70.).

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{432,63}{426,57} - 1 \right| \cdot 100 = 0,8202 \% \quad (65.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,02 + 0,00825)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0690 \% \quad (66.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,1}{47,4} \right) \cdot 100 = 1,2768 \% \quad (67.)$$

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{429,42}{426,17} - 1 \right| \cdot 100 = 0,0336 \% \quad (68.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,02 + 0,006)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0585 \% \quad (69.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,0001}{49,22} \right) \cdot 100 = 1,1548 \% \quad (70.)$$

Tabulka 5 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-1

Normál 13-1			
dílčí nejistoty typu B		Illuminance meter T 10	UV-Radiometer 211
u_{BE}	chyba měřicího přístroje	1,2765	1,1548
u_{Bl}	nepřesnost určení vzdálenosti fotočl.-sv. zdroj	0,0140	0,0140
u_{Bo}	nepřesnost vyosením fotočlánku	0,0690	0,0690
u_{Bs}	nestabilita použitých zařízení	0,8202	0,0336
u_{Bb}	vliv konečných rozměrů světelného zdroje	0,0690	0,0585

Nejistota *typu A* a výsledná nejistota *typu B* pro měření s oběma přístroji se spočítá dle vzorce uvedeného v rovnici (39.) respektive (41.). Kombinovaná nejistota měření na obou použitých luxmetrech se spočítá dle vzorce (42.). Výsledky shrnuje [Tabulka 6](#).

Tabulka 6 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-1

Normál 13-1	\bar{I} [cd]	u_A [%]	u_B [%]	u_C [%]
Illuminance meter T 10	429,46	0,0670	1,5222	1,5236
UV-Radiometer 211	427,52	0,0366	1,2045	1,2051

Normál svítivosti 13-2

Normál, halogenová žárovka, pod označením 13 – 1 byl měřen následujícími přístroji, jejichž parametry uvádí [Tabulka 4](#).

- PRC Krochmann Radiolux 111, třída přesnosti A
- PRC Krochmann UV-Radiometer 211, třída přesnosti L

Naměřené hodnoty pro výpočet svítivosti ve vztáženém směru jsou v [příloze P-2](#). S přístrojem *PRC Krochmann Radiolux 111* jsem naměřil výslednou průměrnou hodnotu

svítivosti 406,06 cd. Přístrojem *PRC Krochmann UV-Radiometer 211* je průměrná hodnota svítivosti 407,98 cd.

Dílčí nejistoty typu B jsem spočítal obdobným způsobem jako v případě normálu 13-1 s využitím shodných vzorců. Výsledné dílčí nejistoty udává [Tabulka 7](#).

Výpočet dílčích nejistot typu B pro měření s přístrojem *Radiolux 111* uvádí rovnice (71.), (72.), (73.) a pro přístroj *UV-Radiometr 211* pak rovnice (74.), (75.), (76.).

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{412,22}{403,75} - 1 \right| \cdot 100 = 1,2112 \% \quad (71.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,02 + 0,006)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0585 \% \quad (72.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1,5}{100} + \frac{3 \cdot 0,01}{45,44} \right) \cdot 100 = 0,9041 \% \quad (73.)$$

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{410,67}{406,53} - 1 \right| \cdot 100 = 0,5880 \% \quad (74.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,02 + 0,006)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0585 \% \quad (75.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,0001}{46,89} \right) \cdot 100 = 1,1548 \% \quad (76.)$$

Tabulka 7 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-2

Normál 13-2			
dílčí nejistoty typu B	Radiolux 111	UV-Radiometer 211	
u_{BE}	chyba měřicího přístroje	0,9041	1,1548
u_{Bl}	nepřesnost určení vzdálenosti fotochl.-sv. zdroj	0,0140	0,0140
u_{Bo}	nepřesnost vyosením fotočlátku	0,0690	0,0690
u_{Bs}	nestabilita použitých zařízení	1,2112	0,5880
u_{Bb}	vliv konečných rozměrů světelného zdroje	0,0585	0,0585

Nejistoty měření oběma přístroji shrnuje následující [Tabulka 8](#).

Tabulka 8 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-2

Normál 13-2	\bar{I} [cd]	u_A [%]	u_B [%]	u_C [%]
Radiolux 111	407,98	0,0618	1,5159	1,5171
UV-Radiometer 211	406,06	0,0427	1,3011	1,3016

Normál svítivosti 13-3

Normál, halogenová žárovka, pod označením 13 – 1 byl měřen následujícími přístroji, jejichž parametry uvádí [Tabulka 4](#).

- Minolta luxmetr T10, třída přesnosti B
- PRC Krochmann UV-Radiometer 211, třída přesnosti L

Naměřené hodnoty pro výpočet svítivosti ve vztázném směru jsou v [příloze P-3](#). S přístrojem *Minolta T10* jsem naměřil výslednou průměrnou hodnotu svítivosti 1199,80 cd. Přístrojem *PRC Krochmann UV-Radiometer 211* je průměrná hodnota svítivosti 1214,65 cd.

Dílčí nejistoty typu B jsem spočítal obdobným způsobem jako v případě normálu 13-1 s využitím shodných vzorců. Výsledné dílčí nejistoty udává [Tabulka 9](#).

Výpočet dílčích nejistot typu B pro měření s luxmetrem *T10* uvádí rovnice (77.), (78.), (79.) a pro přístroj *UV-Radiometr 211* pak rovnice (80.), (81.), (82.).

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{1205,60}{1191,97} - 1 \right| \cdot 100 = 0,6602 \% \quad (77.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,015 + 0,00825)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0468 \% \quad (78.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,1}{131,9} \right) \cdot 100 = 1,1985 \% \quad (79.)$$

$$u_{Bs} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| \frac{1225,91}{1207,97} - 1 \right| \cdot 100 = 0,8574 \% \quad (80.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{2^2 + (0,015 + 0,006)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,0382 \% \quad (81.)$$

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,1}{131,9} \right) \cdot 100 = 1,1547 \% \quad (82.)$$

Tabulka 9 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-3

Normál 13-3			
dílčí nejistoty typu B		Illuminance meter T 10	UV-Radiometer 211
u_{BE}	chyba měřicího přístroje	1,1985	1,1547
u_{Bl}	nepřesnost určení vzdálenosti fotočl.-sv. zdroj	0,0140	0,0140
u_{Bo}	nepřesnost vyosením fotočlátku	0,0690	0,0690
u_{Bs}	nestabilita použitých zařízení	0,6602	0,8574
u_{Bb}	vliv konečných rozměrů světelného zdroje	0,0468	0,0382

Výsledky nejistot měření oběma přístroji jsou shrnuty v následující [Tabulce 10](#).

Tabulka 10 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-3

Normál 13-3	\bar{I} [cd]	u_A [%]	u_B [%]	u_C [%]
Illuminance meter T 10	1199,80	0,0362	1,3737	1,3753
UV-Radiometer 211	1214,65	0,0538	1,4423	1,4433

6.2.3 Výpočet výsledných hodnot svítivosti a kombinované nejistoty

Každý světelný zdroj jsem měřil dvěma na sobě nezávislými přístroji, a proto jsem obdržel ke každému normálu dvě výsledné hodnoty svítivosti ve vztažném směru (I_0) a k nim příslušnou kombinovanou nejistotu. Rekapitulaci výsledků uvádí [Tabulka 11](#). Podle rovnic (83.) a (84.) jsem vypočítal výslednou hodnotu vztažné svítivosti I_0 a celkové nejistoty dle vzorce (43.) s koeficientem rozšíření $k_r = 2$.

Tabulka 11 - Souhrn vypočítaných hodnot svítivosti a kombinovaných nejistot jednotlivých normálů

Normál	\bar{I}_0 [cd]	u_C [%]	přístroj
13-1	429,46	1,5236	Illuminance meter T10
	427,52	1,2051	Radiometr UV 211
13-2	407,98	1,3016	Radiometr UV 211
	406,06	1,5171	Radioluxmetr 111
13-3	1199,80	1,3753	Illuminance meter T10
	1214,65	1,4433	Radiometr UV 211

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \bar{I}_i = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^2 \bar{I}_i \quad [\text{cd}] \quad (83.)$$

$$U = k_r \cdot u_c = k_r \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{c_i}^2} \quad [\%] \quad (84.)$$

Tabulka 12 - Výsledné hodnoty vztažné svítivosti normálů svítivosti

normál	\bar{I}_0 [%]	u_c [%]	$U_{(kr=2)}$ [%]
13-1	428,49	1,94	3,89
13-2	407,02	2,00	4,00
13-3	1207,23	1,99	3,99

Výsledky měření normálů svítivosti

Hodnoty svítivosti se zaokrouhlují na jednotky (včetně nejistot), tak jak to uvádí [Tabulka 21](#).

➤ Normál 13-1

$$I_0 = 428,49 \text{ cd} \pm 3,89 \% \quad T_c = 3\,000 \text{ K}$$

➤ Normál 13-2

$$I_0 = 407,02 \text{ cd} \pm 4,00 \% \quad T_c = 3\,000 \text{ K}$$

➤ Normál 13-3

$$I_0 = 1\,207,23 \text{ cd} \pm 3,99 \% \quad T_c = 2\,900 \text{ K}$$

6.3 Příprava normálu světelného toku

Žárovky vybrané pro tvorbu odvozených normálů světelného toku jsem podrobil procesu zahoření. Vybrané světelné zdroje jsem rovněž jako normály svítivosti opatřil jedinečným identifikačním číslem pro snadné rozpoznání a z důvodu vedení evidence záznamů o měření a jejich používání. Parametry světelných zdrojů uvádí [Tabulka 2](#).

Před započítím měření čar svítivosti na goniofotometru jsem nejprve přes kouřový filtr prozkoumal u rozsvícených žárovek homogenitu světlorozptylové vrstvy, zda není nikterak

narušená. Po provedené kontrole světelných zdrojů jsem přistoupil k měření čar svítivosti, respektive osvětlenosti prostřednictvím luxmetru umístěného na rameni goniofotometru. Žárovky jsem před zahájením přesného měření rozložení světelného toku orientačně proměřil v podélné ose světelného zdroje ($A - \alpha$ rovině), zda nevykazují rotační nesymetrii v distribuci světelného toku. U komerčně vyráběných žárovek, které nejsou určeny pro optické účely, je mírná nesymetrie vyzařování zcela normální.

Po změření čar svítivosti goniofotometrem a výpočtu světelného toku jednotlivých zdrojů metodou pásmových toků (kapitola 2.3) jsem změřil jejich světelný tok v kulovém integrátoru a provedl kontrolu naměřených hodnot světelných toků oběma metodami, zda se neliší o více než 2 %. Na základě splnění této podmínky jsem přistoupil k závěrečným výpočtům světleného toku měřených světelných zdrojů.

6.3.1 Použité přístroje

Světelné zdroje jsou napájeny stabilizátorem napětí a frekvence doplněným regulačním snižovacím autotransfornátorem pro plynulý nájezd síťového napětí na jmenovitou hodnotu napětí měřené halogenové žárovky. Schéma a uspořádání obvodu je identické, jako v případě měření normálů svítivosti (Obrázek 39). K měření čar svítivosti byl použit luxmetr *Minolta T10*, jehož parametry uvádí Tabulka 4. K měření světelného toku v kulovém integrátoru byl použit integrovaný fotometr *OSRAM CENTRA V(λ) Si-Photometer*.

6.3.2 Výpočet světelného toku normálů z naměřených čar svítivosti

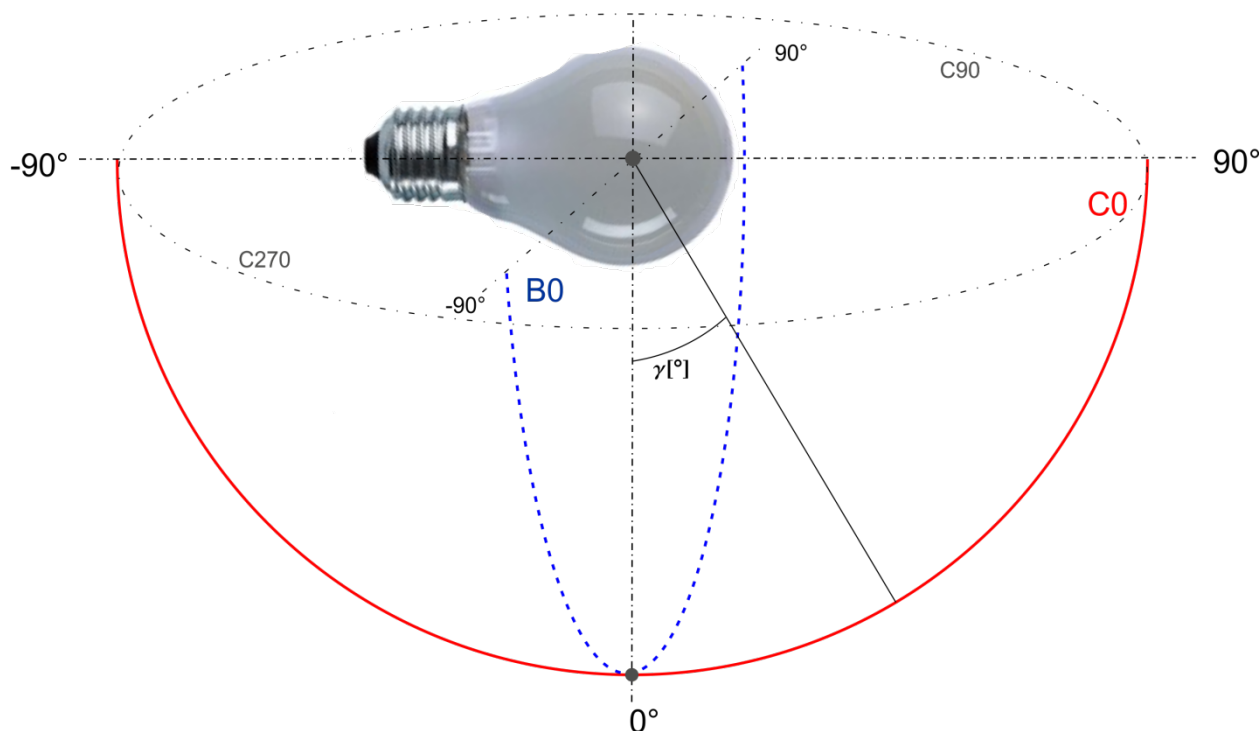
Svítivost se vypočítá na základě platnosti čtvercového zákona ze vztahu (35.) pomocí měření osvětlenosti v konstantní vzdálenosti od světelného zdroje, jak již bylo popsáno v kapitole věnující se měření světelného toku 2.3 a měření na goniofotometru 3.3.

Po ověření symetrického rozložení svítivosti, proměřením světelného zdroje v rovině $B0$ v systému $B - \beta$ a ve 4 rovinách ($C0, C90, C180$ a $C270$) systému $C - \gamma$ stačilo nadále provádět měření čar svítivosti v pouze jedné rovině ($C0$). Naměřená data svítivosti z goniofotometru v jednotlivých C rovinách se musí zkorigovat na stejnou hodnotu svítivosti ve

směru k nadiru ($\gamma = 0^\circ$) dle průměrné hodnoty naměřené v rovině $B0$, která by odpovídala svítivosti v tomto směru u ideálního světelného zdroje s rotačně symetrickým rozložením svítivosti okolo podélné osy. Jedná se standardní postup symetrizace (průměrování) čar svítivosti jednotlivých C rovin, který je využíván výrobcí světelných zdrojů (a svítidel) při tvorbě datových listů a polárních diagramů svítivosti, dnes zpravidla v elektronické podobě. Elektronické soubory prostorového rozložení svítivosti, tzv. eulumdata, jsou nezbytná pro návrh osvětlovacích soustav či simulaci chování světelného zdroje v konkrétním svítidle. Symetrizace křivky svítivosti v systému souřadnic $C - \gamma$ lze provést dle vzorce (85.) s využitím rozložení známého rozložení svítivosti kolem podélné osy světelného zdroje (roviny $A0$). Situaci objasňuje schematický [Obrázek 40](#).

Roviny $C0, C90, C180$ a $C270$ systému $C - \gamma$ byly proměřeny jen u normálu 13-4 ([Obrázek 41](#)). Na základě naměřených křivek svítivosti lze tvrdit, že světelný zdroj má symetrické rozložení světelného toku a proto je možné u normálů 13-5 a 13-6 (normály jsou stejného typu, viz [Tabulka 2](#)) měřit čáry svítivosti jen v jediné C -rovině.

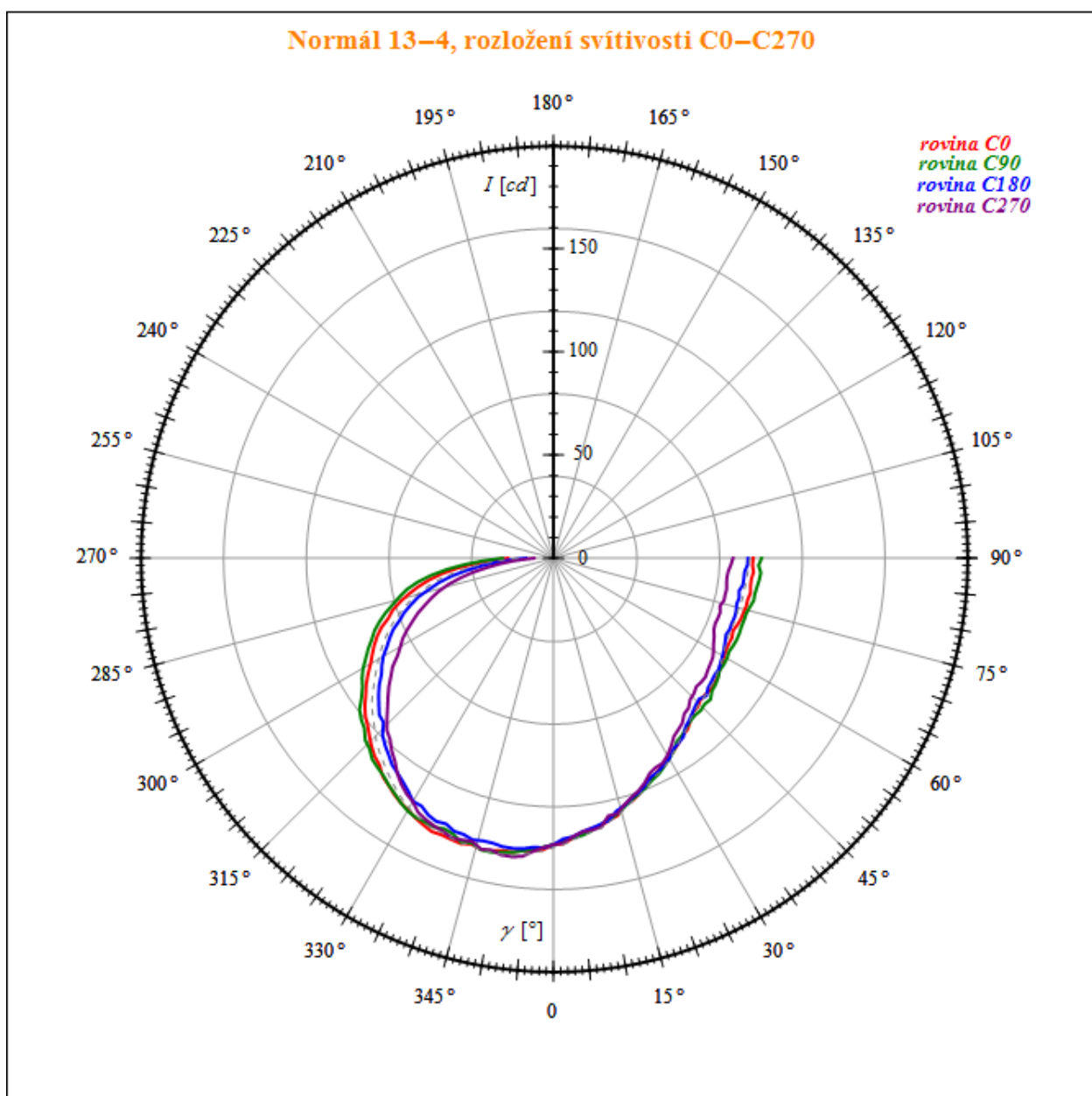
$$I_{CX(\gamma)k} = I_{CX(\gamma)} \cdot \frac{\overline{I_{A0(\alpha)}}}{I_{CX(0)}} = I_{CX(\gamma)} \cdot \frac{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{A0(\alpha)i}}{I_{CX(0)}} \quad [cd] \quad (85.)$$



Obrázek 40 - Znárodnění měření čar svítivosti v jednotlivých fotometrických polorovinách

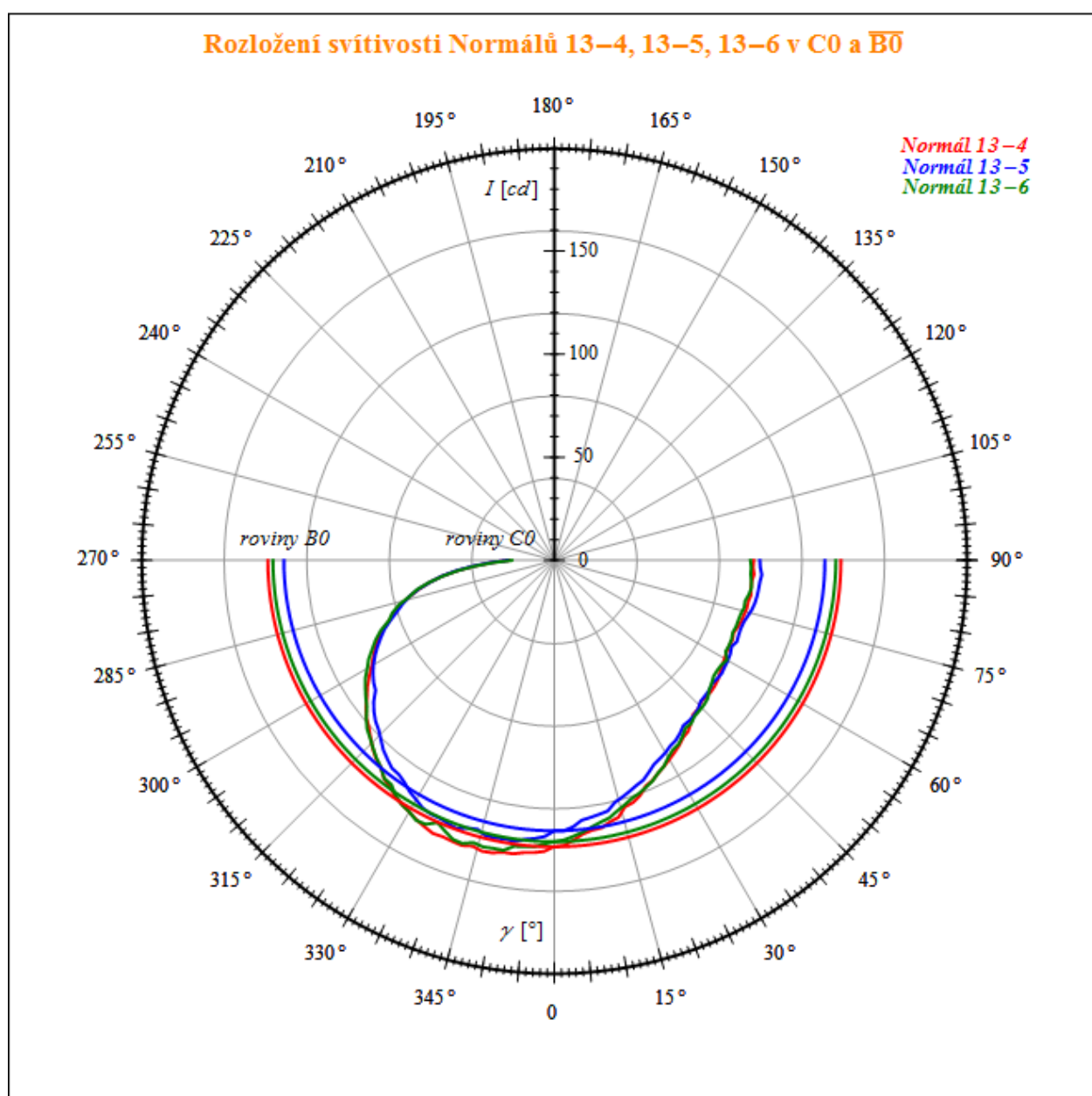
Normál světelného toku 13-4

Naměřená data z goniofotometru jsou uvedena v příloze P4 a následný výpočet světelného toku z prostorového rozložení svítivosti metodou pásmových toků (kapitola 2.3) uvádí příloha P8. Rozložení čar svítivosti normálu 13-4 v polárním diagramu znázorňuje Obrázek 42. Výsledná vypočítaná hodnota světelného toku z měření na goniofotometru je $\Phi_{gofo} = 1\,517,33\text{ lm}$.



Obrázek 41 - Polární diagram rozložení svítivosti normálu 13-4 ve všech měřených C-rovinách

Nejistota měření čar svítivosti se spočítá dle vzorce (60.) uvedeného v kapitole věnované nejistotám měření na goniofotometru 5.2.1. Z této kapitoly rovněž vyplývají hodnoty dosažené za jednotlivé dílčí nejistoty do rovnice (88.). Nejistota způsobená chybou měřicího přístroje (luxmetr Minolta T10) vyjadřuje rovnice (86.). Dílčí nejistota zapříčiněná konečnými rozměry světelného zdroje je vypočítána v rovnici (87.). Hodnota výsledné nejistoty (88.) je totožná pro normály 13-4, 13-5 a 13-6 z důvodu identických parametrů a shodného způsobu měření jejich světelného toku.



Obrázek 42 - Polární diagram čar svítivosti normálů světelného toku 13-4; 13-5; 13-6

$$u_{BE} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,1}{5,35} \right) \cdot 100 = 1,263 \% \quad (86.)$$

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{2}{\sqrt{2^2 + (0,0385 + 0,00825)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,047 \% \quad (87.)$$

$$\begin{aligned} u_{C_{gof_o}} &= \sqrt{u_{B_Y}^2 + u_{B_O}^2 + u_{B_I}^2 + u_{B_E}^2 + u_{B_b}^2 + u_{B_S}^2} = \\ &= \sqrt{0,77^2 + 0,03^2 + 0,29^2 + 1,26^2 + 0,05^2 + 0,5^2} = 1,589 \% \end{aligned} \quad (88.)$$

Normál světelného toku 13-5

Naměřená data z goniometru jsou uvedena v příloze P5 a následný výpočet světelného toku z prostorového rozložení svítivosti metodou pásmových toků ([kapitola 2.3](#)) uvádí příloha P9. Rozložení čar svítivosti normálu 13-5 v polárním diagramu ukazuje [Obrázek 42](#). Výsledná vypočítaná hodnota světelného toku z měření na goniometru je $\Phi_{gof_o} = 1\,484,15\text{ lm}$.

Nejistota měření čar svítivosti se vypočítá obdobným způsobem, ze stejných vzorců jako v případě ostatních normálů světelného toku, tj. (86.), (87.), (88.) a je totožná jako v případě normálu 13-4. ($u_{C_{gof_o}} = 1,589\%$)

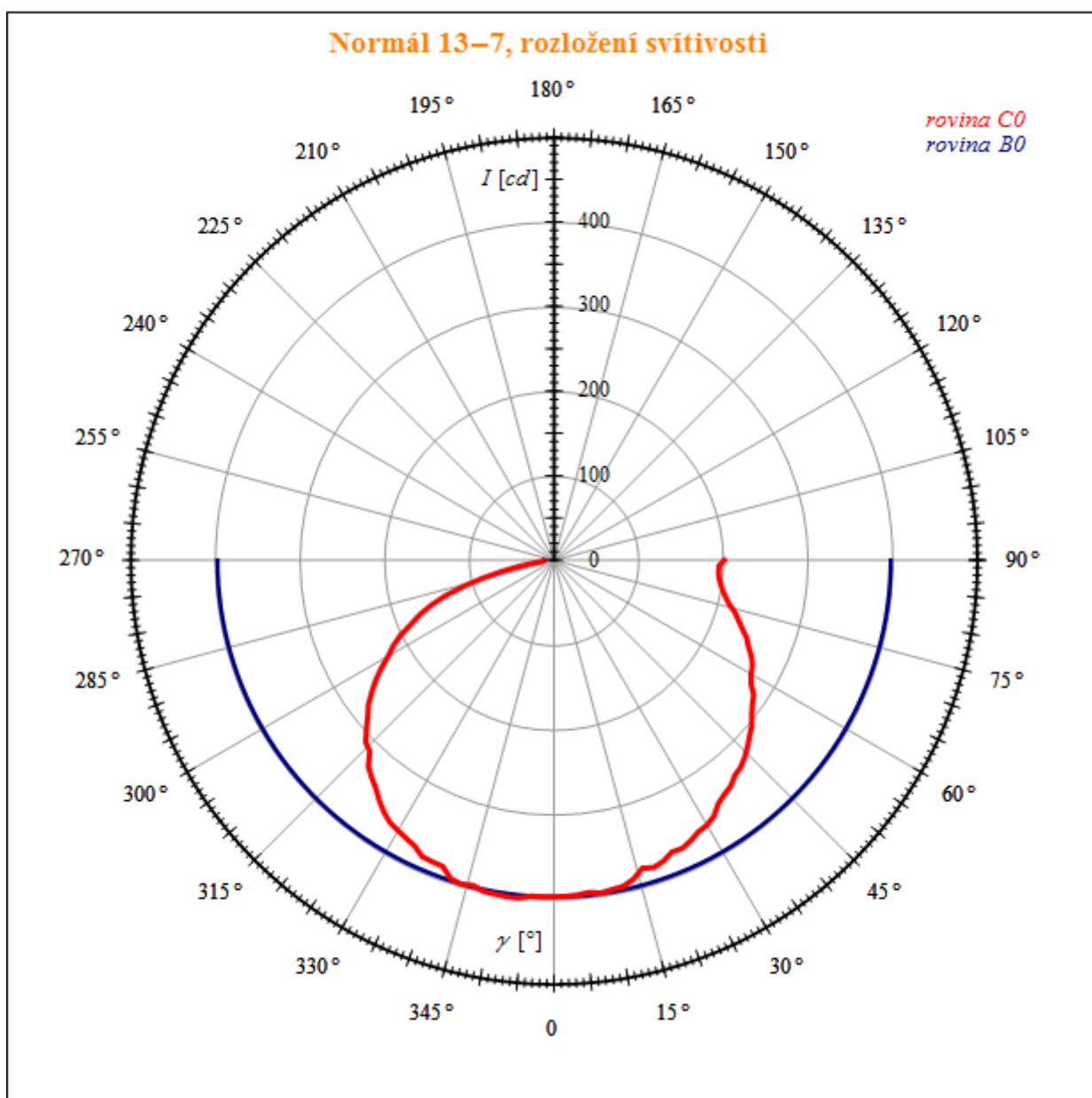
Normál světelného toku 13-6

Naměřená data z goniometru jsou uvedena v příloze P6 a následný výpočet světelného toku z prostorového rozložení svítivosti metodou pásmových toků ([kapitola 2.3](#)) uvádí příloha P10. Rozložení čar svítivosti normálu 13-6 v polárním diagramu zobrazuje [Obrázek 42](#). Výsledná vypočítaná hodnota světelného toku z měření na goniometru je $\Phi_{gof_o} = 1\,527,88\text{ lm}$.

Nejistota měření čar svítivosti se vypočítá obdobným způsobem, ze stejných vzorců jako v případě ostatních normálů světelného toku, tj. (86.), (87.), (88.) a je totožná jako v případě normálu 13-4. ($u_{C_{gof_o}} = 1,589\%$)

Normál světelného toku 13-7

Naměřená data z goniofotometru jsou uvedena v příloze P6 a následný výpočet světelného toku z prostorového rozložení svítivosti metodou pásmových toků (kapitola 2.3) uvádí příloha P11. Rozložení čar svítivosti normálu 13-7 v polárním diagramu ukazuje Obrázek 43. Výsledná vypočítaná hodnota světelného toku z měření na goniofotometru je $\Phi_{gofo} = 4\,279,01\text{ lm}$.



Obrázek 43 - Polární diagram čar svítivosti normálu světelného toku 13-7

Nejistota měření čar svítivosti se vypočítá obdobným způsobem, ze stejných vzorců jako v případě ostatních normálů světelného toku, tj. (86.), (87.), (88.). Výsledná nejistota se od

předchozích normálů světelného toku odlišuje z důvodu jinak velké dílčí nejistoty vlivem konečných rozměrů světelného zdroje (u_{Bb}), jejíž hodnota je vypočítaná z rovnice (89.). Celková nejistota normálu 13-7 se rovná $u_{C_{gof o}} = 1,584 \%$, což je téměř shodné s ostatními normály světelného toku.

$$u_{Bb} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left| 1 - \left(\frac{2}{\sqrt{2^2 + (0,0375 + 0,00825)^2}} \right)^3 \right| \cdot 100 = 0,045 \% \quad (89.)$$

Tabulka 13 - Přehled dílčích nejistot normálů svítivosti - měření na goniofotometru

Měření na goniofotometru		normály	
dílčí nejistoty typu B		13-4, 13-5, 13-6	13-7
u_{BE}	chyba měřicího přístroje	1,263	1,263
u_{Bl}	nepřesnost určení vzdálenosti fotochl.-sv. zdroj	0,290	0,290
u_{Bo}	nepřesnost vyosením fotočlánku	0,030	0,030
u_{BS}	nestabilita použitých zařízení	0,500	0,500
u_{Bb}	vliv konečných rozměrů světelného zdroje	0,057	0,045
$u_{B\gamma}$	nepřesnost nastavení úhlu ramene	0,770	0,770

Tabulka 14 - Rekapitulace výsledných hodnot světelného toku a nejistot pro měření na goniofotometru

Dílčí výsledky goniofotometr		
normál	$\Phi_{gof o} [cd]$	$u_{B_{gof o}} [\%]$
13-4	1517,33	1,59
13-5	1484,15	1,59
13-6	1527,88	1,59
13-7	4279,01	1,58

6.3.3 Výpočet světelného toku normálů z naměřených dat v kulovém integrátoru

Výsledný světelný tok měřený v kulovém integrátoru se vypočítá dle vztahu (36.) uvedeného v kapitole 3.4 týkající se měření v Ulbrichtově kouli. Naměřené hodnoty, které vstupují do výpočtu výsledného světelného toku, zachycuje Tabulka 16. Vypočítané hodnoty světelného toku z naměřených údajů shrnuje Tabulka 17.

Světelný tok normálů 13-4, 13-5 a 13-6 byl měřen pomocí laboratorního normálu světelného toku „413“, normál 13-7 byl měřen s pomocí laboratorního normálu „Č.3“. Světelnětechnické parametry normálů uvádí Tabulka 15. Korekční žárovka se nastavuje na

hodnotu napětí U_k , při němž na hlavici fotometru dopadá stejné množství světelného záření (hodnota E_{kN}), jako při rozsvíceném normálu (E_N). Tato podmínka se dodržuje jen v případě, že to dovoluje maximální jmenovité napětí korekční žárovky. Hodnota napětí U_k zůstává konstantní po dobu měření hodnot E_{kZ} . Hodnoty naměřeného optického výkonu spolu s naměřenou hodnotou U_k zaznamenává **Tabulka 16**. Při měření s *normálem* 413 bylo napětí na korekční žárovce udržováno na hodnotě $U_k = 167,5 V$, při měření s *normálem* Č. 3 bylo napětí $U_k = 187 V$.

Tabulka 15 - Parametry laboratorních normálů světelného toku použitých při měření v kulovém integrátoru

Parametry použitých referenčních normálů		
Normál	413	Č. 3
$U_n [V]$	120	220
$I_n [A]$	0,763	0,855
$P_n [W]$	100	188
$\Phi_n [lm]$	1262	1838

Tabulka 16 - Naměřené hodnoty optického výkonu v kulovém integrátoru

Naměřené hodnoty					
normál	$E_{kZ} [\mu W]$	$E_Z [\mu W]$	$E_N [\mu W]$	$E_{kN} [\mu W]$ při napětí $U_k [V]$	
13-4	106,2	126,2	105,9	105,8	167,5
13-5	106,3	123,6			
13-6	105,5	123,8			
13-7	103,4	384	167,9	104,4	187

Tabulka 17 - Naměřené hodnoty světelného toku jednotlivých normálů světelného toku v kulovém integrátoru

Dílní výsledky měření v kulovém integrátoru		
normál	$\Phi_{KI} [lm]$	$u_{BKI} [%]$
13-4	1498,25	2,55
13-5	1466,00	
13-6	1479,51	
13-7	4244,30	

Tabulka 18 - Naměřené hodnoty elektrických parametrů normálů světelného toku

normály	U [V]	I [A]	P [W]
13-4	230	0,4369	100,48
13-5	230	0,4374	100,60
13-6	230	0,4370	100,52
13-7	230	1,0148	233,40

6.3.4 Výpočet výsledných hodnot světelného toku a kombinované nejistoty

Výsledná hodnota světelného toku odvozených normálů se určí jako průměrná hodnota (90.) z výsledků naměřených goniofotometrem a kulovým integrátorem. Hodnoty světelného toku připravovaných normálů měřených pomocí goniofotometru a kulového integrátoru se od sebe nesmí odlišovat o více jak 2 % (jak již bylo řečeno v kapitole 2.3). Procentuální odchylka naměřených hodnot se vypočítá dle vztahu (91.). Výsledný vypočítaný světelný tok všech normálů shrnuje Tabulka 20.

Tabulka 19 - Rekapitulace dílčích výsledků normálů světelného toku

normál	$\Phi_{gof\phi}$ [lm]	Φ_{KI} [lm]	$\Delta\phi$ [%]	Φ_n [lm] (údaj výrobce)
13-4	1517,33	1498,25	1,26	1480
13-5	1484,15	1466,00	1,22	
13-6	1527,88	1479,51	3,17	
13-7	4279,01	4244,30	0,81	4210

$$\Phi = \frac{1}{2} \cdot (\Phi_{gof\phi} + \Phi_{KI}) \quad [lm] \quad (90.)$$

$$\Delta\phi = \left| 1 - \frac{\Phi_{KI}}{\Phi_{gof\phi}} \right| \cdot 100\% \quad [\%] \quad (91.)$$

Výsledná rozšířená celková nejistota (koeficient rozšíření $k_r = 2$) se spočítá jako geometrický průměr (92.) z celkových nejistot vzniklých při měření na obou zařízeních.

$$U = k_r \cdot u_B = k_r \cdot \sqrt{u_{B_{gof\phi}}^2 + u_{B_{KI}}^2} \quad [\%] \quad (92.)$$

Z vypočítaných hodnot světelného toku jednotlivých normálů (Tabulka 19) je vidět, že v případě normálu 13-6 se hodnota světelného toku naměřená pomocí goniofotometru od

hodnoty naměřené kulovým integrátorem vzájemně odlišuje o více než 2 %, jeho světelný tok tak nelze stanovit s přesností dostatečnou pro laboratorní měření světelného toku.

Tabulka 20 - Výsledné hodnoty normálů světelného toku

normál	Φ [lm]	u_B [%]	$U_{(kr=2)}$ [%]
13-4	1507,79	3,01	6,02
13-5	1475,07	3,01	6,02
13-6	1503,70 ⁶	---	---
13-7	4261,66	3,00	6,00

Výsledky měření normálů světelného toku

Výsledné hodnoty světelného toku se obvykle zaokrouhlují na desítky lumenů, pro laboratorní účely se zaokrouhlují na jednotky, tak jak to uvádí [Tabulka 22](#).

➤ Normál 13-4

$$\Phi = 1\,507,79\text{ lm} \pm 6,02\%$$

$$P = 100,48\text{ W}$$

➤ Normál 13-5

$$\Phi = 1\,475,07\text{ lm} \pm 6,02\%$$

$$P = 100,60\text{ W}$$

➤ Normál 13-6

$\Phi \approx 1\,503,70\text{ lm}$ → světelný zdroj není vhodný pro normál světelného toku

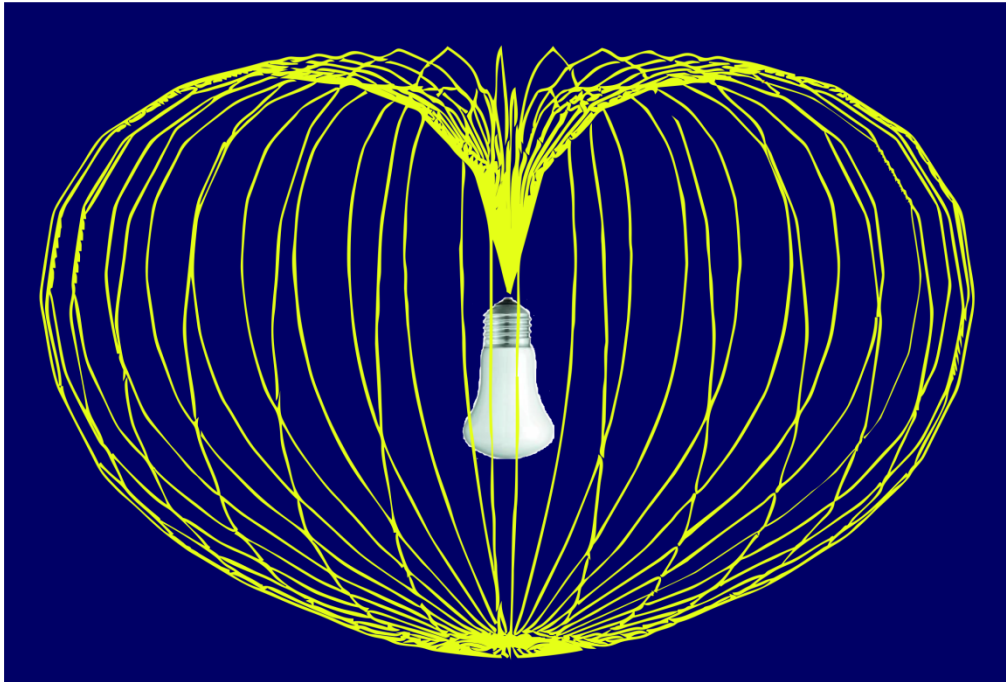
$$P = 100,52\text{ W}$$

➤ Normál 13-7

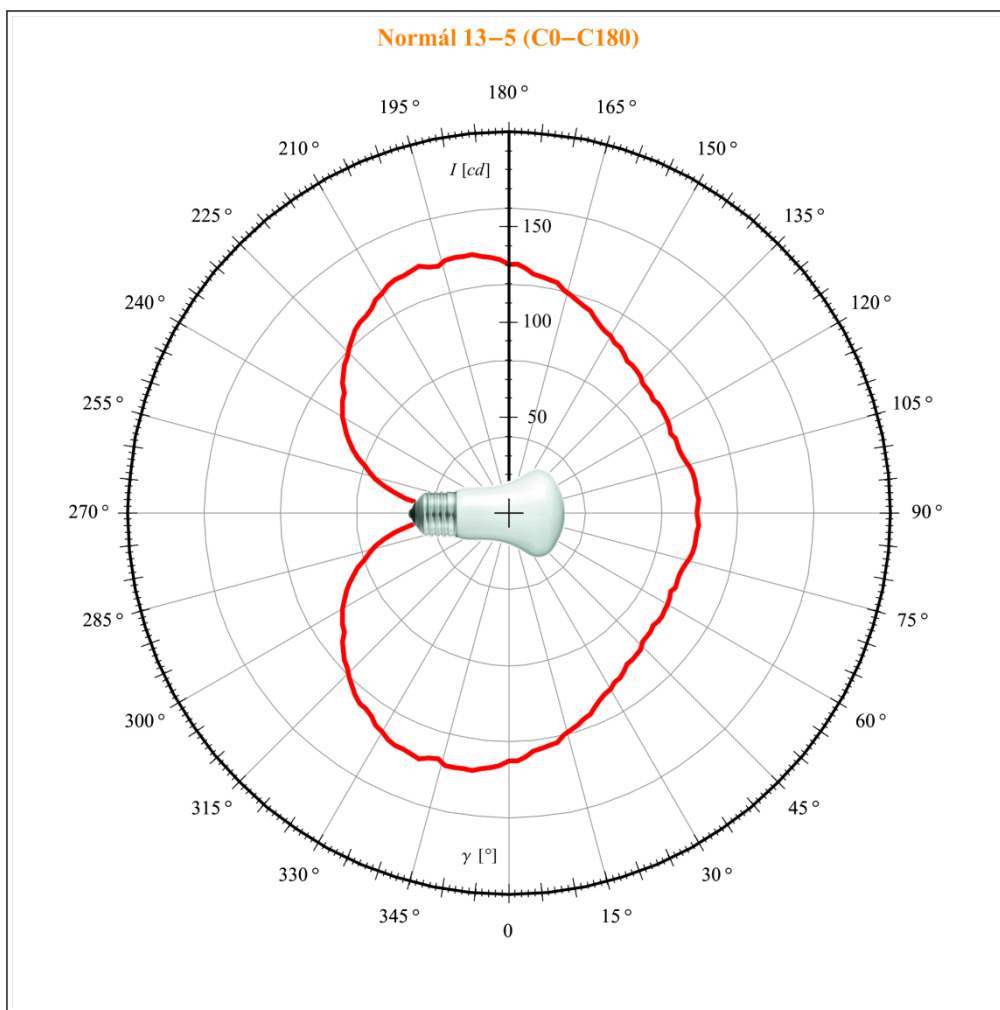
$$\Phi = 4\,261,66\text{ lm} \pm 6,00\%$$

$$P = 233,40\text{ W}$$

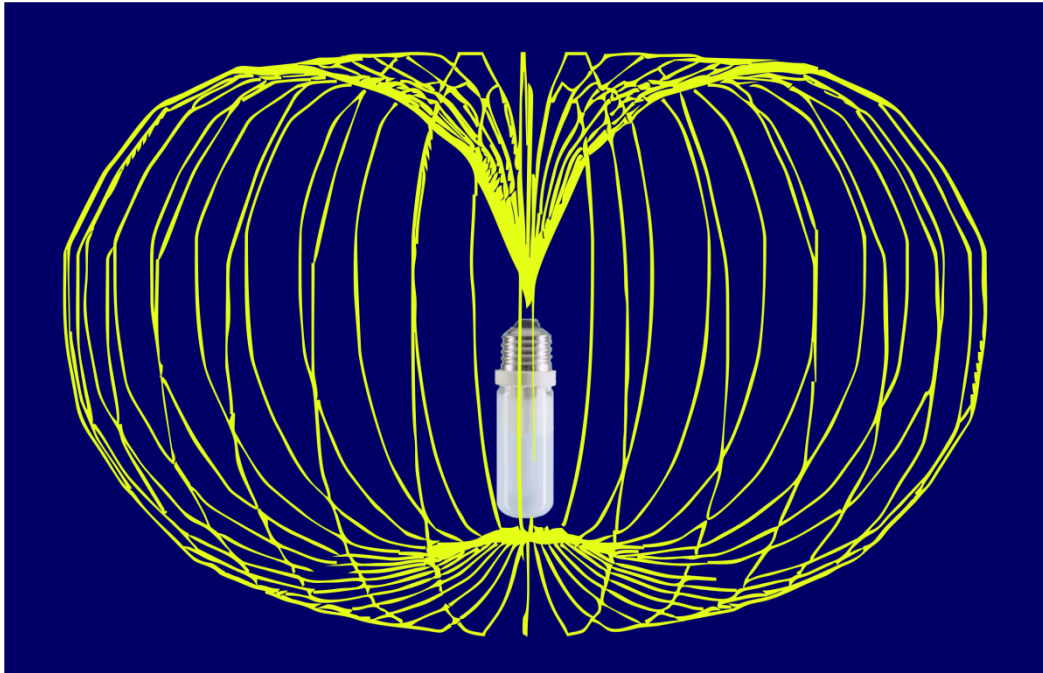
⁶ Světelný tok normálu 13-6 je určen jen orientačně. Nevyhovuje podmínce: $\left|1 - \frac{\Phi_{KI}}{\Phi_{gofa}}\right| \cdot 100\% \leq 2\%$



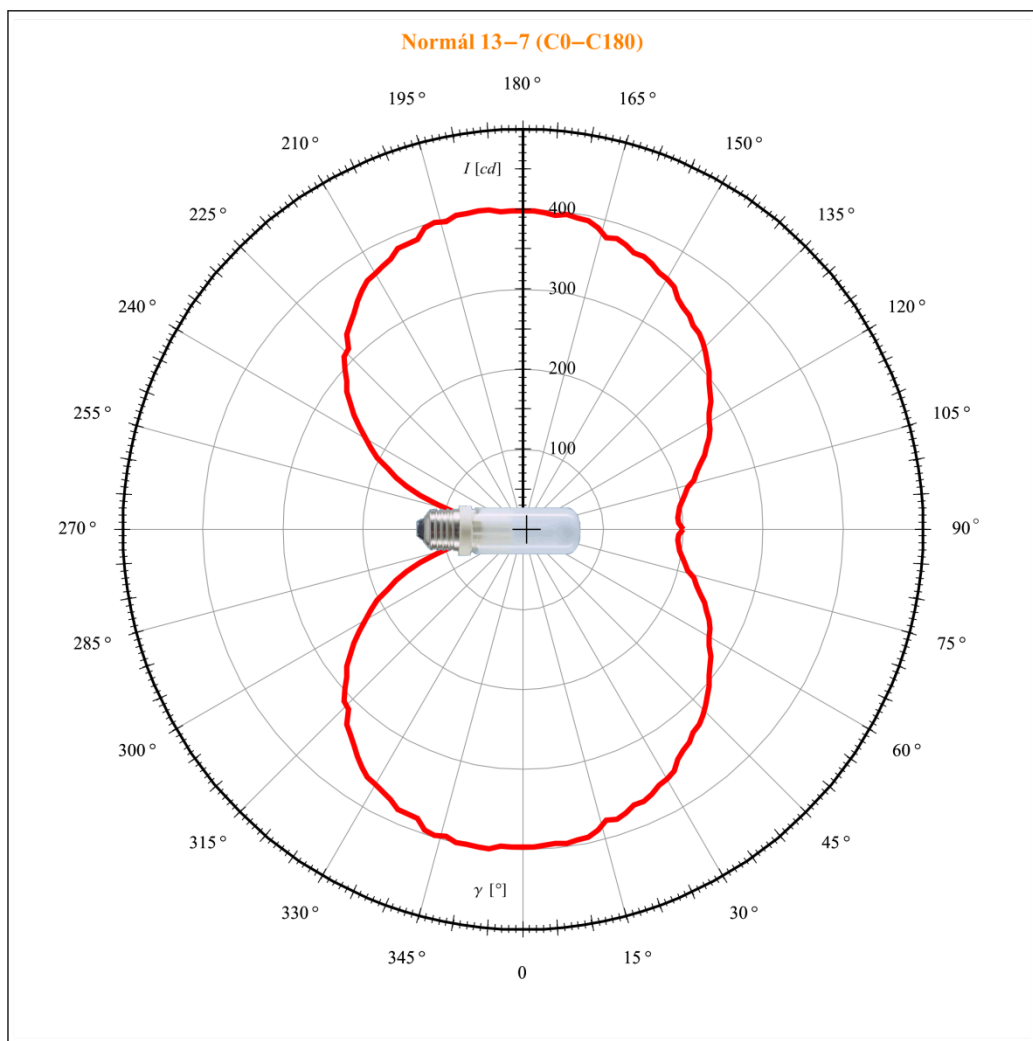
Obrázek 44 - Prostorová charakteristika vyzařování normálů světelného toku 13-4, 13-5 a 13-6



Obrázek 45 - Polární diagram svítivosti v řezu rovinou C0-C180 normálu světelného toku 13-5 (obdobně platí pro normály 13-4 a 13-6)



Obrázek 46 - Prostorová charakteristika vyzařování normálu světelného toku 13-7



Obrázek 47 - Polární diagram svítivosti v řezu rovinou C0-C180 normálu světelného toku 13-7

7. Závěr, vyhodnocení výsledků

Připravované světelné normály odvozené od vybraných komerčně vyráběných světelných zdrojů (halogenových žárovek s určitými specifické konstrukce) jsem pečlivě proměřil dle všech náležitostí norem [5] a [6].

7.1 Normály svítivosti

Světelné zdroje určené pro tvorbu odvozených normálů svítivosti ([Tabulka 1](#)) jsem měřil na fotometrické lavici dvěma nezávislými luxmetry. Na základě čtvercového zákona osvětlenosti jsem vypočítal svítivost normálů 13-1, 13-2 a 13-3 v definovaném směru vztažné svítivosti I_0 . Ke všem vzorkům jsem stanovil dílčí nejistoty měření typu *B*, vypočítal nejistotu měření typu *A* a následně určil celkovou rozšířenou nejistotu měření. Nejistota měření se pro všechny tři normály pohybuje kolem 4 %, což je velmi dobrý výsledek. Ve fotometrii se obecně považuje výsledek světelnětechnické veličiny, jehož rozšířená nejistota je $U \leq 8 \%$, za přesné měření.

Všechny tři světelné zdroje vybrané pro tvorbu odvozených normálů svítivosti jsou pro tento účel vhodné a použitelné, jejich výsledky shrnuje následující [Tabulka 21](#). Pro laboratorní měření je dostačující zaokrouhlovat svítivost normálů ve vztažném směru na celá čísla. Ačkoliv normál 13-1 a normál 13-2 byly odvozeny od typově shodných žárovek, liší se jejich svítivost ve vztažném směru přibližně o 0,5 %. To způsobují neparné odlišnosti způsobené v procesu výroby jako je například rozdíl v uchycení vlákna nebo drobná odlišnost tlaku plynné náplně baňky.

Tabulka 21 - Výsledky - normály svítivosti

normál	I_0 [<i>cd</i>]	T_c [<i>K</i>]	U_n [<i>V</i>]
13-1	429 ± 4 %	3 000	230
13-2	407 ± 4 %	3 000	230
13-3	1 207 ± 4 %	2 900	230

7.2 Normály světelného toku

Světelný tok odvozených normálů světelného toku z třech opálových halogenových žárovek a jedné matované halogenové žárovky ([Tabulka 2](#)) jsem ověřil měřením čar svítivosti na

goniofotometru. Tato metoda je časově náročná, zato značně přesná. Světelný tok z naměřených údajů prostorového rozložení svítivosti jsem vypočítal pomocí metody pásmových toků. Pro ověření a dostatečnou vypovídající přesnost naměřených výsledků jsem světelný tok připravovaných normálů změřil v kulovém integrátoru s použitím referenčních laboratorních normálů světelného toku.

V případě tří normálů lze konstatovat, že se pro účel tvorby nových normálů jsou světelné zdroje vyhovující. Normály 13-4, 13-5 a 13-7 splnily podmínku rozdílu 2 % z naměřených hodnot světelného toku na obou použitých přístrojích. Normál 13-6 tuto nutnou podmínku nesplnil, a tudíž u něj nemůže být určen světelný tok s dostatečnou přesností. Pro tento světelný zdroj není tak možné použít výslednou rozšířenou nejistotu měření určenou shodně pro všechny normály. Výsledné světelné toky shrnuje [Tabulka 22](#).

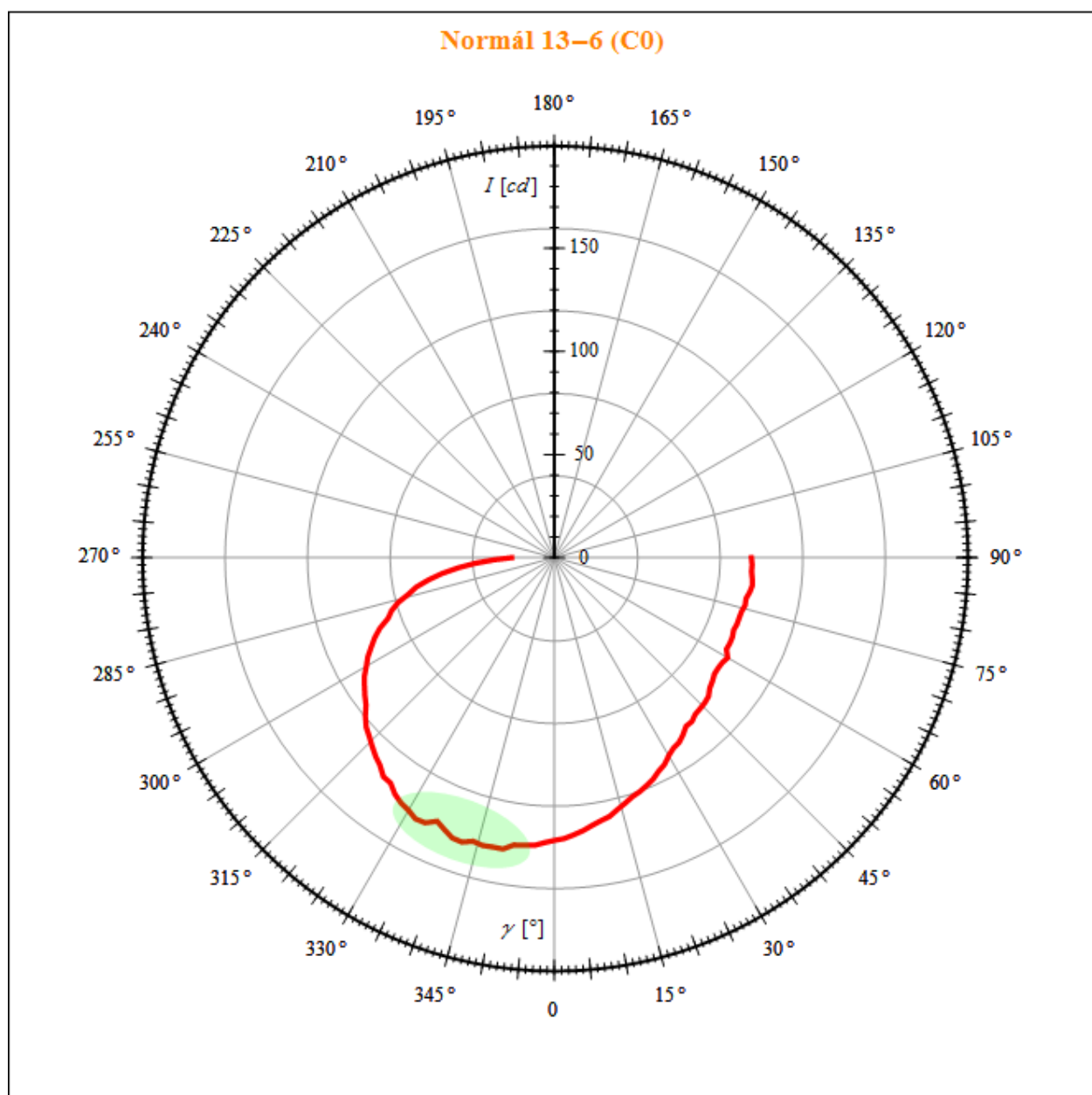
Světelný zdroj 13-5 má výsledný světelný tok menší, než garantuje výrobce ($-0,3\%$). Naměřená hodnota světelného toku oběma použitými zařízeními vychází velmi podobně (rozdíl naměřených hodnot je $1,2\%$). Světelný tok naměřený u tohoto zdroje byl ze skupiny tří shodných typů žárovek nejnižší. Snížený světelný tok nemůže být zapříčiněn podpětím či menším žhavením vlákna v důsledku menší hodnoty procházejícího proudu žárovkou (viz [Tabulka 18](#)). Jediným možným vysvětlením zůstává úbytek světelného toku v důsledku pohlčení v tlustším nánosů světlorozptylující vrstvy na vnitřní straně žárovkové baňky.

Halogenová žárovka s označením 13-6 není vhodná na využití jako normál světelného toku v laboratoři. Naměřený světelný tok v Ulbrichtově kouli vyšel o $3,17\%$ nižší než tok změřený pomocí goniofotometru. Pro světelný zdroj 13-6 není tak možné použít výslednou rozšířenou nejistotu měření určenou shodně pro všechny normály. Tato žárovka má světlorozptylující vrstvu (SiO_2) nanesenou nerovnoměrně, překrývá se začátek a konec nanášení vrstvy. Při prosvětlení žárovkové baňky lze vidět toto místo s výrazně tlustší vrstvou naneseného oxidu křemičitého. Oblast s touto nehomogenitou tvoří souvislý pás, který pochází z výrobního procesu, kdy je vnitřní stěna baňky postupně pokrývána koloidním oxidem křemičitým v elektrostatickém poli. Při srovnání s ostatními měřenými žárovkami stejného typu je popisovaný jev u této žárovky nejviditelnější. Nehomogenitu světlorozptylující vrstvy lze vidět i z výsledné křivky svítivosti (projevuje se jako výrazný „zub“) viz [Obrázek 48](#).

Tabulka 22 - Výsledky - normály světelného toku

normály	ϕ [lm]	P [W]	U_n [V]
13-4	$1\,508 \pm 6\%$	101	230
13-5	$1\,475 \pm 6\%$	101	230
13-6*	$\sim 1\,504$	101	230
13-7	$4\,262 \pm 6\%$	233	230

* není použitelný jako normál světelného toku



Obrázek 48 - Polární diagram čar svítivosti normálu světelného toku 13-6

Výsledkem práce jsou tři kusy vyhotovených normálů svítivosti a tři kusy normálů světelného toku, které vyhověly všem stanoveným podmínkám pro odvozené světelné normály z komerčně produkováných světelných zdrojů (halogenových žárovek) a jsou tudíž vhodné pro laboratorní měření. Parametry vyhotovených normálů pro laboratoř fotometrie na FEL uvádím pro přehlednost v závěrečné tabulce - [Tabulka 23](#).

Tabulka 23 - Souhrnná tabulka parametrů všech vytvořených světelných normálů

normály svítivosti					
označení	jmenovité napětí	vztažná svítivost ⁷	teplota chromatičnosti	doba života	
	U_n [V]	I_0 [cd]	T_c [K]	T [h]	
13-1	230	$429 \pm 4 \%$	3 000	2 000	
13-2		$407 \pm 4 \%$	3 000	2 000	
13-3		$1\,207 \pm 4 \%$	2 900	2 000	
normály světelného toku					
označení	jmenovité napětí	Jmenovitý světelný tok	příkon	proud	doba života
	U_n [V]	Φ_N [lm]	P [W]	I [A]	T [h]
13-4	230	$1\,508 \pm 6 \%$	101	0,437	2 000
13-5		$1\,475 \pm 6 \%$	101	0,437	2 000
13-7		$4\,262 \pm 6 \%$	233	1,015	2 000

⁷ Směr vztažné svítivosti je vyznačen přímo na světelném normálu.

8. Citovaná literatura

- [1] **HABEL, Jiří a kolektiv.** Světlo a osvětlování. 1. Praha : FCC Public, 2013. str. 624. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] **HABEL, Jiří.** Osvětlování. Praha : ČVUT, 1998. str. 330. ISBN 80-01-01770-2.
- [3] **SOKANSKÝ, Karel, NOVÁK, T., BÁLSKÝ, M., BLÁHA, Z., CARBOL, Z., DIVIŠ, D., SOCHA, B., ŠNOBL, J., ŠUMPICH, J., ZÁVADA, P.** Světelná technika. Praha : ČVUT, 2011. str. 256. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] Prospekt Optronik. Light in motion - Photometers. [Online] 2012.
http://www.optronik.de/fileadmin/editors/downloads/Products/OptronikLine_Photometers.pdf.
- [5] ČSN EN 13032 Světlo a osvětlování - Měření a uvádění fotometrických údajů. Praha : Český normalizační institut, 2012. str. 60.
- [6] ČSN 36 0010 Měření světla. Praha : Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1965. str. 40.
- [7] **HABEL, Jiří.** Základy světelné techniky (4) - Základy fotometrie (2. část). Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 4, ročník 12.
- [8] **HABEL, Jiří.** Základy světelné techniky (4) - Základy fotometrie (1. část). Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 3, ročník 12.
- [9] **BÁLSKÝ, Marek a HABEL, Jiří.** Modernizace goniofotometru. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 4, ročník 12.
- [10] **HORŇÁK, Pavol.** Fotometrické integrátory. Jemná mechanika a optika. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2004, Sv. 6, ročník 49.
- [11] Katalog firmy Instrument Systems. Lichtmesstechnik Produktrübersicht. [Online] Instrument Systems Optische Messtechnik GmbH , 2014.
<http://www.instrumentsystems.de/products/>.
- [12] **HORŇÁK, Pavol.** Svetelné normály. Jemná mechanika a optika. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2004, Sv. 6, ročník 49.
- [13] **MIŠKAŘÍK, Stanislav.** Moderní zdroje světla. Praha : SNTL, 1979. str. 256. 04-509-79.
- [14] **HABEL, Jiří a kolektiv.** Světelná technika a osvětlování. Praha : FCC Public, 1995. ISBN 80-901985-0-3.
- [15] Katalog firmy Osram. Produkt-Suche OSRAM. [Online] OSRAM GmbH, 2014.
http://www.osram.de/osram_de/suche/produkt_suche.jsp?mkturl=produktsuche.

- [16] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - obyčejné žárovky. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2008, Sv. 4, ročník 11.
- [17] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - halogenové žárovky. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2008, Sv. 5, ročník 11.
- [18] Katalog firmy Philips. Philips Lighting. [Online] Koninklijke Philips Electronics N.V., 2014. <http://www.ecat.lighting.philips.cz/l/svetelne-zdroje-profesionalni/30701/cat/>.
- [19] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - lineární zářivky. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2008, Sv. 2, ročník 11.
- [20] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - kompaktní zářivky. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2008, Sv. 3, ročník 11.
- [21] **TYRPA, Miroslav.** Indukční osvětlení. In: Kurz osvětlovací techniky XXVII. Česká společnost pro osvětlování, regionální skupina Ostrava. [Online] 2010. <http://www.csorsostrava.cz/sborniky/Kurz%20osvetlovaci%20techniky%20XXVIII.pdf>. s. 189-191.
- [22] **BŘEZOVSKÝ, Josef, FRIML, Leoš.** Vysokotlaké rtuťové výbojky a jejich vlastnosti. Elektrotechnický obzor. SNTL, 1972, Sv. 61, číslo 8.
- [23] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Výroba halogenidových výbojek v České republice. Společnost pro rozvoj veřejného osvětlení. [Online] 2004. www.srvo.cz/zpravodaj.
- [24] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - halogenidové výbojky. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 1,2, ročník 12.
- [25] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - Vysokotlaké sodíkové výbojky. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 3, ročník 12.
- [26] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje - světelné diody. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 5, ročník 12.
- [27] The difference between LED COB and MCOB package. LED NEWS.org. [Online] 6. 8 2013. <http://www.lednews.org/difference-led-cob-mcob-package>.
- [28] LED Lighting: Newest COB LED technology explained. LED Lights Reviews. [Online] 30. 1 2012. <http://ledlights-reviews.com/led-lighting-evolution>.
- [29] Cree News & Events. CREE. [Online] 13. 2 2013. <http://www.cree.com/news-and-events/cree-news/press-releases/2013/february/276-lpw>.
- [30] Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier. CREE. [Online] 26. 3 2014. <http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier>.
- [31] **MAIXNER, Tomáš a SKÁLA, Jiří.** Svítidla LED ve veřejném osvětlení - mýty a skutečnosti. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2009, Sv. 5, ročník 12.

- [32] **TERRICH, Theodor.** Ekonomická náročnost provozu osvětlovacích soustav s různými světelnými zdroji. Praha : ČVUT, 2012. Bakalářská práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd.
- [33] **RYBÁR, Peter.** Nejistota merania osvětlenia. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2002, Sv. 4, ročník 5.
- [34] **HORŇÁK, Pavol, TREMBAČ, V. V. a AJZENBERG, J. B.** Svietidlá a svetelné zdroje. Bratislava : Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, 1983.
- [35] **DVOŘÁČEK, Vladimír.** Světelné zdroje-vysokotlaké rtuťové výbojky, směšové výbojky. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2008, Sv. 6, ročník 11.
- [36] **SOFKA, Otto.** Vysokotlaké sodíkové výbojky Tesla. Elektrotechnický obzor. SNTL, 1972, Sv. 61, číslo 8.
- [37] **HABEL, Jiří.** Světelná technika. Praha : ČVUT, 1981.
- [38] **PLCH, Jiří.** Světelná technika v praxi. 1. Praha : IN-EL, 1999. str. 207. ISBN 80-86230-09-0.
- [39] **HORŇÁK, Pavol.** Základné spôsoby merania jasů. Jemná mechanika a optika. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2005, Sv. 5, ročník 50.
- [40] **HORŇÁK, Pavol.** Určenie svetelného toku zdrojov. Jemná mechanika a optika. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2005, Sv. 9, ročník 50.
- [41] **HORŇÁK, Pavol.** Meranie kriviek svietivosti. Jemná mechanika a optika. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2005, Sv. 3, ročník 50.
- [42] **RYBÁR, Peter.** Nejistoty merania osvětlenia - část 2. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2003, Sv. 1, ročník 6.
- [43] **RYBÁR, Peter.** Nejistoty merania osvětlenia - část 3. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2003, Sv. 2, ročník 6.
- [44] **RYBÁR, Peter.** Nejistota merania osvětlenia - část 4. Světlo-časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2003, Sv. 3, Ročník 6.
- [45] **HORŇÁK, Pavol.** Určovanie svetelného toku jednopäťcových žiariviek. Světlo - časopis pro světelnou techniku a osvětlování. FCC Public, 2005, Sv. 6, ročník 8.
- [46] **VLACH, Jiří.** Nejistoty světelně technických měření. Praha : ČVUT, 2007. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektroenergetiky.

9. Seznam obrázků

Obrázek 1 - poměrné spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele	13
Obrázek 2 - Definice svítivosti, vztah s prostorovým úhlem a světelným tokem [4]	15
Obrázek 3 - a) Prostorové rozložení svítivosti zdroje [3]; b) Polární diagram svítivosti, [4]	16
Obrázek 4 - Definice prostorového úhlu	17
Obrázek 5 - Definice osvětlenosti [4]	18
Obrázek 6 - Osvětlenost roviny bodovým zdrojem [3]	19
Obrázek 7 - Definice jasu [4]	19
Obrázek 8 - Jas svazku sbíhajících se a rozbíhajících se paprsků [3]	20
Obrázek 9 - Soustava C-rovin [5]	23
Obrázek 10 - Luxmetr Minolta T10 (třída B)	27
Obrázek 11 - Laboratorní radioluxmetr PRC Krochmann 211 s nastavci	27
Obrázek 12 - Konstrukce fotoelektrického článku	28
Obrázek 13 - Schematický náčrt fotometrického čidla [4]	28
Obrázek 14 - Detail fotometrického čidla [4]	28
Obrázek 15 - Průběhy poměrné spektrální citlivosti různých typů fotočlánků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí normálního fotometrického pozorovatele $V(\lambda)$ [8]	29
Obrázek 16 - Fotometrická lavice	31
Obrázek 17 - Uspořádání clon na fotometrické lavici	31
Obrázek 18 – Subjektivní měření svítivosti porovnávací (nahore) a substituční (dole) metodou	32
Obrázek 19 - Objektivní měření svítivosti pomocí luxmetru	32
Obrázek 20 - Goniofotometr s otočnou soustavou zrcadel (Photometric Solutions LG 2.0)	34
Obrázek 21 - Goniofotometr s všesměrově pohyblivou fotometrickou hlavicí (Opto Design)	34
Obrázek 22 - Goniofotometr s otočným ramenem na FEL ČVUT [9]	34
Obrázek 23 - Ulbrichtova koule (Instrument Systems ISP 2000)	35
Obrázek 24 - Princip měření světelného toku v integrátoru [11]	36
Obrázek 25 - Náčrt vnitřního uspořádání kulového integrátoru [7]	36
Obrázek 26 - Normál svítivosti OSRAM WI 40/G	39
Obrázek 27 - Normál svítivosti s maskováním v kalibrované objímce PRC Krochmann	39
Obrázek 28 - Normál světelného toku – žárovka	40
Obrázek 29 – Normál světelného toku užívaný v Tesle Holešovice (čirá vysokotlaká rtuťová výbojka)	40
Obrázek 30 - Příklad závislosti přeživších kusů (LSF) a závislosti poklesu světelného toku (LLMF) na době hoření u vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W [15]	42
Obrázek 31 - Schéma halogenového regeneračního cyklu [18]	45
Obrázek 32 - Závislost doby života LED na teplotě P-N přechodu (zdroj CREE) [31]	53
Obrázek 33 - Grafické zobrazení důsledku konečných rozměrů světelného zdroje na dílčí standardní nejistotu	57
Obrázek 34 - Pokles světelného toku obyčejných žárovek během doby života (dle [34])	64
Obrázek 35 - Halogenová žárovka	69

Obrázek 36 - Halogenová žárovka OSRAM M40 500 W	69
Obrázek 37 - Halogenová žárovka	70
Obrázek 38 - Halogenová žárovka OSRAM Halolux Ceram 230 W	70
Obrázek 39 - Schéma zapojení měřeného světelného zdroje	72
Obrázek 40 - Znázornění měření čar svítivosti v jednotlivých fotometrických polorovinách	80
Obrázek 41 - Polární diagram rozložení svítivosti normálu 13-4 ve všech měřených C-rovinách	81
Obrázek 42 - Polární diagram čar svítivosti normálů světelného toku 13-4; 13-5; 13-6	82
Obrázek 43 - Polární diagram čar svítivosti normálu světelného toku 13-7	84
Obrázek 44 - Prostorová charakteristika vyzařování normálů světelného toku 13-4, 13-5 a 13-6	89
Obrázek 45 - Polární diagram svítivosti v řezu rovinou C0-C180 normálu světelného toku 13-5	89
Obrázek 46 - Prostorová charakteristika vyzařování normálu světelného toku 13-7	90
Obrázek 47 - Polární diagram svítivosti v řezu rovinou C0-C180 normálu světelného toku 13-7	90
Obrázek 48 - Polární diagram čar svítivosti normálu světelného toku 13-6	93

10. Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické parametry žárovek určených pro normály svítivosti	68
Tabulka 2 - Technické parametry žárovek určených pro normály světelného toku	70
Tabulka 3 - Seznam použitých přístrojů	71
Tabulka 4 - Přehled parametrů použitých luxmetrů	72
Tabulka 5 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-1	74
Tabulka 6 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-1	74
Tabulka 7 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-2	75
Tabulka 8 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-2	76
Tabulka 9 - Dílčí nejistoty typu B normálu 13-3	77
Tabulka 10 - Výsledné nejistoty měření normálu 13-3	77
Tabulka 11 - Souhrn vypočítaných hodnot svítivosti a kombinovaných nejistot jednotlivých normálů	77
Tabulka 12 - Výsledné hodnoty vztažené svítivosti normálů svítivosti	78
Tabulka 13 - Přehled dílčích nejistot normálů svítivosti - měření na goniofotometru	85
Tabulka 14 - Rekapitulace výsledných hodnot světelného toku a nejistot pro měření na goniofotometru	85
Tabulka 15 - Parametry laboratorních normálů světelného toku použitých při měření v kulovém integrátoru	86
Tabulka 16 - Naměřené hodnoty optického výkonu v kulovém integrátoru	86
Tabulka 17 - Naměřené hodnoty světelného toku jednotlivých normálů světelného toku v kulovém integrátoru	86
Tabulka 18 - Naměřené hodnoty elektrických parametrů normálů světelného toku	87
Tabulka 19 - Rekapitulace dílčích výsledků normálů světelného toku	87
Tabulka 20 - Výsledné hodnoty normálů světelného toku	88
Tabulka 21 - Výsledky - normály svítivosti	91
Tabulka 22 - Výsledky - normály světelného toku	93
Tabulka 23 - Souhrnná tabulka parametrů všech vytvořených světelných normálů	94

11. Symboly a zkratky

A [m ²]	plocha
Ar	Argon
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage (Mezinárodní komise pro osvětlování)
COB	Chip on Board
CRI	Color Rendering Index
ČMI	Český metrologický institut
E [lx]	osvětlenost
E _n [lx]	normálová osvětlenost
EZU	Elektrotechnický zkušební ústav
f [Hz]	frekvence
I [cd]	svítivost
I ₀ [cd]	vztažná svítivost
K(λ)	světelná účinnost
L [cd·m ⁻²]	jas
LED	Light Emitting Diode (světelná dioda)
LLMF	Lamp Lumen Maintenance Factor
LSF	Lamp Survival Factor
MCOB	Multi-chip on Board
Ne	Neon
p [Pa]	tlak
P [W]	výkon
R _a [-]	Všeobecný index podání barev
SMD	Surface Mount Device
T [h]	doba života
T _c [K]	teplota chromatičnosti
T _n [K]	náhradní teplota chromatičnosti
U	rozšířená nejistota měření
u _A	standardní nejistota typu A
u _B	standardní nejistota typu B
u _C	kombinovaná standardní nejistota
VN	vysoké napětí
VO	veřejné osvětlení
V(λ)	poměrná spektrální světelná účinnost normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění
Xe	Xenon
Z _z	činitel stárnutí světelného zdroje
η [lm·W ⁻¹]	měrný výkon světelného zdroje
ρ [-]	činitel odrazu
Ω [sr]	prostorový úhel
φ [lm]	světelný tok
φ _e [W]	zářivý tok

12. Přílohy

UV Radiometer 211				
L [m]	E [lx]		I _{korig} [cd]	
měření	<i>l.</i>	<i>ll.</i>	<i>l.</i>	<i>ll.</i>
3,00	49,22	49,24	429,25	429,42
2,95	50,89	50,91	429,14	429,31
2,90	52,62	52,59	428,82	428,57
2,85	54,48	54,46	428,80	428,64
2,80	56,39	56,4	428,39	428,47
2,75	58,48	58,41	428,55	428,03
2,70	60,64	60,61	428,36	428,15
2,65	62,93	62,9	428,23	428,02
2,60	65,33	65,33	427,94	427,94
2,55	67,88	67,87	427,71	427,64
2,50	70,57	70,57	427,39	427,39
2,45	73,48	73,4	427,39	426,93
2,40	76,48	76,44	426,87	426,65
2,35	79,73	79,75	426,66	426,77
2,30	83,25	83,22	426,74	426,59
2,25	86,97	86,94	426,64	426,49
2,20	90,9	90,93	426,32	426,46
2,15	95,22	95,17	426,51	426,29
2,10	99,8	99,76	426,47	426,30
2,05	104,73	104,76	426,48	426,61
2,00	110,02	109,95	426,44	426,17

Illuminance meter T10				
L [m]	E [lx]		I _{korig} [cd]	
měření	<i>l.</i>	<i>ll.</i>	<i>l.</i>	<i>ll.</i>
3,00	47,5	47,4	432,63	431,72
2,95	49,1	49	432,42	431,54
2,90	50,7	50,7	431,50	431,50
2,85	52,5	52,4	431,55	430,73
2,80	54,4	54,4	431,61	431,61
2,75	56,4	56,3	431,64	430,88
2,70	58,5	58,4	431,58	430,84
2,65	60,6	60,6	430,67	430,67
2,60	62,9	62,9	430,31	430,31
2,55	65,4	65,3	430,37	429,71
2,50	67,9	67,9	429,47	429,47
2,45	70,6	70,6	428,86	428,86
2,40	73,6	73,5	429,02	428,44
2,35	76,7	76,7	428,66	428,66
2,30	80	79,9	428,28	427,74
2,25	83,5	83,5	427,79	427,79
2,20	87,3	87,3	427,60	427,60
2,15	91,3	91,3	427,10	427,10
2,10	95,7	95,7	427,10	427,10
2,05	100,3	100,4	426,57	426,99
2,00	105,4	105,4	426,66	426,66

UV Radiometer 211				
L [m]	E [lx]		I _{korig} [cd]	
měření	<i>l.</i>	<i>ll.</i>	<i>l.</i>	<i>ll.</i>
3,00	47,09	46,89	410,67	408,93
2,95	48,66	48,52	410,34	409,16
2,90	50,29	50,13	409,83	408,52
2,85	52,08	51,92	409,91	408,65
2,80	53,9	53,76	409,48	408,41
2,75	55,83	55,68	409,13	408,03
2,70	57,91	57,77	409,08	408,09
2,65	60,08	59,95	408,83	407,95
2,60	62,43	62,2	408,94	407,44
2,55	64,84	64,71	408,55	407,73
2,50	67,36	67,3	407,95	407,59
2,45	70,14	69,99	407,96	407,09
2,40	73,06	72,91	407,78	406,94
2,35	76,01	76	406,75	406,70
2,30	79,4	79,33	407,01	406,65
2,25	83,02	82,94	407,26	406,87
2,20	86,77	86,76	406,95	406,90
2,15	90,83	90,76	406,85	406,53
2,10	95,23	95,17	406,95	406,69
2,05	99,99	99,96	407,18	407,06
2,00	105,03	104,95	407,10	406,79

Radiolux 111				
L [m]	E [lx]		I _{korig} [cd]	
měření	<i>l.</i>	<i>ll.</i>	<i>l.</i>	<i>ll.</i>
3,00	45,44	45,39	408,96	408,51
2,95	46,87	46,91	407,89	408,23
2,90	48,37	48,4	406,79	407,04
2,85	50,01	50,08	406,21	406,77
2,80	51,84	51,85	406,43	406,50
2,75	53,76	53,73	406,56	406,33
2,70	55,78	55,83	406,64	407,00
2,65	57,73	57,94	405,41	406,88
2,60	60,98	60,24	412,22	407,22
2,55	62,57	62,59	406,86	406,99
2,50	64,94	64,94	405,88	405,88
2,45	67,54	67,59	405,41	405,71
2,40	70,36	70,42	405,27	405,62
2,35	73,54	73,53	406,12	406,07
2,30	76,79	76,52	406,22	404,79
2,25	79,97	79,98	404,85	404,90
2,20	83,42	83,44	403,75	403,85
2,15	87,43	87,45	404,15	404,24
2,10	91,64	91,67	404,13	404,26
2,05	96,28	96,24	404,62	404,45
2,00	101,1	101,1	404,40	404,40

UV Radiometer 211				
L [m]	E [lx]		I _{korig} [cd]	
měření	I.	II.	I.	II.
3,00	140,23	140,57	1222,95	1225,91
2,95	144,78	144,6	1220,89	1219,37
2,90	149,76	149,46	1220,44	1217,99
2,85	154,89	154,78	1219,09	1218,23
2,80	160,5	160,11	1219,31	1216,35
2,75	166,43	166,07	1219,61	1216,97
2,70	172,46	172,2	1218,26	1216,42
2,65	178,92	178,58	1217,52	1215,20
2,60	185,63	185,33	1215,96	1213,99
2,55	192,8	192,68	1214,82	1214,06
2,50	200,57	200,54	1214,70	1214,52
2,45	208,89	208,76	1214,99	1214,24
2,40	217,38	217,29	1213,29	1212,79
2,35	226,72	226,52	1213,25	1212,18
2,30	236,44	236,3	1211,99	1211,28
2,25	246,71	246,54	1210,25	1209,42
2,20	258,31	258,14	1211,46	1210,67
2,15	270,59	270	1212,03	1209,38
2,10	283,23	282,68	1210,32	1207,97
2,05	296,67	296,76	1209,35	1209,72
2,00	311,68	311,5	1209,32	1208,62

Illuminance meter T10						
L [m]	E [lx]			I _{korig} [cd]		
měření	I.	II.	III.	I.	II.	III.
3	131,9	132,3	132,3	1201,35	1204,99	1204,99
2,95	136,6	136,7	136,6	1203,03	1203,91	1203,03
2,9	141	141,5	141,5	1200,04	1204,30	1204,30
2,85	145,9	146,5	146,5	1199,29	1204,23	1204,23
2,8	151,2	151,3	151,6	1199,63	1200,43	1202,81
2,75	156,7	156,9	157	1199,26	1200,79	1201,56
2,7	162,4	162,5	162,7	1198,10	1198,84	1200,32
2,65	168,7	168,7	168,8	1198,91	1198,91	1199,62
2,6	175,1	175,7	175,7	1197,88	1201,98	1201,98
2,55	181,9	182,2	182,4	1197,00	1198,97	1200,29
2,5	188,9	189,2	189,1	1194,79	1196,69	1196,06
2,45	196,3	197	196,7	1192,43	1196,68	1194,86
2,4	204,3	204,7	205	1201,48	1203,83	1205,60
2,35	212,8	213,5	213,6	1199,87	1203,81	1204,38
2,3	222,2	222,9	223	1200,12	1203,90	1204,44
2,25	232,1	232,3	232,6	1199,68	1200,72	1202,27
2,2	242,3	242,6	242,9	1197,36	1198,84	1200,32
2,15	253,5	254	254,3	1196,41	1198,77	1200,19
2,1	265,6	265,7	266,8	1195,89	1196,34	1201,30
2,05	278,5	277,8	278,6	1194,97	1191,97	1195,40
2	292,8	292,4	292,1	1195,80	1194,16	1192,94

korekční koeficienty pro C0-C270:					1,033528	1,061974	0,983755	0,901988
γ [°]	I [cd]				I_{korig} [cd]			
	C0	C90	C180	C270	C0	C90	C180	C270
-90	21,40	23,36	13,72	10,44	22,11750	24,80771	13,49712	9,41676
-88	29,28	31,80	20,32	15,60	30,26171	33,77077	19,98990	14,07102
-86	37,24	40,36	27,80	22,12	38,48859	42,86127	27,34839	19,95198
-84	45,64	48,92	35,68	29,04	47,17023	51,95177	35,10038	26,19374
-82	53,16	56,64	43,52	36,12	54,94236	60,15021	42,81301	32,57982
-80	59,52	63,08	51,12	44,24	61,51560	66,98932	50,28955	39,90396
-78	65,00	68,32	57,68	51,20	67,17934	72,55406	56,74298	46,18180
-76	70,12	72,32	62,96	58,20	72,47100	76,80196	61,93721	52,49572
-74	74,96	76,16	69,32	63,92	77,47328	80,87994	68,19389	57,65509
-72	79,44	80,52	73,68	68,84	82,10348	85,51014	72,48306	62,09287
-70	82,40	84,44	78,24	73,40	85,16273	89,67308	76,96898	66,20594
-68	87,08	88,04	81,76	78,52	89,99964	93,49619	80,43180	70,82412
-66	90,56	90,68	86,44	82,76	93,59632	96,29980	85,03578	74,64855
-64	93,56	94,00	89,80	87,32	96,69690	99,82555	88,34119	78,76162
-62	96,24	96,96	92,96	91,72	99,46676	102,96900	91,44986	82,73036
-60	99,00	100,28	96,80	94,96	102,31930	106,49475	95,22748	85,65281
-58	102,52	103,00	99,68	98,76	105,95731	109,38332	98,06069	89,08036
-56	105,92	105,12	102,16	104,24	109,47131	111,63470	100,50040	94,02326
-54	108,80	108,28	106,08	108,00	112,44787	114,99054	104,35672	97,41473
-52	112,24	112,28	109,32	112,28	116,00321	119,23844	107,54409	101,27524
-50	115,16	114,56	112,28	116,08	119,02111	121,65974	110,45600	104,70280
-48	117,24	116,12	115,44	120,00	121,17085	123,31642	113,56467	108,23859
-46	120,00	119,44	116,44	124,40	124,02339	126,84217	114,54842	112,20734
-44	122,80	120,80	121,20	128,80	126,91727	128,28646	119,23110	116,17609
-42	125,20	123,60	124,00	131,20	129,39773	131,25998	121,98561	118,34086
-40	126,80	124,80	126,40	135,20	131,05138	132,53435	124,34662	121,94882
-38	130,00	126,00	129,20	138,40	134,35867	133,80872	127,10114	124,83518
-36	131,60	128,00	130,80	142,80	136,01232	135,93267	128,67514	128,80393
-34	133,60	129,60	132,80	146,40	138,07937	137,63183	130,64265	132,05108
-32	135,20	131,60	135,20	149,20	139,73302	139,75577	133,00367	134,57665
-30	136,40	133,20	138,40	151,20	140,97325	141,45493	136,15168	136,38063
-28	138,00	134,00	138,40	154,80	142,62690	142,30451	136,15168	139,62779
-26	139,20	134,00	140,80	156,40	143,86713	142,30451	138,51269	141,07097
-24	140,40	134,40	142,00	157,60	145,10736	142,72930	139,69320	142,15335
-22	140,00	133,20	141,20	158,40	144,69395	141,45493	138,90619	142,87494
-20	140,40	134,00	143,20	160,00	145,10736	142,30451	140,87370	144,31812
-18	140,80	136,40	143,20	159,20	145,52078	144,85325	140,87370	143,59653
-16	139,60	135,20	144,40	158,40	144,28054	143,57888	142,05421	142,87494
-14	140,80	137,20	143,60	161,20	145,52078	145,70283	141,26721	145,40051
-12	140,40	137,20	143,60	160,40	145,10736	145,70283	141,26721	144,67892
-10	139,20	136,40	144,40	162,00	143,86713	144,85325	142,05421	146,12210
-8	139,20	135,60	144,40	162,00	143,86713	144,00367	142,05421	146,12210
-6	138,00	134,40	144,00	161,20	142,62690	142,72930	141,66071	145,40051
-4	137,60	133,20	142,80	158,00	142,21349	141,45493	140,48020	142,51415
-2	136,80	132,00	142,80	155,60	141,38666	140,18056	140,48020	140,34938
0	134,40	130,80	141,20	154,00	138,90619	138,90619	138,90619	138,90619
2	134,00	129,20	138,40	153,20	138,49278	137,20704	136,15168	138,18460
4	131,60	128,00	137,60	150,00	136,01232	135,93267	135,36468	135,29824

6	129,20	127,20	135,60	148,00	133,53185	135,08309	133,39717	133,49427
8	128,00	125,60	134,40	147,60	132,29161	133,38393	132,21666	133,13347
10	127,60	123,60	133,20	146,80	131,87820	131,25998	131,03616	132,41188
12	125,60	122,00	132,00	141,60	129,81115	129,56082	129,85565	127,72154
14	124,40	120,40	128,40	141,60	128,57091	127,86167	126,31413	127,72154
16	120,40	118,00	126,80	138,00	124,43680	125,31293	124,74012	124,47438
18	119,60	116,00	124,40	135,20	123,60998	123,18898	122,37911	121,94882
20	117,60	114,40	122,80	133,20	121,54292	121,48982	120,80510	120,14484
22	114,40	112,80	120,80	130,40	118,23563	119,79066	118,83759	117,61927
24	113,20	110,80	118,00	126,80	116,99540	117,66672	116,08308	114,37211
26	111,20	109,60	117,20	125,20	114,92834	116,39235	115,29608	112,92893
28	109,60	107,60	115,60	124,80	113,27469	114,26840	113,72207	112,56814
30	108,00	105,60	114,00	122,40	111,62105	112,14445	112,14806	110,40337
32	106,40	103,60	111,20	119,20	109,96740	110,02050	109,39355	107,51700
34	104,80	100,80	110,00	115,60	108,31376	107,04698	108,21304	104,26984
36	102,80	99,88	108,80	114,00	106,24670	106,06996	107,03254	102,82666
38	102,00	98,28	105,60	112,40	105,41988	104,37080	103,88452	101,38348
40	99,76	97,04	104,00	109,20	103,10478	103,05395	102,31051	98,49712
42	97,44	96,48	102,40	108,40	100,70699	102,45925	100,73650	97,77553
44	97,16	96,68	100,80	105,60	100,41760	102,67164	99,16250	95,24996
46	95,72	95,88	99,84	104,80	98,92932	101,82206	98,21809	94,52837
48	95,72	96,36	101,32	103,20	98,92932	102,33181	99,67405	93,08519
50	96,00	94,36	99,36	103,60	99,21871	100,20786	97,74589	93,44599
52	95,68	93,76	98,72	103,60	98,88798	99,57068	97,11629	93,44599
54	95,04	92,80	98,04	102,40	98,22652	98,55118	96,44733	92,36360
56	93,84	91,44	98,08	101,60	96,98629	97,10690	96,48668	91,64201
58	93,08	91,60	97,04	100,88	96,20081	97,27682	95,46358	90,99258
60	92,24	91,40	96,12	99,32	95,33264	97,06442	94,55852	89,58548
62	91,64	90,72	95,12	97,40	94,71253	96,34228	93,57477	87,85366
64	91,44	91,20	94,04	96,00	94,50582	96,85203	92,51231	86,59087
66	91,56	91,52	92,96	94,28	94,62985	97,19186	91,44986	85,03945
68	90,76	91,48	93,60	93,68	93,80302	97,14938	92,07946	84,49826
70	91,68	91,28	93,48	94,00	94,75387	96,93698	91,96141	84,78690
72	92,36	91,40	93,80	94,16	95,45667	97,06442	92,27621	84,93122
74	92,64	91,48	93,64	93,04	95,74606	97,14938	92,11881	83,92099
76	93,12	92,32	93,00	94,32	96,24215	98,04144	91,48921	85,07553
78	93,08	93,36	93,52	94,24	96,20081	99,14589	92,00076	85,00338
80	93,76	93,32	92,76	94,48	96,90361	99,10341	91,25311	85,21985
82	93,28	93,76	94,24	93,88	96,40751	99,57068	92,70906	84,67866
84	93,24	94,40	94,28	93,72	96,36617	100,25034	92,74841	84,53434
86	94,00	94,80	94,32	94,28	97,15165	100,67513	92,78776	85,03945
88	93,36	93,60	95,64	95,44	96,49020	99,40076	94,08632	86,08576
90	93,60	94,92	95,76	96,44	96,73824	100,80257	94,20437	86,98775

B0					
γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]
-116	---	-36	131,2	44	144,4
-114	---	-34	130,4	46	145,2
-112	---	-32	130,4	48	144,8
-110	---	-30	131,2	50	147,2
-108	129,2	-28	131,2	52	147,2
-106	129,6	-26	131,6	54	148,8
-104	129,2	-24	132,8	56	149,6
-102	129,6	-22	133,2	58	151,6
-100	129,6	-20	133,6	60	152
-98	129,6	-18	133,6	62	150,8
-96	129,2	-16	133,6	64	151,2
-94	129,2	-14	133,6	66	151,6
-92	129,2	-12	132,4	68	151,6
-90	129,2	-10	132	70	151,2
-88	128,8	-8	132,8	72	150,8
-86	128,8	-6	132,4	74	150,4
-84	129,2	-4	134,4	76	150,4
-82	130	-2	135,2	78	152,4
-80	129,6	0	136	80	153,6
-78	129,6	2	135,6	82	153,2
-76	129,2	4	136	84	153,2
-74	129,2	6	136,4	86	152,4
-72	129,6	8	136,4	88	152,8
-70	127,2	10	136,4	90	153,6
-68	129,6	12	137,2	92	152,4
-66	130	14	137,6	94	148,8
-64	130	16	136,8	96	153,6
-62	130,8	18	137,6	98	153,6
-60	130,4	20	138	100	154,4
-58	130,8	22	137,6	102	155,2
-56	130	24	138,8	104	155,6
-54	129,6	26	138,4	106	153,6
-52	128,8	28	138,4	108	153,2
-50	130,4	30	138,8	110	152,4
-48	128,8	32	139,2	112	151,2
-46	130,8	34	139,6	114	151,2
-44	131,6	36	140,4	116	150,8
-42	130,8	38	142,8		
-40	130,8	40	143,2	průměrná hodnota	
-38	131,6	42	144	B0	138,91

korekční koeficient		1,011706
γ [°]	I [cd]	
	CO	CO _{korig}
-90	22,40	22,66222
-88	30,64	30,99868
-86	38,88	39,33514
-84	47,16	47,71206
-82	54,56	55,19869
-80	60,60	61,30939
-78	66,68	67,46057
-76	71,64	72,47863
-74	75,60	76,48498
-72	79,24	80,1676
-70	83,44	84,41676
-68	87,76	88,78733
-66	91,04	92,10573
-64	94,32	95,42412
-62	97,36	98,49971
-60	100,12	101,292
-58	102,48	103,6796
-56	104,48	105,7031
-54	105,88	107,1194
-52	109,88	111,1663
-50	112,84	114,1609
-48	115,28	116,6295
-46	117,00	118,3696
-44	119,60	121,0001
-42	122,40	123,8328
-40	124,40	125,8562
-38	126,40	127,8797
-36	126,80	128,2843
-34	128,40	129,9031
-32	130,80	132,3312
-30	132,40	133,9499
-28	134,40	135,9733
-26	135,20	136,7827
-24	135,20	136,7827
-22	136,00	137,592
-20	136,80	138,4014
-18	134,80	136,378
-16	134,00	135,5686
-14	136,00	137,592
-12	136,00	137,592
-10	135,60	137,1874
-8	136,00	137,592
-6	134,40	135,9733
-4	133,60	135,1639
-2	132,40	133,9499
0	129,60	131,1171
2	129,60	131,1171
4	128,00	129,4984
6	125,20	126,6656
8	124,40	125,8562
10	123,60	125,0469
12	122,80	124,2375

B0					
γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]
-116	---	-36	130,00	44	129,60
-114	134,40	-34	130,00	46	130,00
-112	134,00	-32	130,00	48	129,20
-110	134,40	-30	129,60	50	128,80
-108	136,00	-28	129,60	52	130,00
-106	136,00	-26	129,20	54	130,40
-104	135,60	-24	129,20	56	130,40
-102	135,20	-22	130,00	58	131,20
-100	135,20	-20	130,40	60	130,40
-98	134,80	-18	130,80	62	131,60
-96	133,20	-16	131,20	64	130,80
-94	132,80	-14	130,00	66	131,20
-92	132,00	-12	131,60	68	131,20
-90	133,20	-10	130,80	70	131,60
-88	132,80	-8	130,00	72	132,40
-86	132,80	-6	130,00	74	132,80
-84	133,20	-4	130,00	76	132,40
-82	132,40	-2	129,60	78	132,80
-80	133,20	0	129,20	80	133,20
-78	132,40	2	129,60	82	132,40
-76	130,40	4	130,80	84	133,60
-74	129,60	6	130,80	86	133,20
-72	129,60	8	130,80	88	131,60
-70	128,80	10	129,60	90	134,40
-68	127,60	12	129,20	92	134,40
-66	128,00	14	129,20	94	135,20
-64	128,40	16	130,00	96	135,20
-62	129,20	18	128,80	98	135,60
-60	130,00	20	129,20	100	135,20
-58	129,20	22	129,60	102	136,80
-56	130,00	24	129,20	104	137,60
-54	129,60	26	128,80	106	137,20
-52	130,00	28	127,20	108	---
-50	128,80	30	127,60	110	---
-48	128,80	32	128,00	112	---
-46	129,60	34	127,60	114	---
-44	128,80	36	128,40	116	---
-42	129,20	38	129,20	průměrná hodnota	
-40	130,00	40	128,80	B0	131,12
-38	130,00	42	128,80		

14	119,60	121,0001
16	118,00	119,3813
18	116,40	117,7626
20	114,80	116,1439
22	113,60	114,9298
24	111,20	112,5017
26	108,80	110,0736
28	107,60	108,8596
30	106,40	107,6455
32	104,80	106,0268
34	104,00	105,2174
36	102,40	103,5987
38	100,40	101,5753
40	100,40	101,5753
42	99,96	101,1301
44	99,08	100,2398
46	97,36	98,49971
48	97,04	98,17596
50	96,84	97,97362
52	95,96	97,08332
54	96,44	97,56894
56	96,76	97,89269
58	96,20	97,32613
60	95,92	97,04285
62	95,44	96,55724
64	94,40	95,50506
66	95,68	96,80004
68	95,24	96,35489
70	95,12	96,23349
72	95,48	96,5977
74	96,48	97,60941
76	97,52	98,66158
78	98,20	99,34954
80	98,60	99,75423
82	98,80	99,95657
84	99,00	100,1589
86	99,64	100,8064
88	98,72	99,87563
90	98,44	99,59235

korekční koeficient		0,988432	
γ [°]	I [cd]		CO _{korig}
	CO	CO _{korig}	
-90	20,92	20,678	
-88	29,56	29,21805	
-86	38,52	38,0744	
-84	47,28	46,73306	
-82	55,32	54,68005	
-80	62,40	61,67815	
-78	68,92	68,12273	
-76	73,28	72,43229	
-74	79,28	78,36288	
-72	83,56	82,59337	
-70	86,32	85,32144	
-68	91,84	90,77759	
-66	96,00	94,88946	
-64	99,40	98,25013	
-62	103,16	101,9666	
-60	105,96	104,7342	
-58	109,36	108,0949	
-56	111,80	110,5067	
-54	114,32	112,9975	
-52	116,68	115,3302	
-50	120,40	119,0072	
-48	123,60	122,1702	
-46	125,60	124,147	
-44	128,00	126,5193	
-42	130,40	128,8915	
-40	132,40	130,8684	
-38	135,60	134,0314	
-36	136,00	134,4267	
-34	139,20	137,5897	
-32	141,20	139,5666	
-30	142,40	140,7527	
-28	144,40	142,7296	
-26	144,00	142,3342	
-24	140,80	139,1712	
-22	143,20	141,5434	
-20	145,60	143,9157	
-18	146,00	144,3111	
-16	144,00	142,3342	
-14	144,80	143,1249	
-12	144,40	142,7296	
-10	144,40	142,7296	
-8	141,60	139,962	
-6	141,20	139,5666	
-4	140,80	139,1712	
-2	139,20	137,5897	
0	138,00	136,4036	
2	137,20	135,6129	
4	135,60	134,0314	
6	134,00	132,4499	
8	132,00	130,473	
10	130,40	128,8915	
12	129,20	127,7054	

B0					
γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]
-116	---	-36	134,40	44	139,20
-114	---	-34	135,20	46	139,60
-112	---	-32	135,60	48	138,40
-110	---	-30	135,60	50	138,80
-108	132,40	-28	135,20	52	138,00
-106	132,00	-26	136,00	54	138,40
-104	133,60	-24	136,80	56	137,60
-102	133,60	-22	137,20	58	138,40
-100	133,20	-20	136,80	60	138,80
-98	133,60	-18	135,60	62	137,60
-96	134,00	-16	137,20	64	138,80
-94	134,00	-14	136,80	66	138,40
-92	133,20	-12	138,00	68	138,40
-90	133,20	-10	137,20	70	137,60
-88	133,20	-8	136,00	72	137,20
-86	134,00	-6	136,40	74	137,60
-84	135,60	-4	137,20	76	136,80
-82	135,20	-2	136,40	78	136,80
-80	134,40	0	138,40	80	138,00
-78	136,40	2	139,60	82	136,80
-76	136,40	4	138,80	84	135,20
-74	134,80	6	139,20	86	136,80
-72	136,40	8	138,80	88	136,00
-70	136,00	10	139,60	90	135,60
-68	136,80	12	139,60	92	134,80
-66	137,60	14	139,60	94	134,80
-64	136,40	16	139,60	96	135,20
-62	136,00	18	140,00	98	136,40
-60	136,00	20	139,20	100	134,00
-58	136,00	22	138,80	102	134,00
-56	135,20	24	137,20	104	133,60
-54	133,20	26	138,80	106	132,80
-52	133,20	28	138,80	108	132,00
-50	135,20	30	139,20	110	132,40
-48	134,00	32	139,20	112	131,20
-46	136,00	34	138,40	114	---
-44	136,40	36	139,60	116	---
-42	135,60	38	138,40	průměrná hodnota	
-40	135,20	40	138,00		
-38	135,20	42	139,20		
				B0	136,40

14	126,80	125,3332
16	124,80	123,3563
18	122,80	121,3794
20	121,60	120,1933
22	120,00	118,6118
24	118,40	117,0303
26	116,00	114,6581
28	114,40	113,0766
30	111,60	110,309
32	109,60	108,3321
34	108,80	107,5414
36	106,80	105,5645
38	104,40	103,1923
40	104,40	103,1923
42	102,80	101,6108
44	102,40	101,2154
46	102,00	100,8201
48	101,20	100,0293
50	99,00	97,85476
52	97,88	96,74772
54	96,56	95,44299
56	96,40	95,28484
58	96,64	95,52206
60	97,64	96,51049
62	95,12	94,01964
64	95,28	94,17779
66	95,12	94,01964
68	94,36	93,26844
70	94,84	93,74288
72	94,84	93,74288
74	95,08	93,98011
76	95,92	94,81039
78	95,64	94,53363
80	96,80	95,68021
82	97,56	96,43142
84	97,08	95,95697
86	96,48	95,36391
88	96,56	95,44299
90	96,16	95,04761

korekční koeficient		1,003551
γ [°]	I [cd]	
	CO	CO _{korig}
-90	12,04	12,08275
-88	12,24	12,28346
-86	12,56	12,6046
-84	15,48	15,53497
-82	27,56	27,65786
-80	43,00	43,15269
-78	62,28	62,50115
-76	86,52	86,82723
-74	110,84	111,2336
-72	134,00	134,4758
-70	154,00	154,5468
-68	170,40	171,0051
-66	184,00	184,6534
-64	201,20	201,9144
-62	214,80	215,5627
-60	225,60	226,4011
-58	240,40	241,2536
-56	254,00	254,9019
-54	266,00	266,9445
-52	278,00	278,9872
-50	286,80	287,8184
-48	297,60	298,6568
-46	308,80	309,8965
-44	312,80	313,9107
-42	327,20	328,3619
-40	334,40	335,5874
-38	341,20	342,4116
-36	350,40	351,6442
-34	358,40	359,6727
-32	364,80	366,0954
-30	368,00	369,3067
-28	371,20	372,5181
-26	374,80	376,1309
-24	382,40	383,7579
-22	383,20	384,5607
-20	384,00	385,3636
-18	394,40	395,8005
-16	397,20	398,6104
-14	394,80	396,2019
-12	399,20	400,6175
-10	399,60	401,019
-8	400,40	401,8218
-6	400,40	401,8218
-4	396,80	398,209
-2	396,80	398,209
0	396,80	398,209
2	396,40	397,8076
4	395,60	397,0047
6	393,60	394,9976
8	396,00	397,4062
10	394,00	395,3991
12	392,80	394,1948

B0					
γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]	γ [°]	I [cd]
-116	---	-36	370,80	44	402,80
-114	---	-34	373,20	46	403,20
-112	---	-32	373,60	48	402,80
-110	398,80	-30	375,20	50	415,60
-108	400,40	-28	376,00	52	416,40
-106	398,80	-26	378,80	54	416,00
-104	397,60	-24	382,00	56	418,40
-102	403,20	-22	388,80	58	420,80
-100	401,20	-20	391,60	60	420,80
-98	400,00	-18	395,60	62	422,40
-96	400,80	-16	400,00	64	420,00
-94	400,00	-14	392,00	66	426,00
-92	395,20	-12	395,60	68	427,20
-90	394,40	-10	405,60	70	426,40
-88	396,80	-8	406,40	72	425,20
-86	393,20	-6	406,80	74	424,00
-84	393,60	-4	409,60	76	419,20
-82	392,40	-2	409,60	78	421,20
-80	388,00	0	398,80	80	420,40
-78	388,40	2	402,00	82	416,40
-76	386,80	4	402,80	84	417,60
-74	385,20	6	400,40	86	416,00
-72	382,80	8	399,20	88	410,40
-70	381,20	10	397,60	90	408,80
-68	377,20	12	407,20	92	406,00
-66	378,00	14	404,40	94	403,60
-64	378,00	16	406,00	96	406,80
-62	375,60	18	407,20	98	403,20
-60	374,80	20	408,40	100	402,40
-58	371,60	22	403,20	102	402,80
-56	372,40	24	407,60	104	398,40
-54	370,00	26	408,40	106	401,20
-52	366,80	28	407,60	108	400,00
-50	367,60	30	410,40	110	397,60
-48	365,60	32	410,00	112	---
-46	368,00	34	409,60	114	---
-44	366,00	36	410,80	116	---
-42	366,00	38	413,20	průměrná hodnota	
-40	368,80	40	402,40		
-38	369,20	42	398,40	B0	398,21

14	387,20	388,5749
16	377,60	378,9408
18	380,80	382,1522
20	377,20	378,5394
22	370,80	372,1167
24	371,60	372,9195
26	367,60	368,9053
28	362,40	363,6869
30	360,40	361,6798
32	355,60	356,8627
34	346,00	347,2286
36	341,20	342,4116
38	338,00	339,2002
40	331,20	332,3761
42	328,40	329,5661
44	323,20	324,3477
46	316,80	317,9249
48	310,00	311,1008
50	304,00	305,0795
52	295,60	296,6497
54	288,80	289,8255
56	283,60	284,607
58	273,60	274,5715
60	268,00	268,9516
62	264,80	265,7403
64	258,80	259,719
66	250,80	251,6906
68	244,80	245,6693
70	236,00	236,838
72	228,40	229,211
74	221,60	222,3869
76	212,40	213,1542
78	206,40	207,1329
80	201,60	202,3159
82	198,00	198,7031
84	195,20	195,8931
86	194,40	195,0903
88	194,40	195,0903
90	200,40	201,1116

$\Delta\Omega$ [sr]	γ [°]	ϕ [lm]			
		CO	C90	C180	C270
0,000957	0	0,005244	0,005882	0,0032	0,002233
0,007654	2	0,057384	0,064038	0,037906	0,026682
0,015299	4	0,14588	0,162453	0,103656	0,075622
0,022924	6	0,267905	0,295062	0,199354	0,148768
0,030523	8	0,415472	0,454853	0,32375	0,246367
0,038083	10	0,580409	0,632055	0,47449	0,3765
0,045598	12	0,758916	0,819633	0,641018	0,521709
0,053057	14	0,952617	1,009546	0,814152	0,690046
0,060451	16	1,160296	1,211317	1,021321	0,863485
0,067772	18	1,378551	1,466175	1,21702	1,042565
0,07501	20	1,61617	1,701765	1,460673	1,230347
0,082156	22	1,87069	1,943368	1,671818	1,441569
0,089203	24	2,112311	2,173324	1,919114	1,649732
0,096141	26	2,352016	2,428116	2,148775	1,876011
0,102961	28	2,591033	2,682264	2,382199	2,155063
0,109657	30	2,838659	2,954499	2,64191	2,376278
0,116218	32	3,11549	3,216226	2,883303	2,619253
0,122639	34	3,396626	3,46375	3,11828	2,91731
0,128909	36	3,667378	3,750304	3,403493	3,177086
0,135023	38	3,962759	4,073277	3,673789	3,459641
0,140972	40	4,244995	4,339104	3,939513	3,73432
0,146749	42	4,49878	4,57844	4,216381	4,018637
0,152348	44	4,78036	4,889007	4,415156	4,324922
0,157761	46	5,065712	5,120361	4,75893	4,636994
0,162982	48	5,335632	5,41242	5,029997	4,879709
0,168004	50	5,570334	5,633368	5,285349	5,18343
0,172821	52	5,874671	5,850625	5,557344	5,458268
0,177428	54	6,105505	6,10193	5,776144	5,781925
0,181819	56	6,351682	6,331094	6,009591	6,074379
0,185988	58	6,575143	6,576214	6,258493	6,33251
0,189931	60	6,774123	6,797269	6,542434	6,553435
0,193642	62	6,987504	6,97171	6,670273	6,840573
0,197118	64	7,174762	7,096833	6,907732	7,035315
0,200353	66	7,355383	7,234841	7,080943	7,205647
0,203344	68	7,443924	7,27729	7,146167	7,350343
0,206087	70	7,565907	7,419766	7,345163	7,524756
0,208579	72	7,679219	7,643993	7,43399	7,577675
0,210818	74	7,695469	7,658045	7,576724	7,620499
0,212799	76	7,834564	7,844365	7,60556	7,828089
0,214521	78	7,875526	7,907844	7,667106	7,852272
0,215982	80	7,861379	7,915264	7,762315	7,984598
0,217179	82	7,904967	7,912469	7,805354	8,028869
0,218112	84	7,870485	7,876136	7,817168	8,023539
0,218779	86	7,871677	7,82969	7,775738	7,888319
0,21918	88	7,840243	7,773361	7,789977	7,782723
0,219313	90	7,70739	7,70739	7,70739	7,70739
0,21918	92	7,67977	7,608472	7,54995	7,662681

0,218779	94	7,528435	7,524027	7,492588	7,488911
0,218112	96	7,368599	7,4542	7,361167	7,366525
0,217179	98	7,268935	7,328954	7,264817	7,315192
0,215982	100	7,206264	7,172483	7,160252	7,235426
0,214521	102	7,045342	7,031756	7,047757	6,931931
0,212799	104	6,922015	6,883831	6,800514	6,876287
0,210818	106	6,637067	6,683796	6,653245	6,639071
0,208579	108	6,522973	6,500756	6,458019	6,435312
0,206087	110	6,337255	6,334486	6,298785	6,264359
0,203344	112	6,08275	6,16275	6,113718	6,05104
0,200353	114	5,930409	5,964438	5,884164	5,797437
0,197118	116	5,731562	5,804573	5,749902	5,63185
0,193642	118	5,549496	5,598179	5,571413	5,514881
0,189931	120	5,363675	5,388826	5,388999	5,305162
0,185988	122	5,174521	5,17702	5,147518	5,059217
0,181819	124	4,982457	4,924185	4,977824	4,796436
0,177428	126	4,769346	4,761412	4,804621	4,615822
0,172821	128	4,609357	4,563488	4,542225	4,432871
0,168004	130	4,382465	4,380305	4,348705	4,186617
0,162982	132	4,152587	4,224841	4,153804	4,03171
0,157761	134	4,008018	4,097984	3,957922	3,801759
0,152348	136	3,813134	3,924631	3,78572	3,643503
0,146749	138	3,673006	3,799332	3,700656	3,456027
0,140972	140	3,538725	3,574004	3,486195	3,332835
0,135023	142	3,37809	3,401411	3,317567	3,192187
0,128909	144	3,203562	3,214151	3,145536	3,012349
0,122639	146	3,009246	3,012988	2,993744	2,843426
0,116218	148	2,828617	2,860255	2,80694	2,675478
0,109657	150	2,644827	2,692872	2,623351	2,485383
0,102961	152	2,467189	2,509643	2,437551	2,288521
0,096141	154	2,298721	2,355789	2,250232	2,106201
0,089203	156	2,135636	2,193456	2,063869	1,919197
0,082156	158	1,949746	2,019301	1,91392	1,756341
0,07501	160	1,798185	1,839615	1,745191	1,609037
0,067772	162	1,63672	1,664287	1,582187	1,456248
0,060451	164	1,464349	1,485812	1,408874	1,283496
0,053057	166	1,291892	1,316044	1,228092	1,141999
0,045598	168	1,109796	1,143772	1,061344	0,98062
0,038083	170	0,933675	0,954871	0,879232	0,821101
0,030523	172	0,744478	0,768905	0,715918	0,653905
0,022924	174	0,558914	0,581442	0,537931	0,49029
0,015299	176	0,376028	0,389666	0,359138	0,329148
0,007654	178	0,186848	0,192484	0,182193	0,1667
0,000957	180	0,023421	0,024405	0,022808	0,021061
suma		385,4092	387,6966	374,9963	369,231
výsledná hodnota světelného toku					1517,333

$\Delta\Omega$ [sr]	γ [°]	ϕ [lm]
		CO
0,000957	0	0,021492
0,007654	2	0,235126
0,015299	4	0,596354
0,022924	6	1,083931
0,030523	8	1,66964
0,038083	10	2,313855
0,045598	12	3,04837
0,053057	14	3,810869
0,060451	16	4,581979
0,067772	18	5,384186
0,07501	20	6,408053
0,082156	22	7,381967
0,089203	24	8,314682
0,096141	26	9,284229
0,102961	28	10,26337
0,109657	30	11,24064
0,116218	32	12,19408
0,122639	34	13,11882
0,128909	36	13,97438
0,135023	38	15,1901
0,140972	40	16,28661
0,146749	42	17,32068
0,152348	44	18,24976
0,157761	46	19,31814
0,162982	48	20,42467
0,168004	50	21,39806
0,172821	52	22,36554
0,177428	54	23,0344
0,181819	56	23,90228
0,185988	58	24,9074
0,189931	60	25,74653
0,193642	62	26,64614
0,197118	64	27,28582
0,200353	66	27,73364
0,203344	68	28,31424
0,206087	70	28,86503
0,208579	72	28,78699
0,210818	74	28,92321
0,212799	76	29,63078
0,214521	78	29,87056
0,215982	80	29,9855
0,217179	82	30,2407
0,218112	84	30,0133
0,218779	86	29,92591
0,21918	88	29,71142
0,219313	90	29,10081
0,21918	92	29,08308

0,218779	94	28,67153
0,218112	96	27,95882
0,217179	98	27,66134
0,215982	100	27,33191
0,214521	102	26,97136
0,212799	104	26,05766
0,210818	106	25,46969
0,208579	108	24,85761
0,206087	110	24,22299
0,203344	112	23,65072
0,200353	114	22,81051
0,197118	116	21,95782
0,193642	118	21,33277
0,189931	120	20,69056
0,185988	122	19,95638
0,181819	124	19,3601
0,177428	126	18,60192
0,172821	128	17,76503
0,168004	130	17,26982
0,162982	132	16,68014
0,157761	134	16,00369
0,152348	136	15,1863
0,146749	138	14,58014
0,140972	140	13,97727
0,135023	142	13,26577
0,128909	144	12,72846
0,122639	146	12,14948
0,116218	148	11,44682
0,109657	150	10,7691
0,102961	152	10,06097
0,096141	154	9,292104
0,089203	156	8,738453
0,082156	158	8,01115
0,07501	160	7,305057
0,067772	162	6,625137
0,060451	164	5,97139
0,053057	166	5,297475
0,045598	168	4,584484
0,038083	170	3,844565
0,030523	172	3,087538
0,022924	174	2,323645
0,015299	176	1,560696
0,007654	178	0,773614
0,000957	180	0,09645
výsledný tok		1484,146

$\Delta\Omega$ [sr]	γ [°]	ϕ [lm]
		CO
0,000957	0	0,01961
0,007654	2	0,22162
0,015299	4	0,57724
0,022924	6	1,06169
0,030523	8	1,653953
0,038083	10	2,327772
0,045598	12	3,078292
0,053057	14	3,808432
0,060451	16	4,694478
0,067772	18	5,664652
0,07501	20	6,476727
0,082156	22	7,547441
0,089203	24	8,565979
0,096141	26	9,559183
0,102961	28	10,62461
0,109657	30	11,62263
0,116218	32	12,71337
0,122639	34	13,715
0,128909	36	14,74122
0,135023	38	15,75908
0,140972	40	16,978
0,146749	42	18,14353
0,152348	44	19,1405
0,157761	46	20,19931
0,162982	48	21,25903
0,168004	50	22,25022
0,172821	52	23,44144
0,177428	54	24,13732
0,181819	56	25,31663
0,185988	58	26,26925
0,189931	60	27,0541
0,193642	62	27,97014
0,197118	64	28,39325
0,200353	66	28,21794
0,203344	68	29,12737
0,206087	70	30,01509
0,208579	72	30,46152
0,210818	74	30,36663
0,212799	76	30,82231
0,214521	78	30,98589
0,215982	80	31,19688
0,217179	82	30,76157
0,218112	84	30,80644
0,218779	86	30,81314
0,21918	88	30,51877
0,219313	90	30,27412
0,21918	92	30,08028

0,218779	94	29,67515
0,218112	96	29,23557
0,217179	98	28,67604
0,215982	100	28,17225
0,214521	102	27,72422
0,212799	104	26,9908
0,210818	106	26,31775
0,208579	108	25,62106
0,206087	110	25,06755
0,203344	112	24,40841
0,200353	114	23,72872
0,197118	116	22,87234
0,193642	118	22,15917
0,189931	120	21,20251
0,185988	122	20,39029
0,181819	124	19,78771
0,177428	126	18,95489
0,172821	128	18,04783
0,168004	130	17,54474
0,162982	132	16,75942
0,157761	134	16,15945
0,152348	136	15,54404
0,146749	138	14,85538
0,140972	140	13,96031
0,135023	142	13,21991
0,128909	144	12,45112
0,122639	146	11,82582
0,116218	148	11,23464
0,109657	150	10,71002
0,102961	152	9,79656
0,096141	154	9,162968
0,089203	156	8,487457
0,082156	158	7,754536
0,07501	160	7,115996
0,067772	162	6,42934
0,060451	164	5,749363
0,053057	166	5,090692
0,045598	168	4,362254
0,038083	170	3,687551
0,030523	172	2,97865
0,022924	174	2,226162
0,015299	176	1,476435
0,007654	178	0,73928
0,000957	180	0,092048
výsledný tok		1527,880

$\Delta\Omega$ [sr]	γ [°]	ϕ [lm]
		CO
0,000957	0	0,011701
0,007654	2	0,095145
0,015299	4	0,195146
0,022924	6	0,360405
0,030523	8	0,854318
0,038083	10	1,663121
0,045598	12	2,884115
0,053057	14	4,662049
0,060451	16	6,804868
0,067772	18	9,223001
0,07501	20	11,73161
0,082156	22	14,21773
0,089203	24	16,66926
0,096141	26	19,64514
0,102961	28	22,46098
0,109657	30	25,12431
0,116218	32	28,37457
0,122639	34	31,63592
0,128909	36	34,82454
0,135023	38	38,12167
0,140972	40	41,06121
0,146749	42	44,35361
0,152348	44	47,77863
0,157761	46	50,1171
0,162982	48	54,15915
0,168004	50	57,05653
0,172821	52	59,88613
0,177428	54	63,14033
0,181819	56	66,18009
0,185988	58	68,90654
0,189931	60	70,98451
0,193642	62	73,00087
0,197118	64	75,03172
0,200353	66	77,8096
0,203344	68	79,13643
0,206087	70	80,37151
0,208579	72	83,54652
0,210818	74	85,04249
0,212799	76	85,32305
0,214521	78	86,97212
0,215982	80	87,65204
0,217179	82	88,31449
0,218112	84	88,69385
0,218779	86	88,16527
0,21918	88	88,32673
0,219313	90	88,38057
0,21918	92	88,23769

0,218779	94	87,89865
0,218112	96	87,18757
0,217179	98	87,344
0,215982	100	86,42369
0,214521	102	85,57777
0,212799	104	83,68056
0,210818	106	80,84604
0,208579	108	80,6656
0,206087	110	78,94827
0,203344	112	76,57565
0,200353	114	75,61204
0,197118	116	73,59034
0,193642	118	71,27024
0,189931	120	69,51852
0,185988	122	67,16876
0,181819	124	63,89037
0,177428	126	61,48254
0,172821	128	59,32448
0,168004	130	56,51053
0,162982	132	54,35778
0,157761	134	51,7834
0,152348	136	49,01642
0,146749	138	46,20167
0,140972	140	43,52374
0,135023	142	40,53513
0,128909	144	37,8095
0,122639	146	35,32263
0,116218	148	32,29319
0,109657	150	29,84626
0,102961	152	27,68933
0,096141	154	25,26919
0,089203	156	22,72092
0,082156	158	20,42546
0,07501	160	17,97831
0,067772	162	15,7204
0,060451	164	13,60482
0,053057	166	11,44497
0,045598	168	9,558147
0,038083	170	7,797329
0,030523	172	6,137699
0,022924	174	4,54464
0,015299	176	3,02041
0,007654	178	1,511126
0,000957	180	0,194765
výsledný tok		4279,011