

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky



**Nejistoty světelně technických měření v interiérech**

**Uncertainty of interior lighting measurements**

Diplomová práce

Diploma thesis

Bc. Matěj Pavlík

Vedoucí diplomové práce: Ing. Marek Bálský, Ph. D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Pavlík Jméno: Matěj Osobní číslo: 355338  
Fakulta/ústav: Fakulta elektrotechnická  
Zadávající katedra/ústav: Katedra elektroenergetiky  
Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Studijní obor: Elektroenergetika

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Nejistoty světelně technických měření v interiérech

Název diplomové práce anglicky:

Uncertainty of interior lighting measurements

Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte zdroje nejistot při světelně technických měření v interiérech.
2. Proveďte sérii světelně technických měření v několika typech interiéru různými postupy.
3. Porovnejte výsledky jednotlivých postupů a stanovte nejistoty měření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 12 464: Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů
- [2] ČSN 38 0011: Měření osvětlení prostorů
- [3] HABEL, Jiří. 2013. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 622 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Marek Bálský Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 14.02.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 29.05.2017

Platnost zadání diplomové práce: 30.09.2018

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Abstrakt**

V současné době jsou normy pouze doporučeným dokumentem, podle něhož lze postupovat, ale nejsou závazné.

Tato práce se zabývá srovnáním metodiky měření osvětlenosti vnitřních prostor v praxi – tak jak ji osobně znám – a v laboratorních podmínkách, kdy je měření osvětlenosti provedeno striktně dle normy.

V první části práce je teoretický úvod, kde jsou popsány základní světelně technické veličiny a v současné době používané měřicí přístroje. Následně jsou na modelových situacích ukázány hlavní zdroje nejistot a postup jejich vyčíslení, kdy cílem je stanovení výsledné rozšířené nejistoty měření.

V závěru práce je kvalitativně zhodnoceno porovnání postupu měření dle normy a bez ní a jsou navržena doporučení, kterými se lze při měření osvětlenosti v praxi řídit.

## **Klíčová slova**

Luxmetr, metodika měření osvětlenosti, světelně technické veličiny, nejistoty měření

## **Abstract**

Currently, technical standards are only a recommended document, according to which the process of photometric measurement can be done, but it is not binding.

This thesis deals with the comparison of methodology for measuring of illuminance in the interior in practice - as I know personally - and in the laboratory conditions, where the illuminance measurements can be carried out strictly according to the technical standard.

The thesis includes a theoretical introduction, which describes the basic values and photometric quantities and currently used measurement devices. Subsequently model situations show the main sources of uncertainties and their quantification procedure, which aims to determine the resultant expanded measurement uncertainties.

In the conclusion of the thesis there is a qualitative evaluation by comparing the measurement procedure in accordance to technical standards and without it and proposes recommendations that can be used in practice.

## **Keywords**

Luxmeter, methodics of measurement of illuminance, photometric quantities, uncertainties of measurement

## **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 dne .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat své matce za její podporu (psychickou i finanční) během dlouhého studia. Dále pak své dívce, která o mě během práce pečovala.

Další z neméně významných díků patří vedoucímu práce Ing. M. Bálskému, Ph. D., díky jehož trpělivosti a připomínkám se povedlo práci dovést do zdárného konce.

# Obsah

Seznam obrázků .....	1
Seznam tabulek .....	2
Seznam použitých symbolů .....	3
Seznam použitých zkratk.....	3
<b>1. Úvod .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Světelně technické veličiny.....</b>	<b>4</b>
2.1. Světelný tok.....	5
2.2. Prostorový úhel .....	6
2.3. Svítivost .....	7
2.4. Osvětlenost .....	8
2.5. Jas.....	9
<b>3. Měření osvětlenosti .....</b>	<b>10</b>
3.1. Fotočlánek .....	11
3.2. Luxmetry .....	14
3.3. Metodika měření osvětlenosti v interiérech .....	17
3.4. Protokol o měření osvětlenosti a jeho náležitosti .....	19
3.5. Fotometrická lavice.....	20
<b>4. Teorie nejistot měření.....</b>	<b>21</b>
4.1. Základní pojmy .....	22
4.2. Nejistota a chyba měření .....	23

5.	<b>Fotometrie v blízkosti světelného zdroje</b> .....	27
5.1.	Výpočet osvětlenosti bodovým zdrojem .....	28
5.2.	Výpočet osvětlenosti přímkovým zdrojem .....	29
5.3.	Měření svítivosti přímkového zdroje na fotometrické lavici .....	33
5.3.1.	Vyhodnocení výsledků měření .....	34
6.	<b>Srovnání metodik měření osvětlenosti</b> .....	45
6.1.	Návrh osvětlovací soustavy v softwaru DiaLux .....	46
6.2.	Měření osvětlenosti dle normy .....	50
6.3.	Měření osvětlenosti bez respektování normy .....	51
6.4.	Vyhodnocení výsledků měření .....	52
7.	<b>Závěr</b> .....	57
7.1.	Měření na fotometrické lavici .....	57
7.2.	Měření konzultační místnosti T2: B3-355.....	59
8.	Seznam použité literatury .....	60

## **Přílohy**

Příloha č. 1: Kalibrační list luxmetru PRC Krochmann Radiolux 111

Příloha č. 2: Výpočet osvětlenosti v konzultační místnosti č. T2: B3-355

## Seznam obrázků

Znázornění prostorového úhlu [7].....	6
Prostorový úhel obecné plochy [21] .....	7
Příklad fotometrické plochy svítivosti klasické žárovky [21] .....	8
Osvětlenost v poli bodového zdroje [21] .....	9
Jas svazku paprsků [21] .....	10
Luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111 s popisem jeho součástí.....	11
Řez a principiální schéma luxmetru [21] .....	12
Průběh závislosti poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce u vybraných typů fotočlánků [21].....	12
Závislost fotoelektrického proudu selenového článku na odporu vnějšího obvodu [21].....	13
Chyby různých fotočlánků v závislosti na úhlu dopadu [21].....	14
PU 550 Metra Blansko [21] .....	16
Digitální luxmetr a radiometr PRC Krochmann 211 s čidly [21].....	17
Fotometrická lavice [21].....	21
Rozdělení odchylek [3].....	25
Goniofotometr s pohyblivým ramenem [21].....	27
Goniofotometr s otočnou zrcadlovou soustavou [21].....	27
Výpočet osvětlenost v „bodě“ [21].....	28
Výpočet osvětlenosti přímkovým zdrojem [21].....	29
Svítilo FUTURA od firmy TREVOS [22].....	33
Svítilo od firmy TREVOS – FUTURA – rozměry [22].....	34
Vyzařovací charakteristika svítidla FUTURA [22].....	35
Svítivost v polorovinách svítidla FUTURA [22].....	35
Graf hodnot vypočítané svítivosti z korigované osvětlenosti v závislosti na fotometrické vzdálenosti.....	39
Extrapolační funkce svítivosti.....	40
Graf vypočítaných korigovaných hodnot svítivosti z měření luxmetrem v závislosti na vzdálenosti s vyznačením mezí nejistot.....	45
Měřená místnost – konzultační místnost T2: B3-355 v areálu ČVUT v Dejvicích.....	46
Referenční svítidlo TREVOS typ MO T8 – 2x58 W [22].....	47
Zobrazení modelu konzultační místnosti T2: B3-355 v softwaru Dialux v nepravých barvách.....	49



## Seznam tabulek

Maximálně přípustné chyby luxmetrů pro jednotlivé přesnosti [2].....	15
Požadavky na luxmetry pro různou přesnost měření [2].....	16
Průměrné hodnoty exponentu $c$ [2].....	18
Hodnoty koeficientu $k$ [3].....	24
Naměřené hodnoty osvětlenosti na fotometrické lavici.....	34
Výpočet osvětlenosti ve vzdálenosti 2,8 m od svítidla FUTURA bez udržovacího činitele.....	36
Výpočet osvětlenosti ve vzdálenosti 2,8 m od svítidla FUTURA s udržovacím činitelem $z=0,95$ .....	37
Vstupní hodnoty a parametry ke stanovení udržovacího činitele $z$ .....	37
Hodnoty korigované změřené osvětlenosti a svítivosti.....	38
Nejistota $u_{BK}$ v závislosti na fotometrické vzdálenosti.....	42
Nejistoty typu B při měření na fotometrické lavici.....	42
Celkové nejistoty měření typu B na fotometrické lavici v závislosti na fotometrické vzdálenosti.....	43
Hodnoty rozšířených nejistot $U_B$ pro vypočítané svítivosti v kandelách.....	44
Vstupní údaje pro návrh místnosti v DiaLuxu.....	46
Odraznosti povrchů konzultační místnosti T2: B3-355 [8].....	47
Vstupní parametry a jejich hodnoty pro stanovení udržovacího činitele $z$ pro místnost T2: B3-355.....	48
Výsledky modelového výpočtu místnosti T2: B3-355 v souřadnicích výpočtového rastru.....	49
Významné zpracované hodnoty výpočtu softwarem DiaLux.....	50
Naměřené hodnoty prvního měření dle normy.....	51
Naměřené hodnoty druhého měření dle normy.....	51
Naměřené hodnoty prvního měření bez respektování normy.....	52
Naměřené hodnoty druhého měření bez respektování normy.....	52
Korigované hodnoty prvního měření dle normy.....	53
Korigované hodnoty druhého měření dle normy.....	53
Významné hodnoty měření dle normy.....	53
Korigované hodnoty prvního měření bez ohledu na normu.....	55
Korigované hodnoty druhého měření bez ohledu na normu.....	55
Významné hodnoty měření bez ohledu na normu.....	56
Souhrn kapitoly č. 5.....	58

Porovnání výpočtu a měření na fotometrické lavici.....	58
Hodnoty naměřené dle normy; $U_{BN} = 16,06 \%$ .....	59
Hodnoty naměřené bez ohledu na normu; $U_{BB} = 32,04 \%$ .....	59

## Seznam použitých symbolů

$\Phi$	(lm)	Světelný tok
$\lambda$	(nm)	Vlnová délka
$\Omega$	(sr)	Prostorový úhel
$K(\lambda)$	(lm.W <sup>-1</sup> )	Světelný účinek monochromatického záření
$K_m$	(lm.W <sup>-1</sup> )	Maximální účinek monochromatického záření
$I$	(cd)	Svítivost
$E$	(lx)	Osvětlenost
$L$	(cd.m <sup>-2</sup> )	Jas
$T_c$	(K)	Teplota chromatičnosti
$R_a$	(-)	Index podání barev
$f$	(Hz)	Frekvence
$u_A$	(%)	Relativní nejistota typu A
$u_B$	(%)	Relativní nejistota typu B
$u_C$	(%)	Relativní nejistota typu C
$k$	(-)	Koeficient rozšíření

## Seznam použitých zkratk

CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
LED	Elektroluminiscenční dioda
UV	Ultrafialová oblast spektra
CRI	Index podání barev
ÚNMZ	Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

## 1. Úvod

Současnou dobu lze ze světelně technického úhlu pohledu charakterizovat velkou vlnou modernizace osvětlení. V roce 2009 Evropská unie zahájila legislativní proces vytlačování klasických wolframových žárovek z trhu a tím spustila velký boom modernizace osvětlení nejen v takových odvětvích jako je průmysl, sport, administrativa, ale i v domácnostech. Není to však jen současný trend. Odjakživa se lidstvo snaží o co nejefektivnější zdroj světla s co největším měrným výkonem. Mezi nejmodernější současné světelné zdroje patří osvětlení pomocí LED – elektroluminiscenčních diod. Svítidla tak získala možnost mít zcela nové moderní tvary. U lineárních svítidel máme možnost mít velký rozptyl délek a to nemluvíme o LED páskách, které lze zohýbat do téměř libovolného tvaru.

Moderní počítačové zpracování světelně technických výpočtů umožňuje rychlý a kvalitní odhad, jak by mohl výsledek po odborné instalaci vypadat. Nic to ale nemění na tom, že klíčové je samotné měření světelně technických veličin, protože při kolaudaci stavby je povinností dokládat protokoly o měření, jejichž součástí je stanovení rozšířených nejistot měření ke každému výsledku.

Mám za sebou dvouletou praxi ve firmě, která se zabývá modernizací osvětlení. O stanovení nejistot jsme přesto vedli diskuze bez pro mě uspokojivého výsledku. Za cíl si v této práci tedy kladu jednoznačné stanovení významných zdrojů nejistot, jejich vyčíslení, ověření svých hypotéz pokusem a následné zpracování tak, aby bylo v souladu s normou a současně použitelné v praxi.

## 2. Světelně technické veličiny

Pro popis světelného záření a jeho parametrů je nezbytné používat fyzikální veličiny a jednotky, které jsou celosvětově platné. Pro světlo sjednotila tyto veličiny Mezinárodní komise pro osvětlování CIE a patří mezi ně mimo jiné světelný tok, svítivost, prostorový úhel, osvětlenost a jas. Všechny tyto jednotky zavedené komisí CIE se vztahují k tzv. normálnímu fotometrickému pozorovateli a počítá se s hodnotami spektrální citlivosti oka. Pro proces vidění totiž není důležitá celková energie vyzářená zdrojem za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a především pak jeho prostorové rozložení. Proto se ve světelné technice neposuzují veličiny energetické jako například zářivost nebo zářivý tok, ale veličiny fotometrické s respektem k citlivosti oka pozorovatele k záření různých vlnových délek. [2]

## 2.1. Světelný tok

Světelný tok  $\Phi$  je světelně technická veličina odpovídající zářivému toku  $\Phi_e$ . Vyjadřuje-kvantitativně popisuje-schopnost zářivého toku působit zrakový počitek, tedy zrakový vjem. Světelný tok je vlastně zářivý tok zhodnocený zrakovým orgánem normálního fotometrického pozorovatele, a to obvykle při fotopickém vidění. Jednotkou světelného toku je lumen ( $lm$ ).

Světelný tok  $\Phi$  monochromatického záření o vlnové délce  $\lambda$  získáme součinem zářivého toku  $\Phi_e$  a světelného účinku  $K(\lambda)$  nebo součinem maximální světelné účinnosti  $K_m$  a poměrné světelné účinnosti  $V(\lambda)$ .

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (1)$$

Tento vztah platí pro monochromatické záření. Veličina  $K(\lambda)$  ( $lm \cdot W^{-1}$ ) je světelný účinek monochromatického záření.  $V(\lambda)$  je definována vztahem:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (2)$$

Pro záření složené z různých monochromatických záření, jehož zářivý tok  $\Phi_e$  je dán průběhem  $\Phi_e(\lambda)$  .se světelný tok  $\Phi$  vypočte z rovnice:

$$\Phi = 683 \int_0^{\infty} \left( \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Na základě definice svítivosti mezinárodní orgány CIE a ISO schválily, že maximum  $K_m$  světelné účinnosti záření  $K(\lambda)$  dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění hodnoty 683 lumenů. Jedná se tak o konstantu, která sjednocuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii.

Z výše uvedených vztahů je patrné, že světelný tok závisí nejen na velikosti zářivého toku, ale i na vlastnostech fotopického vidění a že jde v podstatě o zářivý tok zhodnocený zrakovým orgánem normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění. [2,7]

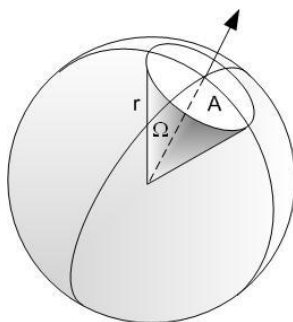
## 2.2. Prostorový úhel

Jedná se o geometrickou veličinu používanou ve výpočtech. Jednotkou prostorového úhlu  $\Omega$  je steradián (sr): Steradián patří mezi odvozené jednotky SI a odpovídá velikosti plochy vyřatě kuželem na povrchu jednotkové koule, jejíž střed se shoduje s vrcholem uvažovaného kužele. Maximální hodnoty nabývá pro plochu povrchu celé koule, tj.  $\Omega_{max} = 4\pi$ .

Prostorový úhel je definován následovně:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (4)$$

kde  $A$  je obsah kulové plochy ( $m^2$ ) a  $r$  je poloměr koule ( $m$ ).

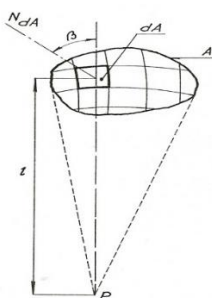


Obr. č. 1 - Znázornění prostorového úhlu [7]

Počítáme-li prostorový úhel pro obecnou plochu, která je vidět z bodu  $P$  (viz. obr. č. 2), vychází se ze vztahu:

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos(\beta)}{l^2} \quad (5)$$

Kde  $dA$  reprezentuje elementární plošku,  $\beta$  je úhel, který svírá osa prostorového úhlu  $d\Omega$  s normálou  $N_{dA}$  plošky  $dA$ .



Obr. č. 2 – Prostorový úhel obecné plochy [21]

Chceme-li tedy určit prostorový úhel, pod kterým je vidět celá plocha  $A$ , máme k dispozici 2 postupy. Jeden je vhodný spíše pro numerické metody a druhý pro analytické.

Za numerickou metodu lze vzít následující postup. Plochu  $A$  rozdělíme na malé plošky  $\Delta A_i$  a spočítáme jednotlivé prostorové úhly z bodu  $P$ . Pokud jsou hodnoty každého prostorového úhlu menší nebo rovny  $0,1256$  sr, je chyba výpočtu menší než 1 %.

Rozhodneme-li, že budeme postupovat analyticky, musíme spočítat následující dvojný integrál [2,7]:

$$\Omega = \iint_A \frac{\cos(\beta)}{l^2} dA \quad (6)$$

### 2.3. Svítivost

V případě, že světelný tok zdroje či svítidla je různě rozložen do různých směrů prostoru, je třeba kromě světelného toku znát ještě prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. K tomuto účelu se zavádí pojem svítivost. Svítivost je definována následujícím vztahem:

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (7)$$

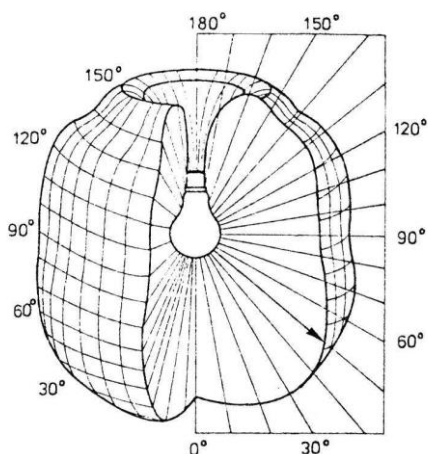
kde  $d\Omega_{\gamma\zeta}$  je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly  $\gamma, \zeta$ . V tomto prostorovém úhlu je vyzařován tok  $d\Phi$ . Určuje se zpravidla pouze pro bodové zdroje světla, které mají zanedbatelné rozměry vůči vzdálenosti od tohoto zdroje, neboť zdroj (svítidlo) leží ve vrcholu prostorového úhlu. Jednotkou svítivosti je kandela (cd), která patří mezi základní jednotky SI od roku 1979.

Kandela je definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje pod daným prostorovým úhlem monochromatické záření o vlnové délce  $\lambda = 555,0155 \text{ nm}$  ( $f = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ) při zářivosti zdroje v daném směru  $1/683 \text{ W}\cdot\text{sr}^{-1}$ .

Svítivost je samozřejmou součástí eulumat stejně jako světelný tok. V praxi se hodnoty svítivosti svítidla ve všech směrech nanesou prostorově od světelného středu zdroje jako radiusvektory a tím se získá fotometrická plocha svítivosti. Není možné postihnout všechny směry, proto v praxi a při výpočtech postačují pouze vybrané řezy. V rovinách řezů tak vzniknou čáry svítivosti v polárních souřadnicích. Křivky svítivosti lze matematicky popsat následující rovnicí:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (8)$$

kde  $I_{\gamma}$  je svítivost pod úhlem  $\gamma$  od vztažného směru,  $I_0$  je svítivost zdroje ve vztažném směru a  $f_I(\gamma)$  je charakteristická funkce svítivosti. Nejčastěji se popisuje pomocí funkce sinus a cosinus, jejich mocninami a lineární kombinací. Z důvodu možné záměny světelného zdroje ve svítidle se přepočítávají diagramy svítivosti na světelný tok zdroje  $1\,000 \text{ lm}$ . Skutečná svítivost  $I_{\gamma}$  se pak určí jako násobek svítivosti přečtené z diagramu a skutečného toku zdroje vyděleným tisícem. [2]



Obr. č. 3 – Příklad fotometrické plochy svítivosti klasické žárovky [21]

## 2.4. Osvětlenost

Osvětlenost, často nazývaná intenzitou osvětlení, reprezentuje velikost světelného toku dopadajícího na jednotkovou plochu. Jednotkou osvětlenosti je lux ( $lx$ ), rozměr jednotky je  $lm\cdot m^{-2}$ . Osvětlenost je definována následujícím vztahem.

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (9)$$

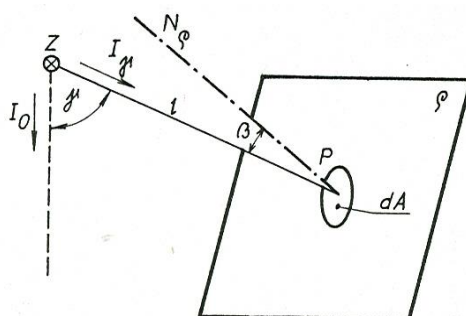
kde  $dA$  je element rovinné plochy, na kterou dopadá světelný tok  $d\Phi_d$ .

Osvětlujeme-li bodovým zdrojem plochu  $dA$ , která tvoří okolí bodu  $P$  v rovině  $\rho$ , a svírá-li normála roviny  $\rho$  úhel  $\beta$  se spojnici bodového zdroje a bodu  $P$ , platí pro velikost osvětlenosti  $E_{P\rho}$  v bodě  $P$  následující rovnice:

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \cos(\beta) \quad (10)$$

kde  $l$  je vzdálenost světelného zdroje od bodu  $P$  (m).

Z toho vztahu vyplývá, že osvětlenost klesá se čtvercem vzdálenosti od světelného zdroje. Tato závislost se často označuje jako čtvercový zákon. Svítivost  $I_\gamma$  klesá s rostoucím úhlem  $\beta$ . Tento jev se nazývá kosinový zákon. [2,3]



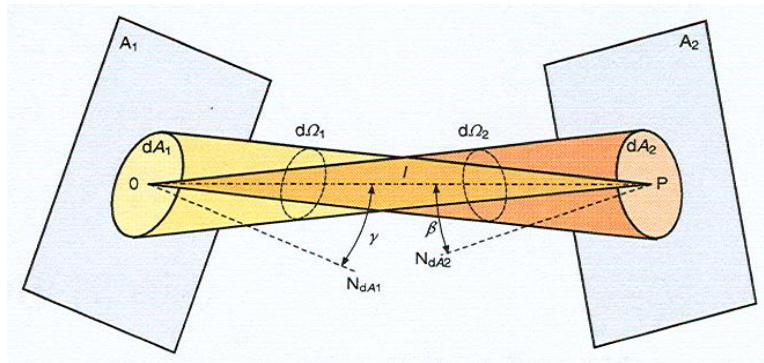
Obr. č. 4 – Osvětlenost v poli bodového zdroje [21]

## 2.5. Jas

Jas svazku světelných paprsků je světelně technickou veličinou, na kterou reaguje lidské oko bezprostředně. Jedná se o veličinu, která je obecně určena prostorovou a plošnou hustotou světelného toku. Je definován následujícím vztahem:

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (11)$$





Obr. č. 5 – Jas svazku paprsků [21]

Kde  $L_{OP}$  označuje jas svazku paprsků ve směru osy  $OP$ ,  $d\Omega$  je prostorový úhel, pod kterým se paprsky šíří a  $dA_n$  je ploška, která je kolmá k ose paprsků. Jednotkou jasu je kandela na metr čtvereční ( $cd.m^{-2}$ ).

Za zdroj jasu lze uvažovat i plochu, která světlo pouze odráží. Velikost jasu závisí na poloze pozorovatele, je tedy funkcí nejen bodu, ale i orientovaného směru. Nejvyšší hodnoty dosahuje jas, když se na světelný zdroj dívá pozorovatel pod úhlem  $90^\circ$  ve směru normály na plochu.

Pokud jsou známy hodnoty jasu svazku paprsků dopadajících z různých směrů do určitého bodu, lze je nanést jako radiusvektory od uvažovaného bodu a získáme tak fotometrickou plochu rozložení jasu. I tato plocha by tedy mohla sloužit podobně jako fotometrická plocha svítivosti, protože charakterizuje rozložení toků v uvažovaném bodě.

Čáry jasu lze popsat matematicky dle následujícího vztahu:

$$L_\gamma = L_0 \cdot f_L(\gamma) \quad (12)$$

Kde  $L_0$  je jas paprsků ve vztažném směru,  $L_\gamma$  je jas paprsků pod úhlem  $\gamma$  od vztažného směru a  $f_L(\gamma)$  je charakteristická funkce, která aproximuje průběh radiusvektorů. K její aproximaci se používají stejné funkce a jejich lineární kombinace jako u čas svítivosti.[2,3]

### 3. Měření osvětlenosti

V této kapitole se blíže zaměřím na samotné měření osvětlenosti, protože se jedná o nejčastější úlohu jak v laboratoři, tak i v běžné praxi. Nejvíce nás bude zajímat, jak ho provádět dle normy, co k němu potřebujeme za pomůcky a jejich základní princip.

Měření je činnost, jejímž cílem je určení velikosti fyzikálních veličin. Výsledkem měření je číselné vyjádření měřené veličiny se stanovenou jednotkou. Aby byl proces kompletní, protože žádný měřicí přístroj není absolutně přesný, je potřeba stanovit také nejistotu měření, o které píše v samostatné kapitole níže.

Fotometrie se zabývá měřením fotometrických veličin, které již byly popsány. Nás bude především zajímat měření osvětlenosti pomocí luxmetru, tedy metoda objektivní (fyzikální). Všeobecně lze říci, že ještě existuje metoda subjektivní a tou je hodnocení osvětlenosti podle lidského zraku. Pro měření jsou klíčové normy ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel a ČSN 36 0011 Měření osvětlení vnitřních prostorů.[2,3,16]

### 3.1. Fotočlánek

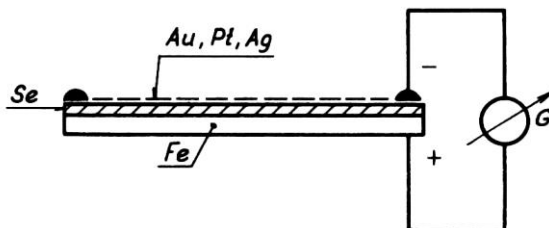
Fotoelektrický článek (zkráceně fotočlánek) je základní součástí luxmetru. Bez fotočláneku bychom neměli „převodník“ ze světla na napětí. Jednoduše se jedná o základní součást nástavce luxmetru, který je propojen s vyhodnocovacím přístrojem z pravidla cca 2 metry dlouhým kabelem. Tato součást je schována uvnitř nástavce (přijímače), nejčastěji kosinového. Na obrázku č. 6 lze vidět názornou ukázkou luxmetru (PRC Krochmann Radiolux 111) i s popisem.



Obr. č. 6 - Luxmetr PRC Krochmann Radiolux 111 s popisem jeho součástí

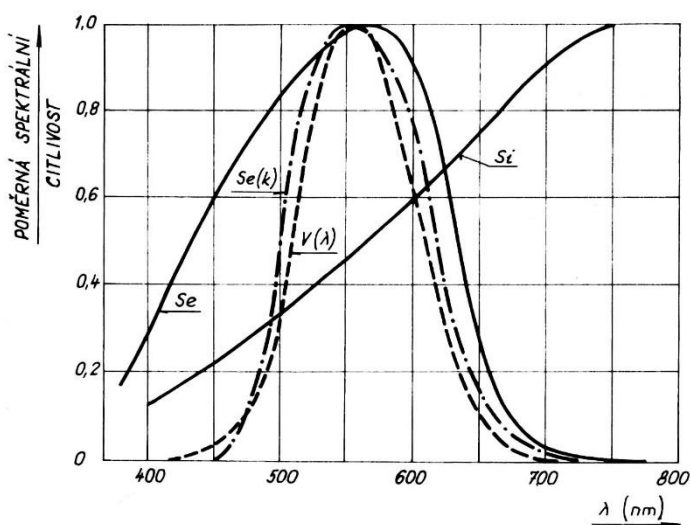
Princip fotočláneku je založen na fotoelektrickém jevu na přechodu mezi polovodičem a kovem. Dopadne-li foton na tenkou vrstvu polovodiče naneseného na kovové podložce, vznikne pár elektron-díra. Uvolněné elektrony pak přecházejí do polovodičové vrstvy typu *N* a díry do vrstvy typu *P*. Vzniká tak potenciálový rozdíl (napětí) a obvodem na obrázku č. 7 může protékat fotoelektrický proud. Kvůli linearitě měření potřebujeme, aby vstupní odpor se blížil k 0 a výstupní odpor se blížil k nekonečnu. [7]

Materiály použitých polovodičů na fotočláncích bývají různé. V současné době je nejpoužívanější křemík ( $Si$ ) a arsenid galia ( $GaAs$ ). Dříve to byl Selen ( $Se$ ). Kovová destička, na které je nanesen polovodič bývá nejčastěji z hliníku ( $Al$ ) nebo železa ( $Fe$ ). Na obr. č. 7 je řez fotočláncem, kde si můžeme povšimnout, že použitý polovodič je ještě pokryt velmi tenkou průsvitnou vodivou vrstvou z platiny ( $Pt$ ), stříbra ( $Ag$ ) nebo zlata ( $Au$ ). [2]



Obr. č. 7 - Řez a principiální schéma luxmetru [21]

Na následujícím obrázku lze vidět příklady průběhů závislosti poměrné spektrální citlivosti fotočláncu na vlnové délce.

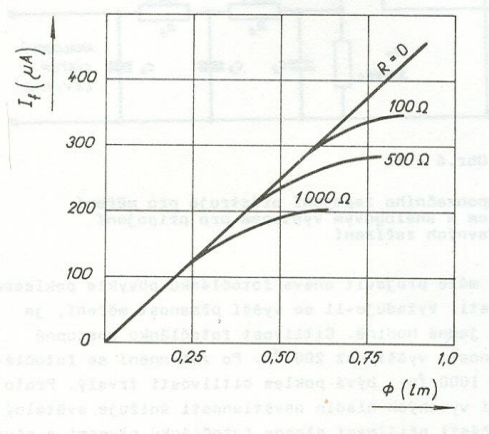


Obr. č. 8 - Průběh závislosti poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce u vybraných typů fotočlánců [21]

Křivka  $Se$  odpovídá nekorigovanému selenovému článku, křivka  $Si$  odpovídá nekorigovanému křemíkovému článku,  $Se(k)$  je křivka korigovaného selenového článku a  $V(\lambda)$  odpovídá spektrální světelné účinnosti pro normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění.

Jedná se o jednu z hlavních podmínek, kterou musí fotočlánek splňovat. Cílem výroby fotočlátku je, aby se průběh závislosti poměrné spektrální citlivosti na vlnové délce co nejvíce shodoval s křivkou  $V(\lambda)$  spektrální citlivosti normálního fotometrického pozorovatele. Nejdůležitější je to při měření světelných zdrojů s čárovým nebo kombinovaným spektrem (výbojkové zdroje). U moderních fotočlátků se korekce na křivku  $V(\lambda)$  provádí pomocí tzv. diferenciálních filtrů, díky kterým lze sledovat křivku  $V(\lambda)$  bod po bodu. Použití diferenciálních filtrů ale snižuje citlivost fotometrického článku, je proto nutné tento jev kompenzovat operačními zesilovači. Spektrální citlivost fotočlátku lze měnit pomocí příměsí a tloušťky vrstev  $P$  a  $N$ . [2,7]

Mezi další parametry jimž musí fotočlánek vyhovovat patří závislost fotoelektrického proudu na dopadajícím světelném toku, která je nelineární. Linearity se dosahuje při nulovém odporu vnějšího obvodu fotočlátku. Tuto závislost vystihuje obr. č. 9.



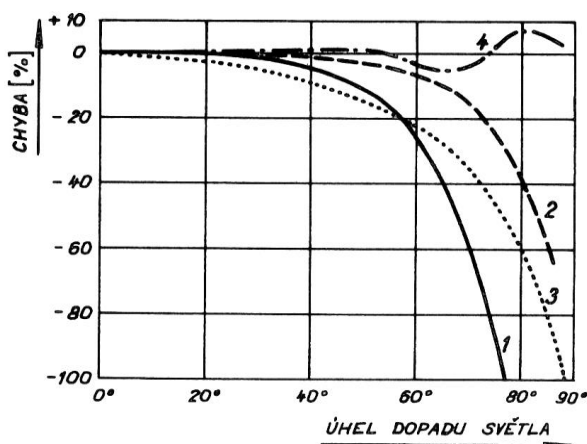
Obr. č.9 - Závislost fotoelektrického proudu selenového článku na odporu vnějšího obvodu [21]

Mezi nežádoucí jevy, ke kterým u fotočlátků (speciálně selenových) dochází je tzv. únava. Jedná se o nežádoucí jev, který se může projevit u dlouhodobých měření poklesem fotoelektrického proudu při konstantním osvětlení. Takový luxmetr tedy po určité době začne zobrazovat nižší hodnoty než skutečné. Je-li tedy vyžadována větší přesnost měření, je nutné naměřené hodnoty ověřovat po půl hodině až jedné hodině měření. Co je další nevýhodou selenových článků, je pokles citlivosti. Pokud měříme v intervalu 200-1 000 lx, po určité době dojde k poklesu citlivosti a je nutné článek zatemnit. Tak dojde k obnově původních vlastností. Takto lze u selenových článků postupovat při osvětlení 200 lx. Pokud je fotočlánek vystaven větší osvětlení než 1 000 lx, pak je pokles citlivosti trvalý. Fotočlánek z křemíku je proti tomuto jevu imunnější.

Fotoproud také závisí na teplotě. U křemíkových je však závislost zanedbatelná. Pokud se u křemíkových článků pohybujeme mezi teplotami 25-50 °C, změna fotoelektrického proudu je pod 1%.

Další fyzikální veličina, která může ovlivnit měření je kmitočet napájecí sítě, se kterým může kmitat i zdroj světla. Tento jev je patrný především u výbojových zdrojů napájených kmitočtem sítě. Dnes se ale u zářivek používají elektronické předřadníky, jejichž kmitočet je až 30 kHz. Zde se tento jev již neprojevuje.

Poslední zmíněnou vlastností je, že fotočlánek bývá kalibrován pro kolmý dopad světla. Jak jsem se již zmínil, osvětlenost je úměrná kosinu úhlu dopadu. U různých fotočlánků se mohou vyskytnout odchylky od tohoto zákona. Zvláště při úhlech dopadu větších než 30°. K chybě dochází díky zrcadlovému odrazu od přijímače, cloněním obrubou, polarizací a sníženou propustností horní vrstvy přijímače. Tuto chybu lze odstranit vhodnou volbou materiálu nástavce a jeho tvarem. Obr. č. 10 zobrazuje chyby různých fotočlánků v závislosti na úhlu dopadu.



Obr. č. 10 - Chyby různých fotočlánků v závislosti na úhlu dopadu [21]

- 1 – přečnávající obruba
- 2 – bez obruby
- 3 – s korekčním filtrem
- 4 – s kosinovým nástavcem

### 3.2. Luxmetry

Luxmetr je přístroj pro měření osvětlenosti a to rovinné, kulové, válcové, polokulové a i poloválcové v závislosti na použitém přijímači. Je to přístroj, který potvrzuje správnost světelně technického výpočtu, který byl proveden před samotnou instalací svítidel do navrhovaného objektu. Pokud existují nějaké garance od firmy,

kteřá daný prostor navrhovala (dnes se dává záruka i pět let na dodržení normové osvětlenosti), pak se potvrzují na základě měření luxmetrem a z něho vycházejícím protokolem o měření osvětlenosti, ve kterém má být uvedeno vše, co je pro protokoly určeno normou ČSN 36 0011.

Základní dělení luxmetrů je podle třídy přesnosti. Luxmetry mají celkem čtyři třídy přesnosti a to dle ÚNMZ a CIE. Dle ÚNMZ se označují číslicemi 1, 2, 3, 4, kdežto dle CIE se označují písmeny (sestupně) L, A, B, C. Těmto třídám odpovídají největší dovolené souhrnné chyby  $f_c$  (viz. tab. č. 1, sloupec  $f_c$ ). Jedná se tedy procentuálně o čísla 2%, 5%, 10%, 20%. Pokud luxmetr posuzujeme, sledujeme celkem jedenáct druhů chyb, přičemž  $f_6$ - $f_{11}$  se posuzují pouze při typové zkoušce. Souhrn všech maximálních chyb i s popisem popisuje již zmíněná tabulka č. 1.

Třída přesnosti přístroje		Největší dovolená chyba (%)											
ÚNMZ	CIE	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$	$f_c$
1	L	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1	1,0	0,2	0,2	0,1	0,1	0,01	2
2	A	3,0	0,8	1,5	0,5	0,2	3,0	1,0	1,0	1,0	0,2	0,50	5
3	B	5,0	1,5	3,0	1,0	0,5	6,0	2,0	2,0	2,0	0,5	1,00	10
4	C	10,0	3,0	6,0	1,0	1,0	9,0	4,0	4,0	5,0	1,0	2,0	20

Tab. č. 1 – Maximálně přípustné chyby luxmetrů pro jednotlivé přesnosti [2]

$f_1$ -relativní chyba stupnice;  $f_2$ -spektrální chyba (projeví se, pokud osvětlujeme přijímač jiným světlem, než pro které bylo kalibrováno);  $f_3$ -směrová (úhlová) chyba;  $f_4$ -chyba nestability;  $f_5$ -chyba vlivu teploty vztažená na 1 °C;  $f_6$ -odchylka od křivky  $V(\lambda)$ ;  $f_7$ -chyby vyplývající z citlivosti fotočlánku na UV záření;  $f_8$ -chyby vyplývající z citlivosti fotočlánku na infračervené záření;  $f_9$ -chyba nelinearity;  $f_{10}$ -chyba při měření modulovaného záření;  $f_{11}$ -chyba při změně rozsahu;  $f_c$ -souhrnná chyba

Tabulka, která souhrnně popisuje požadavky na luxmetry pro různě náročná měření je tab. č. 2. Je zní patrné, že měření se dělí na tři stupně náročnosti a to přesné, provozní, orientační. Podle stupně měření se volí i luxmetr a tabulka uvádí rozsah nejistot měření, do kterých bychom se měli vejít. Je důležité všimnout si délky platnosti kalibrace. U luxmetrů pro přesná měření jsou to jen 2 roky, u provozních jsou to 3 roky a u orientačních až 5 let.

Přesnost měření		Přípustná celková chyba luxmetru (%)	Odhad rozšířené nejistoty výsledků (%)	Maximální doba platnosti kalibrace (roky)
Měření	Přesná	5	$U \leq 8$	2
	Provozní	10	$8 < U \leq 14$	3
	Orientační	15	$14 < U \leq 20$	5

Tab. č. 2 – Požadavky na luxmetry pro různou přesnost měření [2]

Mezi technické vybavení luxmetru patří korektor na indikátoru luxmetru umožňující nastavit nulu, dále pak kontrolu napětí zdroje luxmetru, pokud má vlastní napájecí zdroj. Co se přetížení rozsahu týká, musí každý luxmetr vydržet přetížení 20% po dobu pěti minut a životnost musí být minimálně 5 000 provozních hodin. Frekvenční rozsah je v rozmezí od 40 do  $10^5$  Hz pro všechny třídy luxmetrů. Dále je doporučeno, aby průměr plochy fotočlánku byl do 30 mm.

Provozní luxmetry bývají často vybaveny stíněným kabelem, aby přechtené výsledky nebyly ovlivněny při čtení údajů. Je-li fotočlánek zabudován přímo v přístroji, je nutné, kvůli zastínění při čtení naměřených hodnot, vybavit přístroj o možnost dálkově fixovat naměřenou hodnotu. Jinak je měření čistě orientační.

Příkladem luxmetru pro provozní měření je české PU 550 Metra Blansko na obr. č. 11.



Obr. č. 11 - PU 550 Metra Blansko [21]

Příkladem radiometru a luxmetru pro laboratorní měření je přístroj od německé firmy PRC Krochmann (obr. č. 12). Přístroj má k dispozici několik čidel-na obrázku zleva-tři čidla pro měření v UV oblasti, klasický kosinový nástavec, speciální nástavce pro měření střední poloválcové, válcové a kulové osvětlenosti.



Obr. č. 12 – Digitální luxmetr a radiometr PRC Krochmann 211 s čidly [21]

### 3.3. Metodika měření osvětlenosti v interiérech

Jak jsem se již zmínil, měření osvětlenosti je nejčastější úlohou nejen v laboratořích, ale i v praxi. Při měření vycházíme z platné normy ČSN 36 0011 a jejich změn, která má 3 části. A to část 1 – základní ustanovení, část 2 – Měření denního osvětlení, část 3 - Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů. V této práci se zaměřím na část třetí.

Cílem měření je kontrola hodnot osvětlenosti v bodech pracovní či srovnávací roviny na pracovišti, komunikaci nebo jiném prostoru zatříděném projektantem dle ČSN EN 12464-1.

Na začátku samotného měření je projektová dokumentace, kterou si musí odborník, který bude měřit a vyhodnocovat výsledky měření důkladně prostudovat včetně světelně technických výpočtů. Pouze takto zorientovaný odborník může co nejpřesněji vyhodnotit správnou metodiku měření, zvolit vhodné pomůcky a vybrat čas měření (ve dne či v noci).

Protože každý světelný zdroj má svá specifika, je nutné dodržovat tyto pokyny:

- Nové zářivky a výbojky musí být provozovány (zahořeny) minimálně 100 h při jmenovitém napětí. Tato skutečnost se uvádí do protokolu o měření.
- Nové žárovky musí být zahořeny minimálně 10h při jmenovitém napětí. Tato skutečnost se uvádí do protokolu o měření.
- Světelný tok musí být před začátkem měření stabilizován. To znamená, že po zahoření, vypnutí a novém zapnutí před měřením musí být např. výbojky minimálně 20 min v provozu (pokud jsou v uzavřeném svítidle, může být doba delší)



- Fotočlánek luxmetru (přijímač) musí být osvětlen minimálně 5–15 min před samotným měřením a to hladinou osvětlenosti, která bude měřena
- Kvůli vlivu teploty na světelné zdroje je nutné měřit během měření i teplotu okolí. Tato skutečnost se uvádí do protokolu o měření.
- Kvůli závislosti světelného toku svítidel na napájecím napětí, je nutné toto napětí neustále během měření kontrolovat. Pokud napětí v síti neodpovídá jmenovitému, je nutno naměřené hodnoty je korigovat podle údajů výrobce. Nejsou-li tyto hodnoty známy, násobí se činitelem  $k_U$ , který se vypočítá z výrazu:

$$k_U = \left( \frac{U}{U_N} \right)^c \quad (13)$$

Kde  $U$  je naměřené napětí,  $U_N$  je napětí jmenovité a  $c$  je exponent závislý na druhu zdroje. O volbě exponentu  $c$  rozhoduje následující tab. č. 3.

Světelný zdroj	c
Žárovka pro všeobecné osvětlování	3,6
Zářivka – indukční zapojení	1,4
Zářivka – kapacitní zapojení	0,6
Zářivka – zapojení duo	1,0
Rtuťová vysokotlaká výbojka	2,5
Halogenidová výbojka	3,0
Vysokotlaká sodíková výbojka	1,7
Nízkotlaká sodíková výbojka	0,0

Tab. č. 3 – Průměrné hodnoty exponentu  $c$  [2]

Pokud jsme respektovali předchozí body, můžeme začít měřit. V praxi jsem se nesetkal s měřením umělého osvětlení v interiérech ve dne při zatemněných oknech nebylo-li to nezbytně nutné. Měření probíhala vždy po setmění. Nejvhodnější je měřit v noční době se zatemněnými okny, abychom minimalizovali vliv případného venkovního osvětlení.

Zásadně se měří v síti kontrolních bodů (rastru), jejichž vzdálenost jasně definuje norma ČSN 36 0011. Je to síť bodů (ideálně čtvercová, může být i obdélníková), která nejlépe vystihuje měřenou plochu. Největší možná vzdálenost  $p$  dvou bodů kontrolní sítě se spočítá ze vztahu.

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log(d)} \quad (14)$$

Kde  $d$  je delší strana měřené obdélníkové plochy. V normě je dále uvedeno, že pokud má delší strana rozměr dvojnásobný oproti kratší straně, je nutné dosadit za  $d$  do vztahu kratší rozměr obdélníku. Pokud se síť svítidel shoduje se sítí kontrolních bodů, je nutné rastr tomuto aspektu přizpůsobit, a to zhuštěním měřících bodů.

Za výšku měřené roviny lze vzít přímo povrch pracoviště (např. stolu) nebo lze měřit maximálně 5 cm nad povrchem.

Výhodou měření je využití symetrie místnosti. Není proto nutné vždy měřit místnost jako celek, nýbrž např. pouze část.

Pokud je celkové osvětlení doplněno místním přisvětlením, je potřeba měřit na konkrétním místě při běžné pozici pracovníka. Důležité je pak si uvědomit, že pracovní rovina nemusí být nutně pouze horizontální nebo vertikální, ale obecně nakloněná.

V dalším kroku se vypočítané hodnoty zpracují a vyhotoví se protokol o měření osvětlenosti, přičemž hodnota, dle které se rozhodne, zda měřený prostor splňuje či nesplňuje požadavky norem, je průměrná. Jedná se o aritmetický průměr všech měřených bodů na dané rovině.

### **3.4. Protokol o měření osvětlenosti a jeho náležitosti**

Protokol o měření je velice důležitý dokument podobně jako technická zpráva. Protokol se předkládá hygienikovi při kolaudaci daného objektu a jeho hlavním obsahem je vyjádření o tom, zda je osvětlení v objektu v souladu s normativními požadavky či ne.

Mezi jeho hlavní náležitosti patří označení a charakteristika měřeného prostoru, kde se uvádí například popis činnosti v objektu prováděný, dále pak účel takového objektu, jestli se jedná o rekonstrukci či novostavbu apod. Z hlediska přesnosti měření je důležité pokusit se hygienikovi sdělit prostřednictvím protokolu účel měření a jeho přesnost včetně odhadu nejistoty. Protokol dále obsahuje popis a náčrt osvětlovací soustavy s vyznačením kontrolních rovin, svítidel a kontrolních míst. Hygienik se pak mnohem lépe orientuje v daném prostoru a ví, jaký měřící rastr odpovědná osoba za měření zvolila. Velmi důležitou součástí je popis stavu světelné soustavy, ve které se soustava nacházela při měření.

Například jestli zdroje byly zahořené dle pokynů norem. Dále pak údaje o použitých zdrojích a svítidlech (alespoň výrobce, typ, teplota chromatičnosti, index podání barev).

Mezi další body, které má protokol obsahovat patří popis způsobu měření, který vystihuje, zda se měřilo ve dne či v noci, se zatemněnými okny, použité pomůcky atp. Nesmíme také zapomenout na uvádění hodnot napětí a teploty při měření, neboť jak již víme, tyto veličiny mají vliv na nejistotu měření. Naměřené hodnoty osvětlenosti musejí být tabelárně zpracované (nebo do výkresů zaznamenané bod po bodu) a korigované hodnotami uvedenými v kalibračním listu (případně zdůvodnit hodnotu korekce). Závěrem musí protokol samozřejmě zhodnotit a porovnat výsledky měření s normovými hodnotami, což se dělá tak, že vypočtenou místně průměrnou hodnotu vynásobíme udržovacím činitelem a odečteme nejistotu měření. Následuje pak vyjádření, zda daný prostor splňuje či nesplňuje normu. Nastává tak několik případů:

- Pokud jsme po odečtení nejistoty od aritmetického průměru vynásobeného udržovacím činitelem (pouze v případě nové osvětlovací soustavy) nad normovou hodnotou, lze říci, že osvětlovací soustava normu splňuje.
- Pokud jsme aritmetickým průměrem vynásobeným udržovacím činitelem nad normovou hodnotou, ale po odečtu nejistoty jsme pod normovou hodnotou, nedá se říci, že daný prostor splňuje normu a je proto nutné upravit metodu měření a měřit znovu
- Pokud jsme aritmetickým průměrem pod normovou hodnotou a tedy i po odečtení nejistoty, daný prostor normu jistě nesplňuje.

Protokol musí samozřejmě obsahovat datum a hodinu měření; počet, adresy a kvalifikace osob, které prostor měřily; dále pak soupis použitých přístrojů s údaji o přesnosti a kalibraci. [2,18]

### **3.5. Fotometrická lavice**

Jedná se o laboratorní přístroj, který slouží pro měření svítivosti. Lze na ni ověřovat přesnost měření fotočlánků a porovnávat svítivost světelných zdrojů. Je složena ze dvou paralelních vodících tyčí, na které lze upevnit posuvný nástavec se světelným zdrojem, případně stínítka, celá svítidla a fotočlánky luxmetru.

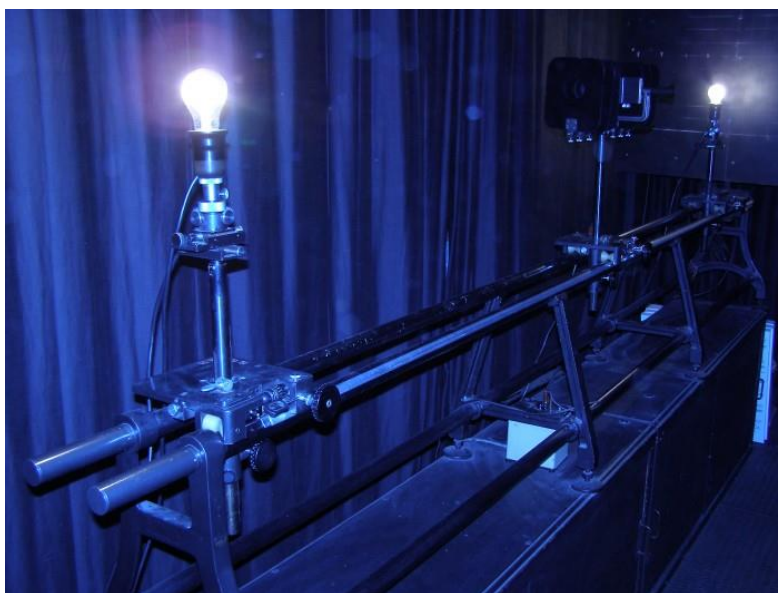
Výhodou je, že se všechny součásti připevněné na fotometrickou lavici dají umístit do jedné optické osy. Takto se měří svítivost – Luxmetr je v optické ose se zdrojem, který se musí jevit jako bodový a pak lze ze čtvercového zákona dopočítat svítivost  $I$ . Aby se zdroj jevil jako bodový je klíčová věc, proto jsou fotometrické lavice dlouhé 3-8 m. Zdroj se jeví jako bodový, pokud jeho největší rozměr je prakticky zanedbatelný oproti vzdálenosti mezi kontrolním bodem a zdrojem. Prakticky to znamená, že pokud chceme, aby zdroj se jevil jako bodový, musíme umístit kontrolní bod do vzdálenosti minimálně 5-ti násobku nejdelšího rozměru svítidla.

Pokud chceme měřit přesněji, musí být kontrolní bod vzdálen až 10-ti násobek nejdelšího rozměru svítidla.

Abychom mohli odečítat vzdálenost, je vodící lišta na fotometrické lavici vybavena stupnicí v milimetrech (někdy až s přesností 0,5 mm).

Toto vybavení světelně technické laboratoře umožňuje i kalibraci luxmetrů. Nazačátek fotometrické lavice se umístí normál svítivosti a na posuvnou část luxmetru. Na základě vypočítané svítivosti ze čtvercového zákona v určité vzdálenosti od zdroje se provede kalibrace luxmetru.

Aby se co nejvíce zamezilo rušivým odrazům, je fotometrická lavice a vybavení laboratoře černé. [2,7,21]



Obr. č. 13 – Fotometrická lavice [21]

#### 4. Teorie nejistot měření

Když chceme shrnout výsledky měření fyzikální veličiny, je jisté, že musíme poskytnout některé kvantitativní ukazatele o kvalitě výsledku tak, aby bylo možné měření použít. Bez těchto ukazatelů nemohou být výsledky měření porovnávány mezi sebou, ani nemohou být vztaženy k existujícím standardům. K tomuto účelu slouží nejistoty měření a z toho důvodu je nezbytné, aby bylo možné nejistotu měření srozumitelně popsat a vyjádřit.

Koncept nejistot měření a jejich kvantifikace je v historii relativně novým pojmem. V minulosti se kvalita měření hodnotila pomocí chyby měření a analýzy chyby měření. Nyní se všeobecně uznává, že když všechny známé nebo možné složky chyby byly vyhodnoceny a byly provedeny příslušné korekce, stále trvá nejistota o správnosti uvedeného výsledku. Jde tedy o pochybnost, na kolik výsledek měření byl ovlivněn množstvím provedených měření.

Stejně jako shoda vědců v užívání jednotek SI přinesla jednotu vědeckých prací a měření, přináší celosvětový konsenzus o hodnocení a vyjadřování nejistot měření transparentnost do závěrů hodnocení měření ve vědě, strojírenství, obchodu i průmyslu. [4]

#### **4.1. Základní pojmy**

Měření – jedná se o souhrn činností s cílem určit hodnotu měřené veličiny (čili vyjádřit hodnotu veličiny v jednotkách této veličiny)

Měřená hodnota – střední prvek souboru, který reprezentuje měřenou veličinu

Míra - měřidlo, které během používání reprodukuje hodnotu nebo hodnoty měřené veličiny

Přesnost měření – míra těsnosti, se kterou výsledek měření vyjadřuje správnou (pravou) hodnotu měřené veličiny

Konvenčně pravá hodnota – hodnota, která je získána měřením pomocí přesnějšího přístroje nebo přesnější metody nebo pomocí metody považované dohodou za referenční.

Citlivost měřícího přístroje – poměr změny výstupní veličiny (údaje přístroje) ke změně vstupní (měřené) veličiny

Rozlišovací schopnost – neménší změna měřené veličiny, která vyvolá detekovatelnou změnu údaje přístroje

Měřící rozsah přístroje – vyjadřuje meze hodnot, ve kterých se může měnit měřená veličina, aby byla měřena se zaručovanou přesností

Ovlivňující veličina – veličina, která není předmětem měření, ale ovlivňuje údaj měřidla

Chyba měření – je to odchylka měřené hodnoty měřené veličiny od správné hodnoty měřené veličiny

Nejistota měření – parametr přiřazený k výsledku měření charakterizující rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny, jež je objektem měření. [1,7]

## 4.2. Nejistota a chyba měření

Dříve se používalo výrazu „chyba měření“. Dnes je tento výraz nahrazen „nejistotou měření“. Připisuje se to poznání, že pravá hodnota je odborníkovi, který provádí měření, skryta a častěji než s pravou hodnotou pracujeme s konvenčně pravou hodnotou neboli odhadem. Je to dáno skutečností, že pravé hodnoty můžeme docílit pouze s použitím různých etalonů, které však v praxi nejsou běžně dosažitelné nebo k použití. Navíc měření s etalony je podmíněno ideálním prostředím. Chyby měření lze rozdělit na dva druhy a to relativní a absolutní. Absolutní chyba je dána jednoduchým vzorcem:

$$\Delta_x = x_m - x_s \quad (15)$$

Kde  $x_m$  je naměřená hodnota a  $x_s$  je hodnota skutečná.

Relativní chybu určíme poměrem chyby absolutní a skutečné hodnoty, tedy:

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s} \quad (16)$$

Kvůli přehlednosti se tato veličina násobí ještě stem. Získáme tak procentuální vyjádření chyby:

$$\delta_x = \frac{x_m - x_s}{x_s} \cdot 100 \quad (17)$$

Dále se chyby dělí na systematické a náhodné. Dělení závisí na tom, jak se při měření chyby vyskytují. Pokud se chyba mění předvídatelným způsobem, nebo je stejná při opakovaném měření, jedná se o chybu systematickou. Vznikají např. při nevhodně nastavené nule, při zjednodušování měření nebo při zesílení. Lze ji následně odstranit případnou korekcí.

Opakem je chyba náhodná. Chová se naprosto nepředvídatelně, nelze ji odstranit korekcí a určuje se na základě statistické analýzy, kde klíčovým pojmem je směrodatná odchylka

Nyní přikročíme k nejistotám. Jak již bylo napsáno v části definic, nejistota vyjadřuje interval hodnot, ve kterém lze očekávat hodnotu správnou. [3]

Existují dva druhy nejistot – Typ A a Typ B. Typ A získáme opakovaným měřením za stejných podmínek nebo statistickou analýzou.

Při stanovování nejistot typu A se postupuje takto. Provedeme  $n$  po sobě jdoucích měření za stejných podmínek, ze kterých získáme  $n$  hodnot (čím více hodnot, tím je menší nejistota Typu A) a určíme směrodatnou odchylku dle následujícího vztahu:

$$u_a = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

Kde  $x_i$  je hodnota  $i$ -tého měření a  $\bar{x}$  je aritmetický průměr všech měření, který se vypočítá podle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (19)$$

Chceme-li nejistotu typu A vyjádřit v procentech, vyjdeme z následujícího vztahu:

$$u_{a\%} = \frac{u_a}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (20)$$

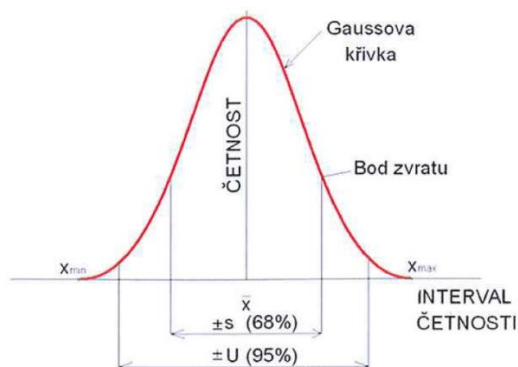
Za dostatečný vzorek měření se bere 10 po sobě jdoucích měření. Pokud tato podmínka není splněna, je nutné výsledek vynásobit koeficientem  $k$ , který závisí na počtu provedených měření v případě, že jich bylo méně než 10. Hodnoty koeficientu  $k$  jsou uvedeny v následující tabulce:

$N$	9	8	7	6	5	4	3	2
$K$	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

Tab. č. 4 – Hodnoty koeficientu  $k$  [3]

Nyní přejdeme k nejistotám typu B. U nich se postupuje jinak a musíme vycházet z velmi dobré znalosti experimentu. Nejdříve se totiž musejí určit možné zdroje nejistot  $z$ , následně se určí interval možných odchylek a největší dovolená chyba (např. z kalibračního listu přístroje), která udává mez intervalu  $z_{max}$ . V dalším bodě určíme rozdělení pravděpodobnosti odchylek (Gaussovo, trojúhelníkové, lichoběžníkové, rovnoměrné apod.) Dále se pomocí rozdělení odchylek určí relativní standardní nejistota, kdy se nejčastěji využívá Gaussova rozdělení (viz obr. 14). Na obrázku č. 14 je patrná směrodatná odchylka  $s$ , která tvoří standardní nejistotu typu A. Zakreslená hodnota  $U$  představuje rozšířenou standardní nejistotu.

Procenta reprezentují pravděpodobnost výskytu pravé hodnoty v daném intervalu, z toho vyplývá, že např. při rozšířené nejistotě  $U$  musí mít přístroj 95 % výsledků v tomto intervalu nejistot a 5 % mimo interval.



Obr. č. 14 - Rozdělení odchylek [3]

V protokolech o měření a kalibračních listech se standardně (a normou je doporučeno) uvádí rozšířená nejistota, která se vypočte z následujícího vztahu:

$$U = k \cdot u \quad (21)$$

Kde  $k$ , je konstanta, která se volí 2 v případě normálního rozdělení a představuje 95 % pokrytí pravé hodnoty. Malé  $u$  značí kombinovanou standardní nejistotu, o které bude řeč dále.

Pokud chceme vypočítat nejistotu typu  $B$ , vyjdeme z následujícího vztahu:

$$u_b = \frac{z_{max}}{\chi} \quad (22)$$

Kde  $z_{max}$  je mez intervalu nejistoty a  $\chi$  je konstanta, která se řídí daným typem rozdělení, pro které jsme se v rozhodovacím algoritmu rozhodli. Volí se 2 nebo 3 pro normální rozdělení v závislosti na tom, jaká bude pravděpodobnost, že bude překročena hodnota  $z_{max}$ . Pokud existuje malá pravděpodobnost, že bude překročena, volí se 2, pokud je  $z_{max}$  nepřekročitelná hodnota, volí se 3.

Jakmile určíme všechny dostupné zdroje nejistot typu  $B$ , je potřeba stanovit výslednou nejistotu typu  $B$  a to dle následujícího vztahu:

$$u_b = \sqrt{\sum u_{bi}^2} \quad (23)$$



Tento vztah platí pro nejistoty, které jsou na sobě nezávislé. Pokud lze ale prokázat závislost (korelaci) mezi jednotlivými nejistotami, postupuje se podle jiného vztahu:

$$u^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2 + 2 \sum_{i=1, j < i}^n u_i u_j r_{i,j} \quad (24)$$

Kde  $u_i$  jsou nejistoty všech zjištěných zdrojů,  $u_j$  jsou nejistoty závislé (korelované) a  $r_{i,j}$  jsou korelační koeficienty, které udávají míru závislosti dvojice veličin.

Pokud jsme získali oba celkové typy nejistot, určíme kombinovanou standardní nejistotu dle následujícího vztahu:

$$u = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (25)$$

Kde  $u_a$  vyjadřuje výslednou nejistotu typu A a  $u_b$  vyjadřuje výslednou nejistotu typu B. Výslednou rozšířenou nejistotu  $U$  získáme po vynásobení koeficientem  $k=2$  pro normální rozdělení, jak bylo již popsáno výše.

Poslední odstavec věnuji zpracování nejistot nepřímých měření. Příkladem nepřímého měření je zjišťování odporu ampérmetrem a voltmetrem z Ohmova zákona. Jedná se tedy o případ, kdy žádaná veličina není odečítána přímo z měřícího přístroje, ale je vypočítávána z matematického vztahu, který je funkcí více proměnných. Máme-li tedy funkci více proměnných:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (26)$$

Kde  $X_1, X_2, \dots, X_n$  jsou proměnné funkce  $Y$ , u nichž máme zjištěny všechny nejistoty typu A a typu B a kombinovanou nejistotu.

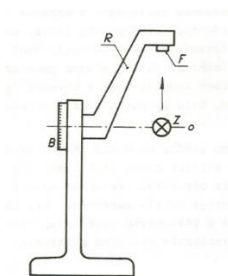
Pokud chceme tedy vypočítat nejistotu nepřímého měření, použijeme následující vztah:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} u_{X_i} \right)^2} \quad (27)$$

Jedná se tedy o součin parciálních derivací podle příslušné proměnné s příslušnou nejistotou. Tento vztah platí pouze pro nekorelované nejistoty. [3]

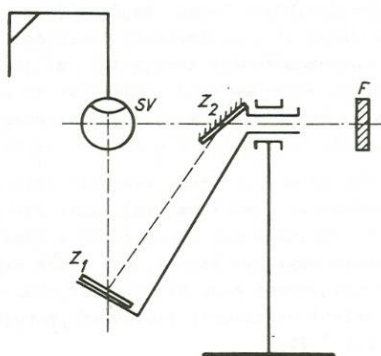
## 5. Fotometrie v blízkosti světelného zdroje

Nyní se dostáváme k problému měření svítivosti v blízkosti světelného zdroje. Přístroje na měření čar svítivosti se nazývají goniofotometry a jsou to poměrně sofistikovaná zařízení. Mezi největší problémy, ke kterým dochází při návrhu takového měřicího zařízení je, jak zajistit, aby se měřený světelný zdroj choval vůči fotočlánku jako bodový. Zářivky se běžně vyrábějí v délce až 1,5 m. Má-li se takový zdroj chovat jako bodový vůči pozorovateli, musí být vzdálen minimálně 5-ti násobek nejdelšího rozměru svítidla tj. 7,5 m, a to se nezmiňuji o tom, že aby měření bylo opravdu přesné, měl by to být 10-ti násobek, tedy 15m.



Obr. č. 15 – Goniofotometr s pohyblivým ramenem [21]

Goniofotometry se vyrábějí ve třech různých provedeních. Buď je otočné rameno s fotočlánkem a světelný zdroj je fixovaný na stálé pozici, nebo je tomu naopak. Třetí varianta spočívá v pevném uspořádání jak fotočlánku, tak i měřeného světelného zdroje, ale s otočnou zrcadlovou soustavou. Druhý typ je nejméně vhodný, neboť světelný tok závisí u některých typů svítidel na poloze světelného zdroje. První typ je lepší, ale vyskytuje se tu problém právě s fotometrickou vzdáleností. Třetí typ je výhodný právě z hlediska fotometrické vzdálenosti, protože se zde sčítají vzdálenosti fotočlánku od zrcadel a světelných zdrojů. Ale i tento typ má své nevýhody. Zrcadla pohlcují záření a s věkem vliv tohoto nežádoucího jevu narůstá. [2]

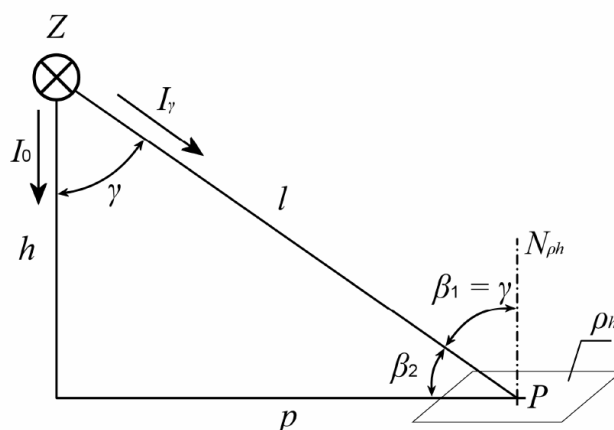


Obr. č. 16 – Goniofotometr s otočnou zrcadlovou soustavou [21]

Klíčovým zjištěním kapitoly 5.3 bude závislost vlivu míry „bodovosti“ světelného zdroje na vzdálenosti, odkud měříme vztažnou svítivost.

### 5.1. Výpočet osvětlenosti bodovým zdrojem

Osvětlenost se řídí čtvercovým zákonem uvedeným v kapitole 2.4. Nyní uvedu jednoduchý příklad na výpočet osvětlenosti.



Obr. č. 17 – Výpočet osvětlenost v „bodě“ [21]

Na obr. č. 17 je zakreslené zadání. Mějme tedy svítidlo, které můžeme pokládat za bodový zdroj ve výšce  $h = 3 \text{ m}$  nad rovinou  $\rho_h$ . Nechť jsou jeho parametry následující – vztažná svítivost  $I_0$  je 150 cd a vyzařovací charakteristiku popisuje druhá mocnina funkce kosinus, tedy  $f_I = \cos^2(\gamma)$  a je rotačně symetrická. Osvětlenost chceme určit v bodě  $P$ , v horizontálnosti  $p = 4 \text{ m}$  od bodového zdroje.

Nejdříve určíme fotometrickou vzdálenost  $l$  mezi bodovým zdrojem a místem pozorovatele z Pythagorovy věty:

$$l = \sqrt{h^2 + p^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \quad (28)$$

Náš bodový zdroj je tedy vzdálen 5 m od místa měření osvětlenosti. V dalším kroku zjistíme, pod jakým úhlem je pozorovatel umístěn vůči světelnému zdroji. Spočítáme tedy úhel  $\gamma$ . Vyjdeme z následujících vztahů:

$$\tan \gamma = \frac{p}{h} = \frac{4}{3} = 1,3\overline{3} \quad (29)$$

$$\gamma = \beta_1 = \arctg(1,3\overline{3}) = 53^\circ 7' \quad (30)$$

Pozorovatel je tedy vůči světelnému zdroji pod úhlem  $53^{\circ}7'$ .

Nyní je nutné spočítat svítivost ve směru  $I_{\gamma}$ . Ze zadání plyne, že vyzařovací charakteristika je rotačně symetrická, je proto jasné, že svítivost lze určit ze vztahu:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot \cos^2(\gamma) \quad (31)$$

$$I_{\gamma} = 150 \cdot \cos^2(53^{\circ}7') = 54 \text{ cd} \quad (32)$$

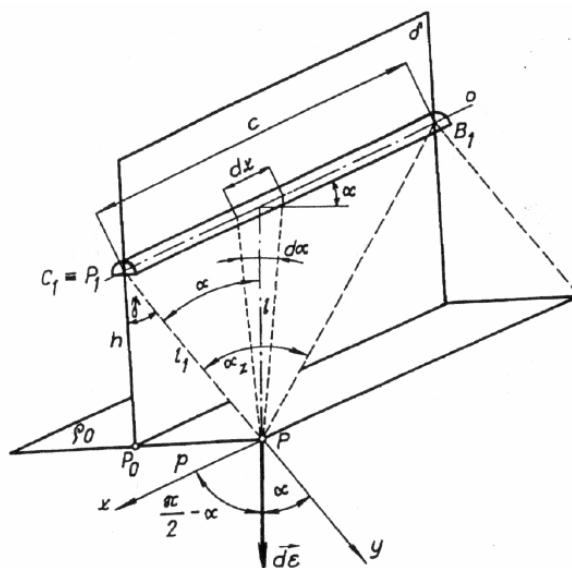
A nyní již lze dosadit do vzorce pro kosinový (čtvercový) zákon:

$$E_{p_{\rho h}} = \frac{I_{\gamma} \cdot \cos(\beta_1)}{l^2} = \frac{54 \cdot \cos(53^{\circ}7')}{5^2} = 1,296 \text{ lx} \quad (33)$$

Výsledná osvětlenost v bodě P je tedy 1,296 lx. [21]

## 5.2. Výpočet osvětlenosti přímkovým zdrojem

Ke zdrojům, u kterých se počítá osvětlenost a jehož rozměry nelze zanedbat, patří přímkový zdroj nebo také lineární zdroj. Nelze u tohoto typu zanedbat charakteristický rozměr (což je v našem případě délka zdroje) a pokládat ho za bodový. Existují dva typy výpočtu, z nichž zde uvedu jeden, který jsem použil v praktické části své diplomové práce a to „numerický“ výpočet. Pro naše účely si tedy vystačíme s pojmem bodový zdroj, neboť náš přímkový zdroj rozdělíme na dílčí bodové zdroje a budeme nich sečítat příspěvky v námi určeném bodě, kde chceme vypočítat osvětlenost. Více již v následujícím příkladu. [21]



Obr. č. 18 – Výpočet osvětlenosti přímkovým zdrojem [21]

Nechť máme svítidlo přímkového typu o délce  $c = 1,2 \text{ m}$  (zářivka  $36\text{W}$ ,  $\Phi = 3350 \text{ lm}$ ). Je zavěšené ve výšce  $h = 2 \text{ m}$  nad srovnávací rovinou. Bod  $P$  na obr. č. 18 je místem pozorování osvětlenosti. Předpokládejme kosinusové rozložení svítivosti (v podélném i příčném směru svítidla) a vztažná svítivost  $I_0 = 200 \text{ cd.klm}^{-1}$ . Vzdálenost  $P$  od  $P_0$  je  $p = 1 \text{ m}$ .

Nejdříve je nutné urči délku elementu svítidla tak, aby se z pohledu pozorovacího místa jevil jako bodový. K tomu nám poslouží definice pro bodový zdroj, tedy minimálně pětinásobek délky jednoho elementu svítidla musí být menší nebo roven vzdálenosti, ze které osvětlenost pozorujeme. Nejdříve tedy zvolíme délku elementu svítidla – svítidlo rozdělím na čtvrtiny o délce  $0,3 \text{ m}$  - a nyní provedu test, zda je takový zdroj z nejbližší pozorované vzdálenosti bodový. Nejbližší vzdálenost, ze které budu pozorovat element přímkového zdroje je  $l_1$ , která se určí ze vztahu:

$$l_1 = \sqrt{h^2 + p^2} = \sqrt{2^2 + 1^2} = \sqrt{5} = 2,236 \text{ m} \quad (34)$$

Nyní vyjdu z následující nerovnice, kde  $a_z$  je délka elementu svítidla:

$$l_1 \geq 5a_z \quad (35)$$

$$2,236 \geq 5 \cdot 0,3 \quad (36)$$

$$2,236 \geq 1,5 \quad (37)$$

Z posledního výrazu vidíme, že nutná podmínka je splněna a zdroj se jeví jako bodový. Stačí tedy svítidlo rozdělit na 4 stejné části o stejné vyzařovací charakteristice, stejné vztažné svítivosti, stejným světelným tokem, což provedeme následujícím způsobem. Nejdříve je potřeba určit svítivost ve vztažném směru připadající na jeden metr délky svítidla pro  $3350 \text{ lm}$ .

$$I_{10} = \left(\frac{I_0}{c}\right) \left(\frac{\Phi}{1000}\right) \quad (38)$$

$$I_{10} = \left(\frac{200}{1,2}\right) \left(\frac{3350}{1000}\right) = 558,3 \text{ cd.m}^{-1} \quad (39)$$

Nyní můžeme určit svítivost každého elementu ( $I_{0z1}, I_{0z2}, I_{0z3}, I_{0z4}$ ) svítidla o délce  $c_e = 0,3 \text{ m}$ :

$$I_{0Z1} = I_{0Z2} = I_{0Z3} = I_{0Z4} = I_{10} \cdot c_e = 558,3 \cdot 0,3 = 167,5 \text{ cd} \quad (40)$$

Nyní chceme napočítat příspěvky osvětlenosti od jednotlivých elementů svítidla ( $E_1, E_2, E_3, E_4$ ) k celkové hledané osvětlenosti  $E$  v místě  $P$ . K tomu je nutné znát jednotlivé fotometrické vzdálenosti bodových zdrojů od místa pozorování. V jednotlivých elementech předpokládáme umístění bodových zdrojů v jejich středu. Proto nejdříve určíme vzdálenosti jednotlivých středů elementárních zdrojů od bodu  $C_1$  (viz. obr. č. 18). Popořadě je to:

$$l_{Z1} = 0,15 \text{ m} \quad (41)$$

$$l_{Z2} = 0,45 \text{ m} \quad (42)$$

$$l_{Z3} = 0,75 \text{ m} \quad (43)$$

$$l_{Z4} = 1,05 \text{ m} \quad (44)$$

Odtud lze již stanovit vzdálenost světelného středu od místa pozorování  $P$ .

$$l_{C_{e1}P} = \sqrt{l_1^2 + l_{Z1}^2} = \sqrt{(\sqrt{5})^2 + 0,15^2} = 2,241 \text{ m} \quad (45)$$

$$l_{C_{e2}P} = \sqrt{l_1^2 + l_{Z2}^2} = \sqrt{(\sqrt{5})^2 + 0,45^2} = 2,281 \text{ m} \quad (46)$$

$$l_{C_{e3}P} = \sqrt{l_1^2 + l_{Z3}^2} = \sqrt{(\sqrt{5})^2 + 0,75^2} = 2,359 \text{ m} \quad (47)$$

$$l_{C_{e4}P} = \sqrt{l_1^2 + l_{Z4}^2} = \sqrt{(\sqrt{5})^2 + 1,05^2} = 2,47 \text{ m} \quad (48)$$

Nyní určíme vzdálenosti  $p_1$  až  $p_4$  mezi průměty bodových zdrojů do roviny  $\rho$  a bodem  $P$ :

$$p_1 = \sqrt{p^2 + l_{Z1}^2} = \sqrt{1^2 + 0,15^2} = 1,01 \text{ m} \quad (49)$$

$$p_2 = \sqrt{p^2 + l_{Z2}^2} = \sqrt{1^2 + 0,45^2} = 1,1 \text{ m} \quad (50)$$

$$p_3 = \sqrt{p^2 + l_{Z3}^2} = \sqrt{1^2 + 0,75^2} = 1,25 \text{ m} \quad (51)$$

$$p_4 = \sqrt{p^2 + l_{Z4}^2} = \sqrt{1^2 + 1,05^2} = 1,43 \text{ m} \quad (52)$$

Dále určíme úhly mezi směry  $l_{C_{ei}P}$  a  $l_{OZi}$  :

$$\gamma_{Z1} = \arctg\left(\frac{p_1}{h}\right) = \arctg\left(\frac{1,01}{2}\right) = 0,46811 \text{ rad} \quad (53)$$

$$\gamma_{Z2} = \arctg\left(\frac{p_2}{h}\right) = \arctg\left(\frac{1,1}{2}\right) = 0,50153 \text{ rad} \quad (54)$$

$$\gamma_{Z3} = \arctg\left(\frac{p_3}{h}\right) = \arctg\left(\frac{1,25}{2}\right) = 0,5586 \text{ rad} \quad (55)$$

$$\gamma_{Z4} = \arctg\left(\frac{p_4}{h}\right) = \arctg\left(\frac{1,43}{2}\right) = 0,6213 \text{ rad} \quad (56)$$

A konečně můžeme stanovit dílčí osvětlenosti ze čtvercového zákona:

$$E_1 = \frac{I_{0Z1} \cdot \cos \gamma_{Z1}}{l_{C_{e1}P}^2} \cos \gamma_{Z1} = \frac{167,5 \cdot \cos 0,46811}{2,241^2} \cos 0,46811 = 26,6 \text{ lx} \quad (57)$$

$$E_2 = \frac{I_{0Z2} \cdot \cos \gamma_{Z2}}{l_{C_{e2}P}^2} \cos \gamma_{Z2} = \frac{167,5 \cdot \cos 0,50153}{2,281^2} \cos 0,50153 = 24,8 \text{ lx} \quad (58)$$

$$E_3 = \frac{I_{0Z3} \cdot \cos \gamma_{Z3}}{l_{C_{e3}P}^2} \cos \gamma_{Z3} = \frac{167,5 \cdot \cos 0,5586}{2,359^2} \cos 0,5586 = 21,7 \text{ lx} \quad (59)$$

$$E_4 = \frac{I_{0Z4} \cdot \cos \gamma_{Z4}}{l_{C_{e4}P}^2} \cos \gamma_{Z4} = \frac{167,5 \cdot \cos 0,6213}{2,47^2} \cos 0,6213 = 18,1 \text{ lx} \quad (60)$$

Výsledná osvětlenost v bodě  $P$  je tedy:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 = 26,6 + 24,8 + 21,7 + 18,1 = 91,2 \text{ lx} \quad (61)$$

### 5.3. Měření svítivosti přímkového zdroje na fotometrické lavici

K měření na fotometrické lavici bylo použito LED svítidlo od firmy TREVOS – FUTURA 2,2 ft PC Al v krytí IP66, tedy svítidlo prachotěsné, s difusorem z translucenčního polykarbonátu. Mezi další jeho parametry patří celkový světelný tok, který má hodnotu 2360 lm, dále pak index podání barev je větší než 80 a teplota chromatičnosti, která má hodnotu 4 000 K. [22]



Obr. č. 19 – Svítidlo FUTURA od firmy TREVOS [22]

Svítidlo jsem umístil do vertikální polohy na začátek fotometrické lavice tak, aby jeho světelný střed byl v ose s kosinovým nástavcem, který jsem na začátku měření umístil na konec fotometrické lavice a patřičnou dobu nechal ve stabilní poloze a stabilní osvětlenosti, aby měření bylo co nejpřesnější. Odečetl jsem hodnoty vzdáleností. Konec difusoru byl umístěn na hodnotě 16 cm, fotometrická lavice měla stupnici do 3 m. Pro budoucí snazší zpracování naměřených hodnot jsem tedy čidlo luxmetru použil do 296 cm, což odpovídá vzdálenosti 2,8 m od konce difusoru svítidla.

Na počátku samotného měření bylo změřeno síťové napětí, které mělo hodnotu 230V, tedy jmenovitou, a byla také změřena teplota, kterou zobrazoval přímo luxmetr a měla hodnotu 22,5 °C.

Následně jsem započal měření. S krokem 10 cm jsem přibližoval čidlo luxmetru ke svítidlu až do krajní polohy – 10 cm od svítidla – a odečítal hodnoty osvětlenosti z displeje luxmetru.

K měření byl použit kalibrovaný luxmetr od firmy PRC Krochmann, typ Radiolux 111 (viz obr. č. 6). Kalibrační list je z roku 2016 a je tedy platný, neboť přístroje tohoto typu mají platnost kalibrace 2 roky.



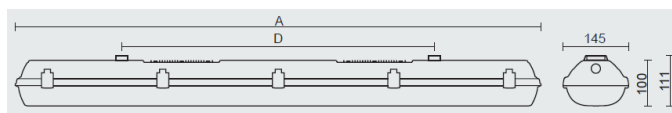
Naměřené hodnoty jsou v následující tabulce:

č. měření	vzdálenost čidla od svítidla (m)	osvětlenost (lx)	č. měření	vzdálenost čidla od svítidla (m)	osvětlenost (lx)
1	2,8	89,8	15	1,4	322
2	2,7	96,1	16	1,3	369
3	2,6	103	17	1,2	426
4	2,5	111	18	1,1	499
5	2,4	120	19	1,0	592
6	2,3	130	20	0,9	712
7	2,2	141	21	0,8	875
8	2,1	153	22	0,7	1100
9	2,0	168	23	0,6	1420
10	1,9	185	24	0,5	1900
11	1,8	204	25	0,4	2650
12	1,7	226	26	0,3	3870
13	1,6	253	27	0,2	6110
14	1,5	285	28	0,1	10900

Tab. č. 5. – Naměřené hodnoty osvětlenosti na fotometrické lavici

### 5.3.1. Vyhodnocení výsledků měření

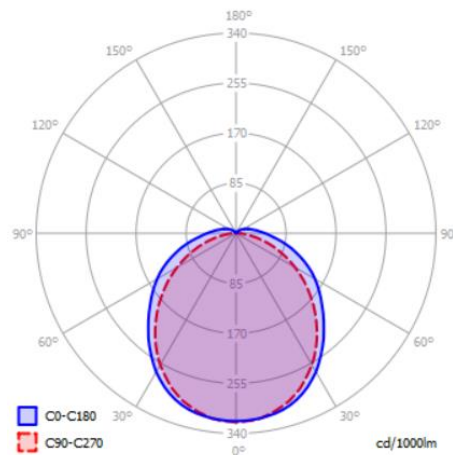
Nejprve jsem zjišťoval, zda se naměřené hodnoty shodují s výpočtem dle kapitoly 5.2. Vytvořil jsem proto program v MS Office – Excel. Tento program je zautomatizovaným postupem kapitoly 5.2 s tím rozdílem, že počítá osvětlenost na ose světelného středu svítidla. Parametry svítidla TREVOS jsou známy všechny (viz. kapitola 5.3), kromě vztažné svítivosti a rozměrů. Fyzické rozměry svítidla jsou vyobrazeny na obr. č. 20, přičemž  $A = 612$  (rozměr  $D$  odpovídá uchycení, není proto pro výpočet potřeba).



Obr. č. 20 – Svítidlo od firmy TREVOS – FUTURA – rozměry [22]

Ale ani fyzické rozměry nejsou dostatečně přesné pro výpočet. Vzal jsem proto za rozměr svítidla rozměr vyzařovací plochy, která je uvedena v eulumdatech, které jsou ke stažení na webových stránkách firmy TREVOS. Pro otevření a editaci eulumdat jsem použil volně šiřitelný software QLumEdit. Odtud lze vyčíst délku vyzařovací plochy na záložce „Luminaire“ a ta činí 0,61 m.

Stejně tak vztažnou svítivost je nutné odečíst z eulumdat. Na následujícím obrázku je vyobrazena vyzařovací charakteristika svítidla FUTURA:



Obr. č. 21 – Vyzařovací charakteristika svítidla FUTURA [22]

Důležité je si povšimnout, že je v jednotkách  $cd.klm^{-1}$ . Abychom určili vztažnou svítivost v kandelách, je nutné se podívat na záložku „Luminous intensity“ v softwaru QLumEdit a přepočítat všechny hodnoty na kandelý pomocí následujícího vztahu:

$$I_{cd} = I_{cd.klm^{-1}} \cdot \left( \frac{\Phi_{celk}}{1000} \right) \quad (62)$$

Kde  $I_{cd}$  je požadovaná hodnota svítivosti v kandelách,  $I_{cd.klm^{-1}}$  je hodnota svítivosti v  $cd.klm^{-1}$  odečtená z eulumdat a  $\Phi_{celk}$  je celkový světelný tok ze svítidla (v našem případě s difusorem). Následující obrázek vyobrazuje záložku „Luminous intensity“ v softwaru QLumEdit:

	C0°	C15°	C30°	C45°	C60°	C75°	C90°	C105°	C120°	C135°	C150°	C165°	C180°	C195°	C
0°	319	320	320	321	321	321	321	321	321	321	320	319	319	320	:
2,5°	319	319	320	320	320	320	320	320	320	320	320	319	319	319	:
5°	318	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	319	318	319	:
7,5°	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	317	:
10°	315	315	315	315	314	314	313	314	314	315	315	315	315	315	:
12,5°	313	313	312	312	311	310	309	310	311	312	312	313	313	313	:
15°	310	310	309	308	306	305	304	305	306	308	309	310	310	310	:
17,5°	306	306	305	303	301	299	299	299	301	303	305	306	306	306	:
20°	301	301	300	298	295	293	292	293	295	298	300	301	301	301	:
22,5°	295	295	294	291	288	285	285	285	288	291	294	295	295	295	:
25°	288	288	287	284	280	277	276	277	280	284	287	288	288	288	:
27,5°	280	280	279	276	272	269	267	269	272	276	279	280	280	280	:
30°	272	271	270	267	263	259	258	259	263	267	270	271	272	271	:

Obr. č. 22 – Svítivost v polorovinách svítidla FUTURA [22]

Nyní můžeme vidět, jak bylo svítidlo měřeno na goniofotometru. Podélný řez fotometrickou plochou svítivosti svítidla FUTURA značí poloroviny C-90 a C-270, příčný řez značí poloroviny C-0 a C-180. Je tedy patrné, že svítidlo bylo měřeno s krokem 15°. Když skloubíme vyzařovací charakteristiku (obr. č. 21) a tabulku svítivosti (obr. č. 22), můžeme odečíst vztažnou svítivost, která odpovídá celému řádku 0°. Jelikož se hodnoty vztažné svítivosti liší a nejsou jednotné, vzal jsem proto aritmetický průměr, jako konvenčně pravou hodnotu. Vztažná svítivost nového, zahořeného svítidla FUTURA je tedy 320,5 cd.klm<sup>-1</sup>. Po přepočítání této hodnoty na kandely je vztažná svítivost  $I_0 = 756,38 \text{ cd}$ . [2]. Postup výpočtu osvětlenosti u přímkového zdroje je již znám z kapitoly 5.2, proto zde uvedu jen závěry výpočtu osvětlenosti pro měřené svítidlo. Pro výpočet jsem zvolil větší přesnost, než je v příkladu v kapitole 5.2. Necht' je tedy zdroj bodový, pokud vzdálenost, odkud svítidlo pozorujeme, je větší než desetinásobek jeho charakteristického rozměru. Pokud měřené svítidlo pozorujeme z 2,8 m, je nutné ho rozdělit minimálně na 3 elementy. Program napsaný v MS Excel má jedinou nevýhodu a tou je nutnost dohledat svítivosti ve vypočítaných směrech z podobné tabulky, jako je v eulumdatech. S tím rozdílem, že tabulka svítivosti se vypočítává pro různou definici elementu měřeného svítidla. Následující tabulka zobrazuje úhly, pod kterými svítí jednotlivé elementy a k nim přiřazuje svítivosti, vzdálenosti a příspěvky osvětlenosti. Z důvodu symetrie úlohy jsou elementy číslovány také symetricky od středu svítidla (0 značí střed svítidla a 1 je první element od středu svítidla ke kraji).

Číslo elementu	Vzdálenost od bodu pozorování (m)	Úhel od vztažné svítivosti (°)	Svítivost elementu v daném směru (cd)	Příspěvek osvětlenosti od daného elementu (lx)
1	2,81	4,15	251,73	31,86
0	2,80	0,00	252,13	32,16
1	2,81	4,15	251,73	31,86
			Celková osvětlenost (lx)	95,87

Tab. č. 6 – Výpočet osvětlenosti ve vzdálenosti 2,8 m od svítidla FUTURA bez udržovacího činitele

Z tab. č. 6 je patrné, že výsledná vypočítaná osvětlenost ve vzdálenosti 2,8m od měřeného svítidla je 95,87 lx, což se nepříliš shoduje s naměřenou hodnotou (viz. tab. č. 5). Odchylka je zřejmě dána stářím a nečistotami ve svítidle. Pokud totiž výpočet korigujeme udržovacím činitelem  $Z=0,95$  stanoveným softwarem DiaLux na hodnotu, získáme přesnější hodnotu (viz. následující tabulka).

Číslo elementu	Vzdálenost od bodu pozorování (m)	Úhel od vztážené svítivosti (°)	Svítivost v daném směru (cd)	Příspěvek osvětlenosti od daného elementu (lx)
1	2,81	4,15	239,15	30,26
0	2,80	0,00	239,52	30,55
1	2,81	4,15	239,15	30,26
Celková osvětlenost (lx)				91,08

Tab. č. 7 – Výpočet osvětlenosti ve vzdálenosti 2,8 m od svítidla FUTURA s udržovacím činitelem  $z=0,95$

Pokud násobíme všechny hodnoty v tab. č. 8, tedy činitel znečištění ploch místnosti, činitel znečištění svítidel a činitel poklesu funkční spolehlivosti, získáme hodnotu udržovacího činitele  $Z = 0,95$ . Hodnoty definované uživatelem, jsou hodnoty, které nebylo možné do softwaru DiaLux vložit. Např. typ světelného zdroje je LED. Tento typ DiaLux zatím nenabízí, ale z této volby vychází při výpočtu činitele stárnutí světelného zdroje. Proto byl odborně odhadnut na 1. Je to dáno tím, že jedinou informací, kterou o rychlosti stárnutí světelného zdroje máme je počet hodin svítivosti při parametru  $LXBY$ , kde  $X$  a  $Y$  jsou hodnoty v procentech. Takový parametr je uveden v katalogovém listu svítidla od výrobce. V našem případě má hodnotu  $L80B20$  při 50 000 hodinách, což říká, že světelný tok jednoho LED čipu klesne po 50 000 hodinách na 80% původní hodnoty a přitom 20% LED čipů celého svítidla nebude svítit vůbec. Pokud tedy předpokládáme, že svítidlo je staré 4 roky, odsvítilo 175 hodin ročně (což je celkem 700 hod) a po 50 000 hodinách bude svítit na  $0,8 \cdot 0,8 = 0,64 = 64\%$  své původní hodnoty světelného toku, tak jednoduše lineární interpolací určíme, že aktuální činitel stárnutí světelného zdroje má hodnotu 0,995 a lze ho tedy zanedbat. Vstupní hodnoty pro určení udržovacího činitele pomocí softwaru DiaLux zobrazuje následující tabulka:

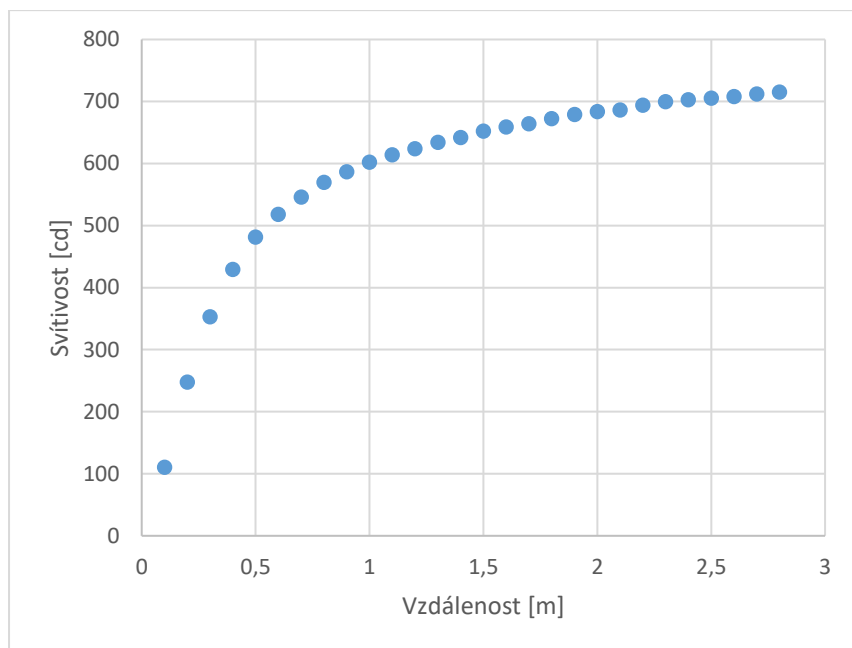
Vliv odrazivosti na plochy místnosti:	střední ( $1.6 < k \leq 3.75$ )	Typ sv. zdroje:	Definováno uživatelem
Typ osvětlení:	Přímé/nepřímé	Neodkladná výměna nefunkčních sv. zdrojů:	Ano
Interval údržby svítidel:	Nepřetržitě (0 let)	Činitel znečištění ploch místnosti:	0.95
Typ svítidla:	Prachotěsný IP5X (podle CIE)	Činitel znečištění svítidel:	1.00
Provozní doba za rok (v 1000 hodin):	0,175	Činitel stárnutí sv. zdrojů:	1 (Definováno uživatelem)
Interval výměny žárovek:	Ročně	Činitel poklesu funkční spolehlivosti:	1.00

Tab. č. 8 – Vstupní hodnoty a parametry ke stanovení udržovacího činitele  $z$

Nyní jsme tedy zjistili, že naměřená hodnota ve 2,8 m odpovídá výpočtu. Jak již ale bylo popsáno v úvodu kapitoly 5, zajímá nás především chování svítivosti v blízkosti světelného zdroje, který není z libovolné vzdálenosti bodový. Pojdme tedy určit svítivost ve všech vzdálenostech od bodového zdroje na základě měření luxmetrem. Vypočtené hodnoty shrnuje následující tab. č. 8. K výpočtu osvětlenosti byl využit čtvercový (kosinový) zákon, z něhož si vyjádříme vztažnou svítivost. Úhel  $\gamma$  pokládáme za rovný 0, neboť čidlo luxmetru je umístěno v ose svítidla na jeho světelném středu. Získáme stále stejnou svítivost v libovolné vzdálenosti o hodnotě  $I_{0z} = I_0 \cdot z = 756,38 \cdot 0,95 = 718,56 \text{ cd}$ ? Následující tab. č. 9 a obr. č. 23 nám dává odpověď.

Č. měření	Vzdálenost čidla od svítidla (m)	Korigovaná osvětlenost (lx)	Svítivost (cd)	Č. měření	Vzdálenost čidla od svítidla (m)	Korigovaná osvětlenost (lx)	Svítivost (cd)
1	2,8	91,23	715,30	15	1,4	327,47	641,85
2	2,7	97,63	711,78	16	1,3	375,27	634,21
3	2,6	104,75	708,12	17	1,2	433,24	623,87
4	2,5	112,88	705,54	18	1,1	507,48	614,05
5	2,4	122,04	702,95	19	1,0	602,06	602,06
6	2,3	132,21	699,39	20	0,9	724,10	586,52
7	2,2	143,39	694,04	21	0,8	889,88	569,52
8	2,1	155,60	686,20	22	0,7	1114,30	546,01
9	2,0	170,86	683,42	23	0,6	1438,46	517,85
10	1,9	188,15	679,20	24	0,5	1924,70	481,18
11	1,8	207,47	672,20	25	0,4	2684,45	429,51
12	1,7	229,84	664,24	26	0,3	3920,31	352,83
13	1,6	257,30	658,69	27	0,2	6189,43	247,58
14	1,5	289,85	652,15	28	0,1	11019,9	110,20

Tab. č. 9 – Hodnoty korigované změřené osvětlenosti a svítivosti



Obr. č. 23 – Graf hodnot vypočítané svítivosti z korigované osvětlenosti v závislosti na fotometrické vzdálenosti

Z tabulky i obrázku je patrné, že svítivost klesá s klesající fotometrickou vzdáleností. Také je důležité si všimnout, že tabulka i graf uvádí hodnoty korigované a liší se tedy od původních naměřených hodnot uvedených v tab. č. 5. Je to dáno kalibračním listem, který je samostatnou přílohou této diplomové práce. Udává se v něm, že pro zjištění přesnější hodnoty měření, je nutno naměřenou hodnotu korigovat průměrným koeficientem pro daný měřicí rozsah.

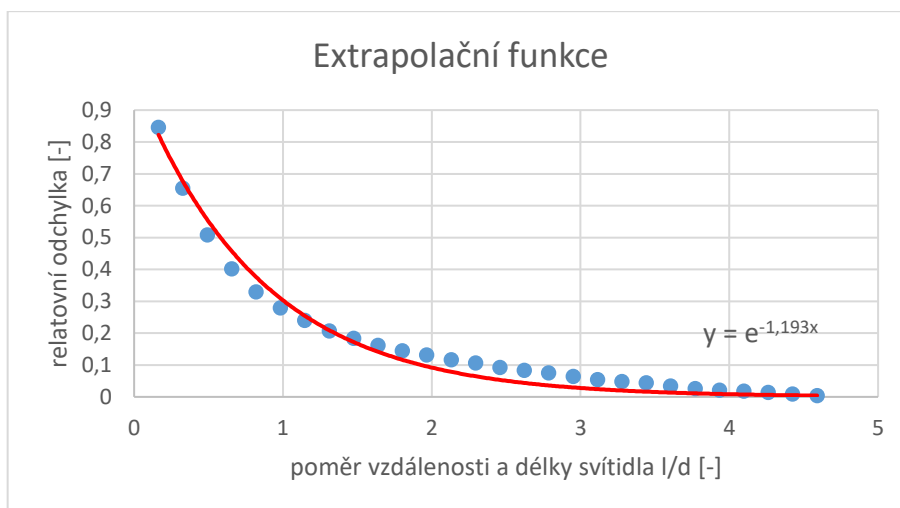
Chceme-li stanovit vztažnou svítivost svítidla, jehož rozměry nejsou zanedbatelné, je nutné, abychom měřili v dostatečné vzdálenosti. Z tabulky vidíme, že značně musí narůstat nejistota samotného měření způsobená zanedbatelnými rozměry svítidla. Ta tedy během měření postupně narůstá.

Dříve než se začnu věnovat nejistotám tohoto měření, povšimněme si, že jsme stále odchyleni od hodnoty vztažné svítivosti z eulumdat, která má hodnotu po udržovacím činiteli 718,56 cd. Víme, že čím jsme dále od svítidla s zanedbatelnými rozměry, tím přesnější měření může být. Fotometrická lavice mi bohužel nestačila, abych dodržel podmínku pětinasobku vzdálenosti, ale mohu extrapolovat. Nyní se podívám, jak se pravděpodobně chová hodnota svítivosti ve 3 m od měřeného svítidla. Je k tomu zapotřebí udělat regresní model např. pomocí softwaru Excel. Vyjádřil jsem si proto relativní odchylku od průměrné vztažné svítivosti z eulumdat pomocí vzorce  $\delta = 1 - \frac{I_{m\check{e}r}}{718,56}$ , kde  $I_{m\check{e}r}$  je vypočítaná hodnota svítivosti z naměřených korigovaných hodnot. Tuto odchylku vynesu na osu y.

Dále pak jsem si vyjádřil hodnoty na ose  $x$  jako poměr délky na fotometrické lavici ( $l$ ) a délky svítidla ( $d$ ). Pro takto sestavený  $x$ - $y$  bodový graf jsem pak odhadl závislost jako funkci  $f(x) = e^{-x}$ . Proložil jsem proto všechny body funkcí  $f(x) = e^{-ax}$ , kde  $a$  je regresní koeficient. Software vygeneroval statisticky významný regresní model ve tvaru:

$$f(x) = e^{-1,19292 \cdot x} \quad (63)$$

Extrapoláční funkce je uvedena na následujícím obrázku. Nyní již jen stačilo extrapolovat do 3 m vzdálenosti. Výsledná extrapolovaná hodnota pro 3 m vyšla 716,2701 cd.



Obr. č. 24 – Extrapoláční funkce

Nyní se budu zabývat nejistotami měření na fotometrické lavici. Jelikož měření bylo provedeno z časových důvodů pouze jedno, nelze stanovit nejistotu typu  $A$ . Zdroje nejistot typu  $B$  lze rozdělit na 5 typů dle [6]. Nejprve je to nejistota měřícího přístroje, dále pak nestabilita použitých zařízení, nepřesnost měření délky na fotometrické lavici, nepřesnost platnosti kosinového zákona (kvůli konečným rozměrům svítidla) a nepřesnost nastavení čidla luxmetru v optické ose se svítidlem. Nejistota měřícího přístroje  $u_{Be}$  je definována kalibračním listem, kde je v jeho závěru uvedena hodnota 2,2 % jako rozšířená nejistota koeficientem  $k = 2$  při předpokládaném normálním rozdělení (viz. příloha č. 1). Pro náš výpočet tedy postačí vydělit tuto hodnotu koeficientem 2. Získali jsme tak nejistotu  $u_{Be} = 1,1 \%$ .

Nejistota způsobená nestabilitou použitých zařízení zahrnuje nestabilitu napájecího zdroje, světelného zdroje a únavu fotočlánku. Tyto nejistoty nelze oddělit a vyžaduje se samostatné měření, kdy se sleduje po dobu  $T$  změny hodnot luxmetru, který nebyl vystaven konstantní osvětlenosti po doporučený čas. Zaznamenává se pak minimální  $Y_{min}$  a maximální  $Y_{max}$  hodnota za dobu  $T$ , z nichž se určí výsledná nejistota ze vztahu:

$$u_{Bs} = \frac{\left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \quad (64)$$

Měření nebylo provedeno a je využito hodnoty 0,5 % na základě [6].

Dílčí relativní nejistota způsobená nepřesností měření délky na fotometrické lavici je způsobená milimetrovým dělením stupnice na fotometrické lavici. Je nutno ji určit pro nejnepříznivější případ. Jak vidíme z následujícího vztahu, relativní odchylka se se zmenšující vzdáleností zdroje a fotočlánku zvětšuje.

$$u_{Bl} = 2 \frac{\frac{Z_{lmax}}{l}}{\sqrt{3}} \quad (65)$$

$Z_{lmax}$  značí maximální absolutní odchylku vzdálenosti, která činí 0,001 m a  $l$  je střední vzdálenost fotočlánku a zdroje svítivosti. Hodnotí se nejnepříznivější případ a tedy, kdy  $l = 0,1$  m. Po dosazení zmíněných hodnot do vztahu nám vyjde relativní nejistota  $u_{Bl} = 1,15$  %. Předpokládáme rovnoměrné rozdělení.

Jak již víme, kosinový zákon platí pro bodový zdroj. Protože jsou ale rozměry našeho svítidla konečné, samozřejmě i luxmetru, je nutné tuto nejistotu  $u_{Bk}$  vyčíslit. K tomu nám poslouží následující vztah:

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left( \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \quad (66)$$

$r_0$  značí osovou vzdálenost světelného středu svítidla od středu přijímací plochy fotočlánku,  $a$  je polovina charakteristického rozměru svítidla ( $a = \frac{0,61}{2} = 0,305$  m) a  $b$  je poloměr přijímacího povrchu fotočlánku, který lze zjistit z katalogového listu výrobce luxmetru ( $b = 0,004$  m). Vzhledem k závislosti na vzdálenosti je nutné buď vzít nejhorší možnost, nebo hodnoty nejistoty přepsat do tabulky.



Pro zajímavost zvolím možnost druhou. Následující tabulka zobrazuje nejistoty způsobené konečnými rozměry svítidla a fotočlásku v závislosti na vzdálenosti od lineárního zdroje:

Vzdálenost čidla od svítidla (m)	nejistota $u_{Bk}$ (%)	Vzdálenost čidla od svítidla (m)	nejistota $u_{Bk}$ (%)
2,8	1,04	1,4	3,98
2,7	1,12	1,3	4,57
2,6	1,20	1,2	5,30
2,5	1,30	1,1	6,22
2,4	1,41	1,0	7,38
2,3	1,53	0,9	8,89
2,2	1,67	0,8	10,87
2,1	1,83	0,7	13,53
2,0	2,01	0,6	17,17
1,9	2,22	0,5	22,20
1,8	2,46	0,4	29,12
1,7	2,75	0,3	38,22
1,6	3,09	0,2	48,47
1,5	3,49	0,1	56,05

Tab. č. 10 – Nejistota  $u_{Bk}$  v závislosti na fotometrické vzdálenosti

Nyní vidíme celé predikované úskalí. Nejistota  $u_{Bk}$  dosahuje až 56 % při fotometrické vzdálenosti 0,1 m. U této nejistoty opět uvažujeme rovnoměrné rozdělení.

Jako poslední nejistotu stanovíme nejistotu nastavení čidla luxmetru v optické ose se svítidlem. U této nejistoty lze použít normální rozdělení a vztah [6]:

$$u_{Bo} = \frac{1 - \cos \gamma}{2} \quad (67)$$

Kde  $\gamma$  je odchylka od kolmice k optické ose. Předpokládám na fotometrické lavici dostatečnou přesnost a tedy, že nepřekročím 2°. Výsledná nejistota  $u_{Bo}$  má hodnotu 0,03 %.

Následující tabulka shrnuje dílčí vypočítané nejistoty kromě nejistoty  $u_{Bk}$ , která je vypočítaná v závislosti na vzdálenosti a je uvedena v tab. č. 10.

$u_{Be}$ [%]	$u_{Bs}$ [%]	$u_{Bl}$ [%]	$u_{Bo}$ [%]
1,1	0,5	1,15	0,03

Tab. č. 11 – Nejistoty typu B při měření na fotometrické lavici

Nyní stanovíme celkovou nejistotu typu  $B$  na základě kapitoly 4.2. Bohužel situaci jsme si zkomplikovali nejistotou  $u_{Bk}$ , proto je celková nejistota stanovena pro každé měření zvlášť, ale pro názornost je to výhodou. Celkovou nejistotu pro vzdálenost 2,8 m určíme z následujícího vztahu, kde  $u_{Bk_{2,8}}$  je nejistota  $u_{Bk}$  ve fotometrické vzdálenosti 2,8 m:

$$u_B = \sqrt{u_{Be}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bl}^2 + u_{Bo}^2 + u_{Bk_{2,8}}^2} = \quad (68)$$

$$= \sqrt{1,1^2 + 0,5^2 + 1,15^2 + 0,03^2 + 1,04^2} = 1,97\% \quad (69)$$

Vztah č. 68 jsem aplikoval pro všechna měření a zapsal je do tabulky č. 12.

Z tab. č. 12 plyne, že největší vliv na měření má nepřesnost platnosti kosinového zákona pro zdroj konečných rozměrů pro vzdálenosti blízké svítidlu.

vzdálenost [m]	nejistota $u_B$ [%]	vzdálenost [m]	nejistota $u_B$ [%]
2,8	1,97	1,4	4,31
2,7	2,01	1,3	4,86
2,6	2,06	1,2	5,56
2,5	2,12	1,1	6,44
2,4	2,18	1,0	7,57
2,3	2,27	0,9	9,04
2,2	2,36	0,8	11,00
2,1	2,48	0,7	13,63
2,0	2,61	0,6	17,25
1,9	2,78	0,5	22,26
1,8	2,98	0,4	29,17
1,7	3,22	0,3	38,26
1,6	3,51	0,2	48,50
1,5	3,87	0,1	56,07

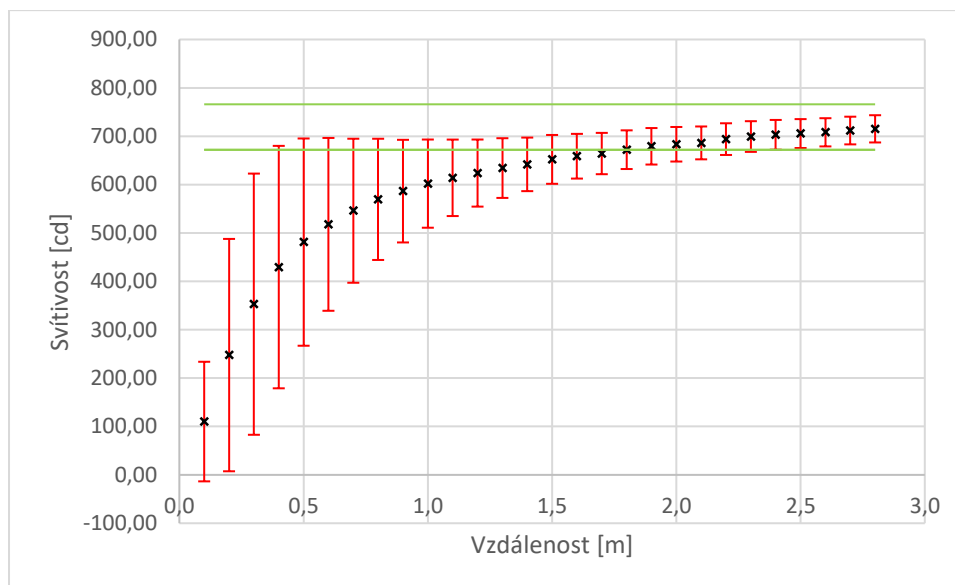
Tab. č. 12 – Celkové nejistoty měření typu  $B$  na fotometrické lavici v závislosti na fotometrické vzdálenosti

Závěrem pro zhodnocení výsledků měření uvedu poslední tabulku, která udává hodnoty rozšířených nejistot koeficientem  $k = 2$  v kandelách.

vzdálenost (m)	Korigovaná vztažná svítivost (cd)	-	rozšířená nejistota (cd)	vzdálenost (m)	Korigovaná vztažná svítivost (cd)	-	nejistota (cd)
2,8	715,30	±	28,16	1,4	641,85	±	55,36
2,7	711,78	±	28,61	1,3	634,21	±	61,71
2,6	708,12	±	29,16	1,2	623,87	±	69,35
2,5	705,54	±	29,87	1,1	614,05	±	79,06
2,4	702,95	±	30,71	1,0	602,06	±	91,13
2,3	699,39	±	31,68	0,9	586,52	±	106,08
2,2	694,04	±	32,77	0,8	569,52	±	125,27
2,1	686,20	±	33,97	0,7	546,01	±	148,88
2,0	683,42	±	35,70	0,6	517,85	±	178,63
1,9	679,20	±	37,72	0,5	481,18	±	214,20
1,8	672,20	±	40,00	0,4	429,51	±	250,57
1,7	664,24	±	42,72	0,3	352,83	±	269,96
1,6	658,69	±	46,23	0,2	247,58	±	240,16
1,5	652,15	±	50,46	0,1	110,20	±	123,59

*Tab. č. 13 – Hodnoty rozšířených nejistot  $U_B$  pro vypočítané svítivosti v kandelách*

Z tabulky je patrné, že při nejpřesnějším měření ve 2,8 m jsme získali hodnotu vztažné svítivosti  $715,30 \pm 28,16$  cd, což se pohodlně kryje s průměrnou hodnotou vztažné svítivosti z eulumdat po vynásobení udržovacím činitelem  $Z=0,95$ , která má hodnotu 718,56 cd. Navíc žádné měření není absolutně přesné, proto když uvážíme text [13], a odhadneme hodnotu rozšířené nejistoty měření na goniofotometru ve firmě TREVOS, která činí 6,54% a určíme pak rozšířenou nejistotu průměrné vztažné svítivosti převzaté z eulumdat vynásobené udržovacím činitelem v kandelách, získáme hodnotu  $719 \pm 47$  cd. Vše shrnuje následující obrázek.



Obr. č. 25 – Graf vypočítaných korigovaných hodnot svítivosti z měření luxmetrem v závislosti na vzdálenosti s vyznačením mezí nejistot; meze odhadnutých nejistot měření na goniofotometru ve firmě TREVOS vyznačeny zeleně

Na obr. č. 25 jsou zeleně vyznačeny odhadnuté meze nejistoty měření na goniofotometru ve firmě TREVOS. Uprostřed mezi nimi leží hodnota 719 cd. Černé křížky jsou naměřené hodnoty korigované svítivosti a červeně jsou vyznačeny přičtené hodnoty nejistot měření svítivosti v kandelách k jednotlivým bodům. Z obrázku je tedy patrné, že kromě prvních tří měření nejdále od svítidla leží intervaly nejistot měřených bodů mimo hranice stanovené pro laboratoř ve firmě TREVOS.

Závěrem této kapitoly připomenu extrapolovanou hodnotu rovnou 716,2701 cd. Jak je patrné z obrázku, vešel jsem se do intervalu nejistot měření ve firmě TREVOS.

## 6. Srovnání metodik měření osvětlenosti

Nyní se podívám blíže na určování nejistot při měření osvětlenosti v interiérech. Především nás bude zajímat vliv metodiky měření na velikost nejistot typu B. Měřenou místností byla konzultační místnost na katedře elektroenergetiky T2: B3-355 (viz. obr. č. 26). K oběma měřením byl použit stejný luxmetr od firmy PRC Krochmann Radiolux 111 (jako při měření na fotometrické lavici). Metodiky měření se liší zásadně v použitých pomůckách při měření, protože v jednom případě byl použit stativ i pásmo, ve druhém žádná z těchto pomůcek.



Obr. č. 26 – Měřená místnost – konzultační místnost T2: B3-355 v areálu ČVUT v Dejvicích

### 6.1. Návrh osvětlovací soustavy v softwaru DiaLux

Před samotným měřením jsem navrhl místnost ve výpočtovém softwaru abych získal referenční hodnoty osvětlenosti. Vybral jsem si software DiaLux, protože mám s ním největší zkušenosti a jedná se o jeden z nejrozšířenějších softwarů.

Místnost byla změřena laserovým měřičem vzdáleností. Získal jsem tak základní informace pro návrh jako je pozice stolu, výška místnosti, montážní výška svítidel a základní půdorysné rozměry místnosti. Základní vstupní údaje shrnuje následující tabulka:

šířka místnosti (m)	délka místnosti (m)	výška místnosti (m)	montážní výška svítidel (m)
4,7	4,8	3,28	2,94

Tab. č. 14 – Vstupní údaje pro návrh místnosti v DiaLuxu

Mezi další klíčové parametry patří odraznosti stěn vyjádřené činitelem odrazu  $\rho$ , které změřil můj předchůdce reflektometrem [8]. Výsledky jeho měření shrnuje tab. č. 15.

Povrch	$\rho$ (-)
stěny	0,8
strop	0,8
koberec	0,22

Tab. č. 15 – Odraznosti povrchů konzultační místnosti T2: B3-355 [8]

Největším problémem se kterým jsem se při návrhu potýkal byl správný výběr eulumdat ke svítidlu v konzultační místnosti. Výrobce světelné soustavy byla dle štítku firma Rendl. Po důkladném prohledání jeho webových stránek jsem zjistil, že se svítidlo nevyrábí a neexistují k němu eulumdata, která bych vložil do DiaLuxu. Rozhodl jsem se proto dohledat referenční svítidlo, které by mělo parametry co nejvíce podobné svítidlu v konzultační místnosti. Nakonec jsem našel svítidlo od s názvem MO T8 2x58W od firmy TREVOS, které svým designem a parametry splňovalo mé požadavky. Difuzorem je bílá plastová mřížka, ve svítidle je umístěn reflektor tvaru paraboly z leštěného hliníku. Celé referenční svítidlo je vidět na obrázku číslo 27.[22]



Obr. č. 27 – Referenční svítidlo TREVOS typ MO T8 – 2x58 W [22]

Parametry světelného zdroje jsem získal během měření v konzultační místnosti. Byly použity zdroje od firmy Philips, konkrétně TL-D 58W / 33-640. V každém svítidle jsou dva takovéto zdroje. Jedná se o starší typ zářivky s patičí G13. Příkon světelného zdroje je 58W, teplota chromatičnosti je 4000 K a index podání barev je větší než 80 (číslo 6 v typovém označení zářivky by dnešním standardům odpovídalo indexu podání barev větším než 60, dle výrobce se však jedná o staré značení stejně tak jako číslo 33, které odpovídá teplotě chromatičnosti 4 000 K).[23]

Nyní se blíží k tvorbě návrhu osvětlovací soustavy. Software DiaLux umožňuje měnit celkový světelný tok vycházející ze zdroje svítidla. Je to z toho důvodu, že je možné získat od výrobce eulumdata ke svítidlu, které je měřeno s jiným světelným zdrojem než je ve výsledku použit při instalaci (nebo při výměně). Proto jsem si ověřil, zda tato podmínka je splněna a splněná nebyla. Svítidlo bylo měřeno se světelným zdrojem o světelném toku 10 400 lm, což odpovídá hodnotě 5 200 lm na jeden světelný zdroj.

Ve skutečnosti ale byly použity v konzultační místnosti již zmíněné světelné zdroje se světelným tokem 4 600 lm. Tuto hodnotu jsem tedy musel vzít jako výchozí pro návrh a opravit světelný tok zdroje svítidla na 9 200 lm.[21]

Jako poslední klíčový bod návrhu zde uvedu stanovení udržovacího činitele Z. Software DiaLux ho dovede určit na základě několika vstupních údajů, které již byly zmíněny v kapitole 5.3. Nyní ale bude situace o něco snazší, neboť světelným zdrojem je zářivka a není potřeba interpolovat kvůli činiteli stárnutí světelného zdroje. Vstupní údaje k určení udržovacího činitele shrnuje tab. č. 16.

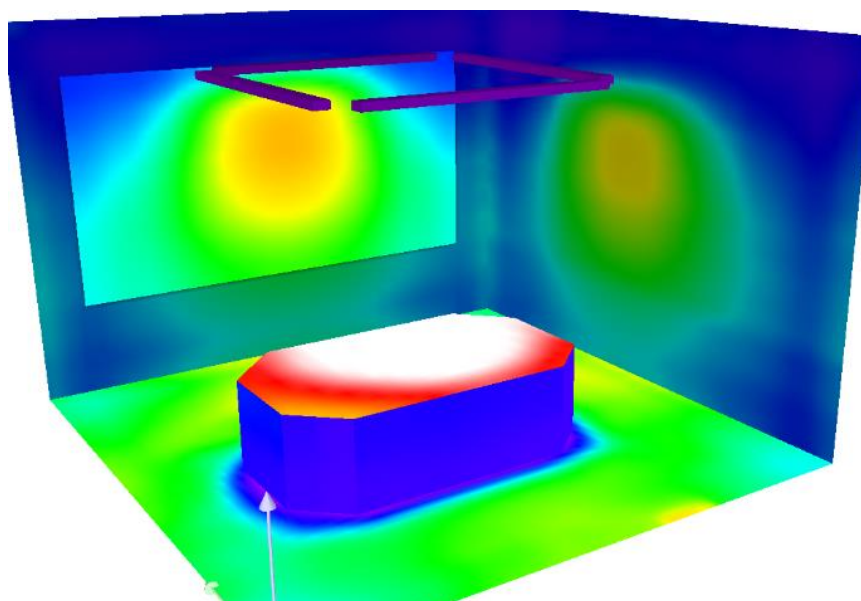
Vliv odrazivosti na plochy místnosti:	malé ( $k \leq 1.6$ )	Typ sv. zdroje:	Třísvazková zářivka (podle CIE)
Typ osvětlení:	Přímé	Neodkladná výměna nefunkčních sv. zdrojů:	Ne
Interval údržby svítidel:	každé 3.0 roky.	Činitel znečištění ploch místnosti:	0.94
Typ svítidla:	Uzavřené IP2X (podle CIE)	Činitel znečištění svítidel:	0.79
Provozní doba za rok (v 1000 hodin):	1.55	Činitel stárnutí sv. zdrojů:	0.90
Interval výměny žárovek:	každé 3.0 roky.	Činitel poklesu funkční spolehlivosti:	1.00

*Tab. č. 16 – Vstupní parametry a jejich hodnoty pro stanovení udržovacího činitele z pro místnost T2: B3-355*

Pokud vynásobíme výše uvedené hodnoty mezi sebou, získáme výsledný udržovací činitel  $Z = 0,66$ .

Závěrem jsem do modelu místnosti vložil měřicí rastr přesně tak, jak se bude měřit místnost v souladu s normou, tj. počátek měřicího rastru leží 0,5 m od stěny, kde bylo okno a 0,5 m od stěny, kde byla tabule. Výška měřicího rastru je 0,77 m nad podlahou.

Výsledný model je na obrázku č. 28 zobrazen v nepravých barvách. Nepravé barvy nezobrazují skutečné barvy objektů a stěn v modelu, ale zobrazují rovnou osvětlenost pomocí barevného spektra viditelného záření. Na obrázku je interpolováno mezi černou a bílou, kde černá značí 0 lx a bílá hodnoty nad 800 lx. Např. modře se tedy zobrazují hodnoty mezi 200 – 300 lx.



Obr. č. 28 – Zobrazení modelu konzultační místnosti T2: B3-355 v softwaru Dialux v nepravých barvách

Výsledky výpočtu zobrazuje tabulka číslo 17. Hodnoty jsou přehledně zapsány pomocí souřadnic bodů v rastru. Např. tedy hodnota osvětlenosti v bodě vzdáleném 150 cm od stěny s tabulí a 100 cm od stěny s oknem je 607 lx.

		okno								souřadnice (cm)		
		400	350	300	250	200	150	100	50			
stěna	vypočítané hodnoty v (lx)								vypočítané hodnoty v (lx)		tabule	
	363	420	505	560	553	491	410	362		50		
	456	524	623	686	679	607	514	449		100		
	566	648	758	828	820	741	636	556		150		
	636	726	844	916	908	825	713	625		200		
	636	726	843	915	907	824	712	623		250		
	569	652	764	833	825	744	637	555		300		
	476	551	652	716	707	632	534	461		350		
	403	472	561	617	609	541	451	383		400		
		dveře										

Tab. č. 17 – Výsledky modelového výpočtu místnosti T2: B3-355 v souřadnicích výpočtového rastru

Výsledné hodnoty jsou následně zpracovány softwarem DiaLux, z nichž jsou pro nás klíčové ty, které zobrazuje následující tabulka.



$E_{min}$ (lx)	362
$E_{max}$ (lx)	916
$E_m$ (lx)	632
$r$ (-)	0,57

Tab. č. 18 – Významné zpracované hodnoty výpočtu softwarem DiaLux

$E_{min}$  – minimální udržovaná hodnota osvětlenosti výpočtového rastru

$E_{max}$  – maximální udržovaná hodnota osvětlenosti výpočtového rastru

$E_m$  – udržovaná průměrná osvětlenost

$r$  – rovnoměrnost osvětlenosti na výpočtovém rastru,  $r = \frac{E_{min}}{E_m}$

## 6.2. Měření osvětlenosti dle normy

Měření dle normy probíhalo za použití všech dostupných pomůcek tak, aby měření bylo co nejpřesnější. Byl tedy použit stativ a dvě pásma (kvůli souřadnici x a y měřícího rastru). Pásma byla položena na zemi. Pomyslný bod o souřadnicích [0,0] ležel v rohu okno – tabule. Do stativu jsem upevnil čidlo luxmetru a započal měření. Měření probíhalo po řadách. Při měření každé další řady bodů jsem přesouval kromě stativu i jedno pásmo, aby se chyby měření nesčítaly. Odečítání hodnot z luxmetru probíhalo v dostatečné vzdálenosti od čidla tak, abych ho svým tělem nezastínil. Byla provedena dvě měření tak jak norma doporučuje (jedná se o minimum). Minimální měřící rastr jsem stanovil ze vztahu č. 14. Do výpočtu jsem dosadil za proměnnou  $d = 4,8 - 2 \cdot 0,5 = 3,8 \text{ m}$ . Odečítám od delšího rozměru měřené místnosti dvakrát 0,5 m z důvodu možnosti měřit 0,5 m od stěny (viz. [20]). Získali jsme delší rozměr měřené plochy a nyní stačí dosadit [20]:

$$p = 0,2 \cdot 5^{\log(d)} = p = 0,2 \cdot 5^{\log(3,8)} = 0,5 \text{ m} \quad (70)$$

Po jednoduchém výpočtu vychází minimální rastr na 8x8 bodů a je čtvercový. Naměřené hodnoty shrnuje tabulka č. 19 a 20.

stěna	okno								naměřené hodnoty v (lx)	souřadnice (cm)	tabule
	400	350	300	250	200	150	100	50			
	naměřené hodnoty v (lx)										
	401	450	528	594	615	572	486	425			
	480	547	630	696	698	639	562	480			
	559	633	722	807	820	758	669	570			
	644	736	817	888	895	849	750	648			
	643	747	848	928	932	856	769	660			
	585	691	785	839	831	766	699	602			
	492	571	661	739	749	692	607	515			
415	489	564	628	626	578	500	440				
dveře											

Tab. č. 19 – Naměřené hodnoty prvního měření dle normy

stěna	okno								naměřené hodnoty v (lx)	souřadnice (cm)	tabule
	400	350	300	250	200	150	100	50			
	naměřené hodnoty v (lx)										
	400	453	531	593	617	574	488	424			
	479	545	629	695	697	640	561	483			
	558	636	723	806	818	757	669	569			
	642	735	819	889	897	851	748	649			
	641	749	851	927	931	856	771	661			
	585	690	787	840	832	767	699	602			
	491	572	661	737	750	690	606	515			
416	490	563	628	627	579	501	440				
dveře											

Tab. č. 20 – Naměřené hodnoty druhého měření dle normy

Naměřené hodnoty v tabulkách č. 19 a 20 nejsou korigovány činitelem pro rozsah.

### 6.3. Měření osvětlenosti bez respektování normy

Měření bez respektování normy probíhalo bez použití všech dostupných pomůcek. Luxmetr jsem uchopil do jedné ruky a v druhé jsem držel čidlo. Snažil jsem se omezit zastínění čidla tím, že jsem vždy maximálně tělem uhnul ze spojnice svítidlo – čidlo, vliv ale nelze opomenout. Výška měření tak byla odhadnuta výškou stolu, stejně tak i rastr nebyl spočítán a úmyslně odhadnut na menší počet bodů, než doporučuje norma. Počátek měřicího rastru je opět umístěn do rohu okno - tabule.

Naměřené hodnoty shrnuje tabulka č. 21 a 22.

stěna	okno				naměřené hodnoty v (lx)	č. měření	tabule
	4	3	2	1			
	naměřené hodnoty v (lx)						
	535	729	775	640			
	659	854	874	672			
	613	754	805	607			
	432	564	557	460			
dveře							

Tab. č. 21 – Naměřené hodnoty prvního měření bez respektování normy

stěna	okno				naměřené hodnoty v (lx)	č. měření	tabule
	4	3	2	1			
	naměřené hodnoty v [lx]						
	539	728	768	634			
	639	254	875	670			
	597	755	804	603			
	425	562	561	451			
dveře							

Tab. č. 22 – Naměřené hodnoty druhého měření bez respektování normy

Naměřené hodnoty v tabulkách č. 21 a 22 nejsou korigovány činitelem pro rozsah.

#### 6.4. Vyhodnocení výsledků měření

Nejprve se detailněji zaměříme na zpracování výsledků měření osvětlenosti dle normy. Naměřené hodnoty z obou měření musíme dle kalibračního listu vynásobit korekčním činitelem pro rozsah (1,017) a korekčním činitelem pro světelný zdroj jiný, než pro který je luxmetr kalibrován (1,003). Korigované hodnoty jsou v tabulkách č. 23, 24. Dále se postupuje tak jako při výpočtu. Stanoví se průměrná, minimální, maximální osvětlenost a rovnoměrnost, ale s příslušnými nejistotami. Protože náš vzorek je příliš malý pro stanovení nejistoty typu *A*, spokojíme se s vyhodnocením a určením hlavních zdrojů nejistoty typu *B*.

Celková nejistota typu *B* pro každý měřený bod je určena především nejistotou měřicího přístroje, nejistotou stability použitých zařízení, nejistotou určení polohy čidla (vertikální a horizontální), nejistotou vlivem konečných rozměrů svítidla a čidla luxmetru a nejistotou způsobenou odchylkou čidla luxmetru od horizontální roviny.

U všech nejistot při měření osvětlenosti předpokládejme normální rozdělení s  $\chi = 2$ .

stěna	okno								naměřené hodnoty v (lx)	souřadnice (cm)	tabule
	400	350	300	250	200	150	100	50			
	naměřené hodnoty v (lx)										
	409	459	539	606	627	583	496	434			
	490	558	643	710	712	652	573	490			
	570	646	736	823	836	773	682	581			
	657	751	833	906	913	866	765	661			
	656	762	865	947	951	873	784	673			
	597	705	801	856	848	781	713	614			
	502	582	674	754	764	706	619	525			
423	499	575	641	639	590	510	449				
dveře											

Tab. č. 23 – Korigované hodnoty prvního měření dle normy

stěna	okno								naměřené hodnoty v (lx)	souřadnice (cm)	tabule
	400	350	300	250	200	150	100	50			
	naměřené hodnoty v (lx)										
	408	462	542	605	629	586	498	433			
	489	556	642	709	711	653	572	493			
	569	649	737	822	834	772	682	580			
	655	750	835	907	915	868	763	662			
	654	764	868	946	950	873	786	674			
	597	704	803	857	849	782	713	614			
	501	583	674	752	765	704	618	525			
424	500	574	641	640	591	511	449				
dveře											

Tab. č. 24 – Korigované hodnoty druhého měření dle normy

1. měření dle normy		2. měření dle normy	
$E_{min}$ (lx)	409	$E_{min}$ (lx)	408
$E_{max}$ (lx)	951	$E_{max}$ (lx)	950
$E_p$ (lx)	670	$E_p$ (lx)	670
$r$ (-)	0,6	$r$ (-)	0,6

Tab. č. 25 – Významné hodnoty měření dle normy

$E_{min}$  – minimální hodnota osvětlenosti měřícího rastru

$E_{max}$  – maximální hodnota osvětlenosti měřícího rastru

$E_p$  – průměrná osvětlenost

$r$  – rovnoměrnost osvětlenosti na výpočtovém rastru,  $r = \frac{E_{min}}{E_p}$

Nejistotu měřicího přístroje určíme stejným způsobem jako při měření na fotometrické lavici. Její hodnota bude  $u_{Be} = 1,1 \%$ .

Nejistotu vlivem nestability zařízení opět odhadneme dle [6] na  $u_{Bs} = 0,5 \%$ .

Nejistotu vlivem konečných rozměrů svítidla a čidla luxmetru stanovíme opět ze vztahu č. 66, kde za  $r_0$  dosadíme nejnepříznivější možnou vzdálenost, která odpovídá rozdílu montážní výšky svítidel (2,94 m) a výšky srovnávací roviny (0,77 m). Polovina délky světelného zdroje (po odečtu obou patič) je  $a = \frac{1,48}{2} = 0,74 \text{ m}$ . Poloměr čidla luxmetru zůstává  $b = 0,004 \text{ m}$ . Po dosazení do vztahu č. 66 dostáváme  $u_{Bk} = 7,67 \%$ .

Nejistotu určení polohy (jak vertikální, tak horizontální) určíme z následujícího vztahu:

$$u_{B\ H,V} = \frac{Z_{l\ H,V\ max}}{2 \cdot l_{V,H}} \quad (71)$$

Kde  $Z_{l\ max}$  je maximální odchylka od měření vzdálenosti pomocí pásma (horizontální odchylka) nebo laserovým měřičem vzdálenosti (vertikální odchylka). Za  $l$  pak dosadíme požadovanou vzdálenost, které jsme chtěli dosáhnout.

Odchylku pro měření pásma lze odhadnout z průměru vertikální trubky stativu a milimetrové přesnosti pásma na  $Z_{lH\ max} = 0,02 \text{ m}$ . Pro nejistotu určení horizontální polohy čidla luxmetru pak získáme pro krok  $l_H = 0,5 \text{ m}$  následující hodnotu nejistoty:

$$u_{BH} = \frac{Z_{lH\ max}}{l_H \cdot 2} = \frac{0,02}{0,5 \cdot 2} = 2 \% \quad (72)$$

Odchylku měření vertikální polohy lze odhadnout z přesnosti měření laserového dálkoměru (na milimetry) a nepřesnosti umístění zadní stěny dálkoměru k horizontální rovině čidla luxmetru na  $Z_{lV\ max} = 0,005 \text{ m}$ . Požadovaná vertikální vzdálenost  $l_V$  od svítidla je pak dána rozdílem montážní výšky svítidla (2,94 m) a srovnávací roviny (0,77 m)

$$u_{BV} = \frac{Z_{lV\ max}}{l_V \cdot 2} = \frac{0,005}{(2,94 - 0,77) \cdot 2} = 0,12 \% \quad (73)$$

Nejistotu způsobenou odchylkou čidla luxmetru od horizontální roviny (luxmetr byl do horizontální roviny upevněn odhadem bez použití vodováhy a zajištěn v této poloze jediným šroubem, proto je předpokládána odchylka větší než u fotometrické lavice) určíme ze vztahu č. 67, kde za  $\beta$  dosadíme hodnotu  $5^\circ$ . Získáme tak nejistotu  $u_{Bo} = 0,19 \%$ .

Celkovou nejistotu měření dle normy  $u_{BN}$  získáme ze vztahu č. 23 následovně:

$$u_{BN} = \sqrt{u_{Be}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bk}^2 + u_{BH}^2 + u_{BV}^2 + u_{Bo}^2} \quad (74)$$

$$u_{BN} = \sqrt{1,1^2 + 0,5^2 + 7,67^2 + 2^2 + 0,12^2 + 0,19^2} = 8,03 \% \quad (75)$$

Celková rozšířená nejistota měření dle normy rozšířená dle vztahu č. 21 koeficientem  $k = 2$  má hodnotu:

$$U_{BN} = 2 \cdot u_{BN} = 2 \cdot 8,03 = 16,06 \% \quad (76)$$

Nyní se podíváme na zpracování měření, které nebralo ohled na normu. V následujících tabulkách jsou korigované hodnoty osvětlenosti z obou měření.

stěna	Okno					tabule	
	4	3	2	1	č. měření		
	naměřené hodnoty v (lx)				naměřené hodnoty v (lx)		
	546	744	791	653			1
	672	871	892	685			2
	625	769	821	619			3
	441	575	568	469			4
Dveře							

Tab. č. 26 – Korigované hodnoty prvního měření bez ohledu na normu

stěna	Okno					tabule	
	4	3	2	1	č. měření		
	naměřené hodnoty v (lx)				naměřené hodnoty v (lx)		
	550	743	783	647			1
	652	871	893	683			2
	609	770	820	615			3
	434	573	572	460			4
Dveře							

Tab. č. 27 – Korigované hodnoty druhého měření bez ohledu na normu

1. měření bez ohledu na normu		2. měření bez ohledu na normu	
$E_{min} (lx)$	432	$E_{min} (lx)$	434
$E_{max} (lx)$	874	$E_{max} (lx)$	893
$E_p (lx)$	658	$E_p (lx)$	667
$r (-)$	0,66	$r (-)$	0,65

Tab. č. 28 – Významné hodnoty měření bez ohledu na normu

$E_{min}$  – minimální hodnota osvětlenosti měřícího rastru

$E_{max}$  – maximální hodnota osvětlenosti měřícího rastru

$E_p$  – průměrná osvětlenost

$r$  – rovnoměrnost osvětlenosti na výpočtovém rastru,  $r = \frac{E_{min}}{E_p}$

Při stanovení nejistoty měření bez ohledu na normu vyjdeme ze stejných zdrojů nejistot, ale různých odchylek. Bohužel, jak píše výše, vliv zastínění nelze opomenout, je ale problém s vyčíslením tohoto vlivu. Není proto zohledněn ve výpočtu, ale pouze součástí komentáře. Nejistota měřícího přístroje zůstává stejná, nejistota způsobená vlivem nestability zařízení zůstává stejná a stejně tak nejistota způsobená vlivem konečných rozměrů čidla luxmetru a svítidla. Co se ale velmi změní je nejistota určení horizontálních souřadnic čidla luxmetru neboť jsem neměl k dispozici pásmo ani laserový dálkoměr. Odchylku určení polohy jsem stanovil na 0,3 m. Do vztahu č. 71 musíme dosadit hodnotu kroku měření. Protože jsem měřil 4x4 body a 3,8 m (což je délka měřené plochy) vydělené třemi má hodnotu 1,27m, pokládám to za požadovanou délku kroku. Dosadíme-li, získáme hodnotu nejistoty  $u_{BH}$ :

$$u_{BH} = \frac{Z_{IHmax}}{l_H \cdot 2} = \frac{0,3}{1,27 \cdot 2} = 11,81 \% \quad (77)$$

Dále se změní velikost nejistoty určení vertikální polohy. Velikost odchylky od srovnávací roviny jsem odhadl na  $Z_{IVmax} = 0,15 m$ . Požadovaná výška čidla  $l_V$  zůstává stejná jako v předchozí úloze. Po dosazení získáme nejistotu  $u_{BV}$ :

$$u_{BV} = \frac{Z_{IVmax}}{l_V \cdot 2} = \frac{0,15}{(2,94 - 0,77) \cdot 2} = 3,46 \% \quad (78)$$

Nejistota způsobená odchylkou čidla luxmetru od horizontální roviny také vzroste, neboť čidlo bylo volně v ruce položené na dlani. Horizontální poloha čidla luxmetru se velmi

těžko kontrolovala. Odchylku jsem proto odhadl na  $\beta = 30^\circ$ . Tuto hodnotu dosadíme do vztahu č. 67. Získáme tak nejistotu  $u_{Bo}=6,7\%$ .

Celkovou nejistotu měření bez ohledu na normu  $u_{BB}$  získáme ze vztahu č. 23 následovně:

$$u_{BB} = \sqrt{u_{Be}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bk}^2 + u_{BH}^2 + u_{BV}^2 + u_{Bo}^2} \quad (79)$$

$$u_{BB} = \sqrt{1,1^2 + 0,5^2 + 7,67^2 + 11,81^2 + 3,46^2 + 6,7^2} = 16,02\% \quad (80)$$

Celková rozšířená nejistota měření bez ohledu na normu rozšířená dle vztahu č. 21 koeficientem  $k = 2$  má hodnotu:

$$U_{BB} = 2 \cdot u_{BB} = 2 \cdot 16,02 = 32,04\% \quad (81)$$

## 7. Závěr

### 7.1. Měření na fotometrické lavici

Měřením na fotometrické lavici se povedlo dokázat platnost kosinového zákona, zvláště nutnou podmínku pro jeho platnost a to, že zdroj se musí jevit jako bodový, abychom mohli určit vztažnou svítivost pomocí fotočlátku. Tabulka č. 30 porovnává výpočet osvětlenosti rozdělením svítidla na dílčí bodové zdroje, elementy, a provedené měření (korigované součinitelem pro rozsah luxmetru dle kalibračního listu).

Dále uvedené tab. č. 29 a 30 shrnují výsledky kapitoly 5 z hlediska měření vztažné svítivosti.



Vztažná svítivost odečtená z eulumat po aktuálním udržovacím činiteli (cd)		Rozšířená nejistota - odhad (cd)
718	±	47
Vypočítaná svítivost z měření ve vzdálenosti 2,8m na fotometrické lavici (cd)		Rozšířená nejistota (cd)
715,3	±	28,16
Vypočítaná svítivost z matematicky určené osvětlenosti ve vzdálenosti 2,8m (cd)		Extrapolovaná hodnota svítivosti ve 3m z měření na fotometrické lavici (cd)
714,0672		716,2701

Tab. č.29 – Souhrn kapitoly č. 5

vzdálenost (m)	vypočítaná osvětlenost po udržovacím činiteli (lx)	změřená korigovaná osvětlenost (lx)	vzdálenost (m)	vypočítaná osvětlenost po udržovacím činiteli (lx)	změřená korigovaná osvětlenost (lx)
2,8	91,08	91,24	1,4	354,56	327,47
2,7	97,71	97,64	1,3	409,79	375,27
2,6	105,32	104,75	1,2	476,96	433,24
2,5	113,86	112,89	1,1	562,43	507,48
2,4	123,48	122,04	1,0	672,74	602,06
2,3	134,36	132,21	0,9	822,63	724,10
2,2	146,75	143,40	0,8	1017,15	889,88
2,1	160,93	155,60	0,7	1298,42	1114,30
2,0	176,79	170,86	0,6	1689,72	1438,46
1,9	195,66	188,15	0,5	2288,15	1924,70
1,8	217,43	207,47	0,4	3222,32	2684,45
1,7	243,36	229,84	0,3	4871,39	3920,31
1,6	274,20	257,30	0,2	8002,37	6189,43
1,5	309,73	289,85	0,1	16845,90	11019,90

Tab. č. 30 – Porovnání výpočtu a měření na fotometrické lavici

Dále jako přínos tohoto měření shledávám metodiku určení svítivosti v nedostatečné fotometrické vzdálenosti od lineárního svítidla. Pro určení vztažné svítivosti zdroje, jehož fotometrická vzdálenost není dostatečná, je nutné vydělit vypočítanou vztažnou svítivost z měření funkční hodnotou  $b$ , kterou určíme z následujícího vztahu.

$$b = 1 - e^{-1,9292 \frac{l}{d}} \quad (82)$$

Kde  $l$  je fotometrická vzdálenost a  $d$  je charakteristický rozměr lineárního svítidla, tedy jeho délka. Např. v našem případě, když vezmu hodnotu měření ve fotometrické vzdálenosti 1 m (592 lx), charakteristický rozměr svítidla je 0,61 m a vypočítaná hodnota svítivosti je 602,064 cd. Stačí hodnotu poměru  $l/d = 1,64$  dosadit do vztahu (82), čímž dostaneme funkční hodnotu  $b=0,8585$  a tou vydělit naměřenou svítivost. Získáme tak 701,279 cd a už jsem v pásmu nejistot měření na goniofotometru ve firmě TREVOS.

## 7.2. Měření konzultační místnosti T2: B3-355

Měřením v konzultační místnosti se dokázalo, jak silný vliv na nejistotu měření má poctivost. Řídíme-li se normou, lze nejistotu snížit až na polovinu. Nejvíce se při měření dle normy projevila nejistota konečnosti rozměrů, které se pohybovala okolo 8 %.

Měření je možné zpřesnit využitím laserových zařízení pro přesnější určení polohy čidla luxmetru v měřícím rastru.

Následující tabulky shrnují kapitolu číslo 6.

1. měření dle normy		2. měření dle normy	
$E_{\min}$ (lx)	409	$E_{\min}$ (lx)	408
$E_{\max}$ (lx)	951	$E_{\max}$ (lx)	950
$E_p$ (lx)	670	$E_p$ (lx)	670
$r$ (-)	0,6	$r$ (-)	0,6

Tab. č. 31 – Hodnoty naměřené dle normy;  $U_{BN} = 16,06 \%$

1. měření bez ohledu na normu		2. měření bez ohledu na normu	
$E_{\min}$ (lx)	432	$E_{\min}$ (lx)	434
$E_{\max}$ (lx)	874	$E_{\max}$ (lx)	893
$E_p$ (lx)	658	$E_p$ (lx)	667
$r$ (-)	0,66	$r$ (-)	0,65

Tab. č. 32 – Hodnoty naměřené bez ohledu na normu;  $U_{BB} = 32,04 \%$

## 8. Seznam použité literatury

- [1] Haasz, V., Sedláček, M.: Elektrická měření. Přístroje a metody. Praha: nakladatelství ČVUT, 2005. s. 337. ISBN 80-01-02731-7
- [2] Habel, J. a kol.: Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. s. 624. ISBN 978-80-86534-21-3
- [3] Skokanský, K. a kol.: Světelná technika. Praha: nakladatelství ČVUT, 2011. s. 256. ISBN 978-80-01-04941-9
- [4] Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements, ISO. Ženeva: 1993
- [5] Grabe, M.: Measurement Uncertainties in Science and Technology. New York: Springer, 2005. s. 259. ISBN 3-540-20944-1
- [6] Vlach, J.: Nejistoty světelně technických měření. Praha, 2007. ČVUT, FEL, Katedra elektroenergetiky. Diplomová práce.
- [7] Motyčka, M.: Nejistoty měření ve fotometrii. Brno, 2016. VUT Brno, Katedra elektrotechniky a komunikačních technologií. Diplomová práce
- [8] Pavloušek, J.: Optimalizace kombinovaného osvětlení denním a umělým světlem. Praha, 2016. ČVUT, FEL, Katedra elektroenergetiky. Diplomová práce
- [9] Rybár, Peter. Neistota merania osvetlenia – část 1. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2015, 2015-4-6, 2015(2) [cit. 15.5. 2017]. ISSN 1212-0812. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/neistota-merania-osvetlenia-cast-1--882>
- [10] Rybár, Peter. Neistota merania osvetlenia – část 2. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2015, 2015-6-14, 2015(3) [cit. 15.5. 2017]. ISSN 1212-0812. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/neistota-merania-osvetlenia-cast-2--969>
- [11] Rybár, Peter. Neistota merania – část 3. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2003, 2003-4-14, 2003(2) [cit. 15.5. 2017]. ISSN 1212-0812. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/neistota-merania-cast-3--16696>
- [12] Rybár, Peter. Neistota merania – část 4. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2003, 2003-6-14, 2003(3) [cit. 15.5. 2017]. ISSN 1212-0812. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/neistota-merania-cast-4--16727>

- [13] Habel, Jiří, Bálský, Marek. Modernizace goniofotometru. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2009, 2009-8-14, 2009(4) [cit. 15.5. 2017]. ISSN 1212-0812. Dostupné z : <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/modernizace-goniofotometru--15660>
- [14] Gutorov, M.: Zbierka príkladov zo svetelnej techniky. Bratislava: Alfa, 1983. s. 216
- [15] ČSN 01 0115 – Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii.
- [16] ČSN 36 0011 – Měření osvětlení vnitřních prostorů. Část 1: Základní ustanovení.
- [17] ČSN 36 0011 – Měření osvětlení vnitřních prostorů. Část 2: Měření denního osvětlení.
- [18] ČSN 36 0011 – Měření osvětlení vnitřních prostorů. Část 3: Měření umělého osvětlení vnitřních prostorů.
- [19] ČSN EN 13032 – Světlo a osvětlení – měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel. Část 1: Měření a formát souboru údajů.
- [20] ČSN EN 12464 - Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory
- [21] podklady k předmětu Elektroenergetika 3, dostupné z [www.powerwiki.cz](http://www.powerwiki.cz)
- [22] oficiální stránky výrobce svítidel TREVOS, dostupné z [www.trevos.cz](http://www.trevos.cz)
- [23] oficiální stránky výrobce PHILIPS, dostupné z [www.philips.cz](http://www.philips.cz)

## **Přílohy**