

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



**Analýza světelně technických
vlastností materiálů pro difuzory
svítidel**

Bakalářská práce

Lukáš Holubec

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marek Bálský

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Obor: Aplikovaná elektrotechnika

2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Lukáš Holubec**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Analýza světelně technických vlastností materiálů pro difuzory svítidel**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Veličiny charakterizující světelně technické vlastnosti materiálů pro difuzory svítidel.
- 2) Metody měření světelně technických vlastností materiálů.
- 3) Analýza fotometrických parametrů vybraných vzorků rozptylových termoplastů.

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 13032: Světlo a osvětlení - Měření a způsob uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel.
- [2] Publikace CIE 130-1998: Practical Methods for the Measurement of Reflectance and Transmittance.
- [3] HABEL, Jiří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Vedoucí: Ing. Marek Bálský

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze 21. 5. 2015

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Marku Bálskému za ochotu, cenné rady a věnovaný čas. Dále bych poděkoval Ing. Michalu Opočenskému a Ing. Vladimíru Tauchmanovi ze společnosti TREVOS a.s. za pomoc při návrhu a výrobě měřicího přípravku. A také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu.

Abstrakt

Cílem této práce je změřit fotometrické vlastnosti vybraných vzorků rozptylových termoplastů, jako je např. světelný tok, činitel prostupu a úhel poloviční svítivosti. Bylo třeba navrhnout a zrealizovat testovací přípravek pro měřené vzorky. Veškeré měření bylo provedeno na goniometru v laboratoři světelné techniky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze, katedry elektroenergetiky. Z naměřených dat byly vypočteny dané fotometrické veličiny a sestrojeny grafy čar svítivosti, které poslouží firmě TREVOS a.s. k výběru vhodného materiálu pro výrobu difuzorů LED svítidel.

Klíčová slova:

Světelný tok, svítivost, osvětlenost, činitel prostupu, úhel poloviční svítivosti

Abstract

The objective of this bachelor's project is to measure the photometric properties of selected samples of thermoplastics (e.g. luminous flux, transmittance and half-peak divergence). It was necessary to design and realize measuring device for the measured samples. All the measuring has been done on the goniophotometer in laboratory of photometry at the Department of Electrical Power Engineering of the Faculty of Electrical Engineering of the CTU in Prague. Photometric properties of thermoplastics were calculated from the measured data and then the luminous intensity distribution diagram were designed. These results will be then used by the TREVOS company to select a suitable material for the manufacture of diffusers LED lights.

Key words:

Luminous flux, luminous intensity, illuminance, transmittance, half-peak divergence

Obsah

1	ÚVOD.....	7
2	SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY.....	8
2.1	SVĚTELNÝ TOK	8
2.2	PROSTOROVÝ ÚHEL.....	10
2.3	SVÍTIVOST.....	11
2.4	PROSTOROVÉ ROZLOŽENÍ SVÍTIVOSTI	13
2.5	OSVĚTLENOST	14
2.6	INTEGRÁLNÍ ČINITELÉ	15
2.7	ÚHEL POLOVIČNÍ SVÍTIVOSTI	16
3	MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH VELIČIN.....	17
3.1	PODMÍNKY PRO MĚŘENÍ V LABORATOŘI.....	17
3.2	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	17
3.2.1	<i>Luxmetr</i>	17
3.2.2	<i>Goniofotometr</i>	18
3.2.3	<i>Přípravek k vlastnímu měření</i>	19
3.3	METODY MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU	20
3.4	METODA MĚŘENÍ ČAR SVÍTIVOSTI.....	21
3.5	METODA VÝPOČTU ČINITELE PROSTUPU	22
3.6	METODA VÝPOČTU ČINITELE ROZPTYLU	22
3.7	METODA VÝPOČTU ÚHLU POLOVIČNÍ SVÍTIVOSTI.....	23
4	VZORKY ROZPTYLOVÝCH TERMOPLASTŮ.....	24
5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	25
5.1	VLASTNÍ MĚŘENÍ	25
5.2	NEJISTOTY MĚŘENÍ NA GONIOFOTOMETRU	34
6	ZÁVĚR	39
7	POUŽITÁ LITERATURA.....	40
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	41
9	PŘÍLOHY	42

1 Úvod

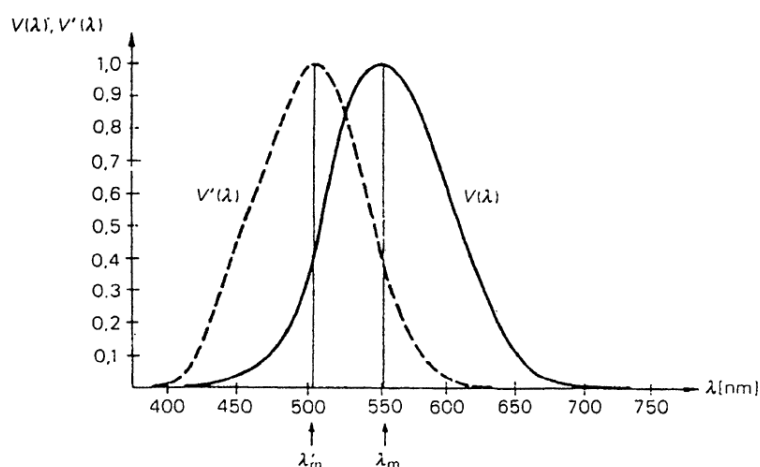
Téma práce bylo navrženo firmou TREVOS a.s., která se zabývá výrobou svítidel a jejich součástí, a má za úkol vyrobit měřicí přípravek a následně změřit fotometrické veličiny vybraných vzorků termoplastů pro výrobu difuzorů svítidel.

V současné době je veliký trend LED svítidel, které jsou méně náročné na spotřebu elektrické energie, nevadí jim časté vypínání a zapínání, jsou odolnější vůči otřesům, nárazům, chladu a oproti klasické žárovce mají až padesátkrát delší životnost. Nedílnou součástí svítidel jsou difuzory. U nich se klade důraz na fotometrické a chemické vlastnosti. Mezi fotometrické vlastnosti patří např. rovnoměrný prostup paprsků světla ze zdroje nebo vysoký činitel prostupu. Mezi chemické vlastnosti patří např. ochrana před mechanickým poškozením, znečištěním nebo vlhkostí. Existuje spousta druhů materiálů, z kterých se difuzory vyrábějí, ať již je to sklo nebo plast.

Tato práce je rozdělena na 3 části. V první části se zabývám popisem základních fotometrických veličin potřebných pro popis fotometrických vlastností difuzorů, jako je například světelný tok, svítivost, osvětlenost a prostorový úhel. Ve druhé části jsou uvedeny vzájemné vztahy daných veličin a jejich aplikace při měření fotometrických vlastností difuzorů. V závěrečné části jsou shrnuty výsledky měření několika vzorků termoplastů s využitím navrženého přípravku.

2 Světelně technické veličiny

Světelně technické veličiny se používají ve světelné technice. Ve světelné technice neposuzujeme energetické veličiny (např. zářivý tok, zářivost apod.), ale pracujeme s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují spektrální citlivost oka pro různou vlnovou délku. Každé lidské oko má ale rozdílnou spektrální citlivost pro danou vlnovou délku, proto byl zaveden pojem „Standartní fotometrický pozorovatel CIE“. To je ideální pozorovatel, jehož poměrná spektrální citlivost odpovídá křivkám $V(\lambda)$ pro fotopické (denní) vidění a $V'(\lambda)$ pro skotopické (noční) vidění (Obr. 1) [4].



Obr. 1 - Poměrná spektrální citlivost ideálního fotometrického pozorovatele [4]

2.1 Světelný tok

Světelný tok je světelně technická veličina, která odpovídá množství zářivému toku vyzářeného do prostoru. Světelný tok vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem. Jednotka světelného toku je lumen (lm). Světelný tok Φ monochromatického záření vlnové délky λ , jehož zářivý tok je Φ_e se určí ze vztahu:

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

kde: $\Phi(\lambda)$ - světelný tok dané vlnové délky λ

$K(\lambda)$ - světelná účinnost dané vlnové délky λ

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

Z rovnice (1) lze získat vztah pro poměrnou světelnou účinnost $V(\lambda)$:

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

kde: $V(\lambda)$ - poměrná světelná účinnost dané vlnové délky λ

$K(\lambda)$ - světelná účinnost dané vlnové délky λ

K_m - maximální světelná účinnost

Konstanta K_m má hodnotu $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Je to nejlepší odhad maxima světelné účinnosti záření pro fotopické vidění z roku 1979 [1]. Jinak řečeno, světelná účinnost monochromatického záření o vlnové délce $\lambda = 555 \text{ nm}$ při zářivém toku $\Phi_e = 1 \text{ W}$ je rovna světelnému toku $\Phi = 683 \text{ lm}$.

Důležité je, že pro záření základní vlnové délky $\lambda = 555 \text{ nm}$ je světelný účinek záření, tj. také spektrální citlivost oka pro fotopické $K(555)$ i skotopické $K'(555)$ vidění stejná a platí:

$$K(555) = K'(555) = 683 \quad [\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (3)$$

Světelný tok Φ složeného záření z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok Φ_e je dán průběhem $\Phi_e(\lambda)$ se určí z rovnice:

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, \text{m}] \quad (4)$$

kde: $\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda}$ - spektrální hustota zářivého toku Φ_e pro vlnovou délku λ

Je-li záření složené z více monochromatických záření, lze světelný tok Φ jednoduše spočítat tak, že se záření rozdělí na n malých úseků $\Delta\lambda_i$. Pro každý úsek určíme střední hodnotu zářivého toku $\Phi_e(\lambda_i)$ a hodnotu poměrné světelné účinnosti $V(\lambda_i)$. Světelný tok je tedy určen sumou všech úseků.

$$\Phi = K_m \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \cdot V(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i \quad [\text{lm}; \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}, \text{W} \cdot \text{m}^{-1}, -, \text{m}] \quad (5)$$

Stejně jako jsme u monochromatického záření určili veličiny $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$, tak u složeného záření určujeme K - světelnou účinnost složeného záření a V - poměrnou světelnou účinnost složeného záření [1].

2.2 Prostorový úhel

Prostorový úhel je důležitá veličina, která se používá ve světelné technice. Jednotkou prostorového úhlu je steradián (sr). Velikost prostorového úhlu je definována jako velikost vyřáté plochy obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule (Obr. 2). Vrchol takovéto kuželové plochy leží ve středu koule [1].

Prostorový úhel, pod kterým je ze středu koule o poloměru r vidět plocha A vyřátá na povrchu této koule, se vypočte ze vztahu:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad [sr; m^2, m] \quad (6)$$

kde: Ω - prostorový úhel

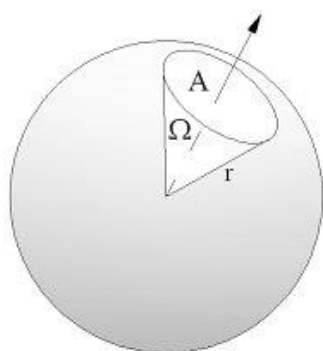
A - vyřátá plocha na povrchu koule

r - poloměr koule

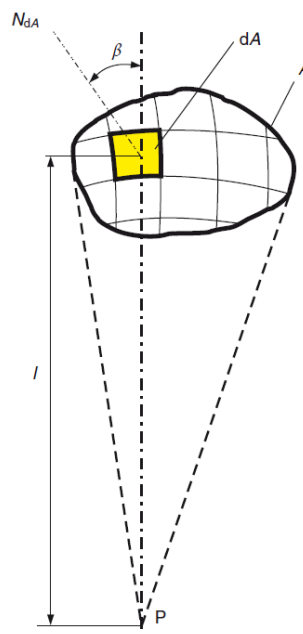
Prostorový úhel elementu dA obecné plochy A , pozorované ze vzdálenosti l z bodu P (Obr. 3), se určí z výrazu:

$$d\Omega = \frac{dA}{l^2} \cdot \cos \beta \quad [sr; m^2, m, -] \quad (7)$$

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



Obr. 2 - Definice prostorového úhlu [7]



Obr. 3 - K výpočtu prostorového úhlu, pod nímž je z bodu P vidět plocha A [1]

2.3 Svítivost

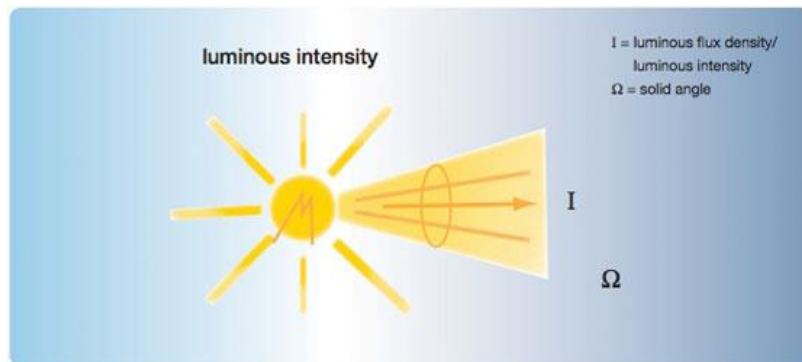
Svítivost určuje hustotu světelného toku vyzářeného zdrojem v prostorovém úhlu do určitého směru (Obr. 4). Jednotkou svítivosti je kandela ($cd = lm \cdot sr^{-1}$), která patří mezi sedm základních fyzikálních jednotek SI. Svítivost zdroje ve směru určeném úhly γ, ζ lze spočítat:

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad [cd; lm, sr] \quad (8)$$

kde: $I_{\gamma\zeta}$ - svítivost svítidla ve směru určeném úhly γ, ζ

$d\Phi$ - vyzářovaný světelný tok

$d\Omega_{\gamma\zeta}$ - prostorový úhel, který se nachází v mezích úhlů γ, ζ kam je vyzářován světelný tok Φ



Obr. 4 - Definice svítivosti [6]

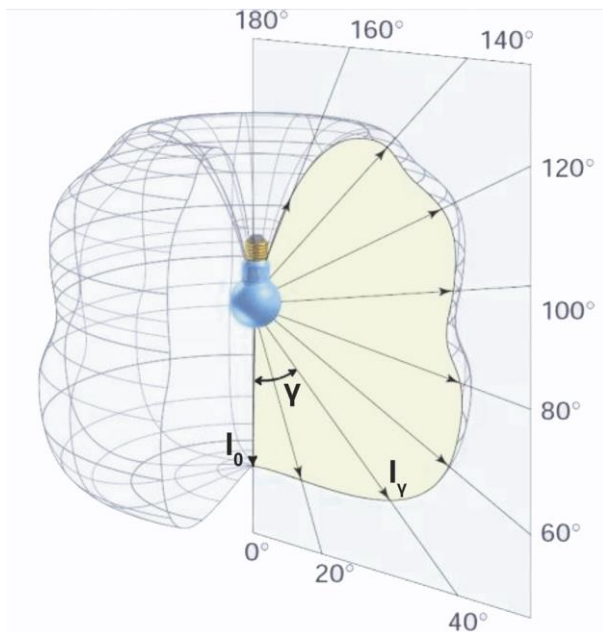
Svítivost se určuje pouze pro bodový zdroj, což znamená, že vyzářující zdroj by měl mít zanedbatelné rozměry vůči pozorovateli. V praxi dosáhneme bodového zdroje tak, je-li splněna následující podmínka:

$$r \geq 5 \cdot a_z \quad [m; -, m] \quad (9)$$

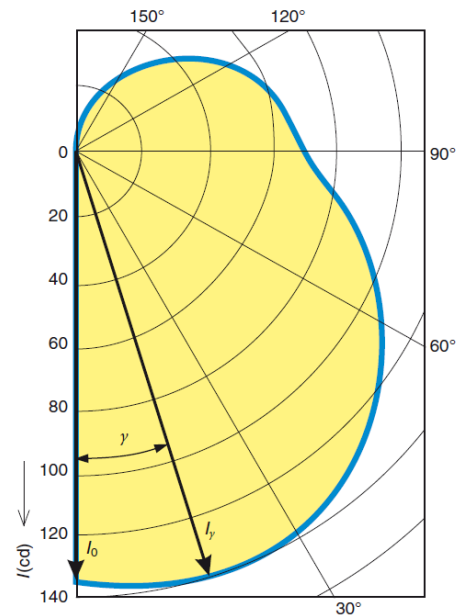
kde: r - vzdálenost pozorovatele od zdroje

a - největší rozměr zdroje

Zjistíme-li svítivost zdroje ve všech směrech a nanese-li ji od fotometrického středu zdroje jako radiusvektory, dostaneme spojením všech koncových bodů fotometrickou plochu svítivosti (Obr. 5).



Obr. 5 - Fotometrická plocha svítivosti [2]



Obr. 6 - Čáry svítivosti v polárních souřadnicích [1]

Obecně rozložení svítivosti měříme v několika rovinách (řezy fotometrické plochy svítivosti), v kterých vzniknou čáry svítivosti v polárních souřadnicích (Obr. 6). Počátek grafu svítivosti se umísťuje do fotometrického středu svítidla. Vztažný směr svítivosti, od kterého měříme úhly, je kolmý k hlavní vyzařovací ploše a je značen I_0 [1]. Čáry svítivosti měříme na goniofotometru (viz kapitola 3.2.2) a lze je popsat vztahem:

$$I_\gamma = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad [\text{cd}; \text{cd}, -] \quad (10)$$

kde: I_γ - hodnota svítivosti přečtená z Obr. 6, pod úhlem γ od vztažného směru

I_0 - svítivost zdroje ve vztažném směru

$f_I(\gamma)$ - indikatrix svítivosti, matematická funkce popisující (aproximující) čáru svítivosti

Pro křivky jasů platí podobný vztah:

$$L_\gamma = L_0 \cdot f_L(\gamma) \quad [\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, -] \quad (11)$$

kde: L_γ - jas svazku paprsků ve směru pod úhlem γ od vztažného směru

L_0 - jas svazku paprsků zvolený za vztažný směr

$f_L(\gamma)$ - indikatrix jasů, charakteristická funkce popisující (aproximující) křivku jasů

Důležitá je souvislost mezi indikatrix svítivosti a jasů:

$$f_I(\gamma) = f_L(\gamma) \cdot \cos \gamma \quad (12)$$

Je-li svítící ploška, jejíž jas L je ve všech směrech poloprostoru konstantní $f_L(\gamma) = 1$, pak je v tomto poloprostoru kosinové rozložení svítivosti $f_I(\gamma) = \cos \gamma$, tj. $I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma$ [1].

2.4 Prostorové rozložení svítivosti

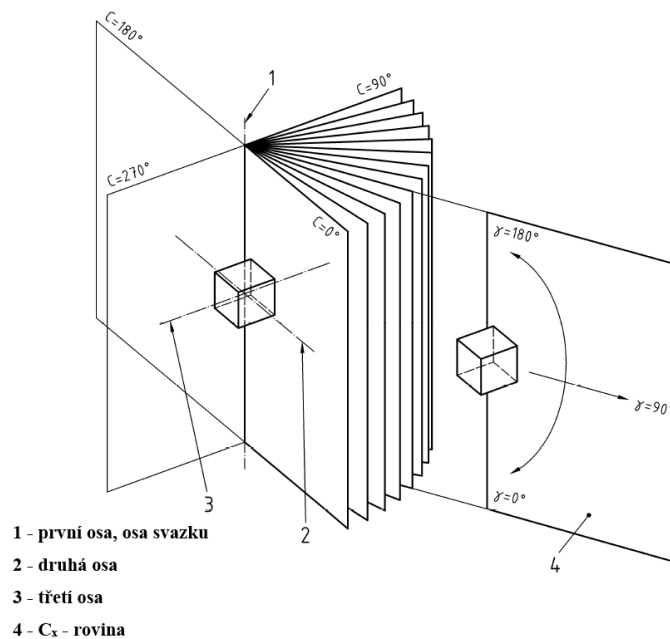
Prostorové rozložení svítivosti se měří ve fotometrických rovinách.

Z mnoha typů fotometrických rovin byly používány tři. Označeny dle CIE jako A -, B - a C - roviny.

Použití soustavy A - rovin se nedoporučuje.

Soustavu B - rovin lze použít pro popis svítidel, jako jsou např. světlomety.

Soustavu C - rovin (Obr. 7) tvoří svazek rovin, jejichž osa (průsečnice) prochází fotometrickým středem svítidla. C - roviny se vyznačují úhly C_x v rozsahu $0^\circ \leq C_x \leq 360^\circ$. V dané C_x rovině jsou směry určeny úhly γ v rozsahu $0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, směr $\gamma = 0$ odpovídá bodu na vodorovné rovině pod fotometrickým středem svítidla [5].



Obr. 7 - Soustava fotometrických rovin $C - \gamma$ [5]

2.5 Osvětlenost

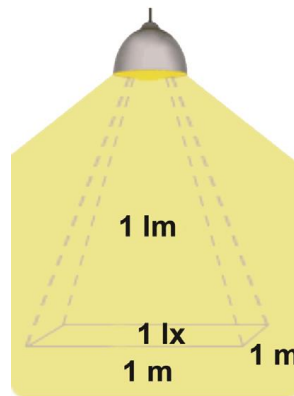
Osvětlenost je definována jako množství světelného toku dopadající na jednotkovou plochu. Jednotka osvětlenosti je lux (lx), (Obr. 8).

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad [lx; lm, m^2] \quad (13)$$

kde: E - osvětlenost

$d\Phi$ - množství světelného toku dopadlého na plochu dA

dA - plocha, na kterou dopadá světelný tok $d\Phi$



Obr. 8 - Osvětlenost, definice jednoho luxu (lx) [8]

Osvětlujeme-li bodovým zdrojem Z z určité vzdálenosti l bod P , který je uvnitř plochy dA a leží v rovině ρ a pokud normála N_ρ roviny ρ svírá úhel β s dráhou paprsku l (Obr. 9), lze pro osvětlenost $E_{P\rho}$ v bodě P použít vzorec:

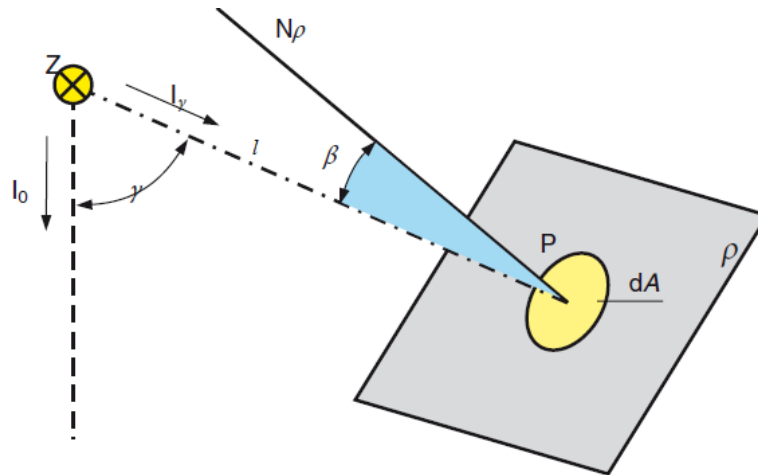
$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos \beta \quad [lx; cd, m, -] \quad (14)$$

kde: $E_{P\rho}$ - osvětlenost roviny v okolí bodu P

I_γ - svítivost bodového zdroje ve směru paprsku l

l - vzdálenost bodového zdroje od bodu

β - úhel mezi normálou roviny ρ a paprskem



Obr. 9 - K výpočtu osvětlenosti bodovým zdrojem Z v bodě P umístěném v rovině ρ [1]

Z rovnice (14) lze zpozorovat, že osvětlenost v bodě P klesá s druhou mocninou vzdálenosti l (tzv. zákon čtverce vzdálenosti). Osvětlenost je přímo úměrná úhlu β , z čehož vyplývá, že největší intenzitu osvětlení dostaneme tehdy, bude-li $\beta = 0$.

2.6 Integrovní činitelé

Světelný tok Φ , který dopadá na materiál, se obecně dělí na 3 části, a to na část Φ_ρ , která odráží, na část Φ_τ , která materiálem prostupuje a na část Φ_α , kterou materiál pohltí. Pro tyto části platí:

$$\Phi = \Phi_\rho + \Phi_\tau + \Phi_\alpha \quad [\text{lm}] \quad (15)$$

Vlastnosti světelně technických látek charakterizují 3 integrovní činitelé [1], a to:

$$\text{- integrovní činitel odrazu:} \quad \rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi} \quad (16)$$

$$\text{- integrovní činitel prostupu:} \quad \tau = \frac{\Phi_\tau}{\Phi} \quad (17)$$

$$\text{- integrovní činitel pohlcení:} \quad \alpha = \frac{\Phi_\alpha}{\Phi} \quad (18)$$

Pro tyto činitele platí:

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (19)$$

Pro neprůsvitné materiály platí:

$$\rho + \alpha = 1 \quad (20)$$

Pro černá tělesa platí:

$$\alpha = 1 \tag{21}$$

2.7 Úhel poloviční svítivosti

Úhel odvozený z čáry svítivosti zdroje určený směry, v kterých svítivost klesá na polovinu maximální hodnoty [4].

3 Měření světelně technických veličin

3.1 Podmínky pro měření v laboratoři

Svítidlo (měřený zdroj) by se mělo měřit v takovém prostředí, aby světlo ze svítidla dopadalo na fotometrickou hlavici přímo nebo úmyslným odrazem. Snažíme se minimalizovat parazitní světlo.

Průměrná teplota v laboratoři by se měla pohybovat mezi 20 - 27 °C, avšak během měření nesmí kolísat o více jak 3°C.

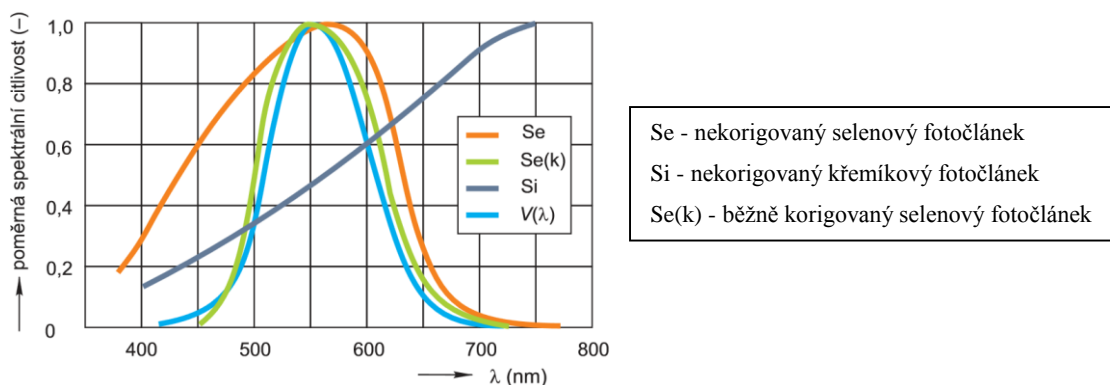
Světelný tok měřených svítidel může být závislý i na proudění vzduchu v okolí svítidla. Proudění může vzniknout např. klimatizací, nebo větráním. Proudění vzniklé vlastním ohřevem svítidla se zanedbává [5].

3.2 Měřicí přístroje

Při měření světelně technických veličin se setkáme s různými přístroji. Budu se věnovat popisu přístrojů, které jsem použil při měření světelného toku a svítivosti.

3.2.1 Luxmetr

Luxmetr se používá k měření osvětlenosti. Důležitou částí je fotočlánek (běžně křemíkový, dříve selenový), neboli fyzikální čidlo. Je nutné, aby spektrální citlivost fotočláneku byla co nejbližší křivce $V(\lambda)$, spektrální citlivosti ideálního fotometrického pozorovatele (Obr. 1). Spektrální rozložení poměrné citlivosti nekorigovaného fotočláneku lze vidět na Obr. 10.



Obr. 10 - Příklady průběhů poměrné spektrální citlivosti hradlových fotočláneků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního fotometrického pozorovatele [13]

Luxmetry můžeme rozdělit do čtyř kategorií dle jejich třídy přesnosti. Ty jsou označeny 1, 2, 3 a 4, nebo dle mezinárodního doporučení L, A, B, C [11]. Dané třídy udávají největší možnou souhrnnou chybu $f_c = 2, 5, 10$ a 20% . Sleduje se 11 druhů různých chyb ($f_1 - f_{11}$), např. f_2 - chyba spektrální, f_5 - chyba vlivu teploty (vztažená na $1 \text{ }^\circ\text{C}$) atd. [10]. Luxmetry třídy L, A se využívají pro přesná laboratorní měření. Pro běžná měření postačují luxmetry třídy B nebo C. Vlastnosti fotočlánku se mohou časem měnit, je tedy zapotřebí luxmetry pravidelně kalibrovat dle pokynů výrobce a požadavků úřadu pro normalizaci a měření.

V laboratoři světelné techniky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze, katedry elektroenergetiky je na goniofotometru umístěn digitální luxmetr Minolta T-10 (Obr. 11), spadající do třídy přesnosti B.



Obr. 11 - Digitální luxmetr Konica Minolta T-10 [12]

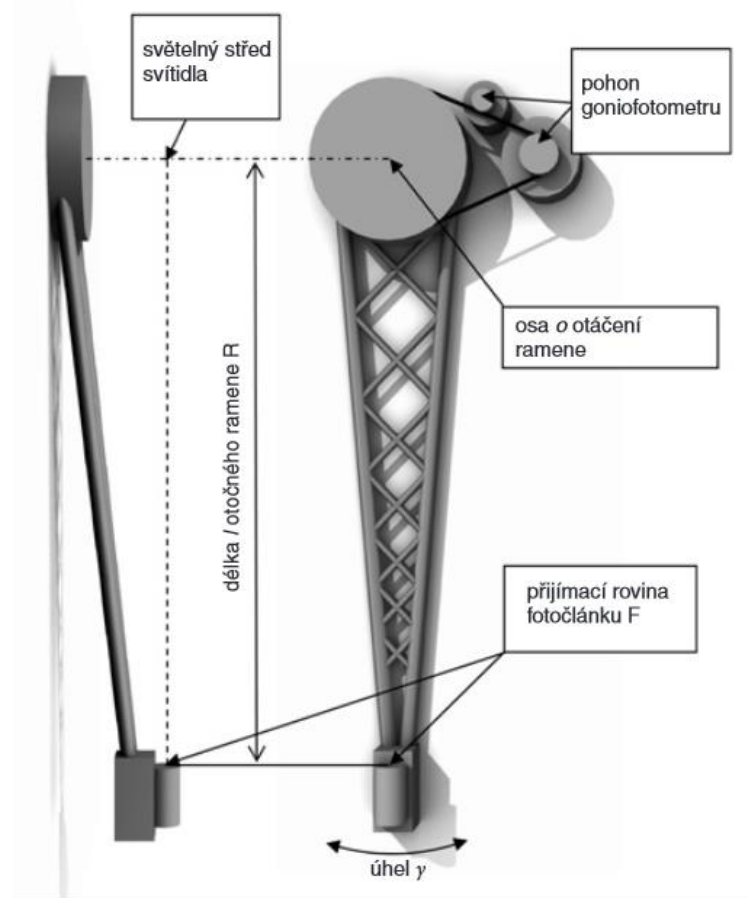
3.2.2 Goniofotometr

Goniofotometr je přístroj, který dokáže změřit svítivost svítidla či světelného zdroje v různých fotometrických rovinách (viz kapitola 2.4)

Měřením získáme čáry svítivosti v polárních souřadnicích (Obr. 6). Existuje několik konstrukčních uspořádání [5]:

- zdroj světla se otáčí okolo svislé i vodorovné osy, fotometrická hlavice je pevná
- zdroj světla se otáčí okolo svislé osy, soustava pohyblivých zrcadel kolem vodorovné osy, fotometrická hlavice je pevná
- zdroj světla je pevný, fotometrická hlavice se pohybuje po fiktivní kulové ploše
- zdroj světla se otáčí okolo svislé osy, fotometrická hlavice je pohyblivá

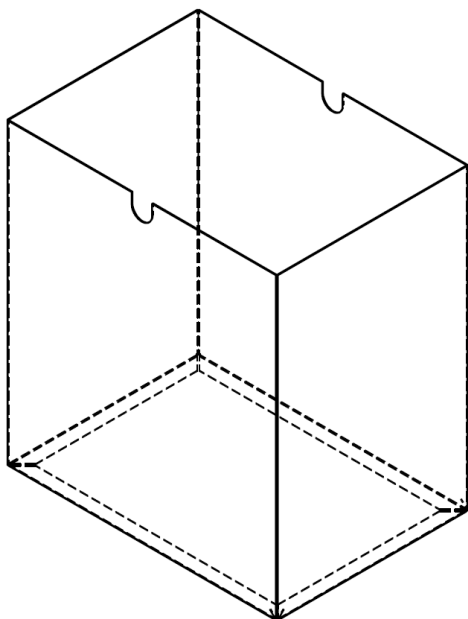
Konstrukce všech goniofotometrů musí být tuhá, aby během rotace nedocházelo k deformaci či kývání nosných částí.



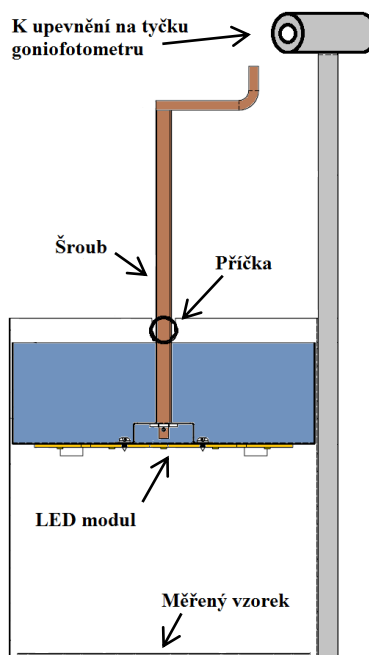
Obr. 12 - Goniofotometr s pohyblivým ramenem [9]

3.2.3 Přípravek k vlastnímu měření

Pro vlastní měření jsem navrhl přípravek, kterým jsem testoval dané vzorky termoplastů. Bylo potřeba dosáhnout toho, aby světelný zdroj, v našem případě LED modul, osvětloval daný vzorek termoplastu a já následně mohl na goniofotometru měřit čáry svítivosti. Hlavní konstrukce je ve tvaru čtyřstěnného hranolu, který je dutý. Ve spodní části této konstrukce je malý lem, který udržuje měřený vzorek uvnitř (Obr. 13). V této konstrukci se za pomoci šroubu pohybuje přepážka, na které je ze spodu připevněn LED modul, světelný zdroj. Šroub je uchycen v třmenu přepážky a v příčce, která je umístěna v horních výřezech hranolu. Na konci šroubu je připevněna klička umožňující snadné nastavení požadované výšky světelného zdroje od měřeného vzorku termoplastu. K vnější straně konstrukce je přivařena tyčka, pomocí které připevňujeme přípravek k tyčce goniofotometru. Celý přípravek je vidět na Obr. 14.



Obr. 13 - Vnější konstrukce přípravku pro měření vzorků termoplastů pro difuzory svítidel



Obr. 14 - Přípravek pro měření světelně technických vlastností termoplastů pro difuzory svítidel

3.3 Metody měření světelného toku

Světelný tok lze přímo změřit v integrátoru za použití normálu světelného toku, nebo ho lze spočítat z naměřených křivek svítivosti. Jelikož všechna má měření probíhala na goniofotometru, budu počítat světelný tok z naměřených křivek svítivosti pomocí metody pásmových toků.

Nejprve vycházíme z předpokladu, že známe rozložení svítivosti daného zdroje ve všech směrech v prostoru. Pokud je známa svítivost $I_{\gamma\zeta}$ daného zdroje ve směru, který udávají úhly γ, ζ , tak světelný tok $d\Phi$ vyzařovaný zdrojem do prostorového úhlu $d\Omega_{\gamma\zeta}$ se spočítá:

$$d\Phi = I_{\gamma\zeta} \cdot \Omega_{\gamma\zeta} \quad [\text{lm; cd, sr}] \quad (22)$$

Vyzařující zdroj lze rozdělit na souměrný a nesouměrný. Světelný tok spočítáme pro souměrný vyzařující zdroj z rovnice (24) a pro nesouměrný z rovnice (23).

$$\Phi = \int_0^{4\pi} I_{\gamma\zeta} \cdot d\Omega_{\gamma\zeta} = \int_{\zeta=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\pi} I_{\gamma\zeta} \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma \cdot d\zeta \quad [\text{lm; cd, -, rad, rad}] \quad (23)$$

$$\Phi = 2\pi \int_0^{k\pi} I_{\gamma} \cdot \sin \gamma \cdot d\gamma \quad [\text{lm; cd, -, rad}] \quad (24)$$

kde: $k = 1$ vyzařuje-li svítidlo do celého prostoru

$k = 1/2$ vyzařuje-li jen do poloprostoru

Pro výpočty světelných toků rotačně souměrně vyzařujících svítidel se rovnice (24) může přepsat na součet dílčích pásmových toků $\Delta\Phi_{\gamma}$ vyzařovaných do prostorových úhlů $\Delta\Omega_{\gamma}$, které jsou postupně vymezeny úzkými kulovými pásy dle úhlu γ .

Výpočet takového prostorového úhlu $\Delta\Omega_{\gamma}$, který je vymezen úhly $(\gamma - \Delta\gamma)$ a $(\gamma + \Delta\gamma)$ se určí ze vztahu:

$$\Delta\Omega_{\gamma} = 2\pi[\cos(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] \quad [\text{sr}] \quad (25)$$

Světelný tok v pásmu vymezeném úhly $(\gamma - \Delta\gamma)$ a $(\gamma + \Delta\gamma)$ tedy je:

$$\Delta\Phi_{\gamma} = I_{\gamma} \cdot \Delta\Omega_{\gamma} \quad [\text{lm; cd, sr}] \quad (26)$$

Obvykle se uvažuje $2 \cdot \Delta\gamma = 10^{\circ}$, tj. $\Delta\gamma = 5^{\circ}$. V našem případě jsme uvažovali $2 \cdot \Delta\gamma = 5^{\circ}$, tj. $\Delta\gamma = 2,5^{\circ}$.

Celkový světelný tok zdroje je tedy roven součtu všech dílčích pásmových toků $\Delta\Phi_{\gamma}$.

$$\Phi_Z = \sum I_{\gamma} \cdot \Delta\Omega_{\gamma} \quad [\text{lm; cd, sr}] \quad (27)$$

kde rozlišujeme: $\Phi_Z = \Phi$ - jedná se o výsledný světelný tok zdroje

$\Phi_Z = \Phi_{\tau}$ - jedná se o světelný tok vystupující ze vzorku

3.4 Metoda měření čar svítivosti

Čáry svítivosti měříme na goniofotometru. V laboratoři světelné techniky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze, katedry elektroenergetiky je goniofotometr s otočným ramenem R, nesoucí fotočlánek F v konstantní vzdálenosti $l = 2 \text{ m}$ od

měřeného zdroje a fotočlásku (Obr. 12). Čáry svítivosti zde měříme v polorovinách fotometrické soustavy $C - \gamma$ (Obr. 7). V dané polorovině C pro každý úhel γ změříme luxmetrem (jehož čidlem je fotočlánek F umístěný na konci ramene) osvětlenost $E_{\gamma z}$, pro kterou platí [9]:

$$E_{\gamma z} = \frac{I_{\gamma z}}{l^2} \quad [\text{lx; cd, m}^2] \quad (28)$$

Z rovnice (28), vyjádříme svítivost $I_{\gamma z}$ pro hledaný úhel, která musí být zkorigována podle hodnoty osvětlenosti. Korigovaná svítivost má tvar:

$$I_{\gamma} = E_{\gamma z} \cdot l^2 \cdot k_{2856} \quad [\text{cd; lx, m}^2, -] \quad (29)$$

kde: k_{2856} - prům. korekční koeficient (uveden v kalibračním listu luxmetru)

$$k_{2856} - \text{pro } E_{\gamma z} < 30 \text{ lx} = 0,993$$

$$k_{2856} - \text{pro } E_{\gamma z} > 30 \text{ lx} \wedge E_{\gamma z} < 300 \text{ lx} = 0,1014$$

V našem případě, kde $l = 2 \text{ m}$, platí:

$$I_{\gamma} = 4 \cdot E_{\gamma z} \cdot k_{2856} \quad [\text{cd; m, lx, -}] \quad (30)$$

3.5 Metoda výpočtu činitele prostupu

Činitel prostupu udává hodnotu, která vyjadřuje, jaké množství světelného toku projde daným vzorkem. Vypočítá se jako podíl světelného toku z vzorku vystupujícího a světelného toku na vzorek za daných okolností dopadajícího, rovnice (17) [4].

Činitel prostupu nám umožní porovnat mezi sebou měřené vzorky z hlediska prostupnosti světelného toku.

3.6 Metoda výpočtu činitele rozptylu

Činitel rozptylu σ je roven podílu aritmetického průměru hodnot jasu měřených pod úhly 20° a 70° a jasu v 5° od normály při kolmém dopadu světla [4].

$$\sigma = \frac{L(20^\circ) + L(70^\circ)}{2 \cdot L(5^\circ)} \quad [-; \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}, \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (31)$$

Jelikož měření probíhalo ve dvou polorovinách, výsledný činitel rozptylu je roven průměru činitelů rozptylu v těchto dvou polorovinách:

$$\sigma = \frac{\sigma_{C0} + \sigma_{C90}}{2} \quad [-] \quad (32)$$

3.7 Metoda výpočtu úhlu poloviční svítivosti

Úhel poloviční svítivosti určíme z grafu čar svítivosti. Jelikož jsme měřili po 5°, tak výsledný úhel se vždy nachází v rozmezí intervalu 5°. Abychom zjistili přesný úhel, je zapotřebí lineární interpolace.

V našem případě se výsledný úhel poloviční svítivosti vypočítá takto:

$$\gamma_H = \gamma_1 + (I_H - I_{\gamma_1}) \cdot \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{I_{\gamma_2} - I_{\gamma_1}} \quad [^\circ; ^\circ, \text{cd}, \text{cd}, ^\circ, ^\circ, \text{cd}, \text{cd}] \quad (33)$$

kde: γ_H - úhel poloviční svítivosti

γ_1 - menší úhel z intervalu 5° kde se nachází poloviční svítivost

γ_2 - větší úhel z intervalu 5° kde se nachází poloviční svítivost

I_H - poloviční svítivost

I_{γ_1} - svítivost v úhlu γ_1

I_{γ_2} - svítivosti v úhlu γ_2

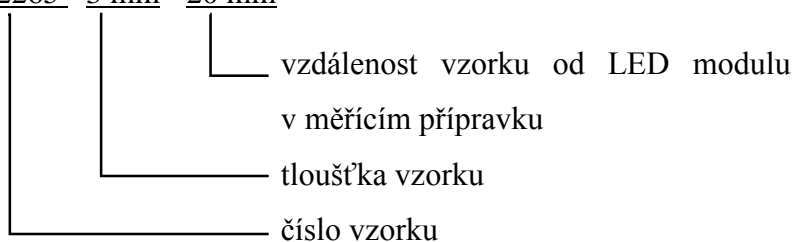
Jelikož měření probíhalo ve dvou polorovinách, výsledný úhel poloviční svítivosti je roven průměru úhlů polovičních svítivostí v těchto dvou polorovinách:

$$\gamma_H = \frac{\gamma_{HC0} + \gamma_{HC90}}{2} \quad [^\circ] \quad (34)$$

4 Vzorky rozptylových termoplastů

Firma TREVOS a.s. mi poskytla několik vzorků termoplastů. Jedná se o translucentní Makrolon od firmy Bayer, který využívají pro výrobu difuzorů svítidel. Vzorky se liší různými přísadkami translucentní složky. Označení vzorků jsem zachoval v podobě, ve které jsem je převzal. Daný vzorek je tedy označen číslem a následně tloušťkou. Ve výsledcích měření je ještě uvedena vzdálenost, ve které je vzorek měřen.

Příklad označení: 002265 - 3 mm - 20 mm



V Tab. 1 je přehled všech měřených vzorků. Mezi měřené vzorky jsem přidal svítidlo Futura 2.2 ft PC AL 2600 vyrobené firmou TREVOS a.s., které jsem měl k dispozici.

Tab. 1 - Přehled měřených vzorků

Měřené vzorky					
021172 - 2 mm	021173 - 2 mm	021180 - 2 mm	021181 - 2 mm	021182 - 2mm	Futura 2.2 ft PC AL 2600

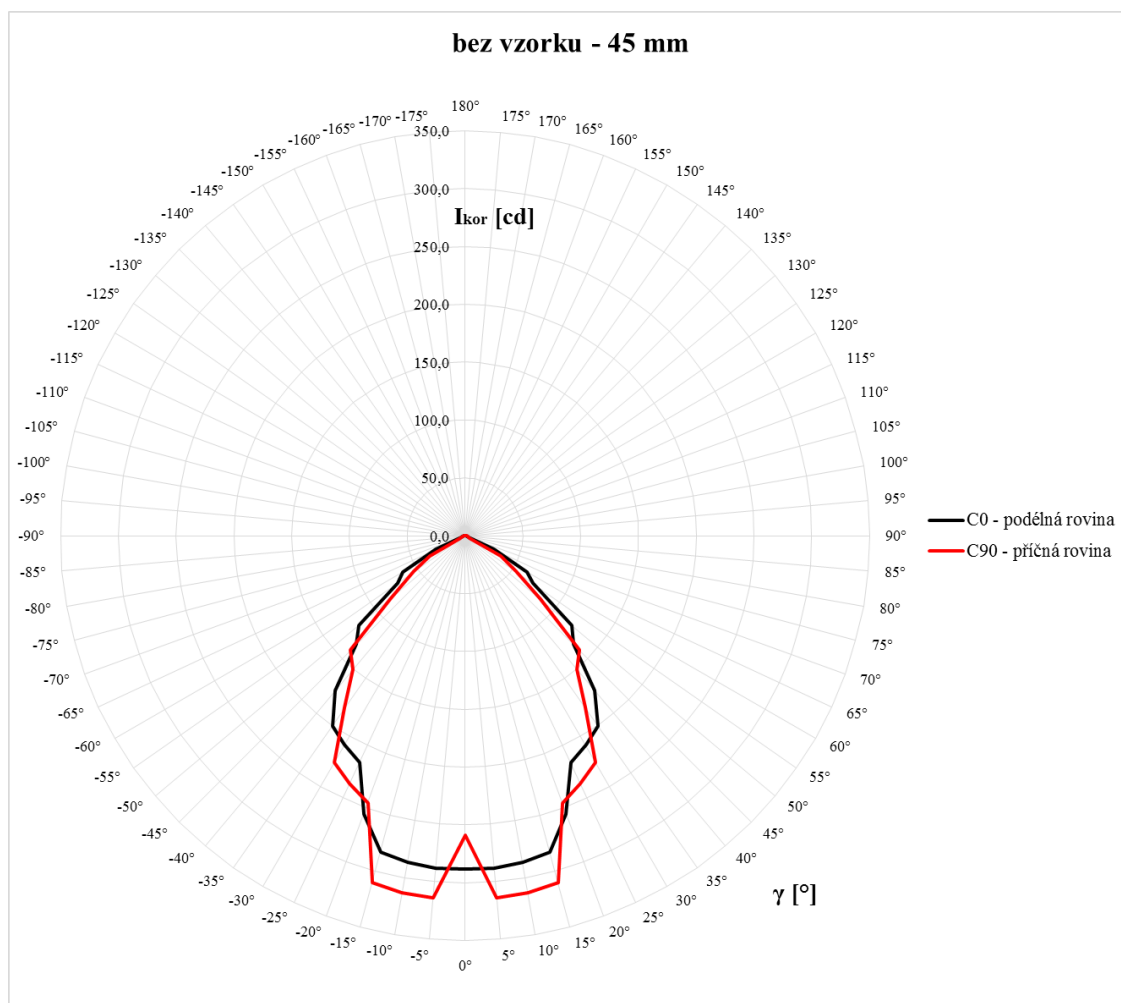
5 Výsledky měření

5.1 Vlastní měření

V této kapitole uvedu vypočtené fotometrické veličiny a grafy čar svítivosti.

Měření bez vzorku - 45 mm

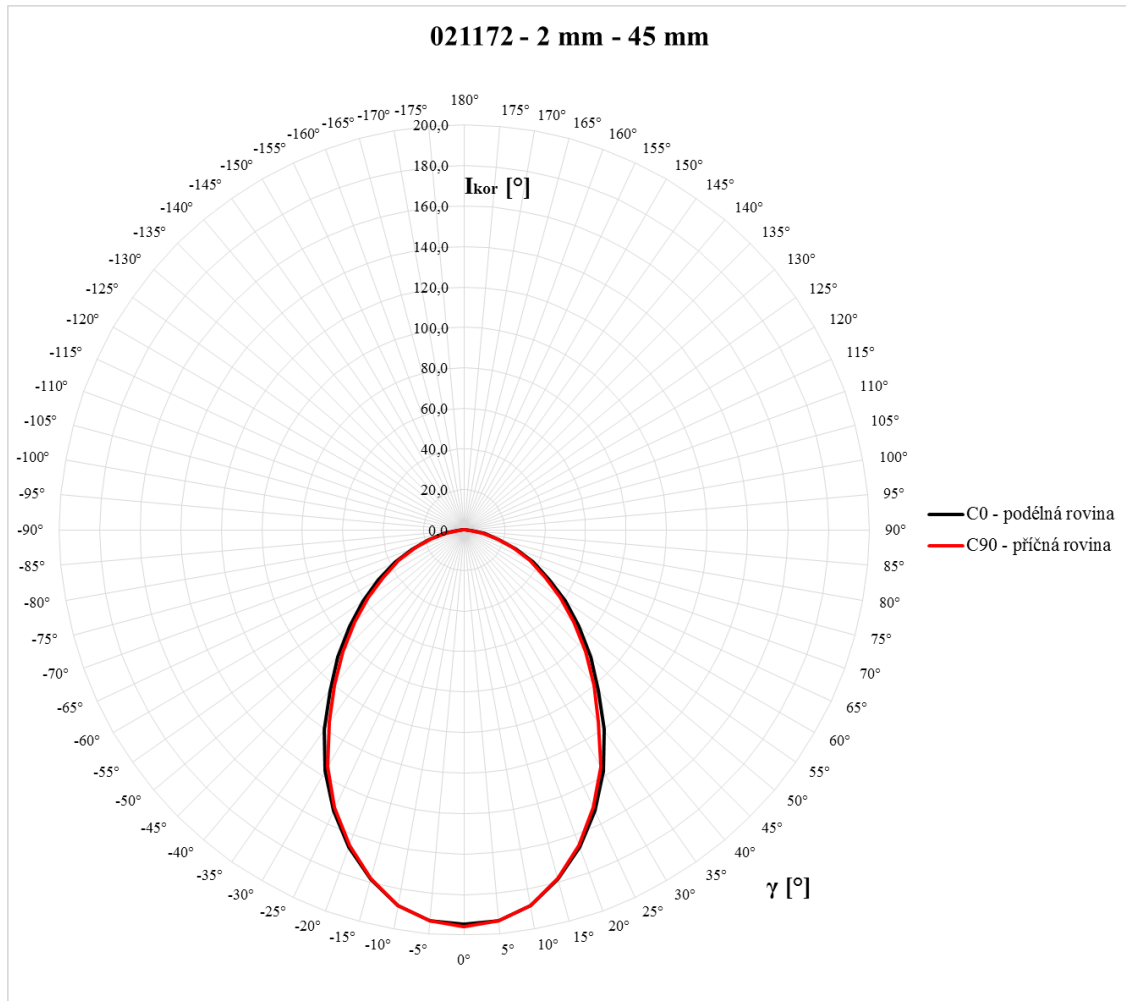
Toto měření bylo provedeno bez vzorku, takže byla změřena svítivost I_{γ} samotného LED modulu umístěného v měřícím přípravku ve výšce 45 mm od spodní hrany. Z časových důvodů bylo měření prováděno s krokem 5° , proto tento graf není příliš podrobný. Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.1, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.1. Výsledný světelný tok $\Phi = 523 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.1. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 41^{\circ}$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,447$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.1.



Obr. 15 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - bez vzorku - 45 mm

Měření vzorku 021172 - 2 mm - 45 mm

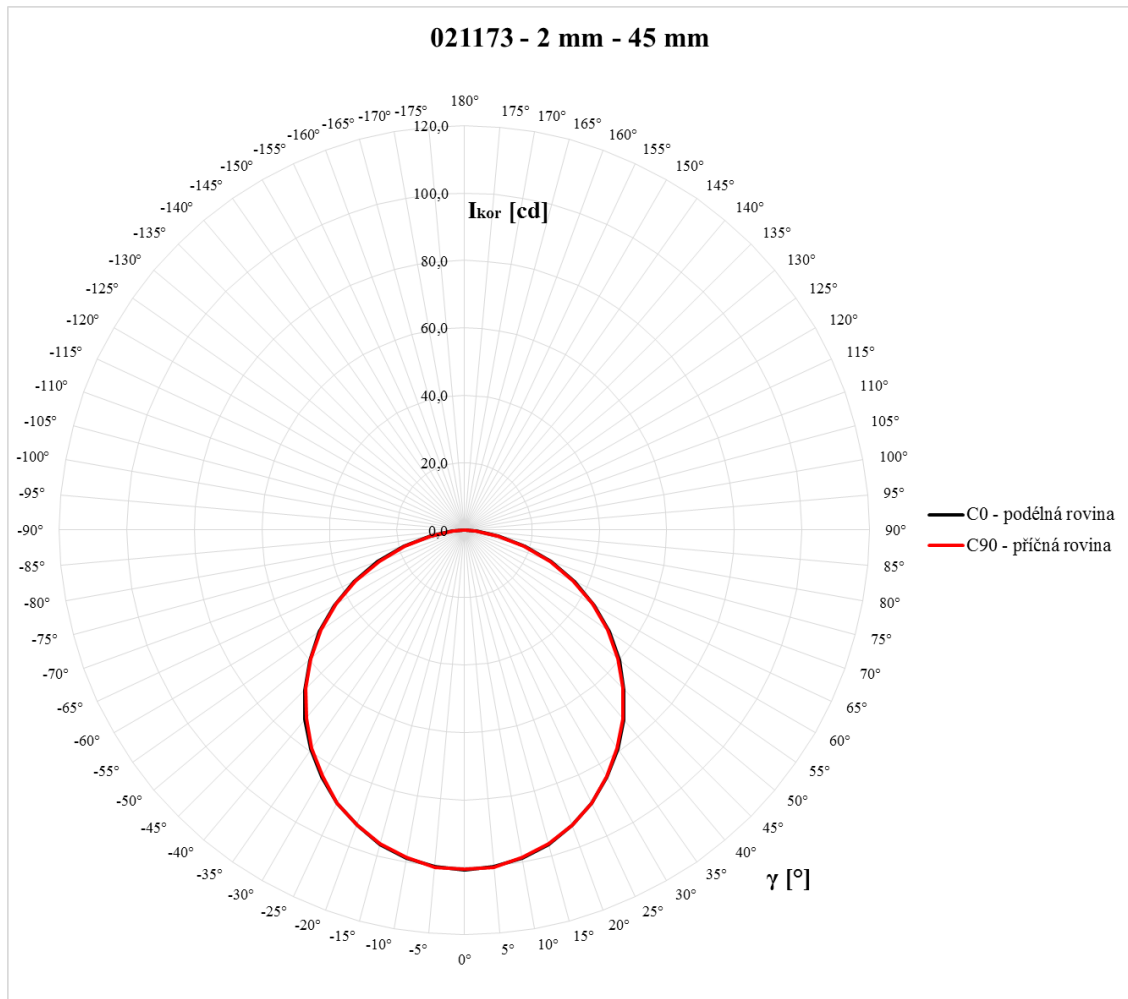
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.2, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.2. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 392 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.2. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 41^{\circ}$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,636$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.2.



Obr. 16 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021172 - 2 mm - 45 mm

Měření vzorku 021173 - 2 mm - 45 mm

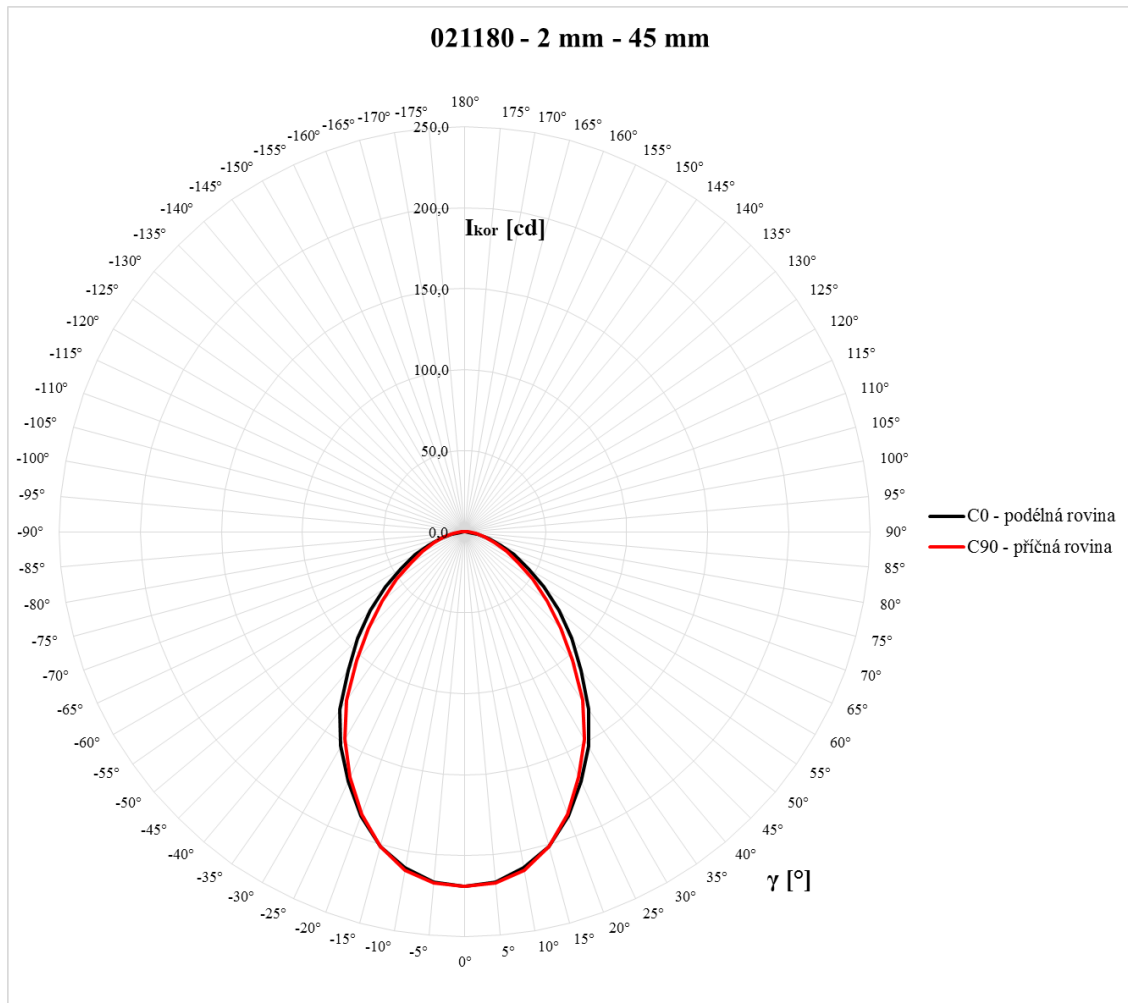
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.3, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.3. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 285 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.3. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 56^\circ$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,862$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.3.



Obr. 17 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021173 - 2 mm - 45 mm

Měření vzorku 021180 - 2 mm - 45 mm

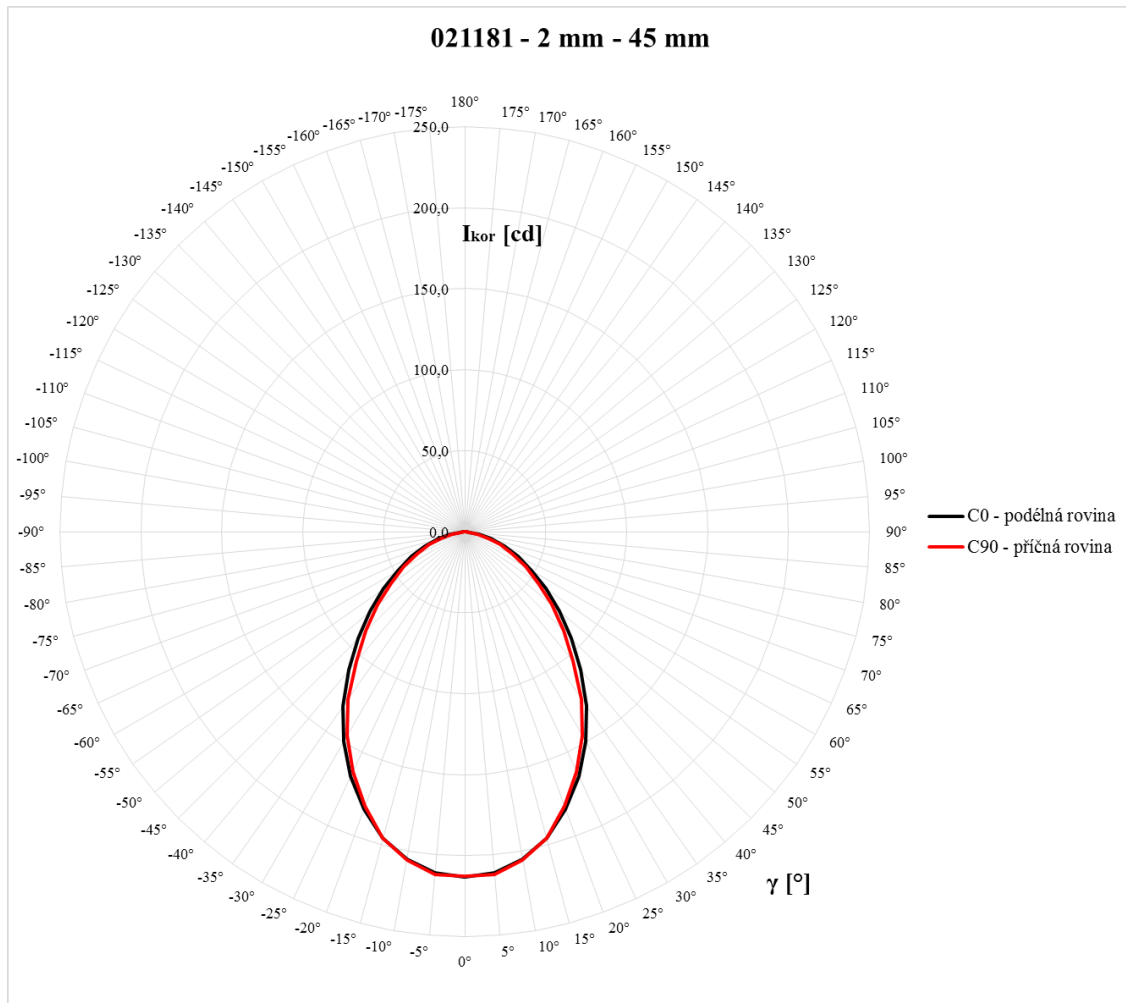
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.4, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.4. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 403 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.4. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 40^\circ$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,584$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.4.



Obr. 18 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021180 - 2 mm - 45 mm

Měření vzorku 021181 - 2 mm - 45 mm

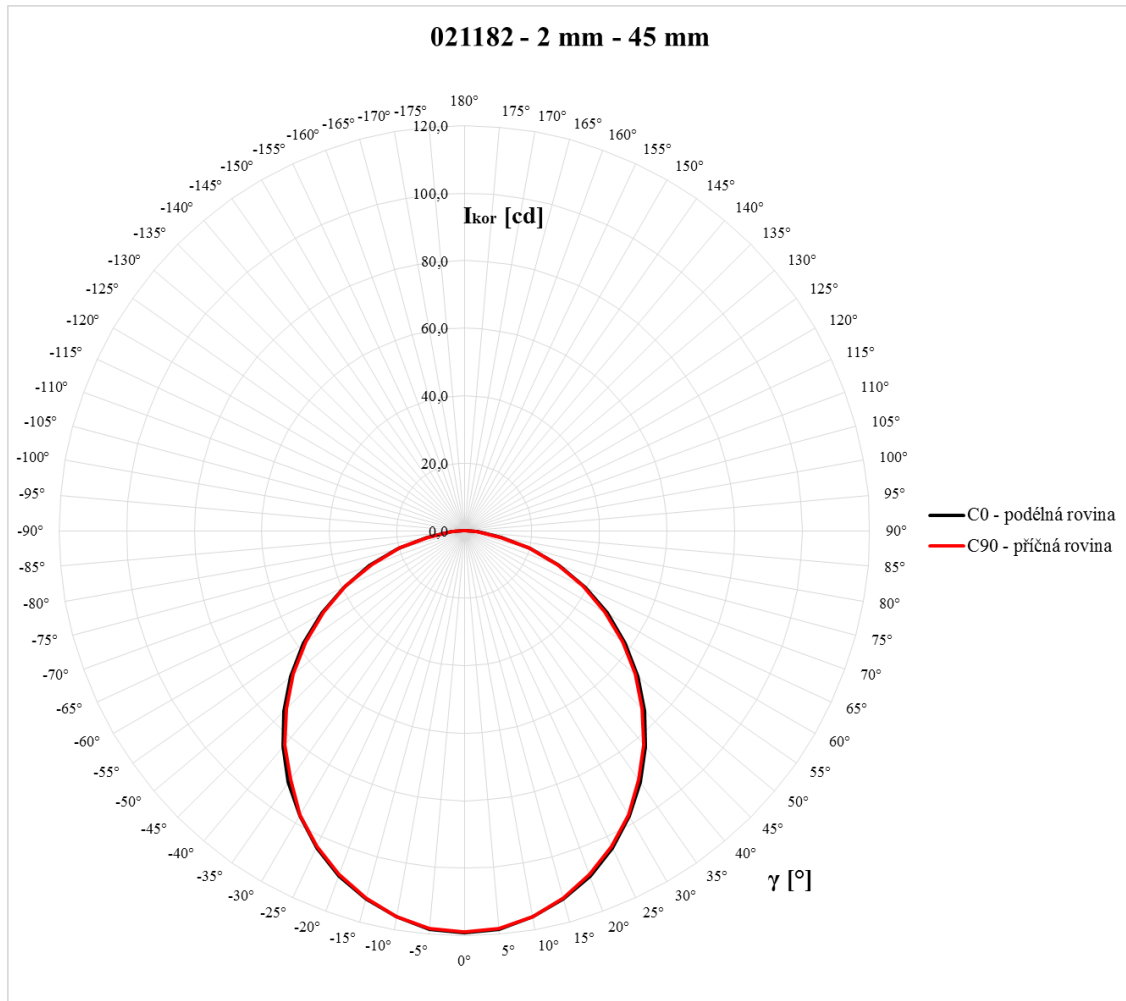
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.5, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.5. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 408 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.5. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 40^\circ$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,605$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.5.



Obr. 19 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021181 - 2 mm - 45 mm

Měření vzorku 021182 - 2 mm - 45 mm

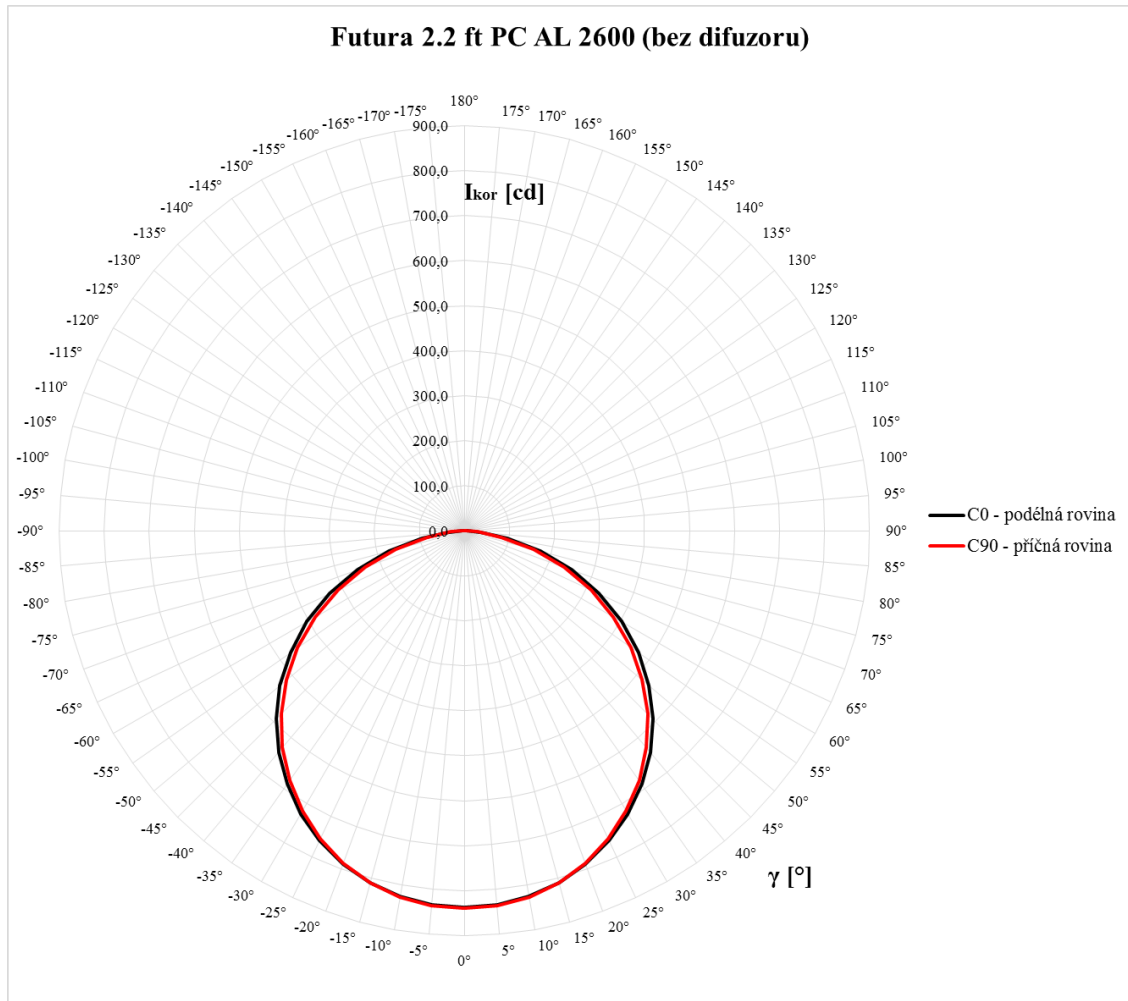
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.6, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.6. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 321 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.6. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 54^{\circ}$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,826$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.6.



Obr. 20 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021182 - 2 mm - 45 mm

Měření Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)

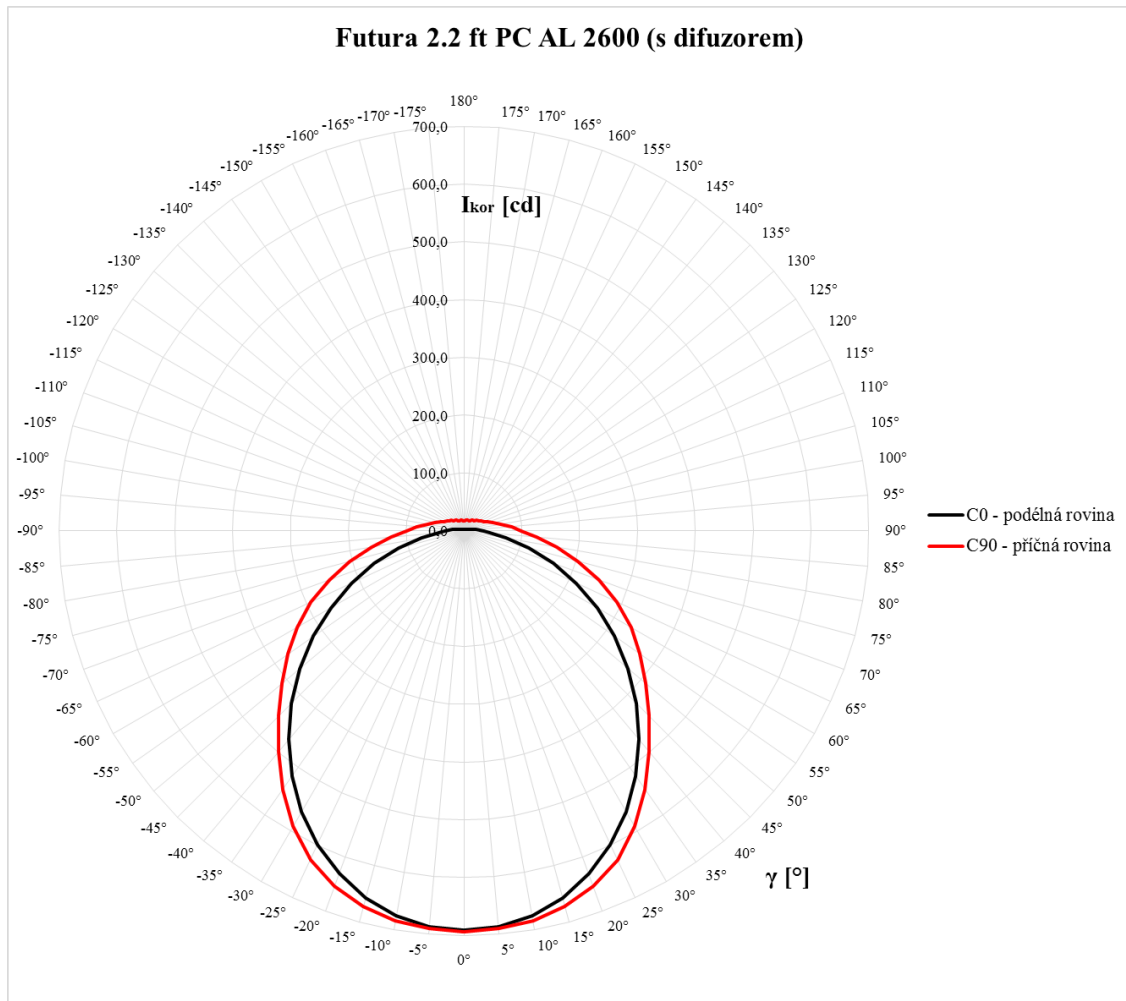
Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.7, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.7. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 2480 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.7. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 58^\circ$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,9$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.7.



Obr. 21 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)

Měření Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)

Naměřená data z goniofotometru jsou v příloze P1.8, z kterých jsou sestrojeny čáry svítivosti (kapitola 2.3). Výpočet světelného toku metodou pásmových toků (kapitola 3.3) je uveden v příloze P2.8. Výsledný světelný tok $\Phi_{\tau} = 2032 \text{ lm}$. Úhel poloviční svítivosti je získán z rovnice (33), (kapitola 3.7) a vypočtená data jsou v příloze P4.8. Úhel poloviční svítivosti $\gamma_H = 55^\circ$. Činitel rozptylu $\sigma = 0,902$, vypočtená data dle rovnice (31) jsou v P5.8.



Obr. 22 - Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)

Přehled činitelů prostupu jednotlivých vzorků

Činitelé prostupu jsou vypočteny ze světelných toků daných vzorků. Výpočty se nacházejí v příloze P3. Přehled činitelů prostupu jednotlivých vzorků je uveden v Tab. 2.

Tab. 2 - Přehled činitelů prostupu měřených vzorků

Činitelé prostupu						
Měřený vzorek	021172 - 2 mm	021173 - 2 mm	021180 - 2 mm	021181 - 2 mm	021182 - 2 mm	Futura 2.2 ft PC AL 2600
Činitel prostupu τ [%]	74,9	54,4	77,1	78	61,4	81,9

5.2 Nejistoty měření na goniofotometru

Při měření čar svítivosti na goniofotometru vznikají určité chyby. Každé takové chybě odpovídá určitá dílčí nejistota měření, kterou lze stanovit jako dílčí nejistotu typu A (značenou u_A), nebo dílčí nejistotu typu B (značenou u_B). Tato kapitola je převzatá z [9].

Dílčí nejistota typu u_A je určena statistickými metodami ze změřených dat. Je nutné, aby opakovaná měření byla měřena vždy za stejných podmínek. Jsou-li k dispozici výsledky n opakovaných měření veličiny X , pak dílčí nejistota typu A se spočítá jako směrodatná odchylka střední hodnoty měřené veličiny X dle vztahu:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (35)$$

kde: X_i - je hodnota měřené veličiny X při i -tém měření

\bar{X} - střední hodnota měřené veličiny X stanovená ze souboru n uskutečněných měření

Dílčí nejistota u_B se stanovuje na základě podrobné analýzy zdroje sledované chyby, odborného odhadu maxima možné odchylky a předpokládatelného rozdělení pravděpodobnosti jeho výskytu. Standardní nejistota typu B odpovídající určitému posuzovanému zdroji chyby při měření veličiny X se určí z výrazu:

$$u_{BX} = \frac{Z_{Xmax}}{\chi \cdot X_{vzt}} \quad (36)$$

kde: Z_{Xmax} - odhad maxima možné odchylky (největší dovolené chyby z dokumentace zařízení)

X_{vzt} - vztažná hodnota měřené veličiny

χ - koeficient pravděpodobnostního rozdělení odchylek měřené veličiny X v intervalu $\langle -Z_{max}; +Z_{max} \rangle$

Předpokládáme-li nezávislost jednotlivých zdrojů dílčích nejistot, je výsledná kombinovaná standardní relativní nejistota měření u_C vypočtena sloučením všech dílčích relativních nejistot u_A a u_B na základě Gaussova principu šíření nejistot z rovnice:

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + u_{A3}^2 + \dots + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (37)$$

Při měření čar svítivosti na goniofotometru uvažujeme několik možných zdrojů chyb, kterým odpovídají dílčí nejistoty. Ty se stanovují jako nejistoty typu B. Je zde riziko, že odchylka naměřené hodnoty od skutečné může překročit hranici standardní nejistoty. Proto zavádíme rozšířenou standardní nejistotu U , která je definována jako součin kombinované standardní nejistoty u_C a koeficientu rozšíření k_U . Nejčastěji je $k_U = 2$.

Hlavní zdroje možných chyb a označení jejich dílčích nejistot při měření čar svítivosti na goniofotometru lze nalézt v Tab. 3.

Tab. 3 - Hlavní zdroje možných chyb a označení jejich dílčích nejistot při měření čar svítivosti na goniofotometru [9]

Číslo chyby	Popis zdroje chyby	Označení dílčí nejistoty
1	nastavování polohy ramene goniofotometru podle úhlu γ	$u_{B\gamma}$
2	nepřesnost použitého digitálního luxmetru	u_{BE}
3	určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku od světelného středu svítidla	u_{Bl}
4	nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}
5	vliv konečných rozměrů vyzářovací plochy svítidla (zdroje) a přijímací plochy fotočlánku	u_{Bk}
6	nastavení spojnice středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla do svislé polohy pro úhel $\gamma = 0$	u_{Bp}

Vyjádření dílčích nejistot měření

Dílčí relativní standardní relativní nejistota $u_{B\gamma}$:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{\gamma_{vzt}\sqrt{3}} \quad [^{\circ}; ^{\circ}, ^{\circ}] \quad (38)$$

kde: $\Delta\gamma_{max}$ - uvažovaná největší odchylka úhlu γ

γ_{vzt} - vztažná hodnota úhlu γ

Dílčí relativní standardní nejistota u_{BE} :

$$u_{BE} = \frac{\frac{\delta_1}{100} + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \quad [^{\circ}; -, -, lx, lx] \quad (39)$$

kde: δ_1 - chyba luxmetru v %

X - údaj přístroje

N - počet platných číslic s možnou chybou

R - hodnota platné číslice s nejmenší vahou

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bl} :

$$u_{Bl} = \frac{Z_{lmax}}{l_d \cdot \sqrt{3}} \quad [^{\circ}; m, m] \quad (40)$$

kde: Z_{lmax} - největší předpokládaná odchylka vzdálenosti středu přijímacího povrchu fotočlánku od světelného středu svítidla

l_d - deklarovaná vzdálenost středu přijímacího povrchu fotočlánku od světelného středu svítidla

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bs} :

$$u_{Bs} = \frac{\left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \quad [-] \quad (41)$$

kde: Y_{max} - maximální hodnota údaje fotometru v čase od $t = 0$ do $t = T$

Y_{min} - minimální hodnota údaje fotometru v čase od $t = 0$ do $t = T$

T - doba svícení zkoušeného svítidla (zdroje)

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bk} :

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \quad [-; m, m, m, m] \quad (42)$$

kde: r_0 - osová vzdálenost světelného středu svítidla od středu přijímací plochy fotočlánku

a - polovina charakteristického rozměru svítidla v řezu kolmém na spojnici světelného středu svítidla a fotočlánku

b - poloměr přijímacího povrchu fotočlánku

Dílčí relativní standardní nejistota u_{Bp} :

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad [-] \quad (43)$$

kde: β - úhel vyosení fotočlánku od spojnice fotočlánku se světelným středem zkoušeného svítidla

Vypočtené hodnoty najdeme v Tab. 4.

Tab. 4 - Přehled vypočtených hodnot relativních standardních nejistot typu B při měření na goniometru [9]

Číslo chyby	Popis zdroje chyby	Označení dílčí nejistoty	Vypočítaná dílčí nejistota [%]
1	nastavování polohy ramene goniometru podle úhlu γ	$u_{B\gamma}$	0,77
2	nepřesnost použitého digitálního luxmetru	u_{BE}	3,08
3	určení vzdálenosti středu přijímací plochy fotočlánku od světelného středu svítidla	u_{Bl}	0,29
4	nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}	0,5
5	vliv konečných rozměrů vyzařovací plochy svítidla (zdroje) a přijímací plochy fotočlánku	u_{Bk}	0,93
6	nastavení spojnice středu přijímací plochy fotočlánku a světelného středu svítidla do svislé polohy pro úhel $\gamma = 0$	u_{Bp}	0,03

Nejistota polohy ramene goniometru není primárním zdrojem nejistoty měření svítivosti, ovlivňuje pouze správnost orientace měřených čar svítivosti v rovině $C - \gamma$.

Rozšířená nejistota měření U_γ polohy ramene goniometru s koeficientem $k_U = 2$:

$$U_\gamma = k_U \cdot u_{B\gamma} = 2 \cdot 0,77 = 1,54 \% \quad (44)$$

Výsledná kombinovaná standardní nejistota měření u_{CI} rozložení svítivosti na goniometru:

$$u_{CI} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bl}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2} = 3,35 \% \quad (45)$$

Rozšířená kombinovaná nejistota měření U_I rozložení svítivosti na goniometru s koeficientem $k_U = 2$:

$$U_I = k_U \cdot u_{CI} = 2 \cdot 3,35 = 6,54 \% \quad (46)$$

6 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout použitelný přípravek pro měření fotometrických vlastností daných vzorků termoplastů pro výrobu difuzorů LED svítidel a následně ho upevnit k goniofotometru ve světelné laboratoři katedry elektroenergetiky Elektrotechnické fakulty ČVUT v Praze. Dále bylo cílem analyzovat fotometrické vlastnosti těchto vzorků.

Přípravek pro měření vzorků se podařilo společně s firmou TREVOS a.s. úspěšně zrealizovat. Do přípravku lze vložit veškeré vzorky o rozměru 155 mm x 109 mm a lze za pomoci šroubu nastavit přesnou vzdálenost daného vzorku od LED modulu (zdroje). Z množství obdržných vzorků jsem vybral ty o tloušťce 2 mm a měřil je ve vzdálenosti 45 mm, jelikož tloušťka i vzdálenost byla shodná s difuzorem u svítidla Futura 2.2 ft PC AL 2600, které jsem měl také k dispozici. Při výrobě difuzorů je důležité sledovat jejich fotometrické vlastnosti, zejména činitel prostupu, úhel poloviční svítivosti nebo činitel rozptylu. K určení činitele prostupu jednotlivých vzorků bylo nejprve nutné změřit prostorové rozložení svítivosti LED zdroje světla, na základě toho sestrojil čáry svítivosti, z kterých metodou pásmových toků byl spočítán světelný tok zdroje. Totéž bylo provedeno pro jednotlivé vzorky. Činitel prostupu byl spočítán jako podíl světelného toku z vzorku vystupující a světelného toku na vzorek za daných okolností dopadající. Dále jsem spočítal úhly polovičních svítivosti jednotlivých vzorků. Ty lze určit z grafů čar svítivosti. Úhel poloviční svítivosti je úhel, který je odvozený z čáry svítivosti a určený směry, v kterých svítivost klesá na polovinu. Pro přesnou hodnotu úhlu poloviční svítivosti byla použita lineární interpolace. Nakonec jsem spočítal činitele rozptylu. Ten je roven podílu aritmetického průměru hodnot jasu měřených pod úhly 20° a 70° a jasu v 5° od normály při kolmém dopadu světla. Fotometrické veličiny daných vzorků termoplastů byly úspěšně vypočítány.

V této práci je možné nadále pokračovat, jelikož je k dispozici několik dalších vzorků různých tloušťek. Vzhledem k popularitě LED svítidel jeví o tento obor veliký zájem.

7 Použitá literatura

- [1] **HABEL J. a kolektiv:** Světlo a osvětlování, FCC PUBLIC, 2013
- [2] **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.
- [3] **HABEL J, Žák P.** Elektrické světlo 1, ČVUT v Praze, 2011
- [4] **ČSN IEC 50(845) - Mezinárodní elektrotechnický slovník, Kapitola 845: Osvětlení**
- [5] **ČSN EN 13 032-1+A1** - Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel - Část1: Měření a formát souboru údajů
- [6] Luminous Intensity. In: CSANYIGROUP [online]. Copyright © 2003-2010 Csanyigroup - Electrical Engineering Portal. Dostupné z: <http://www.csanyigroup.com/abb-i-bus-knx-constant-lighting-control>
- [7] Schematické znázornění prostorového úhlu. In: OSvětle.cz [online]. © 2009-2015 OSvětle.cz: O světle a osvětlení aktuálně. Dostupné z: <http://www.osvetle.cz/index.php/23-zaklady-osvetleni/svetelne-technicke-veliciny/184-svetelne-technicke-parametry?showall=&start=1>
- [8] Definition of lux. In: nvc-lighting.com [online]. © 2000-2011 NVC LIGHTING TECHNOLOGY CORPORATION. Dostupné z: <http://www.nvc-lighting.com/showuseInfo.aspx?typeID=42&ID=94>
- [9] Princip goniofotometru. In: SVĚTLO časopis pro osvětlování [online]. © 2014 - 2015 - FCC Public s. r. o. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39390.pdf>
- [10] **HABEL J.** Osvětlování, Vydavatelství ČVUT, 1998
- [11] Mezinárodní doporučení CIE: Illuminance Meters and Luminance Meters, 1983
- [12] Illuminance meter. In: Konica Minolta Sensing [online]. © 2006-2015 Konica Minolta Sensing Americas, Inc. Dostupné z: <http://sensing.konicaminolta.us/products/t-10a-illuminance-meter/>
- [13] Průběh poměrné spektrální citlivosti fotočlánku. In: SVĚTLO časopis pro osvětlování [online]. © 2014 - 2015 - FCC Public s. r. o. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf>

8 Seznam obrázků

Obr. 1	Poměrná spektrální citlivost ideálního fotometrického pozorovatele	8
Obr. 2	Definice prostorového úhlu	10
Obr. 3	K výpočtu prostorového úhlu, pod nímž je z bodu P vidět plocha A	10
Obr. 4	Definice svítivosti	11
Obr. 5	Fotometrická plocha svítivosti	12
Obr. 6	Čáry svítivosti v polárních souřadnicích	12
Obr. 7	Soustava fotometrických rovin $C - \lambda$	13
Obr. 8	Osvětlenost, definice jednoho luxu (lx)	14
Obr. 9	K výpočtu osvětlenosti bodovým zdrojem Z v bodě P umístěným v rovině ρ	15
Obr. 10	Příklady průběhů poměrné spektrální citlivosti hradlových fotočlánků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního fotometrického pozorovatele	17
Obr. 11	Digitální luxmetr Konica Minolta T-10	18
Obr. 12	Goniofotometr s pohyblivým ramenem	19
Obr. 13	Vnější konstrukce přípravku pro měření vzorků termoplastů pro difuzory svítidel	20
Obr. 14	Přípravek pro měření světelně technických vlastností termoplastů pro difuzory svítidel	20
Obr. 15	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - bez vzorku - 45 mm	25
Obr. 16	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021172 - 2 mm - 45 mm	26
Obr. 17	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021173 - 2 mm - 45 mm	27
Obr. 18	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021180 - 2 mm - 45 mm	28
Obr. 19	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021181 - 2 mm - 45 mm	29
Obr. 20	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - vzorek 021182 - 2 mm - 45 mm	30
Obr. 21	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)	31
Obr. 22	Graf čar svítivosti v polárních souřadnicích - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)	32

9 Přílohy

P1	Naměřené hodnoty z goniometru jednotlivých vzorků	43
P2	Výpočty světelného toku metodou pásmových toků	51
P3	Výpočty činitelů prostupu τ	56
P4	Výpočty úhlů polovičních svítivostí	57
P5	Výpočty činitelů rozptylu	60

P1.1 Naměřené hodnoty z goniometru - bez vzorku - 45 mm

bez vzorku - 45 mm C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,08	1,07	0,27
-85	1,40	1,39	0,35
-80	2,00	1,99	0,50
-75	2,92	2,90	0,73
-70	3,56	3,54	0,89
-65	30,40	30,19	7,60
-60	66,00	65,54	16,50
-55	74,16	73,64	18,54
-50	121,20	122,90	30,30
-45	130,40	132,23	32,60
-40	174,40	176,84	43,60
-35	193,20	195,90	48,30
-30	200,80	203,61	50,20
-25	208,40	211,32	52,10
-20	236,00	239,30	59,00
-15	273,20	277,02	68,30
-10	278,00	281,89	69,50
-5	282,80	286,76	70,70
0	284,40	288,38	71,10
5	286,40	290,41	71,60
10	286,80	290,82	71,70
15	284,40	288,38	71,10
20	268,80	272,56	67,20
25	217,60	220,65	54,40
30	211,20	214,16	52,80
35	202,00	204,83	50,50
40	170,00	172,38	42,50
45	131,20	133,04	32,80
50	118,80	117,97	29,70
55	69,64	69,15	17,41
60	59,52	59,10	14,88
65	25,60	25,42	6,40
70	3,24	3,22	0,81
75	2,36	2,34	0,59
80	1,44	1,43	0,36
85	0,96	0,95	0,24
90	0,80	0,79	0,20

bez vzorku - 45 mm C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,12	1,11	0,28
-85	1,36	1,35	0,34
-80	1,76	1,75	0,44
-75	2,52	2,50	0,63
-70	3,64	3,61	0,91
-65	5,12	5,08	1,28
-60	37,32	37,06	9,33
-55	60,48	60,06	15,12
-50	87,16	86,55	21,79
-45	140,00	141,96	35,00
-40	151,20	153,32	37,80
-35	171,20	173,60	42,80
-30	224,40	227,54	56,10
-25	234,00	237,28	58,50
-20	242,00	245,39	60,50
-15	306,00	310,28	76,50
-10	308,80	313,12	77,20
-5	309,20	313,53	77,30
0	255,20	258,77	63,80
5	310,00	314,34	77,50
10	308,80	313,12	77,20
15	306,40	310,69	76,60
20	243,20	246,60	60,80
25	231,60	234,84	57,90
30	222,00	225,11	55,50
35	186,80	189,42	46,70
40	146,80	148,86	36,70
45	136,00	137,90	34,00
50	84,12	83,53	21,03
55	48,24	47,90	12,06
60	34,16	33,92	8,54
65	4,24	4,21	1,06
70	2,96	2,94	0,74
75	1,96	1,95	0,49
80	1,32	1,31	0,33
85	0,96	0,95	0,24
90	0,80	0,79	0,20

P1.2 Naměřené hodnoty z goniofotometru - 021172 - 2 mm - 45 mm

021172 - 2 mm - 45 mm C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,04	1,03	0,26
-85	4,88	4,85	1,22
-80	11,68	11,60	2,92
-75	20,04	19,90	5,01
-70	29,28	29,08	7,32
-65	39,52	39,24	9,88
-60	50,64	50,29	12,66
-55	62,64	62,20	15,66
-50	76,12	75,59	19,03
-45	90,12	89,49	22,53
-40	105,20	104,46	26,30
-35	120,80	122,49	30,20
-30	136,40	138,31	34,10
-25	150,80	152,91	37,70
-20	164,40	166,70	41,10
-15	176,00	178,46	44,00
-10	185,20	187,79	46,30
-5	190,40	193,07	47,60
0	192,00	194,69	48,00
5	191,20	193,88	47,80
10	186,00	188,60	46,50
15	176,00	178,46	44,00
20	164,40	166,70	41,10
25	150,80	152,91	37,70
30	134,80	136,69	33,70
35	119,20	118,37	29,80
40	102,80	102,08	25,70
45	87,56	86,95	21,89
50	73,20	72,69	18,30
55	60,04	59,62	15,01
60	47,60	47,27	11,90
65	36,24	35,99	9,06
70	25,96	25,78	6,49
75	16,52	16,40	4,13
80	8,20	8,14	2,05
85	2,20	2,18	0,55
90	0,68	0,68	0,17

021172 - 2 mm - 45 mm C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,84	0,83	0,21
-85	3,44	3,42	0,86
-80	9,48	9,41	2,37
-75	17,24	17,12	4,31
-70	26,08	25,90	6,52
-65	35,92	35,67	8,98
-60	46,48	46,15	11,62
-55	58,08	57,67	14,52
-50	70,76	70,26	17,69
-45	85,16	84,56	21,29
-40	100,16	99,46	25,04
-35	115,80	114,99	28,95
-30	132,40	134,25	33,10
-25	148,00	150,07	37,00
-20	162,40	164,67	40,60
-15	174,80	177,25	43,70
-10	184,40	186,98	46,10
-5	190,80	193,47	47,70
0	193,20	195,90	48,30
5	191,60	194,28	47,90
10	186,80	189,42	46,70
15	176,80	179,28	44,20
20	164,40	166,70	41,10
25	150,40	152,51	37,60
30	134,00	135,88	33,50
35	117,60	116,78	29,40
40	101,20	100,49	25,30
45	85,96	85,36	21,49
50	71,56	71,06	17,89
55	58,48	58,07	14,62
60	46,56	46,23	11,64
65	35,72	35,47	8,93
70	25,76	25,58	6,44
75	16,88	16,76	4,22
80	8,96	8,90	2,24
85	2,96	2,94	0,74
90	0,72	0,71	0,18

P1.3 Naměřené hodnoty z goniometru - 021173 - 2 mm - 45 mm

021173 - 2 mm - 45 mm C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,88	0,87	0,22
-85	5,00	4,97	1,25
-80	12,04	11,96	3,01
-75	20,16	20,02	5,04
-70	28,68	28,48	7,17
-65	37,16	36,90	9,29
-60	45,32	45,00	11,33
-55	53,00	52,63	13,25
-50	60,12	59,70	15,03
-45	67,00	66,53	16,75
-40	73,56	73,05	18,39
-35	79,36	78,80	19,84
-30	84,68	84,09	21,17
-25	89,24	88,62	22,31
-20	93,08	92,43	23,27
-15	96,60	95,92	24,15
-10	99,24	98,55	24,81
-5	100,84	100,13	25,21
0	101,48	100,77	25,37
5	100,88	100,17	25,22
10	99,92	99,22	24,98
15	97,72	97,04	24,43
20	94,44	93,78	23,61
25	90,60	89,97	22,65
30	85,68	85,08	21,42
35	80,56	80,00	20,14
40	74,36	73,84	18,59
45	67,72	67,25	16,93
50	60,52	60,10	15,13
55	52,60	52,23	13,15
60	44,36	44,05	11,09
65	35,44	35,19	8,86
70	26,36	26,18	6,59
75	17,24	17,12	4,31
80	8,80	8,74	2,20
85	2,32	2,30	0,58
90	0,52	0,52	0,13

021173 - 2 mm - 45 mm C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,64	0,64	0,16
-85	3,72	3,69	0,93
-80	10,40	10,33	2,60
-75	18,48	18,35	4,62
-70	27,16	26,97	6,79
-65	35,72	35,47	8,93
-60	43,84	43,53	10,96
-55	51,84	51,48	12,96
-50	59,44	59,02	14,86
-45	66,44	65,97	16,61
-40	72,96	72,45	18,24
-35	79,16	78,61	19,79
-30	84,24	83,65	21,06
-25	89,36	88,73	22,34
-20	93,48	92,83	23,37
-15	96,76	96,08	24,19
-10	99,16	98,47	24,79
-5	100,96	100,25	25,24
0	101,32	100,61	25,33
5	101,12	100,41	25,28
10	99,52	98,82	24,88
15	97,04	96,36	24,26
20	94,16	93,50	23,54
25	90,44	89,81	22,61
30	85,36	84,76	21,34
35	80,04	79,48	20,01
40	73,96	73,44	18,49
45	67,24	66,77	16,81
50	60,32	59,90	15,08
55	52,52	52,15	13,13
60	44,36	44,05	11,09
65	35,80	35,55	8,95
70	27,16	26,97	6,79
75	18,32	18,19	4,58
80	9,84	9,77	2,46
85	3,16	3,14	0,79
90	0,56	0,56	0,14

P1.4 Naměřené hodnoty z goniometru - 021180 - 2 mm - 45 mm

021180 - 2 mm - 45 mm C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,00	0,99	0,25
-85	4,12	4,09	1,03
-80	9,76	9,69	2,44
-75	17,00	16,88	4,25
-70	25,52	25,34	6,38
-65	35,64	35,39	8,91
-60	47,64	47,31	11,91
-55	61,76	61,33	15,44
-50	77,76	77,22	19,44
-45	95,40	94,73	23,85
-40	114,12	113,32	28,53
-35	132,80	134,66	33,20
-30	151,20	153,32	37,80
-25	167,60	169,95	41,90
-20	184,00	186,58	46,00
-15	198,40	201,18	49,60
-10	207,60	210,51	51,90
-5	214,40	217,40	53,60
0	216,00	219,02	54,00
5	213,60	216,59	53,40
10	208,00	210,91	52,00
15	198,00	200,77	49,50
20	184,00	186,58	46,00
25	168,00	170,35	42,00
30	150,00	152,10	37,50
35	131,20	133,04	32,80
40	111,60	110,82	27,90
45	92,64	91,99	23,16
50	75,08	74,55	18,77
55	58,28	57,87	14,57
60	44,24	43,93	11,06
65	32,48	32,25	8,12
70	22,44	22,28	5,61
75	14,00	13,90	3,50
80	6,88	6,83	1,72
85	1,92	1,91	0,48
90	0,68	0,68	0,17

021180 - 2 mm - 45 mm C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,88	0,87	0,22
-85	2,88	2,86	0,72
-80	7,44	7,39	1,86
-75	13,48	13,39	3,37
-70	20,56	20,42	5,14
-65	29,12	28,92	7,28
-60	39,24	38,97	9,81
-55	52,04	51,68	13,01
-50	67,28	66,81	16,82
-45	85,24	84,64	21,31
-40	104,28	103,55	26,07
-35	124,80	126,55	31,20
-30	144,80	146,83	36,20
-25	164,00	166,30	41,00
-20	182,00	184,55	45,50
-15	196,80	199,56	49,20
-10	208,40	211,32	52,10
-5	214,80	217,81	53,70
0	216,00	219,02	54,00
5	214,00	217,00	53,50
10	210,00	212,94	52,50
15	199,60	202,39	49,90
20	184,00	186,58	46,00
25	165,20	167,51	41,30
30	146,40	148,45	36,60
35	125,20	126,95	31,30
40	104,00	103,27	26,00
45	84,24	83,65	21,06
50	66,12	65,66	16,53
55	51,00	50,64	12,75
60	38,16	37,89	9,54
65	28,00	27,80	7,00
70	19,68	19,54	4,92
75	12,64	12,55	3,16
80	6,68	6,63	1,67
85	2,28	2,26	0,57
90	0,68	0,68	0,17

P1.5 Naměřené hodnoty z goniofotometru - 021181 - 2 mm - 45 mm

021181 - 2 mm - 45 mm			
C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,08	1,07	0,27
-85	4,52	4,49	1,13
-80	10,76	10,68	2,69
-75	18,64	18,51	4,66
-70	27,84	27,65	6,96
-65	38,24	37,97	9,56
-60	50,04	49,69	12,51
-55	63,36	62,92	15,84
-50	78,92	78,37	19,73
-45	95,20	94,53	23,80
-40	113,16	112,37	28,29
-35	130,80	132,63	32,70
-30	147,60	149,67	36,90
-25	164,00	166,30	41,00
-20	179,20	181,71	44,80
-15	192,80	195,50	48,20
-10	202,40	205,23	50,60
-5	208,80	211,72	52,20
0	210,00	212,94	52,50
5	208,00	210,91	52,00
10	202,40	205,23	50,60
15	193,60	196,31	48,40
20	180,00	182,52	45,00
25	164,00	166,30	41,00
30	147,60	149,67	36,90
35	128,40	130,20	32,10
40	110,40	109,63	27,60
45	92,24	91,59	23,06
50	75,52	74,99	18,88
55	60,12	59,70	15,03
60	46,48	46,15	11,62
65	34,56	34,32	8,64
70	24,40	24,23	6,10
75	15,28	15,17	3,82
80	7,60	7,55	1,90
85	2,12	2,11	0,53
90	0,76	0,75	0,19

021181 - 2 mm - 45 mm			
C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,88	0,87	0,22
-85	3,20	3,18	0,80
-80	8,52	8,46	2,13
-75	15,56	15,45	3,89
-70	23,72	23,55	5,93
-65	32,88	32,65	8,22
-60	43,92	43,61	10,98
-55	56,48	56,08	14,12
-50	70,72	70,22	17,68
-45	87,44	86,83	21,86
-40	105,00	104,27	26,25
-35	123,60	125,33	30,90
-30	143,20	145,20	35,80
-25	160,80	163,05	40,20
-20	177,20	179,68	44,30
-15	192,40	195,09	48,10
-10	202,40	205,23	50,60
-5	209,20	212,13	52,30
0	209,60	212,53	52,40
5	209,20	212,13	52,30
10	203,60	206,45	50,90
15	193,60	196,31	48,40
20	178,40	180,90	44,60
25	162,00	164,27	40,50
30	143,60	145,61	35,90
35	124,80	126,55	31,20
40	105,20	104,46	26,30
45	87,04	86,43	21,76
50	70,36	69,87	17,59
55	55,80	55,41	13,95
60	43,00	42,70	10,75
65	32,24	32,01	8,06
70	22,96	22,80	5,74
75	14,88	14,78	3,72
80	7,92	7,86	1,98
85	2,60	2,58	0,65
90	0,72	0,71	0,18

P1.6 Naměřené hodnoty z goniometru - 021182 - 2 mm - 45 mm

021182 - 2 mm - 45 mm C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	1,00	0,99	0,25
-85	5,48	5,44	1,37
-80	13,16	13,07	3,29
-75	22,12	21,97	5,53
-70	31,44	31,22	7,86
-65	40,84	40,55	10,21
-60	50,08	49,73	12,52
-55	58,92	58,51	14,73
-50	67,64	67,17	16,91
-45	76,08	75,55	19,02
-40	83,96	83,37	20,99
-35	91,44	90,80	22,86
-30	97,84	97,16	24,46
-25	103,92	103,19	25,98
-20	109,32	108,55	27,33
-15	113,16	112,37	28,29
-10	116,88	116,06	29,22
-5	118,96	118,13	29,74
0	119,99	119,15	30,00
5	119,60	118,76	29,90
10	116,80	115,98	29,20
15	114,00	113,20	28,50
20	110,00	109,23	27,50
25	104,80	104,07	26,20
30	98,40	97,71	24,60
35	91,60	90,96	22,90
40	84,00	83,41	21,00
45	76,04	75,51	19,01
50	67,36	66,89	16,84
55	58,12	57,71	14,53
60	48,20	47,86	12,05
65	38,60	38,33	9,65
70	28,68	28,48	7,17
75	18,68	18,55	4,67
80	9,44	9,37	2,36
85	2,48	2,46	0,62
90	0,60	0,60	0,15

021182 - 2 mm - 45 mm C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	0,84	0,83	0,21
-85	4,32	4,29	1,08
-80	11,60	11,52	2,90
-75	20,48	20,34	5,12
-70	29,88	29,67	7,47
-65	39,40	39,12	9,85
-60	48,72	48,38	12,18
-55	57,80	57,40	14,45
-50	66,68	66,21	16,67
-45	75,00	74,48	18,75
-40	83,32	82,74	20,83
-35	90,60	89,97	22,65
-30	97,76	97,08	24,44
-25	103,72	102,99	25,93
-20	109,00	108,24	27,25
-15	113,32	112,53	28,33
-10	116,76	115,94	29,19
-5	118,88	118,05	29,72
0	119,60	118,76	29,90
5	119,20	118,37	29,80
10	117,20	116,38	29,30
15	113,60	112,80	28,40
20	109,20	108,44	27,30
25	104,00	103,27	26,00
30	98,00	97,31	24,50
35	90,44	89,81	22,61
40	83,20	82,62	20,80
45	75,12	74,59	18,78
50	66,36	65,90	16,59
55	57,36	56,96	14,34
60	48,04	47,70	12,01
65	38,56	38,29	9,64
70	28,92	28,72	7,23
75	19,32	19,18	4,83
80	10,32	10,25	2,58
85	3,20	3,18	0,80
90	0,56	0,56	0,14

P1.7 Naměřené hodnoty z goniofotometru - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)

Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru) C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	8,80	8,74	2,20
-85	50,40	50,05	12,60
-80	114,36	113,56	28,59
-75	188,00	190,63	47,00
-70	264,00	267,70	66,00
-65	338,40	343,14	84,60
-60	408,00	413,71	102,00
-55	473,20	479,82	118,30
-50	533,20	540,66	133,30
-45	587,60	595,83	146,90
-40	636,80	645,72	159,20
-35	680,00	689,52	170,00
-30	717,60	727,65	179,40
-25	750,00	760,50	187,50
-20	777,20	788,08	194,30
-15	798,40	809,58	199,60
-10	813,60	824,99	203,40
-5	822,80	834,32	205,70
0	826,00	837,56	206,50
5	822,80	834,32	205,70
10	812,80	824,18	203,20
15	797,20	808,36	199,30
20	776,00	786,86	194,00
25	748,80	759,28	187,20
30	715,20	725,21	178,80
35	675,60	685,06	168,90
40	630,40	639,23	157,60
45	578,80	586,90	144,70
50	521,60	528,90	130,40
55	457,60	464,01	114,40
60	387,60	393,03	96,90
65	312,80	317,18	78,20
70	234,80	238,09	58,70
75	156,00	158,18	39,00
80	80,32	79,76	20,08
85	23,44	23,28	5,86
90	4,44	4,41	1,11

Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru) C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	7,44	7,39	1,86
-85	44,20	43,89	11,05
-80	99,96	99,26	24,99
-75	173,60	176,03	43,40
-70	248,40	251,88	62,10
-65	320,40	324,89	80,10
-60	390,00	395,46	97,50
-55	456,00	462,38	114,00
-50	517,20	524,44	129,30
-45	574,00	582,04	143,50
-40	625,60	634,36	156,40
-35	671,60	681,00	167,90
-30	712,40	722,37	178,10
-25	748,00	758,47	187,00
-20	776,80	787,68	194,20
-15	799,20	810,39	199,80
-10	815,20	826,61	203,80
-5	824,40	835,94	206,10
0	827,20	838,78	206,80
5	824,00	835,54	206,00
10	814,40	825,80	203,60
15	797,60	808,77	199,40
20	773,60	784,43	193,40
25	743,20	753,60	185,80
30	706,40	716,29	176,60
35	663,60	672,89	165,90
40	614,80	623,41	153,70
45	560,80	568,65	140,20
50	500,80	507,81	125,20
55	435,20	441,29	108,80
60	364,80	369,91	91,20
65	290,80	294,87	72,70
70	216,00	219,02	54,00
75	140,00	141,96	35,00
80	69,20	68,72	17,30
85	16,76	16,64	4,19
90	4,08	4,05	1,02

P1.8 Naměřené hodnoty z goniofotometru - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)

Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem) C0 - podélná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	40,16	39,88	10,04
-85	52,60	52,23	13,15
-80	81,12	80,55	20,28
-75	122,40	124,11	30,60
-70	168,80	171,16	42,20
-65	217,20	220,24	54,30
-60	266,80	270,54	66,70
-55	316,80	321,24	79,20
-50	367,20	372,34	91,80
-45	417,20	423,04	104,30
-40	465,20	471,71	116,30
-35	510,80	517,95	127,70
-30	552,80	560,54	138,20
-25	590,00	598,26	147,50
-20	622,00	630,71	155,50
-15	647,20	656,26	161,80
-10	665,60	674,92	166,40
-5	677,20	686,68	169,30
0	681,60	691,14	170,40
5	678,80	688,30	169,70
10	668,00	677,35	167,00
15	649,20	658,29	162,30
20	623,60	632,33	155,90
25	592,00	600,29	148,00
30	554,00	561,76	138,50
35	510,80	517,95	127,70
40	464,00	470,50	116,00
45	414,80	420,61	103,70
50	363,60	368,69	90,90
55	310,80	315,15	77,70
60	258,40	262,02	64,60
65	206,80	209,70	51,70
70	156,80	159,00	39,20
75	109,60	108,83	27,40
80	67,72	67,25	16,93
85	38,24	37,97	9,56
90	28,84	28,64	7,21

Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem) C90 - příčná			
γ [°]	$I_{\gamma z}$ [cd]	I_{γ} [cd]	$E_{\gamma z}$ [lx]
-90	109,20	108,44	27,30
-85	137,60	139,53	34,40
-80	174,80	177,25	43,70
-75	216,80	219,84	54,20
-70	261,60	265,26	65,40
-65	305,60	309,88	76,40
-60	345,60	350,44	86,40
-55	382,40	387,75	95,60
-50	419,20	425,07	104,80
-45	460,00	466,44	115,00
-40	504,40	511,46	126,10
-35	550,40	558,11	137,60
-30	592,40	600,69	148,10
-25	627,60	636,39	156,90
-20	652,80	661,94	163,20
-15	668,80	678,16	167,20
-10	678,00	687,49	169,50
-5	682,80	692,36	170,70
0	683,60	693,17	170,90
5	680,40	689,93	170,10
10	672,40	681,81	168,10
15	658,80	668,02	164,70
20	638,80	647,74	159,70
25	610,40	618,95	152,60
30	572,40	580,41	143,10
35	527,20	534,58	131,80
40	478,80	485,50	119,70
45	432,40	438,45	108,10
50	390,00	395,46	97,50
55	350,80	355,71	87,70
60	312,00	316,37	78,00
65	270,80	274,59	67,70
70	228,00	231,19	57,00
75	185,60	188,20	46,40
80	146,00	148,04	36,50
85	113,60	112,80	28,40
90	90,56	89,93	22,64

P2 Výpočty světelného toku metodou pásových toků

Tabulka prostorových úhlů $\Delta\Omega_\gamma$, které jsou vymezeny úhly $(\gamma - \Delta\gamma)$ a $(\gamma + \Delta\gamma)$

Prostorové úhly pro metodu pásových toků		
$(\gamma - \Delta\gamma)$ [°]	$(\gamma + \Delta\gamma)$ [°]	$\Delta\Omega_\gamma$ [sr]
0	2,5	0,0060
2,5	7,5	0,0478
7,5	12,5	0,0952
12,5	17,5	0,1419
17,5	22,5	0,1875
22,5	27,5	0,2317
27,5	32,5	0,2741
32,5	37,5	0,3144
37,5	42,5	0,3523
42,5	47,5	0,3876
47,5	52,5	0,4199
52,5	57,5	0,4490
57,5	62,5	0,4747
62,5	67,5	0,4968
67,5	72,5	0,5151
72,5	77,5	0,5295
77,5	82,5	0,5398
82,5	87,5	0,5461
87,5	90	0,2741

P2.1

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - bez vzorku - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,862	0,774
5	6,893	7,499
10	13,628	14,902
15	20,053	22,024
20	23,990	23,059
25	25,016	27,342
30	28,624	31,014
35	31,497	28,533
40	30,761	26,617
45	25,703	27,118
50	25,285	17,854
55	16,029	12,119
60	14,792	8,424
65	6,906	1,154
70	0,870	0,844
75	0,694	0,589
80	0,461	0,413
85	0,320	0,314
90	0,128	0,131
Suma	272,514	250,723
Výsledný světelný tok Φ [lm]	523,236	

P2.2

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - 021172 - 2 mm - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,582	0,586
5	4,621	4,631
10	8,957	8,957
15	12,659	12,645
20	15,626	15,531
25	17,711	17,523
30	18,842	18,509
35	18,931	18,217
40	18,193	17,612
45	17,096	16,465
50	15,565	14,835
55	13,675	12,993
60	11,577	10,964
65	9,343	8,835
70	7,063	6,629
75	4,805	4,485
80	2,664	2,471
85	0,960	0,868
90	0,117	0,106
Suma	198,989	192,861
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]	391,85	

P2.3

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - 021173 - 2 mm - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,301	0,301
5	2,392	2,397
10	4,706	4,695
15	6,844	6,825
20	8,727	8,733
25	10,342	10,340
30	11,591	11,539
35	12,482	12,425
40	12,938	12,851
45	12,963	12,863
50	12,575	12,484
55	11,771	11,633
60	10,568	10,394
65	8,953	8,820
70	7,038	6,946
75	4,916	4,837
80	2,793	2,712
85	0,992	0,933
90	0,095	0,082
Suma	142,988	141,808
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]		284,796

P2.4

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - 021180 - 2 mm - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,655	0,655
5	5,183	5,193
10	10,028	10,096
15	14,256	14,256
20	17,489	17,394
25	19,708	19,332
30	20,926	20,232
35	21,041	19,925
40	19,743	18,218
45	18,093	16,307
50	15,932	13,906
55	13,380	11,485
60	10,828	9,121
65	8,401	7,044
70	6,133	5,145
75	4,075	3,433
80	2,230	1,892
85	0,819	0,699
90	0,114	0,106
Suma	209,033	194,440
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]		403,473

P2.5

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - 021181 - 2 mm - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,637	0,635
5	5,048	5,067
10	9,767	9,796
15	13,896	13,882
20	17,071	16,900
25	19,261	18,956
30	20,509	19,926
35	20,658	19,797
40	19,554	18,386
45	18,035	16,788
50	16,099	14,706
55	13,764	12,515
60	11,374	10,243
65	8,978	8,031
70	6,680	5,969
75	4,458	4,001
80	2,460	2,203
85	0,900	0,786
90	0,125	0,109
Suma	209,277	198,698
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]	407,975	

P2.6

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - 021182 - 2 mm - 45 mm

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	0,356	0,355
5	2,829	2,824
10	5,522	5,528
15	8,000	7,992
20	10,207	10,155
25	12,003	11,946
30	13,352	13,319
35	14,286	14,130
40	14,691	14,565
45	14,637	14,444
50	14,072	13,868
55	13,046	12,836
60	11,582	11,403
65	9,797	9,614
70	7,687	7,519
75	5,363	5,231
80	3,029	2,937
85	1,079	1,019
90	0,109	0,095
Suma	161,647	159,782
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]	321,429	

P2.7

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	2,504	2,508
5	19,929	19,963
10	39,243	39,320
15	57,384	57,427
20	73,815	73,682
25	88,016	87,569
30	99,546	98,573
35	108,041	106,416
40	113,183	110,789
45	114,604	111,499
50	112,277	108,360
55	105,947	101,439
60	95,740	90,830
65	82,008	76,971
70	65,130	60,638
75	46,171	42,091
80	26,089	22,669
85	10,010	8,264
90	0,901	0,784
Suma	1260,537	1219,792
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]	2480,33	

P2.8

Výpočet světelného toku metodou pásmových toků - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)

Pásmové toky		
Středový úhel	$\Delta\Phi_\gamma$ [lm]	
γ [°]	C 0-180	C 90-270
0	2,067	2,073
5	16,422	16,509
10	32,178	32,584
15	46,623	47,745
20	59,197	61,383
25	69,412	72,700
30	76,896	80,926
35	81,422	85,885
40	82,994	87,817
45	81,748	87,682
50	77,789	86,135
55	71,436	83,455
60	63,201	79,133
65	53,396	72,588
70	42,515	63,929
75	30,834	54,009
80	19,946	43,899
85	12,314	34,446
90	4,695	13,591
Suma	925,082	1106,490
Výsledný světelný tok Φ_τ [lm]	2031,57	

P3 Výpočet činitelů prostupu τ

Výpočet činitelů prostupu						
Měřený vzorek	021172 - 2 mm - 45 mm	021173 - 2 mm - 45 mm	021180 - 2 mm - 45 mm	021181 - 2 mm - 45 mm	021182 - 2 mm - 45 mm	Futura 2.2 ft PC AL 2600
Výsledný světelný tok Φ (bez vzorku) [lm]	523	523	523	523	523	2480
Výsledný světelný tok Φ_{τ} (s vzorkem) [lm]	392	285	403	408	321	2032
Činitel prostupu τ [%]	74,9	54,4	77,1	78	61,4	81,9

P4.1

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - bez vzorku - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	145,41	157,17
γ_1 [°]	40	35
I_{γ_1} [cd]	174,61	181,51
γ_2 [°]	45	40
I_{γ_2} [cd]	132,63	151,09
γ_H [°]	43	39

P4.2

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - 021172 - 2 mm - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	97,34	97,95
γ_1 [°]	40	40
I_{γ_1} [cd]	103,27	99,98
γ_2 [°]	45	45
I_{γ_2} [cd]	88,22	84,96
γ_H [°]	42	41

P4.3

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - 021173 - 2 mm - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	50,38	50,31
γ_1 [°]	55	55
I_{γ_1} [cd]	52,43	51,81
γ_2 [°]	60	60
I_{γ_2} [cd]	44,53	43,79
γ_H [°]	56	56

P4.4

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - 021180 - 2 mm - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	109,51	109,51
γ_1 [°]	40	35
I_{γ_1} [cd]	112,07	126,75
γ_2 [°]	45	40
I_{γ_2} [cd]	93,36	103,41
γ_H [°]	41	39

P4.5

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - 021181 - 2 mm - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	106,47	106,27
γ_1 [°]	40	35
I_{γ_1} [cd]	111,00	125,94
γ_2 [°]	45	40
I_{γ_2} [cd]	93,06	104,36
γ_H [°]	41	40

P4.6

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - 021182 - 2 mm - 45 mm

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	59,58	59,38
γ_1 [°]	50	50
I_{γ_1} [cd]	67,03	66,05
γ_2 [°]	55	55
I_{γ_2} [cd]	58,11	57,18
γ_H [°]	54	54

P4.7

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - Futura 2.2 ft PC AL 2600
(bez difuzoru)

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	418,78	419,39
γ_1 [°]	55	55
I_{γ_1} [cd]	471,92	451,84
γ_2 [°]	60	60
I_{γ_2} [cd]	403,37	382,68
γ_H [°]	59	57

P4.8

Výpočet úhlu poloviční svítivosti lineární interpolací - Futura 2.2 ft PC AL 2600
(s difuzorem)

Úhel poloviční svítivosti		
Měřená polorovina	C0	C90
I_H [cd]	345,57	346,59
γ_1 [°]	50	55
I_{γ_1} [cd]	370,52	371,73
γ_2 [°]	55	60
I_{γ_2} [cd]	318,19	333,40
γ_H [°]	52	58

P5.1

Výpočet činitele rozptylu - bez vzorku - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m ⁻²]	289,69	334,08
L(20°) [cd·m ⁻²]	272,36	261,78
L(70°) [cd·m ⁻²]	9,87	9,58
σ [-]	0,487	0,406

P5.2

Výpočet činitele rozptylu - 021172 - 2 mm - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m ⁻²]	194,21	206,32
L(20°) [cd·m ⁻²]	177,40	176,32
L(70°) [cd·m ⁻²]	80,19	75,25
σ [-]	0,663	0,61

P5.3

Výpočet činitele rozptylu - 021173 - 2 mm - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m ⁻²]	100,54	106,77
L(20°) [cd·m ⁻²]	99,08	99,14
L(70°) [cd·m ⁻²]	79,90	78,85
σ [-]	0,89	0,834

P5.4

Výpočet činitele rozptylu - 021180 - 2 mm - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m ⁻²]	217,82	231,35
L(20°) [cd·m ⁻²]	198,55	197,47
L(70°) [cd·m ⁻²]	69,62	58,42
σ [-]	0,616	0,553

P5.5

Výpočet činitele rozptylu - 021181 - 2 mm - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m⁻²]	212,12	225,74
L(20°) [cd·m⁻²]	193,80	191,86
L(70°) [cd·m⁻²]	75,84	67,76
σ [-]	0,636	0,575

P5.6

Výpočet činitele rozptylu - 021182 - 2 mm - 45 mm

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m⁻²]	118,90	125,79
L(20°) [cd·m⁻²]	115,88	115,29
L(70°) [cd·m⁻²]	87,27	85,36
σ [-]	0,854	0,798

P5.7

Výpočet činitele rozptylu - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (bez difuzoru)

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m⁻²]	837,51	889,37
L(20°) [cd·m⁻²]	838,01	836,50
L(70°) [cd·m⁻²]	739,41	688,41
σ [-]	0,942	0,857

P5.8

Výpočet činitele rozptylu - Futura 2.2 ft PC AL 2600 (s difuzorem)

Činitel rozptylu		
Měřená polorovina	C0	C90
L(5°) [cd·m⁻²]	690,12	735,50
L(20°) [cd·m⁻²]	672,05	696,87
L(70°) [cd·m⁻²]	482,66	725,77
σ [-]	0,837	0,967