



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

NEJISTOTY MĚŘENÍ VE FOTOMETRII

MEASUREMENT UNCERTAINTIES IN PHOTOMETRY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

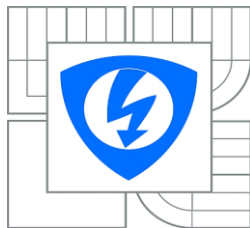
Bc. Martin Motyčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Martin Motyčka
Ročník: 2

ID: 146909
Akademický rok: 2015/2016

NÁZEV TÉMATU:

Nejistoty měření ve fotometrii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypracujte přehled fotometrických veličin.
2. Rozeberte možné druhy nejistot.
3. Popište matematický aparát nutný k výpočtu nejistot měření.
4. Teoretické poznatky aplikujte na praktická měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 20.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

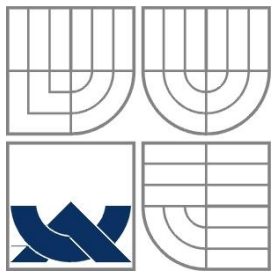
Bibliografická citace práce:

MOTYČKA, M. *Nejistoty měření ve fotometrii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Škoda, Ph.D..

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

.....

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a pomoc s měřením v laboratoři světelné techniky.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Diplomová práce

Nejistoty měření ve fotometrii

Martin Motyčka

vedoucí: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2016

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Master's Thesis

Measurement uncertainties in photometry

by

Martin Motyčka

Supervisor: Ing. Jan Škoda, Ph.D.

Brno University of Technology, 2016

Brno

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku určování nejistot ve fotometrii. V teoretické části se zabývá popisem fotometrických měřících přístrojů, jejich nejistotami měření a možnostmi jejich odstranění. Dále se práce zabývá matematickým popisem určování nejistot v laboratorních podmínkách pro měření základních fotometrických veličin. V praktické části jsou tyto nejistoty určeny pro základní úlohy v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky VUT v Brně.

KLÍČOVÁ SLOVA: Fotometrie; nejistoty měření; laboratorní měření; světelný tok, intenzita osvětlení, svítivost; jas; kalibrace fotometrických přístrojů; luxmetr, jasový analyzátor; spektrofotometr; kulový integrátor.

ABSTRACT

This master's thesis is focused on problematic of measurement uncertainties in photometry. Theoretical part describes photometric measuring instruments, their uncertainties and limitations. In the second part of this thesis there is a mathematical description of calculating uncertainties in laboratory conditions. In practical part there are calculations of uncertainties for photometric instruments at light laboratory VUT Brno.

KEY WORDS:

Photometry; uncertainties measurement; laboratory measurement;
luminous flux, luminous intensity, illuminance; luminance;
calibration; illuminance meter, luminance analyzer;
spectrophotometer; integrating sphere.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
ÚVOD.....	14
1 ZÁKLADY FOTOMETRIE	15
1.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA SVĚTLA	15
1.2 VZNIK SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ.....	16
1.2.1 PŘÍRODNÍ ZDROJE	16
1.2.2 UMĚLÉ ZDROJE	16
2 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY	18
2.1 RADIOMETRICKÉ VELIČINY	18
2.2 FOTOMETRICKÉ VELIČINY	19
2.2.1 SVĚTELNÝ TOK	19
2.2.2 SVÍTIVOST	21
2.2.3 OSVĚTLENOST.....	22
2.2.4 JAS	23
2.2.5 SVĚTLENÍ	24
2.2.6 MĚRNÝ SVĚTELNÝ VÝKON	24
2.2.7 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI	25
2.2.8 INDEX PODÁNÍ BAREV	26
3 FOTOMETRICKÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE.....	27
3.1 FOTOČLÁNKY	27
3.2 FOTOMETRICKÉ PŘÍSTROJE	30
3.2.1 LUXMETRY.....	30
3.2.2 JASOMĚRY A JASOVÉ ANALYZÁTORY	31
3.2.3 SPEKTORADIOMETRY.....	32
3.2.4 KULOVÝ INTEGRÁTOR	33
3.2.5 GONIOFOTOMETRY	35
3.2.6 FOTOMETRICKÁ LAVICE	37
4 NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	38
4.1 ÚVOD DO STATISTIKY	38
4.1.1 DEFINICE.....	38
4.1.2 ROZLOŽENÍ PRAVDĚPODOBNOSTI.....	39
4.2 TEORIE NEJISTOT MĚŘENÍ.....	43
4.2.1 DEFINICE.....	43
4.2.2 NEJISTOTA TYPU U_A	44
4.2.3 NEJISTOTA TYPU U_B	47
4.2.4 KOMBINOVANÁ NEJISTOTA U_C	50

5 NEJISTOTY VE FOTOMETRII	52
5.1 PARAMETRY FOTOČLÁNKU	53
5.1.1 SPEKTRÁLNÍ INTENZITA VYZAŘOVÁNÍ	53
5.1.2 SPEKTRÁLNÍ CITLIVOST FOTOČLÁNKU	54
5.2 CHYBY FOTOMETRŮ	55
5.2.1 SPEKTRÁLNÍ CHYBA.....	55
5.2.2 SMĚROVÁ CHYBA LUXMETRU.....	57
5.2.3 ZÁKLADNÍ CHYBA ODEZVY JASOMĚRU	58
5.2.4 CHYBA NELINEARITY	58
5.2.5 CHYBA ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKY	58
5.2.6 CHYBA KRÁTKODOBÉ ČASOVÉ NESTABILITY	58
5.2.7 CHYBA TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI	59
5.3 NEJISTOTY FOTOMETRICKÝCH PŘÍSTROJŮ	60
5.3.1 KULOVÝ INTEGRÁTOR	60
5.3.2 FOTOMETRICKÁ LAVICE	63
5.3.3 GONIOFOTOMETR.....	67
ZÁVĚR.....	69
POUŽITÁ LITERATURA	71
PŘÍLOHA A LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Spektrum viditelného elektromagnetického záření</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 Spektrální citlivost lidského oka</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3 Znázornění prostorového úhlu</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 4 Znázornění definice jasu</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5 Teplota chromatičnosti bílého světla</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 6 Porovnání indexů podání barev</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 7 Princip fotodiody</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 8 Spektrální citlivosti hradlových fotočlánků</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 9 Závislost fotoproudu na vnitřním odporu selenového fotočlánku</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 10 Procentuální směrová chyba fotočlánků</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 11 Digitální luxmetr PRC Krochmann 211</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 12 Schéma objektivového jasoměru</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 13 Jasoměr L1009</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 14 Spektroradiometr CS-1000A</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 15 Czerny - Turnerův monochromátor</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 16 Kulový integrátor</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 17 Optimální rozložení uvnitř kulového integrátoru</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 18 Křivka svítivosti vyznačená v polorovině fotometrického prostoru</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 19 Systém rovin C-γ</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 20 Izokandelový diagram v sinusoidálním zobrazení</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 21 Fotometrická lavice</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 22 Studentovo a normální rozložení</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 23 Pravostranný test</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 24 Oboustranný test</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 25 Rozložení normální (Gaussovo)</i>	<i>50</i>
<i>Obrázek 26 Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozložení</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 27 Rovnoměrné (pravoúhlé) rozložení</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 28 Lichoběžníkové rozdělení</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 29 Spektrum normovaných zářičů CIE</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 30 Konstrukce fotometrické hlavice</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 31 Porovnání spektrální citlivosti Konica Minolta T10 a spektrometru CL500A</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 32 Korekční faktory pro jednotlivé typy luxmetrů pro měření LED</i>	<i>56</i>

<i>Obrázek 33 Kosinový nástavec.....</i>	<i>57</i>
<i>Obrázek 34 Teplotní závislost citlivosti fotočlánku.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 35 Pokles světelného toku normálu typu FEL</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 36 Rozměry fotometrické lavice</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 37 Schéma fotometrické lavice</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 38 Schéma goniofotometru</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 39 Nelinearita krokového motoru</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 40 Náhled rastru desky</i>	<i>76</i>
<i>Obrázek 41 Laboratorní úloha měření osvětlenosti pracovního stolu.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 42 Poziční nástavec pro hlavici luxmetru.....</i>	<i>77</i>
<i>Obrázek 43 Prostorový graf intenzity osvětlení pracovního stolu</i>	<i>78</i>
<i>Obrázek 44 Interpolovaný prostorový graf intenzity osvětlení pracovního stolu</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 45 Izoluxy osvětleného pracovního stolu</i>	<i>79</i>
<i>Obrázek 46 Rozložení pravděpodobnosti měření vizuálním umístováním.....</i>	<i>80</i>
<i>Obrázek 47 Rozložení pravděpodobnosti měření umístováním pomocí nástavce</i>	<i>81</i>
<i>Obrázek 48 Nejistota konečných rozměrů fotometrické lavice</i>	<i>84</i>
<i>Obrázek 49 Graf závislosti dílčí nejistoty konečných rozměrů na vzdálenosti světelného zdroje od měřicího přístroje</i>	<i>85</i>
<i>Obrázek 50 Nejistota konečných rozměrů goniofotometru</i>	<i>90</i>
<i>Obrázek 51 Nejistota konečných rozměrů goniofotometru v závislosti na velikosti svítidla</i>	<i>91</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Barevné tóny.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 2 Radiometrické veličiny</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 3 Přehled fotometrických veličin</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 4 Příklady velikostí intenzity osvětlení přírodními zdroji</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 5 Měrný světelný výkon jednotlivých typů světelných zdrojů</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 6 Teplota chromatičnosti světelných zdrojů.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 7 Přehled indexů podání barev různých světelných zdrojů.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 8 Rozdělení luxmetrů podle přesnosti</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 9 Minimální počet měření v systému C-γ</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 10 Příklad výpočtu nejistoty typu A.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 11 Kvantily T_L rozložení.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 12 Tabulka koeficientů rozšíření k_u.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 13 Chyby fotometrických přístrojů.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 14 Dílčí nejistoty fotometrické lavice</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 15 Tabulka nejistot měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován</i>	<i>89</i>
<i>Tabulka 16 Přehled dílčích nejistot měření intenzity osvětlení pracovního stolu.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 17 Přehled dílčích nejistot měření svítivosti na fotometrické lavic s spektrometrem JeTi SCB 1211 UV.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 18 Přehled dílčích nejistot měření svítivosti na fotometrické lavic s chroma metrem KM CL-200.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabulka 19 Přehled dílčích nejistot měření křivek svítivosti na goniofotometru s PRC Krochmann RadioLux 111</i>	<i>94</i>
<i>Tabulka 20 Přehled dílčích nejistot kulového integrátoru</i>	<i>94</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**Symboly** ϕ λ Ω M_z K I E L M T_c R_a f f' u_A u_B u_C k_u **Význam**

Světelný tok

Vlnová délka

Prostorový úhel

Měrný výkon

Účinnost světelného záření

Svítivost

Intenzita osvětlení

Jas

Světlení

Náhradní teplota chromatičnosti

Index podání barev

Frekvence

Chyba fotometru

Relativní nejistota typu A

Relativní nejistota typu B

Relativní nejistota typu C

Koeficient rozšíření

Zkratky

CIE

LED

UV

CRI

NIST

THD

Význam

Mezinárodní komise pro osvětlování

Svítivá dioda

Ultra fialová oblast spektra

Index podání barev

Národní institut standardů a technologie v USA

Celkové harmonické zkreslení

ÚVOD

Od vynalezení žárovky se světelné zdroje neustále zdokonalují. Světelné zdroje jsou stále více kompaktnější, úspornější a spolehlivější. Trh je přesycen velkým množstvím typů a výrobců světelných zdrojů. Pro jejich porovnání je nutno znát jejich světelně - technické parametry. Proto vznikl obor fotometrie, která se zabývá měřením parametrů světelných zdrojů.

Měření světelných zdrojů není tak přesné jako měření elektrických veličin. Fotometrické přístroje mají značnou nepřesnost měření v terénu až kolem 20 - 30 %. Laboratorní přístroje jsou na tom značně lépe, ale jsou velice drahé na pořízení i údržbu. Fotometrické laboratorní přístroje se musí pravidelně kalibrovat a všechny naměřené výsledky by se měly uvádět s nejistotou měření. Kalibrace fotometrických přístrojů a normálu jsou velice finančně a časově náročné.

Tato práce popisuje všechny fotometrické veličiny, včetně vztahů pro jejich výpočet i s rozsahem hodnot, kterých u jednotlivých typů světelných zdrojů mohou nabývat. Dále se práce zaměřuje na popis fotometrických přístrojů, jejich funkci a nedostatků, které způsobují nepřesnost měření a zvyšují tím celkovou nejistotu měření. Jednotlivé chyby fotometrických přístrojů jsou podrobně vysvětleny s uvedením vztahů pro jejich výpočet a rozsahem hodnot, kterých v praxi mohou dosahovat.

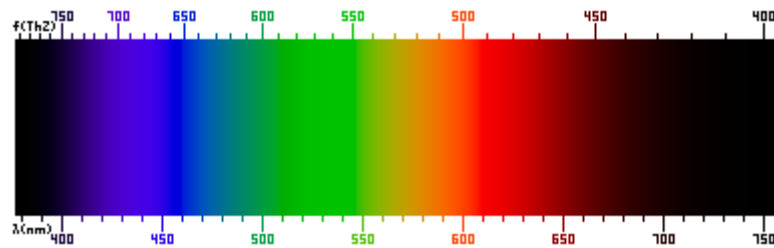
Pro vyjádření nepřesnosti měřících fotometrických přístrojů nebo měřících metod se zavádí nejistoty měření, které udávají interval, ve kterém se nachází skutečně pravá hodnota s určitou pravděpodobností. K pochopení nejistot je potřeba znát základy statistiky, které jsou názorně vysvětleny pomocí názorných příkladů. Dále práce popisuje jednotlivé typy nejistot a metody jejich určení. Podle normy ČSN je nutné pro každé fotometrické měření stanovit celkovou rozšířenou standardní nejistotu. V praxi se tato hodnota často odhaduje z maximální chyby měření přístroje. O výpočtu nejistot ve fotometrii je dostupných velice málo informací. Tato práce se zabývá doplněním těchto informací a to hlavně v oblasti matematického popisu nejistot a postupech jejich stanovení.

Dále se práce zabývá určením nejistot pro vybrané úlohy ve světelné laboratoři na Ústavu elektroenergetiky na Vysokém učení technickém v Brně. Výsledky jsou uvedeny s postupem výpočtu v příloze A. Tyto poznatky mohou sloužit k budoucímu hodnocení jednotlivých měření v laboratoři.

1 ZÁKLADY FOTOMETRIE

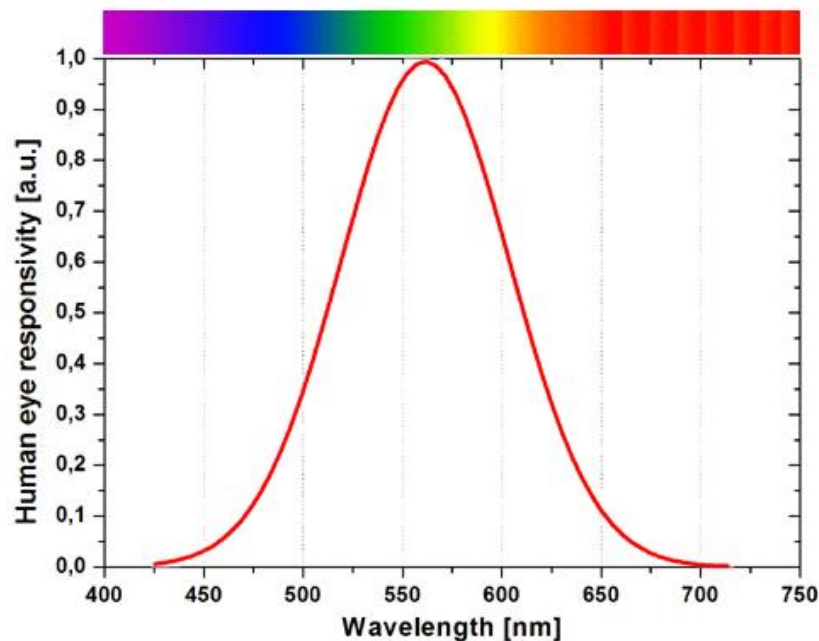
1.1 Fyzikální podstata světla

Světlo je svojí podstatou elektromagnetické vlnění, které zaujímá pouze malou část celého elektromagnetického spektra. Tento rozsah bývá nejčastěji udáván v intervalu $\lambda = 380 - 780 \text{ nm}$. Pod hranicí 380 nm se nachází člověku nedetekovatelné a nebezpečné ultrafialové (rentgenové) záření a nad hranicí 780 nm infračervené (dlouhovlnné) záření. Na obrázku č.1 je zobrazeno spektrum viditelného spektra elektromagnetického záření [1].



Obrázek 1 Spektrum viditelného elektromagnetického záření [2]

Lidské oko je schopné detekovat pouze tuto malou část elektromagnetického spektra. Naše Slunce vyzařuje světlo o největší intenzitě záření při vlnové délce $\lambda = 555 \text{ nm}$. Lidské oko během fyziologického vývoje člověka přizpůsobilo svoji citlivost právě této vlnové délce a jejímu okolí. Na obrázku č.3 je znázorněna spektrální citlivost lidského oka. Tato křivka se ve fotometrii označuje jako $V(\lambda)$ [1].



Obrázek 2 Spektrální citlivost lidského oka [3]

Lidské oko má schopnost tuto spektrální citlivost měnit během dne. Na obr. č.3 je znázorněná spektrální citlivost během dne, ale v šeru se tato citlivost posouvá směrem doleva. Denní vidění se nazývá fotopické a noční skotopické. Přechodné vidění mezi nimi se nazývá mezopické.

Každá vlnová délka budí barevný počitek, který nazýváme barevným tónem (odstínem). V tabulce č.1 jsou znázorněny jednotlivé barevné tóny a jejich rozmezí vlnových délek.

Barevný tón	Vlnová délka λ [nm]
Fialová	380 - 420
Modrofialová	420 - 440
Modrá	440 - 460
Modrozelená	460 - 510
Zelená	510 - 560
Žlutá	560 - 590
Oranžová	590 - 650
Červená	650 - 780

Tabulka 1 Barevné tóny [1]

1.2 Vznik světelného záření

Světelné zdroje rozlišujeme do dvou hlavních skupin. Jsou to zdroje přírodní, které vznikají nezávisle na člověku, a zdroje umělé, které vytváří člověk.

1.2.1 Přírodní zdroje

Tyto zdroje světla člověk svojí přítomností neovlivňuje a vznikají zcela nezávisle v celém vesmíru. Patří sem například kosmická tělesa jako jsou hvězdy, které vyzařují světelné spektrum v závislosti na její teplotě. Jen pouhým okem lze pozorovat na noční obloze kolem 10 000 hvězd až do vzdálenosti 800 světelných let. Mezi další zdroje patří i Měsíc, který světlo přímo nevytváří, ale pouze ho odráží [4]. Některé chemické reakce jako oheň také vytváří viditelné světlo. Dále jsem patří biologické zdroje světla. Živočichové jako jsou světlušky nebo někteří mořští živočichové využívají luminiscence jako způsobu komunikace. V poslední řadě jsem patří elektrické výboje jako je například blesk.

1.2.2 Umělé zdroje

Umělé zdroje vytváří člověk a pracují na základě těchto fyzikálních principů.

Tepelným buzením při zahřívání pevné látky na vysokou teplotu. Tento jev se nazývá inkandescence (někdy také elektroinkandescence). Tohoto jevu využívají obyčejné žárovky, kdy při průchodu proudu vznikají ve wolframovém vlákně tepelné ztráty, které vlákno ohřívají na vysokou teplotu. Při této teplotě vlákno vyzařuje spojitě světelné záření. Maximum tohoto spektra lze vypočítat z Wienova posunovacího zákona:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1)$$

kde b je Wienova konstanta, jejíž hodnota je přibližně $b = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K}$, T je termodynamická teplota tělesa v kelvinech. Wilhelm Wien dostal roku 1893 Nobelovu cenu za tento objev. Například teplota našeho Slunce je 5780 K. Podle Wienova posunovacího zákona této teplotě odpovídá vyzařování o vlnové délce přibližně 555 nm, která vyvolává lidskému oku vjem žlutozelené barvy. Klasická žárovka má pro porovnání teplotu kolem 2850 K a proto vyzařuje ve větších vlnových délkách než je tomu u Slunce. Tento zdroj světla má malou světelnou účinnost, protože většina dodané energie se přemění na teplo. Světelná účinnost a vyzařované spektrum u žárovek jsou silně závislé na stabilní teplotě wolframového vlákna [5].

Buzení atomů v elektrickém poli.

Tento jev se vyskytuje ve výbojových trubicích, kde za nízkého tlaku vzniká doutnavý výboj. Zdrojem záření jsou atomy plynů, které při vzájemných srážkách s elektrony excitují do vyšší energetické hladiny a při následné deexcitaci do nižší energetické hladiny vyžáří foton o určité energii a vlnové délce. Vznikající světlo je tedy monochromatické (při neuvažování kvantových nejistot). V doutnavé trubici při tlaku 100 Pa vzniká katodové doutnavé světlo, které je namodralé. Zatímco anodové světlo má barvu růžovou. Rtuťové výbojky vyzařují v oblasti neviditelného ultrafialového záření. Proto je vnitřní povrch pokrytý luminoforem, který absorbuje část energie záření a přemění ho tím na záření s nižší energií (frekvencí) a větší vlnovou délkou.

Luminiscence pevných látek.

Při dopadu záření o určité vlnové délce na pevnou látku dojde k excitaci jejích atomů, které následně vyžáří záření o větší vlnové délce. Pokud se jedná o přechod mezi dovolenými stavy - energetickými hladinami, tak se tento děj nazývá fluorescence a trvá jen několik nanosekund. Při přechodu mezi zakázaným pásmem dochází u fosforescence, která může trvat i několik minut. Tento jev využíváme při přeměně ultrafialového světla na světlo s menší energií a větší vlnovou délkou. Látky, mající tuto vlastnost, se nazývají luminofory. Luminofory jsou převážně pevné látky obsahující luminiscenční centra. Mezi nejčastější luminofory patří chemické sloučeniny ZnS, CdS s příměsí Cu, Ag nebo Mg. Při tzv. elektroluminiscenci prochází luminoforem elektrický náboj, který má za následek excitaci elektronů a vznik záření [6].

Emisi fotonů na polovodičovém přechodu.

Tohoto jevu využívají LED světelné zdroje, kdy při průchodu proudu přes polovodičový přechod dochází k přechodu elektronu mezi dvěma energetickými hladinami za emise fotonu. Vyzařované spektrum závisí na rozdílu těchto energetických hladin a tedy i na chemickém složení daného polovodiče.

Všechny fyzikální veličiny a jednotky u světelných zdrojů jsou sjednocené a platí po celém světě díky Mezinárodní komisi pro osvětlování CIE. V mezinárodní soustavě SI se vyskytuje pouze jedna fotometrická jednotka. Je to jednotka svítivosti - kandela (cd). CIE dále normalizuje tzv. křivku spektrální citlivosti normálního pozorovatele označovanou jako $V(\lambda)$ [1].

2 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY

Světelně technické parametry dělíme do dvou skupin:

- Radiometrické
- Fotometrické.

2.1 Radiometrické veličiny

Radiometrické veličiny vyjadřují přenos energie elektromagnetickým zářením. Proto se často nazývají energetické. Patří sem například veličiny jako jsou zářivá energie, zářivý tok, zářivost a další. V tabulce č.2 je znázorněn přehled všech radiometrických veličin s příslušnými jednotkami. Radiometrické veličiny se především uplatňují ve spektrografii a astronomii.

Veličina	Symbol	Jednotka	Fyzikální význam veličiny
Zářivá energie	Q	J	Udává množství energie, které těleso vyzáří
Zářivý tok	ϕ_e	W	Vyjadřuje jaké množství energie je přeneseno za jednotku času
Zářivost	I_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	Reprezentuje výkon vyzářený do jednotkového prostorového úhlu
Zář	L_e	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$	Představuje měrnou zářivost plošného zdroje
Ozáření	E_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Jedná se o plošnou hustotu světelného toku
Intenzita vyzařování	H_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Plošná hustota světelného toku vyzařována plochou do poloprostoru
Radiozita	J_e	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	Radiozita je součet vlastního a odraženého vyzařování z dané plochy
Spektrální zář	$L_{e\lambda}$	$\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	Zář specifické vlnové délky
Spektrální ozáření	$E_{e\lambda}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$	Ozáření specifické vlnové délky

Tabulka 2 Radiometrické veličiny [7]

Radiometrické veličiny se dělí na integrální a spektrální. Radiometrické integrální veličiny představují například pro zářivou energii celkovou sumu dílčích energií jednotlivých vlnových délek, zatímco u spektrální zářivé energie se jedná o energii pouze jedné vlnové délky [8].

2.2 Fotometrické veličiny

Fotometrické veličiny jsou vztaženy ke spektrální citlivosti lidského oka a kvantitativně hodnotí velikost vizuálního vjemu. V tabulce č.3. je zobrazen přehled fotometrických veličin a jejich jednotek. Fotometrická veličina svítivost s jednotkou kandela je jediná fotometrická veličina, která patří mezi základní jednotky SI [8].

Veličina	Symbol	Jednotka	Fyzikální význam veličiny
Světelná energie	Q_v	lm·s	Udává zářivou energii, která vyvolává určitý zrakový vjem ve viditelném spektru
Světelný tok	ϕ	lm	Světelná energie procházející danou plochou za jednotku času
Svítivost	I	cd	Prostorová hustota světelného toku
Jas	L	cd·m ⁻²	Představuje měrnou zářivost plošného zdroje
Osvětlení	E	lm·m ⁻²	Světelný tok dopadající na určitou plochu
Světlení	H	W·m ⁻²	Světelný tok vyzařován z plošného zdroje
Světelná účinnost	K	lm·W ⁻¹	Poměr světelného a zářivého toku

Tabulka 3 Přehled fotometrických veličin [8]

Fotometrické veličiny dělíme také na integrální a spektrální. Integrální veličina představuje například světelný tok celého spektra. Zatímco spektrální veličina určuje světelný tok jedné vlnové délky. Spektrální veličiny mají v dolním indexu symbol λ .

2.2.1 Světelný tok

Světelný tok ϕ je úměrný zářivému toku ϕ_e , který udává množství energie přenesené ze světelného zdroje fotony do svého okolí za jednotku času a je posuzován z hlediska spektrální citlivosti normalizovaného fotometrického pozorovatele. Dále kvantitativně popisuje velikost vyvolaného zrakového vjemu. Jednotkou světelného toku je lumen (lm).

Zářivý tok je definován:

$$\phi_e = \int_0^\infty \phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda = \sum_{i=1}^n (\phi_{e\lambda})_i \Delta\lambda_i \quad (2)$$

kde výraz $\frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ představuje spektrální hustotu zářivého toku [W/m².nm],

$\phi_{e\lambda}$ je spektrální zářivý tok [W].

Tato rovnice platí pouze v případě spojitého vyzařování. Pokud se jedná o záření monochromatické, kdy záření obsahuje určité množství monochromatických toků, potom je celkový zářivý tok dán součtem všech těchto jednotlivých monochromatických složek.

$$\phi_e = \sum_{i=1}^n \phi_{ei}(\lambda_i) \quad (3)$$

kde ϕ_{ei} je zářivý tok jednotlivých monochromatických složek čárového spektra.

K určení světelného toku ϕ využíváme funkci $V(\lambda)$, která vyjadřuje spektrální citlivost normálního pozorovatele a je normalizovaná pro denní vidění mezinárodní komisí pro osvětlení CIE. Tato funkce je definována:

$$V(\lambda) = \frac{K_\phi(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad (4)$$

kde $K_\phi(\lambda)$ se nazývá světelná účinnost [lm/W].

K_m reprezentuje maximální světelnou účinnost zářivého toku o velikosti 1 W při vlnové délce $\lambda = 555$ nm. Na tuto vlnovou délku je během dne lidské oko nejcitlivější. Tato hodnota pro normalizovaného pozorovatele byla stanovena na $K_m = 683$ lm/W.

Světelný tok získáme součinem zářivého toku a světelnou účinností nebo maximální světelnou účinností a poměrnou světelnou účinností.

$$\phi(\lambda) = K_\phi(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) \quad (5)$$

Tento vztah platí opět pro spojitě vyzařování a pro monochromatické záření se používá zjednodušení, kdy se spektrum rozdělí na n úseků. Pro každý úsek se stanoví střední hodnota zářivého toku a poměrné světelné účinnosti. Celkový světelný tok je dán sumou všech těchto středních hodnot.

$$\phi(\lambda) = 683 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta \phi_e(\lambda_i)}{\Delta \lambda_i} \right) V(\lambda) \cdot \Delta \lambda_i \cong 683 \int_0^\infty \left(\frac{\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že světelný tok závisí na velikosti zářivého toku, ale i na vlastnostech fotopického vidění, které reprezentuje poměrná světelná účinnost, která nabývá maximální hodnoty 1. Součin této funkce s maximální světelnou účinností $K_m = 683$ lm/W se získá světelná účinnost $K_\phi(\lambda)$.

Zářivý tok patří do skupiny radiometrických veličin, zatímco světelný tok je stažen ke spektrální citlivosti lidského oka a tedy patří do fotometrických veličin [1].

2.2.2 Svítivost

Svítivost fyzikálně vyjadřuje hustotu světelného toku v prostoru. Svítivost se zpravidla určuje pouze pro bodové zdroje světla, které mají zanedbatelné rozměry vůči vzdálenosti od tohoto zdroje. Jednotka svítivosti je kandela (cd), která patří mezi základní jednotky SI.

Kandela je definována jako svítivost zdroje, který vyzařuje pod daným prostorovým úhlem monochromatické záření o vlnové délce $\lambda = 555 \text{ nm}$ ($f = 540 \text{ THz}$) s intenzitou $1/683 \text{ W/sr}$. Název jednotky byl odvozen z římského slova candela (svíce, svíčka). Střední hodnota svítivosti se určí následujícím vztahem.

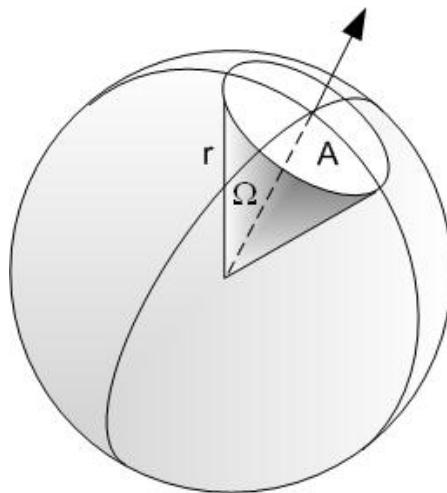
$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (7)$$

kde Ω je prostorový úhel, který má jednotku steradián [sr] a je definován následovně

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (8)$$

kde A je obsah kulové plochy [m^2] a r je poloměr koule [m].

Steradián patří mezi odvozené jednotky SI a odpovídá prostorovému úhlu, který je vymezen na jednotkové kouli z jejího středu na jednotkovou plochu na jejím povrchu. Steradián je z fyzikálního hlediska bezrozměrná jednotka. Plný prostorový úhel je roven 4π . Poloprostor má hodnotu 2π .



Obrázek 3 Znáznornění prostorového úhlu [9]

Světelný zdroj se v praxi považuje za bodový splňuje-li následující podmínku. Poměr vzdálenosti světelného zdroje a jeho největšího rozměru nesmí být menší než 5.

Prostorový úhel kulového vrchlíku

$$\Omega = 2 \cdot \pi (1 - \cos(\alpha)) \quad (9)$$

Prostorový úhel kulového pásu

$$\Omega = 2 \cdot \pi (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)) \quad (10)$$

kde pro hraniční úhly platí $\alpha_2 \geq \alpha_1$.

2.2.3 Osvětlenost

Osvětlenost se často nazývá intenzitou osvětlení a reprezentuje velikost světelného toku dopadající na jednotkovou plochu. Jednotkou osvětlenosti je lux (lx). Osvětlenost je definována následujícím vztahem.

$$E = \frac{d\phi}{dA} \quad (11)$$

kde dA představuje element plochy, na kterou dopadá světelný tok $d\phi$.

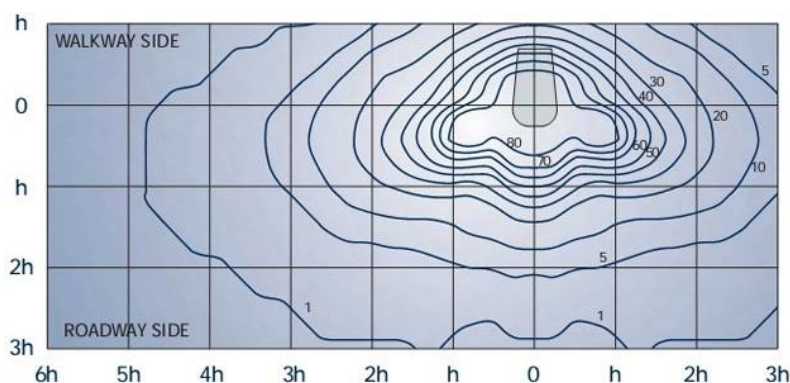
Pokud u bodového zdroje známe úhel β , který svírá normála osvětlované plochy s dopadajícím paprskem světla, lze vyjádřit velikost intenzity osvětlení tímto vztahem.

$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos\beta}{l^2} \quad (12)$$

kde l je vzdálenost světelného zdroje od plochy (m).

Z toho vztahu vyplývá, že osvětlenost klesá se čtvercem vzdálenosti od světelného zdroje. Tato závislost se často označuje jako **čtvercový zákon**. Svítivost I_γ klesá s rostoucím úhlem β . Tento jev se nazývá **kosinový zákon**. Pokud je tento úhel nulový, potom platí rovnost $I_\gamma = I_0$ a tedy velikost intenzity osvětlení nabývá maximální hodnoty, která se označuje jako E_n (normálová osvětlenost). V případě, kdy je svícený paprsek kolmý na normálu osvětlené plochy, velikost svítivosti nabývá nulové hodnoty $I_\gamma = 0$.

Měření osvětlenosti se provádí v rovnoměrně rozložené síti bodů. Body o stejné intenzitě se spojí do křivek, které se nazývají izoluxy. Na obr. č.4 je znázorněná izoluxní mapa.



Obrázek 4 Izoluxní křivky [10]

V následující tabulce č.4 jsou uvedeny orientační hodnoty osvětlení přírodními zdroji světla.

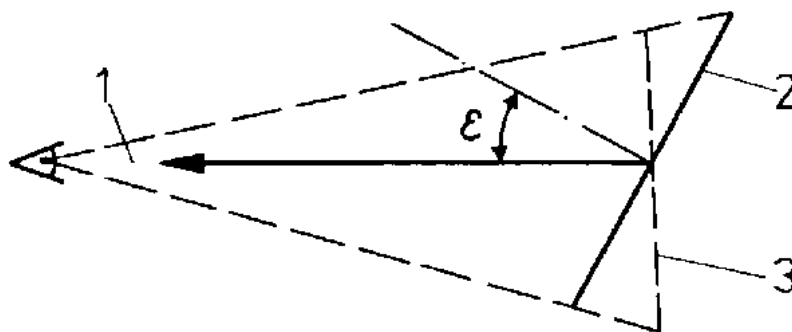
Zdroj světla	Osvětlenost [lx]
Měsíc v úplňku při vyjasněné obloze	0,27
Východ slunce při vyjasněné obloze	3,40
Západ slunce při vyjasněné obloze	400
Zatažená obloha	1000
Nepřímé denní světlo	10000 - 25000
Přímé denní světlo	32000 - 130000

Tabulka 4 Příklady velikostí intenzity osvětlení přírodními zdroji [11]

2.2.4 Jas

Jas se často nazývá jako měrná svítivost a reprezentuje plošnou a prostorovou hustotu světelného toku [1]. Značí se velkým písmenem L a má jednotku kandela na metr čtvereční (cd/m^2). Velikost jasu se mění v závislosti na poloze pozorovatele. Jas dosahuje nejvyšší hodnoty v okamžiku, kdy se pozorovatel dívá na plošný světelný zdroj pod úhlem 90° .

Na obrázku č.4 je popsána definice jasu.



Obrázek 4 Znáznornění definice jasu [9]

1. Svítivost [cd]
2. Svítící plocha [m^2]
3. Pozorovatelem viditelná plocha [m^2]

Zdrojem jasu může být i plocha, která světlo pouze reflektuje. V tomto případě svazky paprsků vynášíme jako radiusvektory a dostáváme fotometrickou plochu, ze které pomocí řezu ku vztáženému bodu získáme čáry jasu.

Jas svazku paprsků se matematicky vyjádří:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA} = \frac{d^2\Phi}{dG} \quad (13)$$

kde $d\Omega$ je prostorový úhel [sr], dA plocha kolmá k ose svazku, dG geometrická velikost svazku [1].

Zjednodušeně se jas vypočítá:

$$L = \frac{I}{S_p} \quad (14)$$

kde S_p je plocha viditelná pozorovatelem [m^2].

Lidské oko nereaguje přímo na jas ale na tzv. kontrast jasu, který se značí K a má bezrozměrnou jednotku. Matematicky je definován:

$$K = \frac{|L_a - L_b|}{L_b} \quad (15)$$

kde L_a je jas předmětu a L_b je jas pozadí [cd/m^2].

2.2.5 Světlení

Světlení udává velikost světelného toku vyzařovaného z elementu plochy. Značí se M a má jednotku lumen na metr čtvereční (lm/m^2).

Světlení má tuto fyzikální závislost:

$$M = \int_0^\Omega L_\gamma \cos \gamma = \int_0^\Omega f_L(\gamma) \cos \gamma d\Omega = L_0 \int_0^\Omega f_1(\gamma) d\Omega = L_0 \Omega_e \quad (16)$$

kde L_γ je jas vyzařovaný plochou dA pod úhlem γ od normály této plochy, L_0 je jas vyzařovaný plochou dA ve směru normály, Ω je prostorový úhel a Ω_e je ekvivalentní prostorový úhel.

Ekvivalentní prostorový úhel Ω_e reprezentuje prostorový úhel, do kterého bodový zdroj vyzáří veškerý svůj světelný tok [1].

2.2.6 Měrný světelný výkon

Měrný světelný výkon je jedním z nejdůležitějších parametrů světelných zdrojů. Měrný světelný výkon udává, jak velký světelný tok dokáže světelný zdroj vyzářit při příkonu jednoho wattu. Značí se M_z a má jednotku lumen na watt (lm/W). U světelných zdrojů bez předřadníku je udávaný výkon stejný jako příkon světelného zdroje. U světelných zdrojů s předřadníkem se musí počítat s jeho ztrátami.

Měrný světelný výkon je definován:

$$M_z = \frac{\phi}{P} \quad (17)$$

kde P je elektrický příkon světelného zdroje [W], ϕ je světelný tok [lm].

V tabulce č.5 je znázorněn přehled světelných zdrojů a jejich měrný světelný výkon.

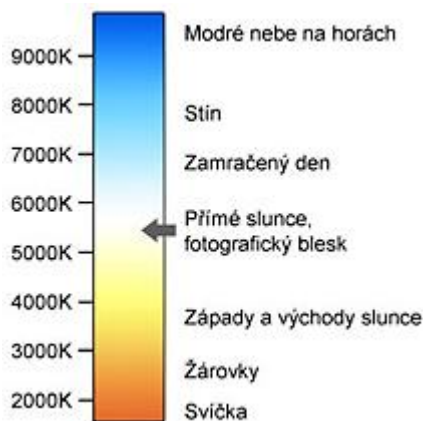
Světelný zdroj	Měrný světelný výkon [lm/W]
Klasické žárovky	10-18
Halogenové žárovky	20-30
Kompaktní zářivky	35-87
Lineární zářivky	50-104
Metal-halogenidové výbojky	50-130
Vysokotlaké sodíkové výbojky	70-150
Nízkotlaké sodíkové výbojky	90-200
LED studené bílé	60-160
LED teplé bílé	40-100

Tabulka 5 Měrný světelný výkon jednotlivých typů světelných zdrojů [12]

V laboratorních podmínkách dosahuje měrný světelný výkon LED diod až hodnoty $M_z = 300 \text{ lm/W}$ (2014). Nejvyššího měrného světelného výkonu dosahují vysokotlaké a nízkotlaké sodíkové výbojky. Nevýhodou nízkotlaké sodíkové výbojky je její index podání barev, který se blíží k nulové hodnotě. Nízkotlaké sodíkové výbojky se využívají ve veřejném osvětlení. Vysokotlaké se používají jen zřídka při osvětlování historických památek.

2.2.7 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti světelného zdroje udává teplotu, kterou by muselo mít černé těleso, aby vyzařovalo stejné spektrum bílého světla jako světelný zdroj. Značí se symbolem T a má jednotku jeden kelvin (K). U výbojkových a LED světelných zdrojů se používá náhradní teplota chromatičnosti, která se značí T_n .



Obrázek 5 Teplota chromatičnosti bílého světla [13]

Z obrázku č.9 je patrné, že se zvyšující se teplotou chromatičnosti roste podíl modré složky a snižuje se podíl červené složky ve výsledném spektru. Teplota našeho Slunce činí přibližně 5780 K a přesto ho lidské oko vnímá jako žluté i přesto, že vyzařuje spektrum s maximem v oblasti zeleno-žluté. Bílé světlo rozlišujeme na teplé a studené, které mají odlišný psychický vliv na člověka.

Teplá bílá má nažloutlý nádech klasické žárovky a působí na člověka příjemně a útulně. Doporučuje se jí používat v prostorech, kde se má člověk cítit uvolněně. Například obývací pokoj, ložnice nebo dětský pokoj.

Studená bílá je pocitově neutrální a doporučuje se jí používat v pracovnách, koupelnách a kancelářích s nedostatkem denního světla [12]. V tabulce č.6 je přehled světelných zdrojů a jejich orientačních teplot chromatičnosti.

Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti [K]
Červená LED	600
Svíčka	1000-1200
Žárovka	2800
Východ a západ Slunce	2800
Denní světlo	5000
Fotografické blesky, výbojky	5500
Polední světlo	6000
Standardizované denní světlo	6500
Oblačno, mlhavo	7000-9000
UV solární výbojky	14000

Tabulka 6 Teplota chromatičnosti světelných zdrojů [13]

2.2.8 Index podání barev

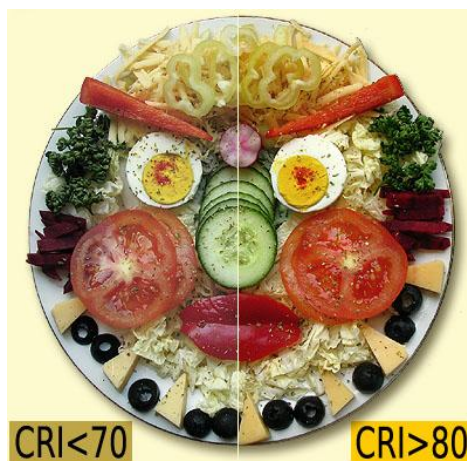
Index podání barev u světelných zdrojů udává věrnost reprodukce barev osvětlovaných předmětů. Značí se R_a a nabývá hodnot od 0 do 100, kdy hodnota 100 udává naprosto věrné podání barev při slunečním osvětlení. Někdy se označuje u zobrazovacích zařízeních jako CRI (Color Rendering Index). Při nulové hodnotě R_a světelného zdroje není možno rozeznat okolní barvy [12]. Tabulka č.7 zobrazuje přehled světelných zdrojů a jejich indexů podání barev.

Světelný zdroj	Index podání barev R_a
Klasické žárovky	98-100
Halogenové žárovky	99-100
Kompaktní zářivky	75-95
Lineární zářivky	68-98
Metal-halogenidové výbojky	60-85
Vysokotlaké sodíkové výbojky	20-60
Nízkotlaké sodíkové výbojky	0
LED	65-90

Tabulka 7 Přehled indexů podání barev různých světelných zdrojů [13]

Nejlepší index podání barev mají žárovky, které vyzařují v širokém spojitém spektru. U nejlevnější svítivé diody je index podání barev $R_a = 62$. Většina komerčních diod se pohybuje v pásmu okolo $R_a = 80$. Vyrábějí se i vzácně LED s $R_a = 90$. Tyto LED mají menší světelnou účinnost, protože pro zvýšení indexu podání barev se využívá luminoforu, který pohlcuje určitou část energie záření. Rozdíl světelného toku u LED čipů s indexem podání barev 70 a 80 činí asi 15 %. Pro měření indexu barev se používá spektrometr, který porovnává škálu nejčastěji 8 nebo i 15 referenčních barev.

V domácnostech a kancelářích se doporučuje použití světelných zdrojů s $R_a = 80$ a více. Tuto podmínku splňuje většina světelných zdrojů na trhu. V průmyslových prostorech je normou stanovena minimální hodnota $R_a = 65$. Index podání barev je nejdůležitějším kvalitativním parametrem světelných zdrojů používaných v tiskárnách a všude tam, kde je vyžadována vysoká věrnost reprodukce barev [14].



Obrázek 6 Porovnání indexů podání barev [14]

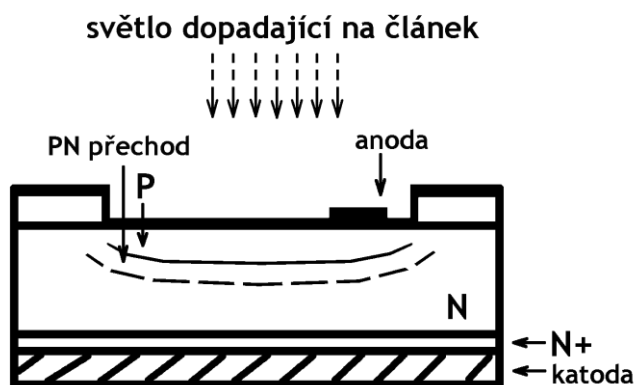
3 FOTOMETRICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

3.1 Fotočlánky

Fotočlánek, někdy taky nazývaný jako fotodetektor nebo fotonka, je elektrotechnická součástka, která mění dopadající světelné záření na napětí. Nejčastěji se používají fotočlánky hradlové, které jsou dnes nejčastěji z křemíku. Dříve se používaly i fotočlánky selenové.

Princip fotočlánku je následující. Při dopadu světelného záření na povrch fotočlánku vzniká napětí mezi kovovou vrstvou (platina, zlato) a polovodičem. To způsobí průchod fotoelektrického proudu obvodem. Pro lineární závislost fotoproudu na osvětlení musíme splnit, aby vstupní odpor fotočlánku se blížil nule a výstupní odpor měřicího systému se blížil nekonečnu.

Z konstrukčního hlediska se nejčastěji používá ve fotočláncích fotodiody, která má na povrchu velice tenkou vrstvu polovodiče typu P (nosičem proudu jsou díry). Při dopadu fotonu vzniká pár elektron - díra. Vzniklé elektrony přechází do polovodičové vrstvy N (nosičem proudu jsou elektrony) a díry do P vrstvy. Na přechodu vzniká rozdíl potenciálů. Proud, který nazýváme fotoproud, je tedy úměrný velikosti intenzity osvětlení, dopadající na povrch fotodiody. Spektrální citlivost se dá měnit pomocí tloušťky vrstev P, N, N^+ a koncentrací příměsí [15].

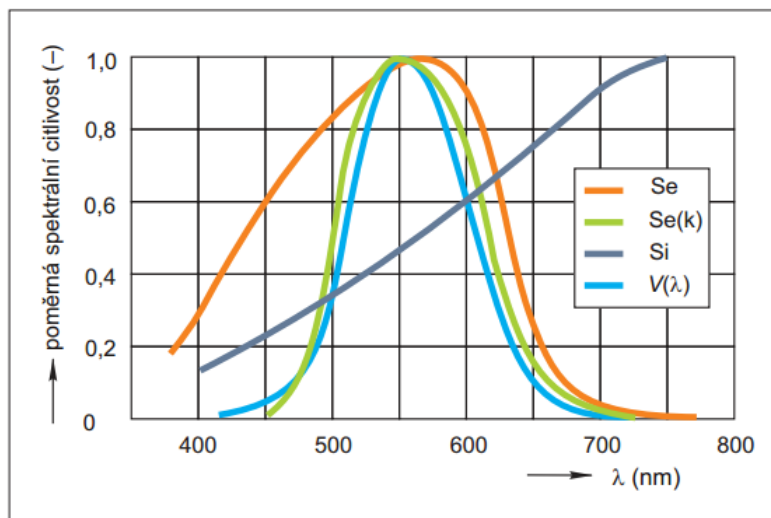


Obrázek 7 Princip fotodiody [16]

Pro měření fotometrických veličin je nutno aplikovat do fotočlánku filtr, který upravuje spektrální citlivost fotodiody na křivku spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele $V(\lambda)$. Spektrální křivka selenového fotočlánku se příliš neliší od normované spektrální citlivosti a se koriguje pomocí speciálních filtrů.

U křemíkových fotočlánků je spektrální křivka velice odlišná a proto je nutné korigovat celou oblast viditelného spektra pomocí skleněných monochromatických filtrů. Nevýhodou selenových fotočlánků je pokles proudu při konstantním osvětlení (tzv. únava fotočlánku) a velká teplotní závislost. Selenové články je tedy nutné opakovaně kalibrovat. Zatímco křemíkové fotočlánky jsou v tomto ohledu mnohem stabilnější. Křemíkové fotočlánky mohou pracovat do teploty 50° s maximální chybou $\pm 1\%$ [17].

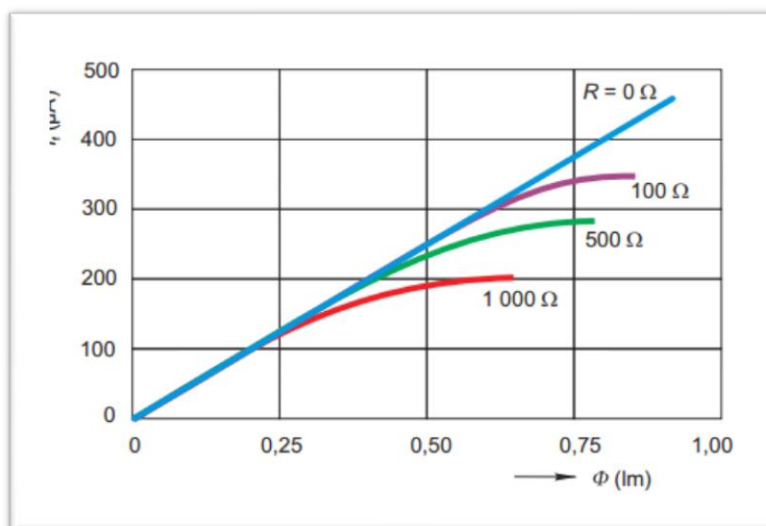
Na obrázku č.18 jsou zobrazeny spektrální citlivosti hradlových fotočlánků.



Obrázek 8 Spektrální citlivosti hradlových fotočlánků [17]

Místo fotodiody se také používaly emisní fotonky, u kterých se využívá vnějšího fotoelektrického jevu. Elektroda je umístěna ve vakuu nebo plynném prostředí a emituje elektrony při dopadu fotonů. Anoda je drátěná smyčka nebo síťka. Katoda je tvořena alkalickou vrstvou, nanesené na vnitřní straně baňky. Emisní fotonky jsou velice přesné a stabilní, ale vyžadují ke své činnosti externí napájení. K přizpůsobení spektrální citlivosti se využívá kapalinových filtrů [15].

Na obrázku č.19 je zobrazena závislost fotoproudu selenového fotočlánku na vnitřním odporu. Charakteristika je lineární pouze při nulovém vnitřním odporu. V praxi se využívá pro zmenšení celkové chyby kompenzačního zapojení, kdy se měří fotoelektrický proud článku nakrátko. Stárnutí fotočlánku tuto charakteristiku mění a je třeba provádět opakované kalibrace.



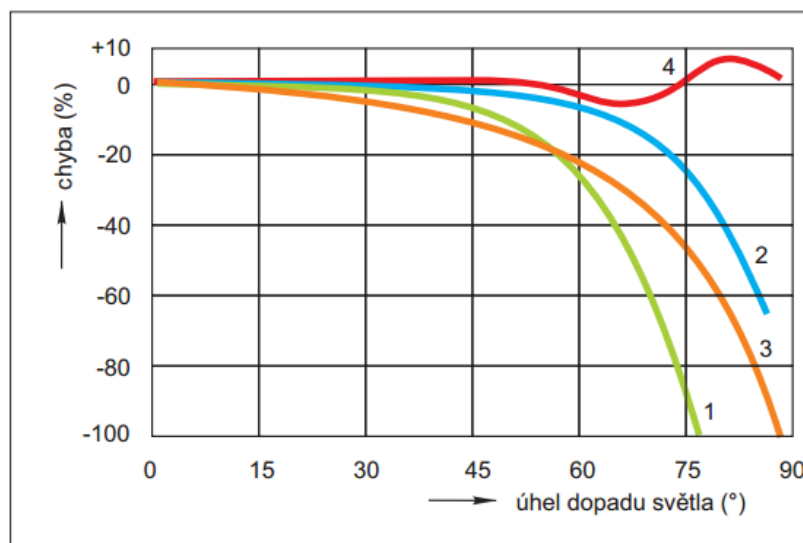
Obrázek 9 Závislost fotoproudu na vnitřním odporu selenového fotočlánku [17]

V případě měření velmi nízkých hodnot se primární fotoelektrický proud zesiluje pomocí sekundární emise fotoelektrického násobiče. Nevýhodou je zhoršení stability a nutnost vysoce stabilizovaného zdroje vysokého napětí. Pro zesílení fotoproudu na výstupu jsou nejvýhodnější operační zesilovače, kvůli jejich nízkému odporu.

Fotočlánky lze rozdělit podle směrové selektivity následovně.

- Fotočlánky pro rovinné měření osvětlenosti.
- Fotočlánky pro měření prostorového osvětlenosti.
- Fotočlánky se snímacím úhlem $\pm 10^\circ$ od osy snímání.

Fotočlánky jsou kalibrovány pro kolmý dopad světla. Osvětlenost při dopadu šikmo na povrch je úměrná kosinu úhlu dopadu. Při experimentálním měření bylo zjištěno, že při úhlu dopadu větším než 30° vzniká velká odchylka. Je to způsobeno zrcadlovým odrazem, nedostatečnou propustností horní vrstvy a vlivem cloněním a polarizací okraje fotočlánku obrubou. Tato úhlová chyba se odstraňuje pomocí kosinového nástavce, který má tvar kulového vrchlíku a je vyroben z rozptylového skla [17].



Obrázek 10 Procentuální směrová chyba fotočlánků [17]

1. Fotočlánek s přečnívající obrubou.
2. Fotočlánek bez obruby.
3. Fotočlánek s korekčním filtrem.
4. Fotočlánek s kosinovým nástavcem.

Dělení fotočlánků podle přesnosti.

- **Přesná**
U těchto fotočlánků je odhad rozšířené nejistoty $u \leq 8\%$. Používají se při měření etalonů, kalibraci přístrojů a laboratorním měření.
- **Provozní**
Rozšířená nejistota těchto fotočlánků je v rozmezí $u = 8 - 14\%$ a používají pro ověřování parametrů světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav.
- **Orientační**
Zde se pohybuje nejistota měření v rozmezí $u = 14 - 20\%$. Používají se při kontrole funkce osvětlovacího zařízení [17].

3.2 Fotometrické přístroje

3.2.1 Luxmetry

Luxmetr je přístroj pro měření intenzity osvětlení. Skládá se z přijímače s fotočlánkem a vyhodnocovacího systému. Fotoproud, vznikající osvětlením fotodiody, se zesiluje operačními zesilovači. Fotočlánek luxmetru je opatřen kosinovým nástavcem. Vyhodnocovací obvod je napojen na digitální nebo analogový indikátor s korektorem pro nastavení nuly. Luxmetry se rozdělují podle přesnosti do jednotlivých tříd, znázorněných v tabulce č.10.

Třída přesnosti	f_c [%]	Využití
L	2	Měření etalonů
A	5	Přesná laboratorní měření
B	10	Běžné měření osvětlenosti
C	20	Orientační měření

Tabulka 8 Rozdělení luxmetrů podle přesnosti [17], [18]

kde f_c značí největší dovolenou souhrnnou chybu (rozšířená nejistota) v procentech

Některé luxmetry mají vlastní napájecí zdroj, u kterého musí být přítomna možnost kontroly napájecího napětí. Každý luxmetr musí snést přetížení 20 % z měřicího rozsahu po dobu nejméně 5 minut. Za příznivých podmínek se životnost luxmetru pohybuje kolem 5000 provozních hodin. Dále musí splňovat všechny třídy luxmetrů frekvenční rozsah od 40 Hz do 1 Mhz. Při měření je důležité nechat stabilizovat fotočlánek luxmetru daným okolním podmínkám. V praxi stačí ponechat odkrytý luxmetr 5-15 minut v osvětleném prostředí, kde bude probíhat měření [17].

Během provozu luxmetrů dochází ke změně vlastností daného fotočlánku a proto je nutné provádět pravidelné kalibrace. Kalibrace luxmetrů pro přesná měření se musí provádět každé dva roky, pro provozní měření každé tři roky a pro orientační měření každých pět let. Kalibrace mohou provádět pouze certifikovaná pracoviště.

Měření luxmetry doprovází mnoho chyb - nejistot. Jedná se především o chybu spektrální, úhlovou, směrovou, odchylky spektrální citlivosti fotočlánku od křivky $V(\lambda)$ a chybou linearitu. U luxmetrů, které jsou konstruovány jako fotočlánek, připojený přes kabel k vlastnímu měřicímu přístroji, je nutnost kvalitního stínění propojovacího kabelu, aby nedocházelo k nežádoucímu rušení.

U kompaktních luxmetrů, které mají fotodetektor a elektroniku v jednom pouzdře, musí mít možnost dálkové fixace naměřené hodnoty, protože přítomnost pracovníka by mohla ovlivnit samotné měření. Pokud tyto luxmetry nejsou tímto způsobem upraveny, mohou sloužit pouze k orientačnímu měření.

Některé univerzální laboratorní luxmetry mají jednotlivé čidla pro měření v určitém spektru (UV), fotočlánky s kosinovým nástavcem pro měření horizontální osvětlenosti a nebo speciálními nástavce fotonkami pro měření střední poloválcové, válcové a kulové osvětlenosti [17].



Obrázek 11 Digitální luxmetr PRC Krochmann 211 [17]

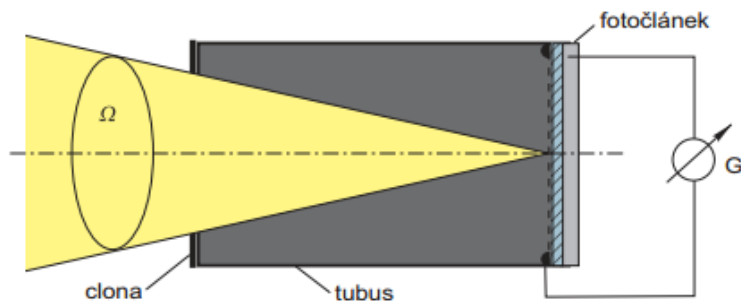
Zásady měření osvětlenosti

- Nové zářivky musí před měřením odsvitit minimálně 100 hodin, žárovky 6 hodin. Důvodem je pokles světelného toku zdroje v průběhu jeho životnosti.
- Dostatečné zahoření výbojových zdrojů (někdy až 20 minut).
- Fotočlánek je potřeba před měřením nechat 5 - 15 minut osvětlené měřeným zdroje světla.
- Světelný tok je u světelných zdrojů teplotně závislá veličina a proto je nutné udávat k výsledkům měření okolní parametry (teplota, vlhkost a tlak).
- Během měření je nutno sledovat napájecí napětí. V případě odlišné velikosti napájecího napětí musíme provést korekci korekčním činitelem k_U , který závisí na poměru napájecího napětí s nominálním umocněného koeficientem c , který poskytuje výrobce světelného zdroje [17].

3.2.2 Jasoměry a jasové analyzátory

Jasoměr je fotometrický přístroj, který slouží k měření jasu. Skládá se z fotočlátku, optického systému pro vyhodnocení prostorového úhlu, měřicího a vyhodnocovacího systému. Optický systém pro vyhodnocení prostorového úhlu se skládá ze soustavy clonících a fokusačních prvků. Fotočlánek měří normálovou osvětlenost a jas se vypočítá podle rovnice č.11 [19], [20].

Na obrázku č.13 je zobrazeno schéma objektivového jasoměru.



Obrázek 12 Schéma objektivového jasoměru [19]

Podle zorného pole optického systému rozděluje jasoměry na bodové a integrační. Bodové jasoměry dokážou měřit velmi malé plochy (pod úhlem 6'). Integrační jasoměry měří větší plochy (pod úhlem 2°).

Podle přesnosti rozdělujeme jasoměry pro přesné měření s chybou $\pm 7,5 \%$ a pro provozní měření s chybou $\pm 10 \%$ [17]. Jasový analyzátor má navíc softwarovou úpravu podle křivky spektrální citlivosti normalizovaného pozorovatele. [1].



Obrázek 13 Jasoměr L1009 [17]

3.2.3 Spektroradiometry

Spektroradiometr slouží k měření spektra elektromagnetického záření. Spektrofotometr měří spektrum pouze viditelného spektra. Oba využívají rozkladu světla na hranolu nebo světelné mřížky. Jednotlivé složky dopadají na snímací čip, který předává informace do procesoru ke zpracování. Mimo spektrum dokáže měřit i jas, osvětlenost, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev a trichromatické souřadnice.

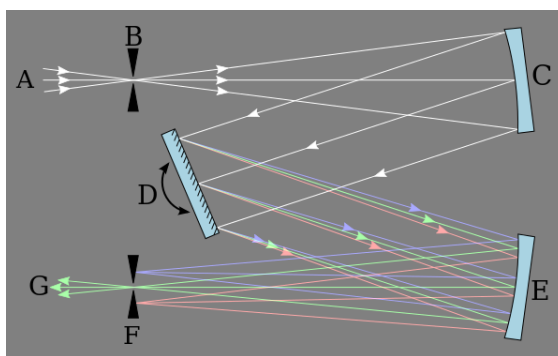
Spektroradiometr se skládá z těchto částí:

- Vstupní optika
- Monochromátor
- Fotočlánek
- Záznamový a komunikační systém



Obrázek 14 Spektroradiometr CS-1000A [21]

Vstupní optika zahrnuje čočky, difuzory a filtry. Elektromagnetické vlnění prochází čočkou, která je skleněná nebo křemenná. Difuzor bývá z teflonu. Monochromátor má za úkol rozložit světlo na jednotlivé vlnové délky. K rozkladu světla se využívá buď systému mřížky nebo hranolů. Na obrázku č. 15 je znázorněn Czerny - Turnerův monochromátor. Na každém hranolu dochází k lomu světla, které je rozdílné pro jednotlivé vlnové délky. K rozkladu dochází opakovaně v systému několika hranolů.



Obrázek 15 Czerny - Turnerův monochromátor [22]

Na konci monochromátoru je nastavitelná štěrbin, která selektuje pouze určitý interval vlnových délek. Některé spektroradiometry mají i dva systémy monochromátorů pro zvýšení jejich přesnosti. Moderní spektroradiometry mají monochromátory, které rozkládají světlo na síti mřížek. Tento systém má menší útlum a je více univerzální. Rozklad světla je stabilnější a má větší rozsah. Detektorem je fotočlánek, který integruje intenzitu osvětlení, která je následně zaznamenána pro příslušný interval vlnových délek do paměti přístroje [22].

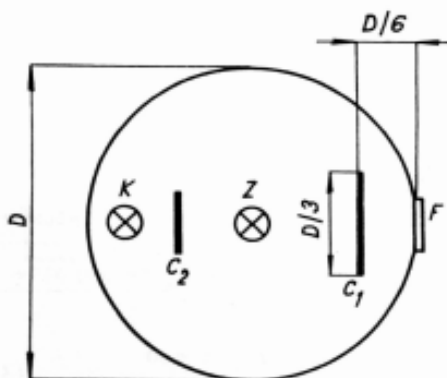
3.2.4 Kulový integrátor

Kulový integrátor se často nazývá fotometrický integrátor, integrační koule nebo Ulbrichtova koule. Jedná se o fotometrický přístroj, ve kterém se měří celkový světelný tok světelného zdroje umístěného ve středu duté koule. Vnitřní strana je natřenou bílou barvou s vysokým rozptylem, odrazivostí a trvanlivostí. Povrch musí být barevně neselektivní. Těmto požadavkům odpovídá nátěr síranu barnatého BaSO_4 nebo oxidu hořečnatého MgO , který má odrazivost 96 - 98 %.



Obrázek 16 Kulový integrátor [23]

Kulový integrátor je navržen tak, aby se dal snadno otevřít a vyměnit světelný zdroj za jiný. Uvnitř jsou přítomny dvě clony. Jedna pro měřicí fotočlánek a druhá pro korekční žárovku, která se využívá při měření světelné účinnosti svítidel [23]. Na obr. č.17 je znázorněn půdorys kulového integrátoru. První clona C_1 zakrývá korekční žárovku a její rozměr by měl být $D/3$ ve vzdálenosti $D/6$ od vnitřního okraje, kde D je průměr koule.



Obrázek 17 Optimální rozložení uvnitř kulového integrátoru [24]

Světelný tok uvnitř koule je oslaben několikanásobným odrazem. Následující vztah vyjadřuje geometrický součet řady, který popisuje celkový útlum světelného toku v kouli.

$$\phi = \rho \cdot \phi_z + \rho^2 \cdot \phi_z + \dots + \rho^n \cdot \phi_z = \frac{\rho}{1 - \rho} \cdot \phi_z \quad (18)$$

kde ϕ je utlumený světelný tok uvnitř koule, ϕ_z je světelný tok zdroje a ρ je integrální činitel odrazu.

V kulovém integrátoru se měří velikost osvětlení, která je dána vztahem:

$$E = \frac{\phi}{\pi \cdot D^2} = \frac{\rho}{(1 - \rho) \cdot \pi \cdot D^2} \cdot \phi_Z = k_i \cdot \phi_Z \quad (19)$$

kde D je průměr koule a k_i je konstanta integrační koule [lx/lm].

Pokud je v integrační kouli použit fotočlánek připojený na zesilovač s voltmetrem, tak se uvádí koeficientem celého systému K_{MS} (lm/V). Rozměry kulových integrátorů se pohybují v rozmezí 0,2 m až do 3 m. V menších kulových integrátorech se měří LED světelné zdroje a v největších se měří svítidla o délce až 2 m.

Některá svítidla obsahují materiály, které absorbují světelné záření uvnitř koule. Proto je nutné stanovit tzv. korekční činitel absorpance neaktivních částí:

$$k_k = \frac{E_{kN}}{E_{kx}} \quad (20)$$

kde E_{kN} je hodnota intenzity osvětlenosti během zapnuté korekční žárovky

E_{kx} je hodnota intenzity osvětlenosti během zapnuté korekční žárovky
a vloženého zhasnutého svítidla.

Pro přesné hodnoty se provádí kalibrace normálem, u kterého známe přesnou hodnotu celkového světelného toku. Korekce se stanoví následovně:

$$k_N = \frac{E_X}{E_N} \quad (21)$$

kde E_X je hodnota intenzity osvětlenosti měřeného světelného zdroje

E_{kx} je hodnota intenzity osvětlenosti normálu.

Světelný tok měřeného zdroje je dán vztahem:

$$\phi_X = k_k \cdot k_N \cdot \phi_N \quad (22)$$

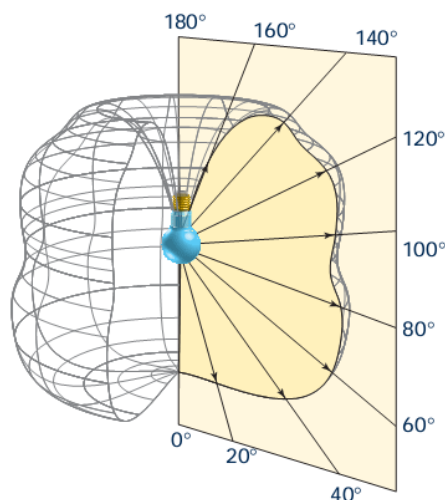
kde ϕ_N je světelný tok normálu.

Měření s normálem musí být provedeno se stabilizovaným zdrojem při hodnotě napájecího proudu, uvedeného v kalibračním protokolu normálu. Světelný zdroj je třeba nechat dostatečně dlouho zahořet. U zářivek přibližně 20 minut. U LED světelných zdrojů i déle z důvodu ustálení jejich provozní teploty. Teplota uvnitř koule by měla být přibližně 25°C. Zářivky se měří vždy ve vodorovné poloze. Žárovky a vysokotlaké sodíkové výbojky se měří naopak v poloze svislé a vždy patičí nahoru.

Přesnost naměřeného světelného toku závisí na několika faktorech. Mezi tyto faktory patří nejistota etalonu, která se pohybuje přibližně kolem 2 % u žárovek a 3,5 % u zářivek. Dále měření ovlivňuje nelinearita fotočlátku, neustálená teplota světelného zdroje a únava materiálu - nátěru.

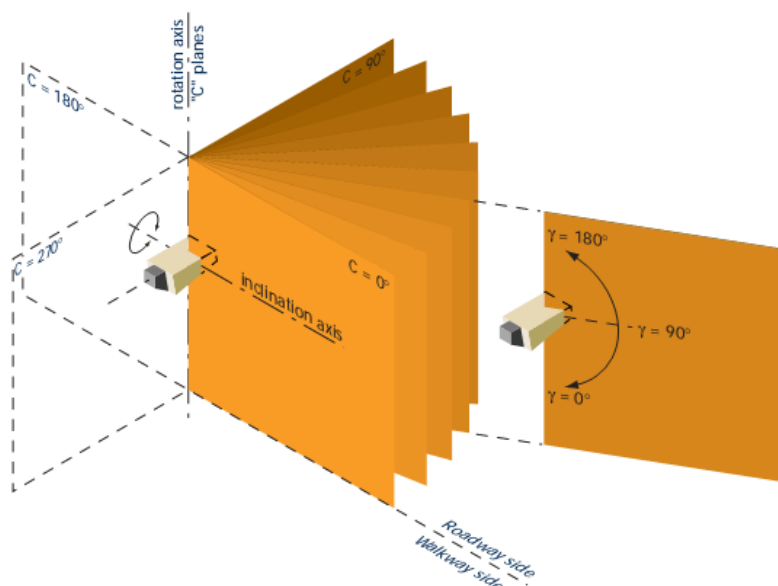
3.2.5 Goniofotometry

Goniofotometr je laboratorní měřicí přístroj, který měří prostorové rozložení svítivosti. Přístroj musí být konstruován tak, aby mohl měřit v různých rovinách a pod různými úhly. Měření svítivosti se provádí ve všech bodech prostoru a vynesení těchto vektorů se získá prostorové rozložení svítivosti zdroje. Toto zobrazení není příliš praktické a využívá se proto jednotlivých řezů tohoto prostoru. Na obrázku č.17 je zobrazena křivka svítivosti v polorovině fotometrického prostoru.



Obrázek 18 Křivka svítivosti vyznačená v polorovině fotometrického prostoru [25]

Nejčastěji se používá systém rovin C- γ , kde C značí úhel od hlavní osy. V těchto polorovinách dostáváme křivky svítivosti standardně v polárních souřadnicích, kde se úhel značí řeckým písmenem γ a v praxi se používá krok 5°. Hlavní osa je v tomto systému kolmá k vyzařovací ploše svítidla a od této osy se počítají úhly jednotlivých polorovin s nejčastějším krokem 15°.



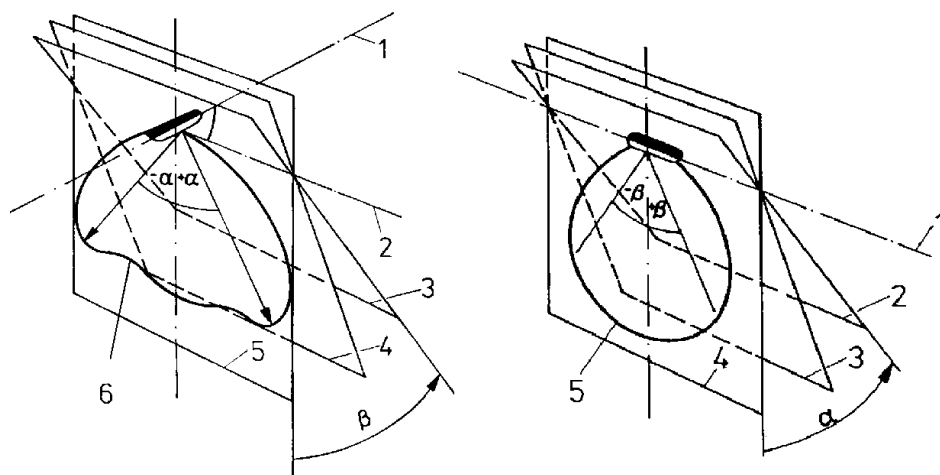
Obrázek 19 Systém rovin C- γ [25]

V tabulce č.9 jsou minimální počty měření svítivosti pro systém C- γ , kde mají jednotlivé poloroviny krok 15° a úhel γ má krok 5°.

Druh osvětlení	Počet úhlů γ	Počet polorovin	Minimální počet měření
Dolní polorovina	36	24	409
2 osy symetrie	18	7	120
Kruhově symetrické svítidlo	18	1	18
Bodový zdroj	1	1	1

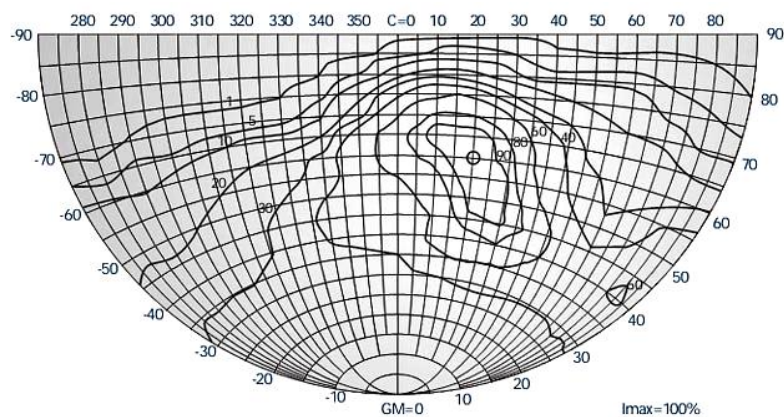
Tabulka 9 Minimální počet měření v systému C- γ

Dále se používají systémy A- α a B- β s příčnou osou svítidla.



Obrázek 6 Systémy A- α a B- β polorovin [26]

Poslední zobrazení rozložení svítivosti je pomocí jednotkové koule. Nejčastěji se používá polokoule se sinusoidálním zobrazením. Body s danou velikostí jsou zobrazeny pomocí rovnoběžek a poledníků a jsou spojeny do izokandely. Izokandela je křivka o stejné hodnotě svítivosti.



Obrázek 20 Izokandelový diagram v sinusoidálním zobrazení [25]

Konstrukční řešení goniometrů

- Otočný zdroj nebo svítidlo s pevně umístěným fotočlánkem.
- Pevně umístěný zdroj nebo svítidlo a otočný fotočlánek.
- Pevně umístěný zdroj i fotočlánek s otočným zrcadlem.

3.2.6 Fotometrická lavice

Fotometrická lavice je laboratorní přístroj sloužící k měření svítivosti. Umožňuje porovnání svítivosti světelných zdrojů a lze na ní ověřovat přesnost měření fotočlánků. Skládá se ze dvou vodících tyčí, po kterých se pohybuje posuvný nástavec, na který se připevňuje světelný zdroj.



Obrázek 21 Fotometrická lavice [27]

Světelný zdroj a laboratorní luxmetr se umístí do optické osy. Změří se hodnota osvětlení a pomocí čtvercového zákona se dopočítá svítivost. Fotometrické lavice jsou dlouhé 3 až 8 metrů. Vodící lišta má rastr pro měření vzdálenosti s přesností až 0,5 mm.

V laboratorních světelné techniky lze provádět kalibrace luxmetrů na fotometrické lavici. Na jeden konec se umístí normál svítivosti a na pohyblivou část se umístí luxmetr. Na základě změřené svítivosti v určité vzdálenosti od zdroje a pomocí čtvercového zákona se provede kalibrace luxmetru. Vzdálenost luxmetru od normálu svítivosti se volí jako pětinašobek největšího rozměru světelného zdroje pro méně přesná měření, desetinásobek pro přesnější měření.

Všechny stěny, popřípadě předměty, musí být opatřeny černým povrchem, aby se zamezilo co nejvíce rušivým odrazům světla.

4 NEJISTOTY MĚŘENÍ

4.1 Úvod do statistiky

Statistika pomáhá najít skryté závislosti ve velkém souboru naměřených, či jinak získaných hodnot. Úkolem statistiky je najít postupy, jak popsat velké množství dat pomocí několik charakteristických parametrů.

4.1.1 Definice

Základní soubor je množina všech naměřených, či jinak získaných hodnot.

Rozsah výběru se značí n , kde výběr $n = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

Výběr lze rozdělit na skupiny hodnot se stejnými parametry - třídícím znakem. Pak lze každou hodnotu výběru zařadit do této třídy. Veličina popisující množství prvků v třídě se nazývá četnost. Četnost lze vyjádřit absolutně nebo relativně [28].

Mezi výběrové charakteristiky patří.

Výběrový průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (23)$$

kde n je rozsah výběru.

Výběrový rozptyl

$$\bar{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (24)$$

Pro praktičtější výpočty lze použít vztah

$$\bar{s}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \bar{x}^2 \quad (25)$$

Výběrová směrodatná odchylka

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (26)$$

Vztah mezi empirickým rozptylem a nestranným odhadem

$$\bar{s}^2 = \frac{n-1}{n} \cdot s^2 \quad (27)$$

V praxi se často zavádí pojem součet čtverců

$$SS = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (28)$$

Potom při tomto označení je empirický rozptyl

$$S^2 = \frac{1}{N} \cdot SS \quad (29)$$

Nestranný odhad rozptylu

$$\bar{S}^2 = \frac{1}{N-1} \cdot SS \quad (30)$$

Poznámka: hodnota s^2 vyjadřuje empirický rozptyl naměřených hodnot, který je pouze odhadem rozptylu σ^2 , který je vždy větší než empirický. Proto je ve vztahu pro nestranný odhad $\bar{s}^2$ ve jmenovateli $n-1$, aby náš odhad rozptylu byl o něco větší [28]. Závěrem nestranný odhad $\bar{s}^2$ je nejlepší varianta pro odhad skutečného rozptylu σ^2 .

Výběrová směrodatná odchylka střední hodnoty

$$s_x^2 = \frac{s^2}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (31)$$

Počet měření je tedy jedním z parametrů, který snižuje hodnotu rozptylu. Je tedy vhodné, aby soubor dat měl alespoň 20 hodnot. Další možnost je snižovat hodnotu rozptylu s^2 pomocí zlepšení podmínek získání dat. Například načasováním nebo ustálením měřených hodnot.

Pokud daná situace neumožňuje získání většího počtu hodnot do souboru dat, je nutné zvolit jinou metodu určení směrodatné odchylky střední hodnoty. Například pomocí Hornova postupu [29].

4.1.2 Rozložení pravděpodobnosti

Náhodný výběr lze popsat střední hodnotou

$$E(\bar{X}) = \mu \quad (32)$$

Potom směrodatná odchylka bude

$$D(\bar{X}) = \frac{D(X)}{n} = \frac{\delta^2}{n} \quad (33)$$

Náhodná veličina má normální rozložení $No\left(\mu, \frac{\delta}{\sqrt{n}}\right)$

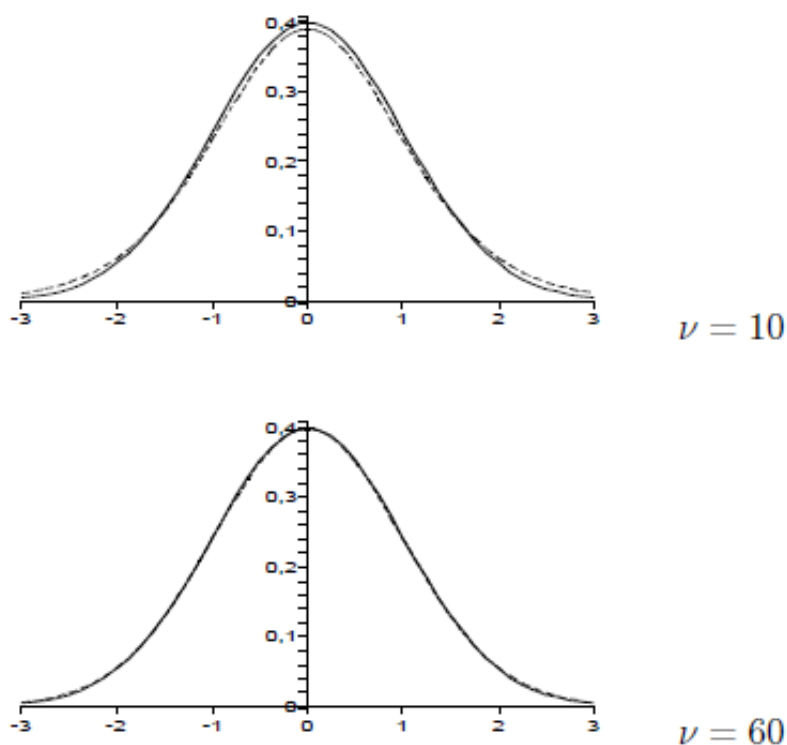
Výraz $u = \frac{x - \mu}{\delta} \sqrt{n}$ reprezentuje pravděpodobnost výskytu náhodné veličiny a nabývá hodnot $No(0,1)$. Pro vyčíslení pravděpodobnosti výskytu náhodné veličiny ohraničenou hodnotou kritickou hodnotou x se nejdříve spočítá substituční hodnota $u = \frac{x - \mu}{\delta} \sqrt{n}$. Pro kritickou hodnotu vyhledáme pravděpodobnost výskytu pomocí Laplaceovy distribuční funkce, kterou lze vyhledat ve statistických tabulkách. Pokud hledáme hodnotu náhodné veličiny, pro kterou se vyžaduje maximální dovolená pravděpodobnost výskytu, použijeme obráceného postupu.

V tabulkách pro určitou hodnotu pravděpodobnosti vyhledáme hodnotu výrazu $u = \frac{\bar{x} - \mu}{\delta} \sqrt{n}$ a potom vyčíslíme maximální hodnotu $\bar{x}$.

V případě kdy neznáme skutečný rozptyl δ musíme použít rozdělení t s hodnotou

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{N}}} \quad (34)$$

Toto rozdělení se nazývá Studentovo - podle článku podepsaného pod jménem Student. Toto rozložení odvodil pan William Sealy Gosset. Toto rozdělení závisí na počtu stupňů volnosti ν , které je závislé především na počtu měření. U opakovaného nezávislého měření je $\nu = n - 1$, kde n je počet naměřených hodnot. Ve vztahu je -1 kvůli odhadu střední hodnoty aritmetického průměru. Pak lze tedy konstatovat, že při velkém počtu měření ($N > 60$) se blíží nestranný odhad $\bar{s}^{-2}$ skutečnému rozptylu a Studentovo rozložení se podobá rozložení normálnímu. Na následujícím obrázku je vidět porovnání Studentova rozložení s normálním. Díky této skutečnosti se doporučuje ve většině literatuře opakovat počet měření minimálně v počtu 20 a více.

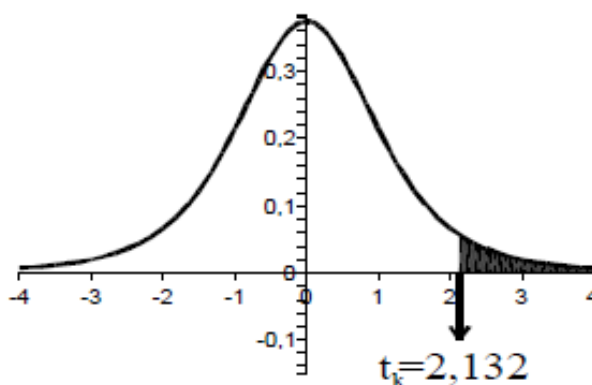


Obrázek 22 Studentovo a normální rozložení [28]

Pro určení přesného nestranného odhadu rozptylu je zbytečné v praxi provádět více jak 60 měření. Obě funkce jsou sudé a jejich hodnoty distribučních funkcí pro substituce t a u jsou ve statistických tabulkách. V důsledku velkého počtu hodnot v závislosti na počtu volnosti a hodnotě pravděpodobnosti jsou v tabulkách uvedeny jen určité hodnoty pro kritickou hodnotu $\alpha = q$ pro jednostranný test (uvažujeme pouze omezení zprava či zleva) a $\alpha = 2q$ pro oboustranný test [28].

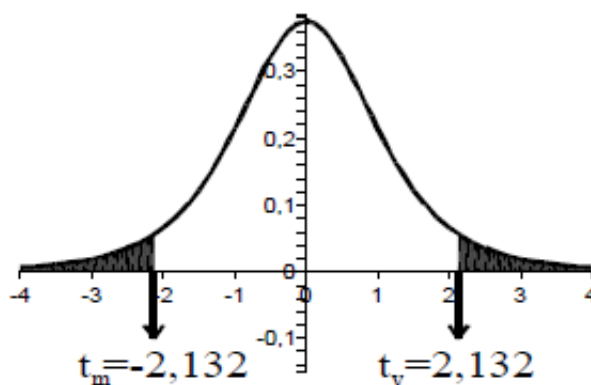
Jednostranný test se použije například, máme-li výběr hodnot věku skupiny občanů se střední hodnotou a nestranným odhadem a chceme otestovat, s jakou pravděpodobností vybereme jedince s určitým věkem menším, než kterému odpovídá zvolená kritická hodnota. Kritická hodnota určuje sílu testu. nejčastěji se volí $\alpha = 0,05$ nebo $\alpha = 0,1$.

Na následujícím obrázku je graficky znázorněn pravostranný test s kritickou hodnotou t_k pro stupeň volnosti $\nu = 4$ a $\alpha = q = 5\%$.



Obrázek 23 Pravostranný test [28]

Zatímco oboustranný test se uvažuje v případě, kdy náhodná veličina reprezentuje naměřenou veličinu, která se vyskytuje v okolí střední hodnoty a je třeba najít interval, ve kterém s určitou pravděpodobností bude ležet ona naměřená hodnota. Na obrázku č.22 je znázorněn oboustranný test pro $\nu = 4$ a $\alpha = 2q = 10\%$



Obrázek 24 Oboustranný test [28]

Šrafovaná část nyní tvoří 10 % ze všech hodnot. Kritická hodnota vlevo má opačné znaménko než hodnota vpravo.

Pro naměřený soubor hodnot, který má skutečnou střední hodnotu a rozptyl, se nejdříve stanoví výběrový průměr a nestranný odhad empirického rozptylu, ze kterého se vypočítá celková směrodatná odchylka. Pokud je výsledek měření uveden ve tvaru střední aritmetické hodnoty $\pm$ násobky směrodatné odchylky, pravděpodobnost, že naměřená hodnota leží v tomto intervalu je následující [28].

Pravděpodobnost výskytu náhodné veličiny v intervalu $(\mu - \sigma; \mu + \sigma)$

$$\begin{aligned} P(\mu - \sigma < X < \mu + \sigma) &= \\ &= \phi\left(\frac{\mu + \sigma - \mu}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{\mu - \sigma - \mu}{\sigma}\right) = \phi(1) - \phi(-1) = \\ &= \phi(1) - (1 - \phi(1)) = 2\phi(1) - 1 = 2 \cdot 0,8413 - 1 = 0,6826 \end{aligned}$$

Hodnoty distribuční funkce $\phi(u)$ lze najít ve statistických tabulkách [28]. Během úpravy je využito vlastnosti normálního rozložení $\phi(-u) = 1 - \phi(u)$.

Z výsledku je patrné, že náhodná hodnota se vyskytuje v intervalu omezeného směrodatnou odchylkou pouze s pravděpodobností 68,3%. To není příliš velká hodnota. Proto se v praxi vypočítané hodnoty nejistoty násobí koeficientem rozšíření, aby jsme zvýšili pravděpodobnost výskytu naměřené hodnoty. Pro normální rozložení se používá násobky 2σ a 3σ .

Pro tyto intervaly odpovídá pravděpodobnost:

$$\begin{aligned} P(\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma) &= \\ &= \phi\left(\frac{\mu + 2\sigma - \mu}{\sigma}\right) - \phi\left(\frac{\mu - 2\sigma - \mu}{\sigma}\right) = \phi(2) - \phi(-2) = \\ &= \phi(2) - (1 - \phi(2)) = 2\phi(2) - 1 = 2 \cdot 0,9772 - 1 = 0,9544 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) &= \\ &= 2\phi(3) - 1 = 2 \cdot 0,9986 - 1 = 0,9973 \end{aligned}$$

Při použití intervalu dvojnásobku směrodatné odchylky se pravděpodobnost výskytu zvýšila na hodnotu 95,44%. Pro praktické určení rozšířené nejistoty je tato pravděpodobnost dostačující. Při intervalu třínásobku směrodatné odchylky lze konstatovat, že naměřená hodnota bude s 99,73% v tomto intervalu.

4.2 Teorie nejistot měření

4.2.1 Definice

Chyba měření - rozdíl naměřené a pravé hodnoty měřené veličiny. Pokud známe skutečnou (pravou hodnotu), lze chybu měření vyčíslit. Ve většině případů ji ale neznáme a chybu měření vyjádříme jako nejistotu měření.

Konvenčně pravá hodnota - hodnota, nahrazující hodnotu pravou. Většinou se jedná o referenční hodnoty etalonu nebo hodnotu získanou přesnějšími přístroji.

Systematická chyba - chyba měření, která se během měření zůstává stejná a nedá se lehce odstranit. Lze ji do jisté míry kompenzovat vhodnou korekcí. Celková systematická chyba se skládá ze systematické chyby metody měření a systematických chyb měřících přístrojů.

Chyba měřících přístrojů - maximální přípustná chyba měření deklarovaná výrobcem přístroje. Tato chyba se skládá z chyby směrové (kosinový nástavec) nebo spektrální. Systematická chyba měřících přístrojů se dá korigovat pravidelnými kalibracemi.

Kalibrace - proces ověření standardní nejistoty měřícího přístroje. Každý protokol o kalibraci musí obsahovat hodnoty systematických chyb a hodnotu celkové nejistoty měření. Tato nejistota bývá často rozšířená. Tato skutečnost musí být zohledněna při stanovení celkové nejistoty měření, ve kterém je přístroj použit.

Korekce - zvýšení přesnosti a snížení celkové nejistoty měřícího přístroje odstraněním systematických chyb. Toho je docíleno kalibrační křivkou - křivka opačného znaménka než křivka systematických chyb.

Náhodná chyba - nepredikovatelně vyskytující se chyba během měření, jejíž příčina není vždy známá. Do jisté míry přispívá k celkové nejistotě měření. Tato chyba se dá eliminovat zvýšením počtu měření. Počet měření úměrně snižuje směrodatnou odchylku střední hodnoty.

Pravděpodobnost - funkce popisující relativní četnost výskytu určité jevu. Nabývá hodnoty $\langle 0,1 \rangle$, kdy 0 představuje jev nemožný a 1 jev jistý. Například při hodu kostkou může nastat šest možností. Pravděpodobnost, že padne sudé číslo je dáno poměrem četností toho jevu ku celkovému počtu možností. V našem případě jsou to 3/6 možností, které odpovídají pravděpodobnosti 50 %.

Náhodná veličina - hodnota, která svojí četností odpovídá určité pravděpodobnosti.

Kritická hodnota náhodné veličiny - hodnota určující meze intervalu, do kterého spadá náhodná veličina s určitou pravděpodobností. U normálního rozložení závisí na směrodatné odchylce a střední hodnotě. U Studentova rozložení dále na stupních volnosti.

Distribuční funkce - funkce vyjadřující pravděpodobnost jevu pro všechny hodnoty menší než $P(x < X)$.

Rozložení pravděpodobnosti - funkce popisující relativní četnost výskytu. Rozdělení pravděpodobností může být normální, rovnoměrné, trojúhelníkové a další. Tato funkce se často nazývá frekvenční a její integrací získáváme distribuční funkci [30].

4.2.2 Nejistota typu U_A

Mezi první typ nejistoty patří již několikrát zmíněná směrodatná odchylka střední hodnoty z výběrového souboru dat. Pro více jak 20 měření se absolutní nejistota typu A vypočítá následovně.

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (35)$$

kde n je rozsah souboru, x_i je i -tý prvek souboru a $\bar{x}$ je aritmetický průměr souboru

Relativní hodnota nejistoty u_A

$$u_A = \frac{U_A}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot 100\% \quad (36)$$

Klasická analýza za předpokladu normálního rozdělení se používá při více jak 20 nezávislých měření. Pokud tuto podmínku nelze dodržet, musí se použít tzv. analýza malých rozsahů. Mezi tyto metody patří Box-Coxova transformace nebo Hornův postup [29].

Tabulka 10 Příklad výpočtu nejistoty typu A

i	x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	10,4	0,37	0,137
2	10	-0,03	0,001
3	9,8	-0,23	0,053
4	10,8	0,77	0,593
5	9,4	-0,63	0,397
6	9,6	-0,43	0,185
7	9,1	-0,93	0,865
8	10,2	0,17	0,029
9	9,3	-0,73	0,533
10	11	0,97	0,941
11	11	0,97	0,941
12	10,8	0,77	0,593
13	9,8	-0,23	0,053
14	9,7	-0,33	0,109
15	10,2	0,17	0,029
16	9	-1,03	1,061
17	9,9	-0,13	0,017
18	10,6	0,57	0,325
19	10,5	0,47	0,221
20	9,5	-0,53	0,281

Tabulka obsahuje 20 naměřených hodnot.

Rozsah souboru $n = 20$

Aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 10,03$

Součet čtverců $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 7,362$

Absolutní nejistota typu u_A se vypočítá:

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{20(20-1)} \cdot 7,362} = 0,373$$

Relativní nejistota typu A

$$u_A = \frac{U_A}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{0,373}{10,03} \cdot 100\% = 3,72\%$$

Výsledek ve tvaru $x = (\bar{x} \pm u_A) = (10,03 \pm 3,72\%)$

V případě, kdy nelze provést více jak 20 měření, musíme použít tzv. **Hornův postup**. Hornův postup lze použít pro rozsahy v intervalu $4 \leq n \leq 20$ [31]. Metoda spočívá ve stanovení tzv. pivotů - hodnot stanovených hloubkou pivotů, která závisí na rozsahu souboru.

Postup je následující. Naměřené hodnoty seřadíme, vypočítáme hloubku pivotů H a určíme horní a dolní pivot - hodnoty na H -té a $(n-1)-H$ pozici v řadě. Funkce int zaokrouhluje na celá čísla dolů. Střední hodnotu určíme jako pivotovou polosumu těchto hodnot. Rozdíl horní a dolního pivotu se nazývá pivotové rozpětí. V tabulce č.11 jsou vypočítané hodnoty $t_{L,1-\alpha,n}$ pro $4 \leq n \leq 20$ a pro $1-2\alpha=0,95$ a $0,995$ (31).

Tabulka 11 Kvantily T_L rozložení

n	0,95	0,995
4	0,555	1,331
5	1,370	5,805
6	0,759	1,968
7	0,550	1,211
8	0,469	0,890
9	0,688	1,575
10	0,523	1,051
11	0,452	0,859
12	0,423	0,697
13	0,497	0,945
14	0,437	0,776
15	0,399	0,685
16	0,374	0,591
17	0,421	0,774
18	0,380	0,650
19	0,361	0,575
20	0,337	0,519

Hornův postup

1. Seřadíme prvky od nejmenší hodnoty po největší

$$2. \text{ Hloubka pivotu } H = \frac{\text{int}\left(\frac{n+1}{2} + 1\right)}{2} \quad (37)$$

3. Zvolíme dolní pivot - hodnota na pozici H
horní pivot - hodnota na pozici $(n+1) - H$

$$4. \text{ Pivotová polosuma } P_L = \frac{x_D + x_H}{2} \quad (38)$$

$$5. \text{ Pivotové rozpětí } R_L = x_H - x_D \quad (39)$$

$$6. \text{ Relativní nejistota } u_A = \frac{R_L \cdot t_{L,1-\alpha,n}}{P_L} \quad (40)$$

$$7. \text{ Výsledek ve tvaru } x = (P_L \pm u_A) \quad (41)$$

Příklad aplikace Hornova postupu pro soubor naměřených 10 hodnot navíc zatížených značnou chybou měření [31].

6,5	5,8	16,7	6,4	7,0	6,3	7,0	9,2	6,7	6,7
-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Nyní seřadíme prvky od nejmenší hodnoty po největší

5,8	6,3	6,4	6,5	6,7	6,7	7,0	7,0	9,2	16,7
-----	-----	------------	-----	-----	-----	-----	------------	-----	------

Stanovíme hloubku pivotů

$$H = \frac{\text{int}\left(\frac{n+1}{2} + 1\right)}{2} = \frac{\text{int}\left(\frac{10+1}{2} + 1\right)}{2} = \frac{\text{int}(6,5)}{2} = \frac{6}{2} = 3$$

Určíme horní a dolní pivoty

$$x_D = x_H = 6,4$$

$$x_H = x_{(n+1)-H} = 7,0$$

Nyní vyčíslíme pivotovou polosumu a rozpětí

$$P_L = \frac{x_D + x_H}{2} = \frac{6,4 + 7}{2} = 6,7$$

$$R_L = x_H - x_D = 7 - 6,4 = 0,6$$

Stanovíme nejistotu typu A

$$u_A = \frac{R_L \cdot t_{L,1-\alpha,n}}{P_L} \cdot 100\% = \frac{0,6 \cdot 0,668}{6,7} \cdot 100\% = 5,98\%$$

Nyní lze konstatovat, že správná hodnota leží v tomto intervalu s pravděpodobností 95 %.

$$x = (P_L \pm u_A) = (6,7 \pm 5,98\%) = (6,7 \pm 0,4)$$

Poznámka: Nejistoty typu A bývají nerozšířené. To znamená, že pravděpodobnost výskytu náhodné veličiny je 68,3%. Hornova metoda poskytuje už rozšířenou hodnotu nejistoty typu A (pro normální rozdělení $k_u = 2$).

Pokud na soubor hodnot aplikujeme klasickou analýzu dostaneme tyto výsledky:

Střední hodnotu:

$$\bar{x} = 7,83$$

Nejistota typu U_A :

$$\begin{aligned} U_A &= \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{10(9)} \cdot 94,74} = 1,026 \end{aligned}$$

$$u_A = \frac{U_A}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{1,026}{7,83} \cdot 100\% = 13,1\%$$

Rozdíly jsou značné. Navíc nejistota pomocí Hornova postupu je již rozšířená.

Porovnání klasické analýzy a Hornovy metody.

Střední hodnota klasické metody se spočítá jako aritmetický průměr zatímco u Hornovy metody střední hodnotu vyjadřuje pivotová polosuma. Nejistota typu A představuje u klasické metody kvadratickou směrodatnou odchylku výběru. Zatímco u Hornovy metody je vyjádřena jako poměr součinu pivotového rozpětí s hodnotou kvantilu z tabulek a pilotové polosumy. Z příkladu je patrné, že klasickou metodu nelze pro malé soubory hodnot použít [31].

4.2.3 Nejistota typu U_B

Zatímco nejistota typu A se stanovuje statistickými metodami, nejistoty typu B zahrnují systematické chyby. Tato nejistota neklesá s počtem měření jako nejistota A a skládá se několika dílčích chyb jako je chyba přístroje, metody nebo vyhodnocení měření. Pokud není možné například v terénu opakovat měření, celková nejistota je dána pouze nejistotou typu B.

Ve velkém množství případů se omezuje nejistota typu B pouze na maximální přípustnou chybu měřicího přístroje. Tato chyba - nejistota bývá stanovena pro rovnoměrné rozložení a bývá rozšířená konstantou $k = \sqrt{3}$. Tato konstanta rozšiřuje hodnotu směrodatné odchylky pro pravděpodobnost výskytu přibližně 95 % (pro normální rozložení $k_u = 2$) [32].

Pokud je dána výrobcem třída přesnosti, lze nejistotu vyjádřit tímto vztahem:

$$u_B = \frac{\delta_m}{k_u} \quad (42)$$

Pro přístroj s udávanou přesností měření 10 % je hodnota nejistoty typu B:

$$u_B = \frac{\delta_m}{k_u} = \frac{10\%}{\sqrt{3}} = 5,77\% \quad (43)$$

Tato nejistota tedy definuje interval ve kterém se nachází náhodně změřená hodnota s pravděpodobností 55 %.

U starších analogových přístrojů se tato nejistota dále rozšiřuje pomocí dílčích nejistot.

Pokud známe rozlišení měřicího přístroje, vyjádříme dílčí nejistotu rozlišení:

$$u_{B1} = \frac{U_{res}}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (44)$$

Ve jmenovateli je 2 z důvodu rozdělení intervalu rozlišení na dvě části.

Další nejistota vyjadřuje nepřesnost čtení údajů ze stupnice:

$$u_{B2} = \frac{U_{R.E}}{2\sqrt{3}} \quad (45)$$

kde se nejčastěji odhaduje $U_{R.E} \sim 0,1$ (pro zkušeného pracovníka).

U analogových přístrojů je nutné zohlednit nastavený rozsah měření. Udávaná třída přesnosti neudává relativní nejistotu, ale pouze definuje absolutní chybu vztaženou na nastavený rozsah. jako názorný příklad si vezmeme voltmetr s třídou přesnosti 1. naměříme hodnotu 50V na 100V rozsahu. Chyba měření se spočítá následovně.

Relativní chyba

$$\delta_m = \frac{T_p \cdot rozsah}{U_{nam}} = \frac{1\% \cdot 100}{50} = 2\% \quad (46)$$

Závěrem lze konstatovat, že nejistotu měření analogových přístrojů lze minimalizovat vhodným nastavením rozsahu, tak aby byla výchylka maximální. Většina dnešních měřicích přístrojů je digitální [32].

U digitálních měřicích přístrojů se udává maximální přípustná chyba ve tvaru procentuální chyby z naměřené hodnoty a chyby přesnosti udávanou v digitech. Výrobce udává tyto přesnosti pro jednotlivé rozsahy měření a jsou nejčastěji nalezeny v uživatelské příručce na poslední straně.

Chyba chroma metru CL-200 je udávána:

$$z_{\max} \pm (2\% + 5 \text{ digitů})$$

Při naměření hodnoty 500,5 lx se nejistota typu vyjádří jako:

$$z_{\max} = 0,02 \cdot 500,5 + 5 \cdot 0,1 = 10,51 \text{ lx}$$

$$z_{\max} = \frac{Z_{\max}}{E} \cdot 100\% = \frac{10,51}{500,5} \cdot 100\% = 2,10\%$$

$$u_B = \frac{z_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{2,10}{\sqrt{3}} = 1,21\%$$

V případě kdy je maximální chyba přístroje udávána horní a dolní mezí, stanoví se nejistota následovně [32].

$$u_B = \frac{\frac{z_{\max} + z_{\min}}{2}}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

Pro vyjádření výsledné nejistoty se používá Gaussův zákon šíření nejistot. Pokud jsou dílčí nejistoty na sobě nezávislé, sčítají se nejistoty kvadraticky.

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2} \quad (48)$$

V případě, kdy dílčí nejistoty jsou na sobě závislé, použijeme tzv. kovarianční zákon šíření nejistot.

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2 + 2 \cdot \sum_{i=1, k < i}^n u_{Bi} \cdot u_{Bk} \cdot r_{j,k}} \quad (49)$$

kde $r_{j,k}$ představuje korelační koeficient - míru závislosti dvou nejistot v intervalu $\langle -1, +1 \rangle$.

Při uvažování dvou na sobě závislých nejistot u_{B1} a u_{B2} a korelačního koeficientu $r_k = +1$ přechází kovariační zákon v aritmetický součet obou nejistot [30].

$$u^2 = u_1^2 + u_2^2 + k_r \cdot u_1 \cdot u_2 = u_1^2 + u_2^2 + 2 \cdot u_1 \cdot u_2$$

$$u^2 = (u_1 + u_2)^2$$

$$u = u_1 + u_2$$

Stejná situace nastane pro korelační koeficient $r_k = -1$.

$$u^2 = u_1^2 + u_2^2 + k_r \cdot u_1 \cdot u_2 = u_1^2 + u_2^2 - 2 \cdot u_1 \cdot u_2$$

$$u^2 = (u_1 - u_2)^2$$

$$u = u_1 - u_2$$

Lze tedy konstatovat že při plné korelaci dvou nejistot přechází kvadratický součet nejistot v součet aritmetický. Zákon šíření nejistoty v lineárním tvaru:

$$u_B = \sum_{i=1}^n u_{B_i} \quad (50)$$

Korelační koeficienty se v praxi často odhadují z výsledků opakovaných měření. Při jejich zanedbání může dojít k rozšíření či naopak zúžení výsledné nejistoty. Ve výsledku se volí kompromis, kdy méně závislé nejistoty se uvažují jako nezávislé a uvažujeme pouze členy s velkou mírou vzájemné korelace.

V rovnici č. 47 až 49 se uvažuje šíření nejistot bez tzv. citlivostních koeficientů, které respektují odezvu měřicí soustavy [33]. Matematicky je citlivostní koeficient $C_{b,i}$ definován:

$$C_{j,i} = \frac{\partial Y_j(x_1 \dots x_n)}{\partial X_{j,i}} \quad (51)$$

kde Y_j je výstupní funkce hledané hodnoty/nejistoty nepřímého měření

$X_{j,i}$ je vstupní naměřená veličina přímou metodou.

Gaussův zákon šíření nejistot vyjádřit v obecném vztahu:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_{j,i}^2 \cdot u_{B_i}^2 + 2 \cdot \sum_{i=1, k < i}^n C_{j,i} \cdot C_{j,k} \cdot u_{B_i} \cdot u_{B_k} \cdot r_{j,k}} \quad (52)$$

Pro názorný příklad je uveden postup stanovení nejistoty měřeného výkonu nepřímou metodou pomocí měření napětí a odporu rezistoru. Výkon se nepřímo vypočítá vztahem:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (53)$$

Při uvažování nulových korelačních koeficientů je výsledná dílčí nejistota dána nejistotou měření napětí a odporu vztahem:

$$\begin{aligned} \frac{u(P)}{P} &= \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial V} \cdot \frac{U(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial R} \cdot \frac{U(R)}{R}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{2 \cdot U(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{U(R)}{R}\right)^2} \\ &= \sqrt{4 \cdot u(V)^2 + u(R)^2} \end{aligned}$$

Pro přehlednost je napětí značeno symbolem V . Ze vztahu je patrné, že podíl nejistoty měření napětí při nepřímém určení nejistoty měřeného výkonu je větší než podíl nejistoty měřeného odporu. U stanovení nejistot veličin měřených nepřímou metodou je vždy nutné uvažovat citlivostní koeficienty [33].

4.2.4 Kombinovaná nejistota U_C

Kombinovaná nejistota typu C představuje výslednou hodnotu nejistot typu A a B pomocí Gaussova zákona šíření nejistot.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (54)$$

Tato nejistota udává interval, ve kterém se nachází správná hodnota pouze s pravděpodobností přibližně 68,3 % (normální rozdělení). Proto se zavádí tzv. rozšířená nejistota, které pokrývá interval s 95,4 % pravděpodobností výskytu skutečné hodnoty [30].

$$u = k_u \cdot u_C \quad (55)$$

kde k_u je koeficient rozšíření.

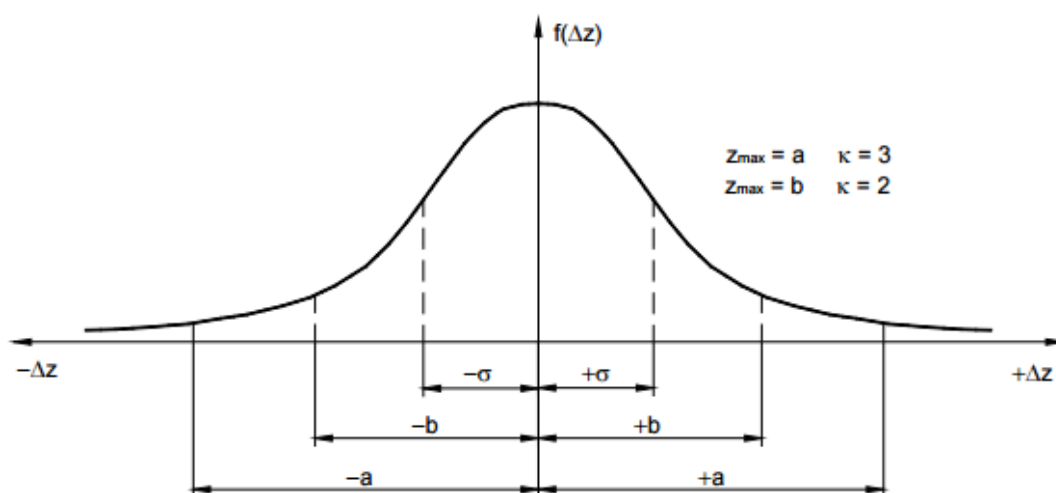
Koeficient rozšíření závisí na zvoleném rozložení pravděpodobnosti podle následující tabulky č.12:

Rozložení pravděpodobnosti	Z_{max} [%]	k_u
Normální - Gaussovo - užší interval	$\pm b$	2
Normální - Gaussovo - širší interval	$\pm a$	3
Rovnoměrné - pravouhlé	$\pm a$	1,73
Trojúhelníkové - Simpsonovo	$\pm a$	2,45

Tabulka 12 Tabulka koeficientů rozšíření k_u [29]

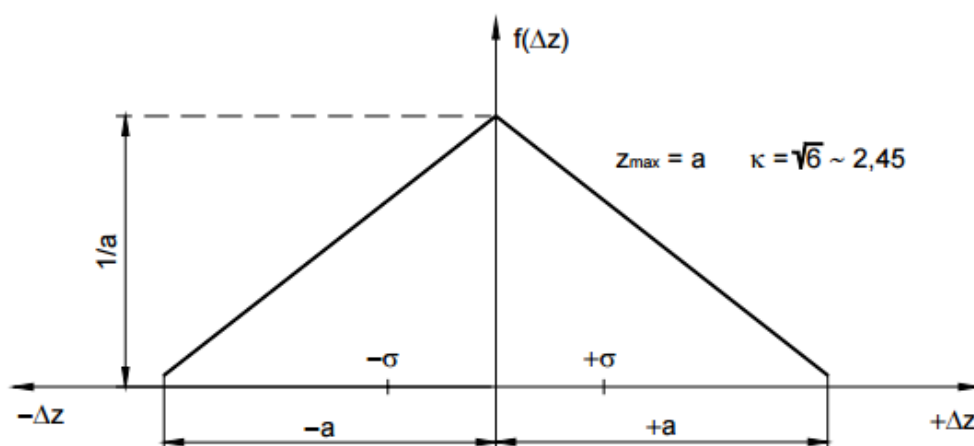
Na následujícím obrázcích č.25 až 28 jsou znázorněny průběhy jednotlivých rozdělení pravděpodobností.

Normální (Gaussovo) rozložení pravděpodobnosti.



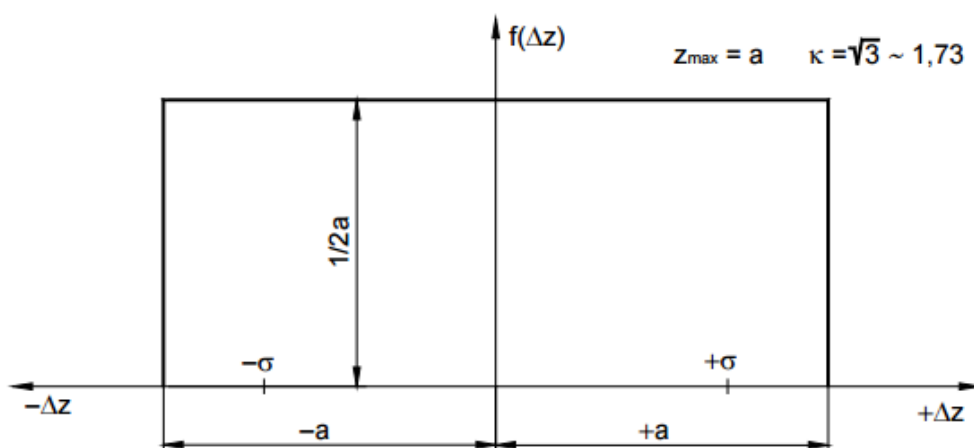
Obrázek 25 Rozložení normální (Gaussovo) [34]

Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení pravděpodobnosti.



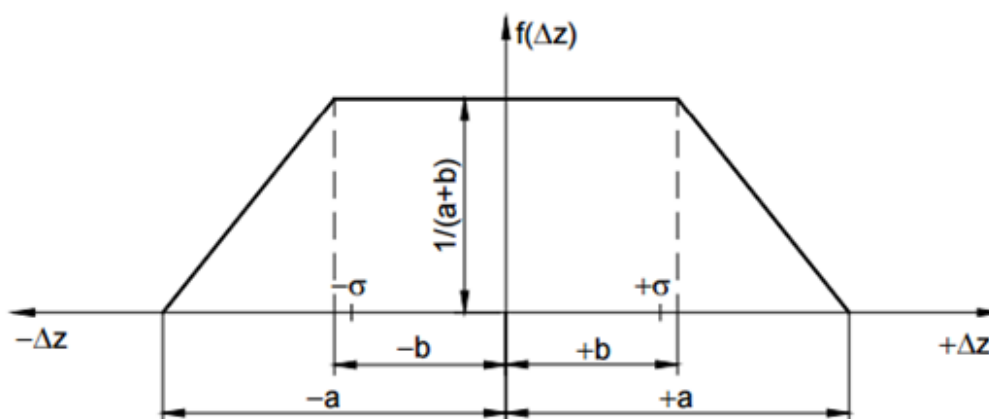
Obrázek 26 Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozložení [34]

Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení pravděpodobnosti.



Obrázek 27 Rovnoměrné (pravoúhlé) rozložení [34]

Lichoběžníkové rozdělení pravděpodobnosti.



Obrázek 28 Lichoběžníkové rozdělení [34]

5 NEJISTOTY VE FOTOMETRII

V této kapitole jsou popsány základní chyby fotometrických přístrojů, které se podílejí na celkové nejistotě typu u_B . Tyto chyby jsou nejčastěji udávány výrobcem přístroje nebo institucí, která provádí pravidelné kalibrace. Značení jednotlivých chyb vychází z norem CIE/ISO. V následující tabulce je výčet jednotlivých chyb a jejich hodnot pro laboratorní fotometrické přístroje, které patří k těm nejlepším [30].

Druh chyby	Značení	Luxmetry	Jasoměry
Spektrální chyba	f_1''	2%	3%
	$f_1(Z)_{max}$	0,60%	–
Směrová chyba luxmetru (chyba směrové citlivosti)	f_2	1,50%	–
Prostorová	$f_{2,o}$	10%	–
Válcová	$f_{2,z}$	5%	–
Poloválcová	$f_{2,zh}$	5%	–
Přímá odezva jasoměru	$f_{2(g)}$	–	2%
Chyba způsobená okrajem jasoměru	$f_2(u)$	–	1%
Nelinearita	f_3	0,20%	0,20%
Chyba zobrazení jednotky	f_4	0,20%	0,20%
Nestabilita	f_5	0,20%	0,10%
Vliv teploty	f_6		
Činitel teploty	l	0,2 %/K	0,2 %/K
Modulované záření	f_7	0,10%	0,10%
Chyba polarizace světla	f_8	2%	0,10%
Chyba nerovnoměrného osvětlení snímací plochy	f_9		
Chyba přebuzení	f_{10}		
Crest factor	C		
Chyba změny rozsahu	f_{11}	0,10%	0,10%
Chyba zaostření jasoměru	f_{12}	–	0,40%
Frekvenční chyba			
Dolní limit	f_L	33 Hz	33 Hz
Horní limit	f_U	10^5 Hz	10^5 Hz
Odezva na UV záření	u	0,20%	0,20%
Odezva na IR záření	r	0,20%	0,20%
Stárnutí fotočlánku			
Vliv napájecího napětí			
Vliv vnějšího magnetického rušení (EMI)			

Tabulka 13 Chyby fotometrických přístrojů [30]

Všechny uvedené chyby představují dílčí nejistoty u_B , které jsou rozšířené. Výsledná nejistota se určí pomocí Gaussova zákona a následně rozšíří koeficientem rozšíření ($k_u = 2$).

5.1 Parametry fotočlánku

K pochopení základních chyb fotometrů je zapotřebí si vysvětlit následující parametry.

5.1.1 Spektrální intenzita vyzařování

Spektrální intenzita vyzařování udává velikost vyzařeného toku ϕ_E (W) na určité vlnové délce. Značí se $S(\lambda)_Z$ a jednotku má $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$. CIE norma udává hodnoty spektra pro normované světla typu A, D50, D65, D75 a F1.

Typ A odpovídá teplotnímu zářiči o teplotě chromatičnosti 2856 K. Denní světlo se označuje písmenem D a následující číslice popisuje teplotu chromatičnosti (75 odpovídá 7500 K). Spektrum zářiče F odpovídá kompaktní nebo lineární zářivce.

Měrná spektrální intenzita vyzařování zářiče Z se určí:

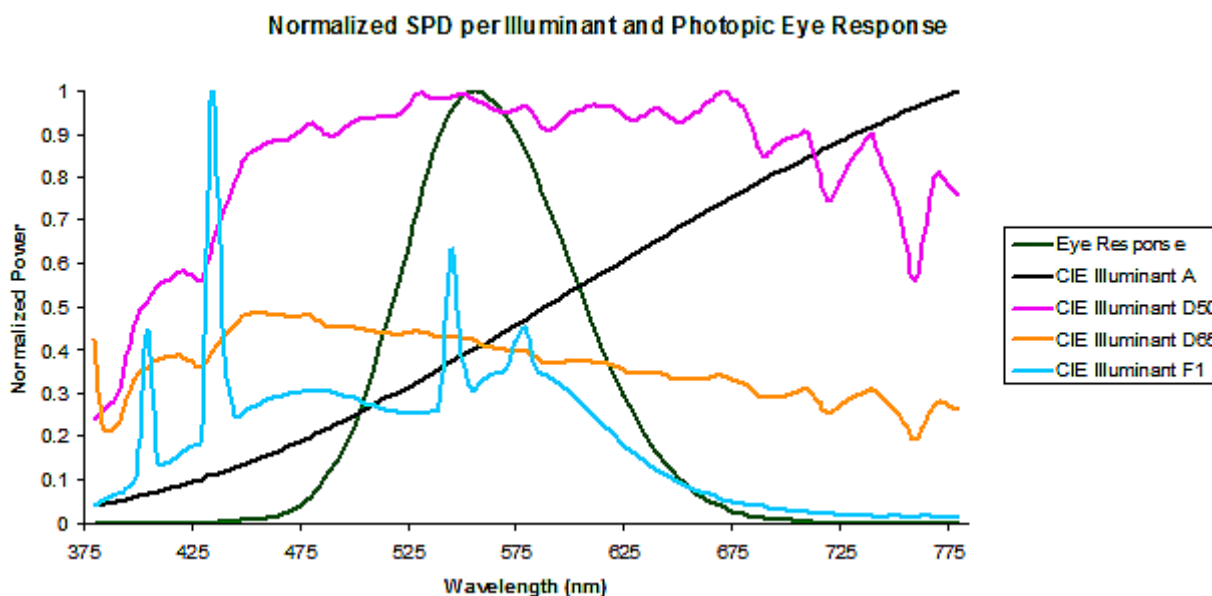
$$s_Z(\lambda)_{rel} = \frac{S_Z(\lambda)}{S_m} \quad (56)$$

kde S_m je největší hodnota intenzity vyzařování v daném spektru.

Integrální tvar:

$$S_Z = \sum_i^n S(\lambda_i)_Z \Delta\lambda \quad (57)$$

Na následujícím obrázku jsou znázorněny spektra jednotlivých zářičů [35].

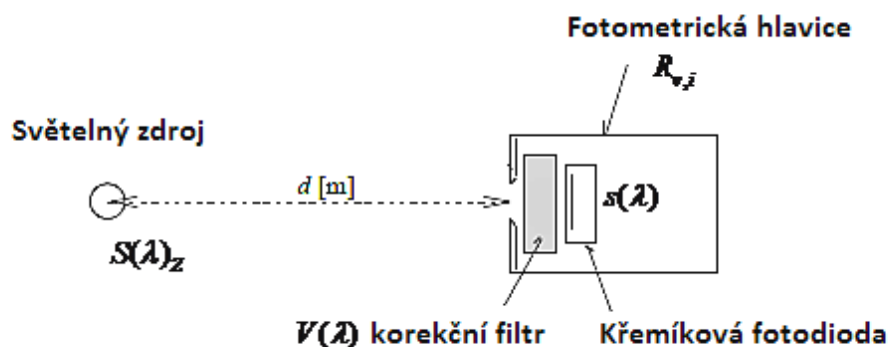


Obrázek 29 Spektrum normovaných zářičů CIE [35]

Měření měrné spektrální intenzity by mělo probíhat minimálně s krokem $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$. Hodnoty pro CIE normované zářiče jsou uvedeny v příslušných tabulkách s krokem $\Delta\lambda = 5 \text{ nm}$.

5.1.2 Spektrální citlivost fotočlánku

Při dopadu elektromagnetického záření o určité vlnové délce, vyvolá u fotočlánku vznik tzv. fotoproudu. Pro popis míry vzniku fotoproudu se používá absolutní spektrální citlivost fotočlánku $s(\lambda)$, která má jednotku A/W, a měrná fotometrická citlivost $R_{v,f}$ s jednotkou A/lm [36].



Obrázek 30 Konstrukce fotometrické hlavice [36]

Měrná fotometrická citlivost fotočlánku je dána vztahem:

$$R_{v,f} = \frac{\int_{\lambda} S(\lambda)_z \cdot s(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{\lambda} S(\lambda)_z \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (58)$$

kde $S(\lambda)_z$ je spektrální intenzita vyzařování měřeného světla Z ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$)

$s(\lambda)$ je absolutní spektrální citlivost fotočlánku (A/W)

$V(\lambda)$ je normalizovaná spektrální citlivost lidské oka (-)

K_m je maximální spektrální účinnost (683 lm/W)

Pokud známe celkovou osvětlovanou plochu $A(\text{m}^2)$ fotočlánku, lze vyjádřit celkovou fotometrickou citlivost článku:

$$R_{v,i} = A \cdot R_{v,f} \quad (59)$$

Tento údaj se využívá při kalibraci fotočlánku na fotometrické lavici, kde d je vzdálenost kalibrovaného bodového světelného zdroje od fotočlánku a y je velikost fotoproudu (A). Potom dostaneme hodnotu svítivosti:

$$I_v = d^2 \cdot \frac{y}{R_{v,i}} \quad (60)$$

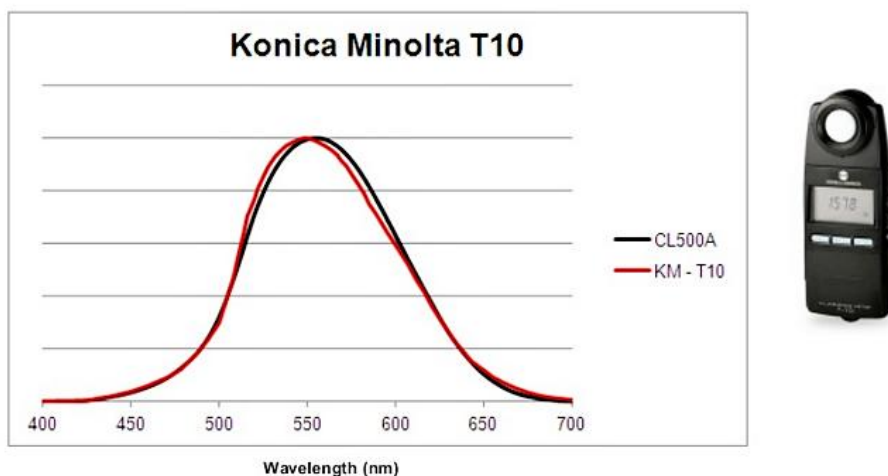
Celková měrná citlivost se měří pro normovaný světelný zdroj typu A o teplotě chromatičnosti 2856 K.

5.2 Chyby fotometru

V kapitole 3 byl přibližně nastíněn princip, na jakém fungují fotometrické přístroje. Aby bylo možné vysvětlit vznik jednotlivých chyb fotometru, je nutný detailnější popis jeho funkce. Jak bylo popsáno v kapitole 2, existují veličiny spektrální a integrální. V této kapitole se budou vyskytovat především veličiny spektrální a to jak fotometrické, tak i radiometrické.

5.2.1 Spektrální chyba

Tato chyba se označuje celým jménem jako odchylka relativní spektrální citlivosti od $V(\lambda)$ funkce. Značí se symbolem f_1' a udává se v %. Na obrázku č.25 je znázorněn rozdíl spektrální citlivosti chroma metru Konica Minolta T10, který využívá sadu skleněných filtrů, a spektrometru Konica Minolta CL500A, který využívá přesné softwarové úpravy spektrální citlivosti. Spektrální chyba laboratorních luxmetru činí přibližně 2 % (jasoměr 3 %).



Obrázek 31 Porovnání spektrální citlivosti Konica Minolta T10 a spektrometru CL500A [37]

Spektrální chybu f_1' lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$f_1' = \frac{\sum_i^n |s^*(\lambda_i)_{rel} - V(\lambda_i)| \Delta \lambda}{\sum_i^n V(\lambda_i) \Delta \lambda} \cdot 100\% \quad (61)$$

kde $s^*(\lambda)_{rel}$ je korigovaná relativní spektrální citlivost fotometru na typ světla A:

$$s^*(\lambda)_{rel} = \frac{\sum S_A(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)}{\sum S_A(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}} \cdot s(\lambda)_{rel} \quad (62)$$

Protože výraz $\left(\sum_i^n V(\lambda_i) \Delta \lambda \right)^{-1}$ je roven hodnotě přibližně 0,98354, potom lze vztah zjednodušit:

$$f_1' = 0,98354 \cdot \sum_i^n |s^*(\lambda_i)_{rel} - V(\lambda_i)| \Delta \lambda \cdot 100\% \quad (63)$$

Ve vztahu č.60 a 62 je uvedena již korigovaná hodnota normalizované relativní spektrální citlivosti $s^*(\lambda)_{rel}$. Tyto hodnoty stanovuje příslušná instituce, provádějící kalibraci fotometru. Špičková kalibrační pracoviště pracují s monochromátorem s paprskem o průměru 1 mm, kterým se zjistí měrná citlivost měřeného fotočlánku (NIST Comparator Facility). Paprsek se posouvá po přijímací ploše fotočlánku a získané hodnoty se potom zprůměrují. Spektrální citlivost fotometru se časem mění. Proto je nutné fotometrické přístroje pravidelně kalibrovat. Kalibrace se provádí pro normalizovaný typ světla A [36].

Pro měření světelných zdrojů s odlišným spektrem než typu A, pro které byl přístroj kalibrován, vzniká chyba, která se označuje $f_1(Z)$, kde Z je spektrum měřeného světla [30].

$$f_1(Z) = a(Z) - 1 \quad (64)$$

kde $a(Z)$ je korekční součinitel pro světlo Z a je dán vztahem:

$$a(Z) = \frac{s_Z}{s_A} = \frac{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}}{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)} \cdot \frac{\sum S_A(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)}{\sum S_A(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}} \quad (65)$$

kde $S_Z(\lambda_i)$ je vyzařované spektrum měřeného světelného zdroje Z

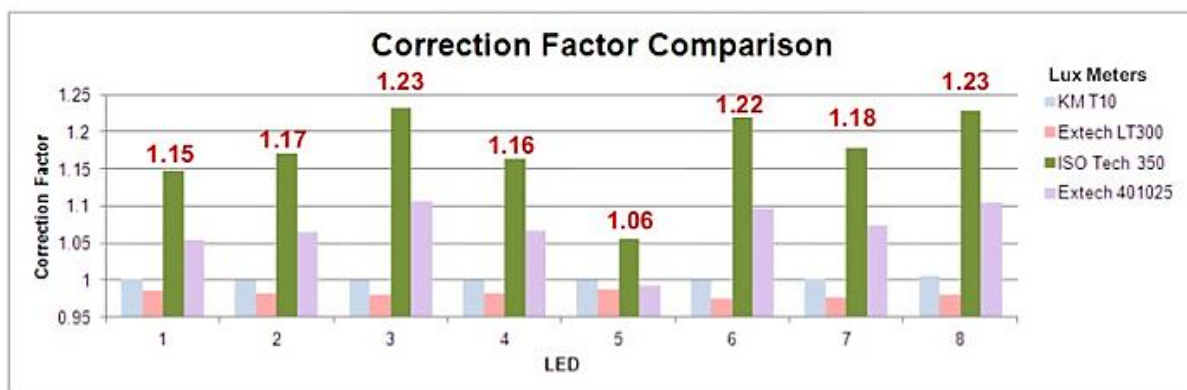
$S_A(\lambda_i)$ je vyzařované spektrum normalizovaného typu světla A.

Korekčním činitelem lze korigovat přímo naměřené hodnoty osvětlenosti či jasů dle vztahu:

$$E = \frac{E(Z)_{nam}}{a(Z)} \quad (66)$$

Poznámka: někdy se také uvádí korekční faktor CCF (Colour Correction Factor nebo Mismatch Correction Factor). Jedná se o převrácenou hodnotu korekčního součinitele $a(Z)$. Používá se pro korigování naměřených hodnot.

V následujícím obrázku č.26 jsou znázorněny korekční činitele pro měření LED (luxmetry jsou kalibrovány na světlo typu A). Korekční faktor je určen průměrem osmi hodnot pro osm LED o různém spektru. Ze získaných hodnot lze konstatovat, že Konica Minolta T10 dokáže měřit LED světelné zdroje bez větší spektrální chyby. Ostatní luxmetry nejsou pro tato měření vhodná.



Obrázek 32 Korekční faktory pro jednotlivé typy luxmetrů pro měření LED [37]

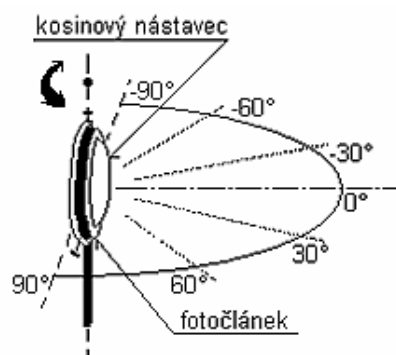
Doporučení pro stanovení spektrální chyby

- Chyba $f_1(Z)$ nabývá největší hodnoty pro normalizovaný typ světla D75. Je tedy vhodné při stanovení nejistot luxmetru nebo jasoměru počítat s touto maximální chybou, která se označuje jako $f_1(Z)_{\max}$.
- Hodnota f_1' a $f_1(Z)_{\max}$ je dána výrobcem nebo kalibračním pracovištěm. Pokud chceme naprosto přesnou hodnotu spektrální chyby, musíme stanovit hodnotu $f_1(Z)$ dle uvedených vztahů pro měřený světelný zdroj s přesně naměřeným spektrem Z .
- Chyby f_1' a $f_1(Z)_{\max}$ se sčítají Gaussovým zákonem šíření nejistot. Korelační koeficienty se v praxi zanedbávají a nebo odhadují ze zkušenosti.

5.2.2 Směrová chyba luxmetru

Celým názvem se označuje jako chyba směrové citlivosti fotometrické hlavice. Hlavice fotometrických přístrojů se vybavují směrově selektivními prvky. Pro měření rovinné osvětlenosti se využívá jako směrového korektoru kosinusový nástavec (dříve odnímatelný).

Směrová chyba je stanovena kalibračním pracovištěm nebo výrobcem přístroje. Zpravidla obsahuje i chybu nelinearity a chyby změny rozsahu.



Obrázek 33 kosinový nástavec [40]

Směrová chyba se stanoví vztahem:

$$f_2(\varepsilon) = \frac{Y(\varepsilon)}{Y(0) \cdot \cos(\varepsilon)} - 1 \quad (67)$$

kde $Y(\varepsilon)$ je výstupní signál fotometru při dopadu světla na fotometrickou hlavici pod úhlem ε on normály, $Y(0)$ je výstupní signál při osvětlení ve směru normály [30].

Integrální tvar se stanoví následujícím vztahem:

$$f_2 = \int_0^{1,484} |f_2(\varepsilon)| \cdot \sin(2\varepsilon) d\varepsilon \quad (68)$$

kde meze představují hodnotu 0 až 85° , ε je úhel mezi normálou a dopadajícím světlem.

V praxi se využívá kroku 5° . Tento vztah platí pouze pro osvětlení fotometrické hlavice dokonale difúzním světlem. Pro měření denní osvětlenosti tento vztah nelze využít. Vztah by bylo nutné doplnit funkcí respektující pokles jasu oblohy od obzoru ku zenitu v poměru 1 : 3,14.

Měření prostorové, válcové a poloválcové osvětlenosti je velice složité. V praxi se doporučuje kontaktovat výrobce fotometrického přístroje pro více informací [30].

5.2.3 Základní chyba odezvy jasoměru

Základní chyba odezvy jasoměru se určí laboratorně pomocí etalonu svítivosti. Tato korekce navíc eliminuje chybu změny rozsahu a nelinearity. Plocha etalonu svítivosti musí být větší než snímané pole jasoměru. Měřený jas nemusí být vždy konstantní. Potom vzniká chyba nerovnoměrnostmi která je dána vztahem:

$$f_{2,g} = 1 - \frac{Y_{\min}}{Y_{\max}} \quad (69)$$

kde $Y_{\min}$ a $Y_{\max}$ jsou minimální a maximální výstupy jasoměru při snímání minimální hodnoty jasu etalonu svítivosti, který se považuje za bodový zdroj a zaujímá maximálně 5 % snímaného pole jasoměru. U jasoměru se udává ještě tzv. chyba okrajového pole - prstence. Určuje se především v laboratořích s okrajem s maximálně 1,1 násobkem průměru světlo-činné plochy fotometru. Tato chyba bývá stanovena výrobcem. Označuje se symbolem $f_{2,u}$.

5.2.4 Chyba nelinearity

V kapitole 3 je stručně nastíněn konstrukční princip fotometrických přístrojů. Bylo zde uvedeno, jak ovlivňuje výstupní odpor fotodiody výstupní hodnoty. Pro nulový odpor je tato charakteristika lineární. Pro minimalizaci výstupního odporu se používají obvody s operačními zesilovači. Chyba nelinearity se označuje f_3 a je velice malá (desetiny %). Zpravidla bývá obsažena ve výsledné nejistotě kalibrace přístroje. Chyba se stanovuje následujícím vztahem:

$$f_3 = \frac{Y}{Y_{\max}} \cdot \frac{X_{\min}}{X} - 1 \quad (70)$$

kde X značí vstupní veličinu a Y výstupní veličinu, $X_{\max}$ značí maximální vstupní veličinu při $Y_{\max}$, která je maximální hodnotou rozsahu měřicího přístroje.

5.2.5 Chyba zobrazovací jednotky

Tato chyba je podrobně popsána v kapitole 4.3.1. Značí se symbolem f_4 a nabývá hodnot desetiny % u laboratorních luxmetrů a jasoměrů.

5.2.6 Chyba krátkodobé časové nestability

Tato chyba reprezentuje krátkodobou časovou únavu fotočlánku. Pokud není fotočlánek ponechán po nějakou dobu v prostředí, kde bude měření probíhat, projeví se měření zatížením chybou, která se vypočítá pomocí vztahu:

$$f_5 = \frac{Y(t)}{Y(t_0)} - 1 \quad (71)$$

kde $Y(t)$ je hodnota neměřená v čase t od začátku měření,

$Y(t_0)$ je hodnota naměřená na začátku měření.

Před laboratorním měřením nestability je doporučeno ponechat fotočlánek ve tmě alespoň po dobu 24 hodin. Doba t je 10 až 30 minut od začátku měření a t_0 se měří 10 sekund po začátku měření [30].

5.2.7 Chyba teplotní závislosti

Změna teploty mění vlastnosti spektrálně selektivních filtrů a fotočlánku. Chyba teplotní závislosti se dá poměrně přesně laboratorně vyčíslit. Pro laboratorní měření je tato chyba malá. Ovšem při měření v exteriéru, například denní osvětlenosti, se musí s touto chybou počítat. Někteří výrobci udávají tzv. činitel teploty, který má jednotkou %/K.

Činitel teploty lze určit podle následujícího vztahu:

$$\alpha = \frac{Y(\vartheta_1) - Y(\vartheta_2)}{Y(\vartheta_0)} \cdot \frac{1}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \cdot 100 \% \quad (72)$$

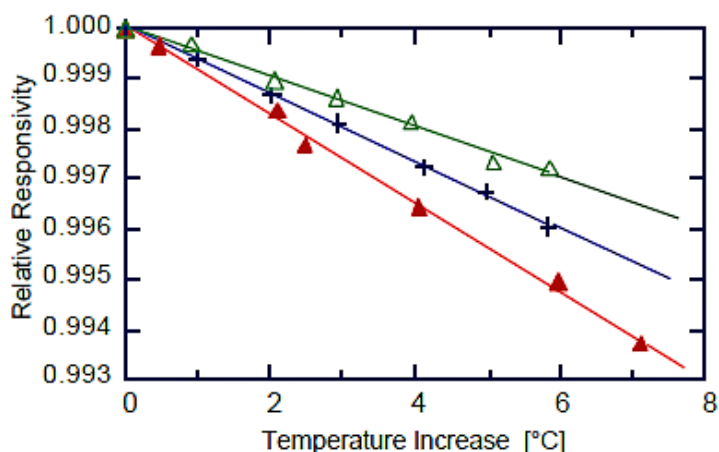
Teplota během kalibrace fotočlánku ϑ_0 je 25 °C. Pro luxmetry používané v interiéru se volí $\vartheta_1 = 40^\circ\text{C}$ a $\vartheta_2 = 15^\circ\text{C}$, pro luxmetry v exteriéru se volí $\vartheta_2 = 5^\circ\text{C}$ (někdy i 0°C).

Pro přesnou hodnotu je nutné pro každé měření stanovit hodnotu chyby teplotní závislosti podle vztahu:

$$f_6(\vartheta) = \frac{Y(\vartheta)}{Y(\vartheta_0)} - 1 \quad (73)$$

kde $Y(\vartheta)$ je hodnota změřená při teplotě ϑ a $Y(\vartheta_0)$ při teplotě ϑ_0 za stejných výše zmíněných podmínek měření [30].

Na obrázku č.29 je znázorněna závislost citlivosti fotočlánku při změně okolní teploty. Z průběhu je patrné, že při zvyšování teploty fotočlánku klesá jeho citlivost a tedy i velikost naměřených hodnot.



Obrázek 34 Teplotní závislost citlivosti fotočlánku [36].

Činitel teploty pro laboratorní fotometry se pohybuje v rozmezí $-0,049 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ až $-0,088 \text{ \%/}^\circ\text{C}$. Z naměřených hodnot se stanoví lineární funkce ve tvaru:

$$k(\vartheta_m) = 1 - (\vartheta_m - \vartheta_0) \cdot \alpha \quad (74)$$

kde ϑ_m je teplota během měření a ϑ_0 je teplota během kalibrace.

Poznámka: činitel teploty α se také někdy označuje symbolem c_p .

5.3 Nejistoty fotometrických přístrojů

Mezi nejčastější úkoly fotometrických laboratoří patří měření světelného toku v kulovém integrátoru, měření křivek svítivosti ve goniofotometru a měření svítivosti na fotometrické lavici. Tyto úlohy jsou z hlediska nejistot měření popsány v následujících podkapitolách. Tyto nejistoty jsou vypočítány pro laboratoř světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky VUT v příloze A.

5.3.1 Kulový integrátor

Kulový integrátor je fotometrický přístroj pro měření světelného toku světelných zdrojů či svítidel. Podrobný popis přístroje je v kapitole 3.2.4. Celková nejistota měření se skládá z velkého počtu dílčích nejistot typu B. Nejistoty lze rozdělit do následujících skupin.

- Nejistoty měřicího systému
 - Nejistota kalibrace měřicího přístroje
 - Nejistota světelného normálu a testovací žárovky
 - Chyba měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován.
 - Nejistota stability přístrojů
 - Teplotní stabilita fotočlánku
 - Časová stabilita fotočlánku
 - Nejistota stabilizovaného napájecího zdroje
- Nejistoty konstrukčního charakteru
 - Nestejnoměrný povrch uvnitř koule
 - Absorbance neaktivních částí
 - Netěsnost mechanických částí

Nejistoty měřicího systému

Chyby fotometrických přístrojů jsou přesněji popsány v kapitole 5.2. Nejistotou kalibrace a normálu musí být uvedena v kalibračním protokolu. Kalibrace by se měla optimálně provádět jednou do roka. Kalibrace světelných normálu se provádí po uplynutí určité doby, ideálně po 25 hodinách provozu [36].

Dílčí standardní nejistota kalibrace fotometru:

$$u_{BE} = \frac{u_k}{k} \quad (75)$$

kde u_k je rozšířená hodnota nejistoty kalibrace

k je koeficient rozšíření ($k = 2$ pro normální rozložení)

Dílčí standardní nejistota normálu:

$$u_{Bn} = \frac{u_{kn}}{k} \quad (76)$$

kde u_{kn} je rozšířená hodnota nejistoty kalibrace normálu světelného toku

Dílčí standardní nejistota měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován (36).

$$u_{Bz} = \left| \frac{S_Z}{S_A} - 1 \right| = \left| \frac{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}}{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)} \cdot \frac{\sum S_A(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)}{\sum S_A(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}} - 1 \right| \quad (77)$$

kde $S_Z(\lambda_i)$ je vyzařované spektrum měřeného světelného zdroje Z

$S_A(\lambda_i)$ je vyzařované spektrum normalizovaného typu světla A (2856 K)

$V(\lambda_i)$ je křivka spektrální citlivosti normálního pozorovatele

$s(\lambda_i)_{rel}$ je citlivost fotočlánku

Dílčí standardní nejistota stability přístrojů v sobě zahrnuje krátkodobou časovou nestabilitu, teplotní nestabilitu a nestabilitu napájecího zdroje:

$$u_{Bs} = \frac{\left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \quad (78)$$

kde Y_{max} je maximální hodnota výstupu během času $t = 0$ s (po zahoření zdroje)

Y_{min} je minimální hodnota výstupu během stanoveného testovacího času τ

Nejistoty konstrukčního charakteru

Nestejný povrch uvnitř koule, clony a mezery mezi polokoulemi mohou způsobit nestejně rozložené osvětlení uvnitř koule. NIST (Národní institut standardů a technologie v USA) používá zařízení, které tuto nejistotu dokáže změřit.

Celkový světelný tok uvnitř integrační koule se dá vyjádřit vztahem:

$$\phi_C = \int_A E dA = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=0}^{\pi} I(\theta, \phi) \sin(\theta) d\phi \quad (79)$$

$\phi = 0^\circ$ se nachází na dně integrační koule a $\theta = 0^\circ$ je v místě fotometru.

Normalizované křivky svítivosti popisuje funkce:

$$I^*(\theta, \phi) = \frac{4\pi}{\phi_C} \cdot I(\theta, \phi) \quad (cd \cdot lm^{-1}) \quad (80)$$

Dílčí nejistota nestejně rozloženého osvětlení

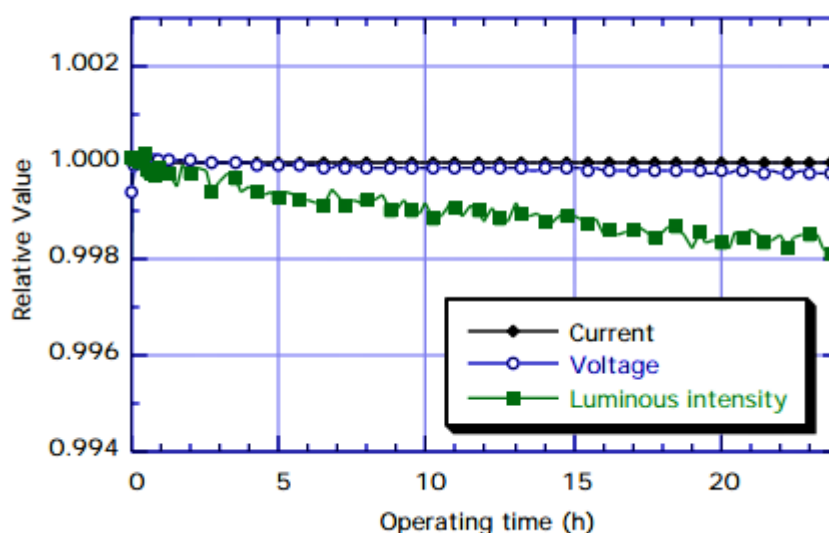
$$u_{Bu} = \left| 1 - \frac{\int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=0}^{\pi} I^*(\theta, \phi) \cdot K(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) d\phi}{\int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=0}^{\pi} I^*(\theta, \phi) \cdot \sin(\theta) d\phi} \right| \quad (81)$$

kde $K(\theta, \phi)$ popisuje funkci prostorové odezvy vnitřního povrchu koule. Tato funkce se měří pomocí rotujícího světelného zdroje uvnitř koule, který vytváří zaostřený paprsek na stěnu integrační koule. Křivky svítivosti $I^*(\theta, \phi)$ lze vyhledat v katalogu světelného zdroje [36].

Tuto nejistotu je technologicky velice náročné vyčíslit. Ve většině případů se zanedbává. Integrační koule pro kalibraci normálů vyžadují co největší přesnost. Zde je tedy nutné tuto nejistotu vyčíslit.

Nejistota absorbance neaktivních částí se odstraňuje pomocí testovacího měření, kdy se nejdříve změří ustálený světelný tok testovací žárovky bez přítomného svítidla. Testovací žárovku je nutné nechat dostatečně zahřet. V druhém měření se umístí svítidlo do integrační koule a změří se ustálený světelný tok testovací žárovky. Poměrem získaných hodnot se vyčíslí míra absorbance neaktivních částí svítidla. Více informací v kapitole 3.2.4.

Nejistota provozní nestability světelného normálu vyjadřuje pokles celkového světelného toku během provozu. Podle obrázku č.35 je patrné, že pokud pracoviště nechává světelné normály kalibrovat každých 25 hodin jejich provozu, je tato nejistota menší než 0,2 %. V opačném případě ke konci svého života může tato nejistota nabývat hodnoty až 2,5 % (počítáno pro pokles na 85 % původního světelného toku normálu) [36].



Obrázek 35 Pokles světelného toku normálu typu FEL [36]

Výsledná dílčí nejistota se určí vztahem

$$u_{\phi} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bn}^2 + u_{Bz}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bu}^2} \quad (82)$$

5.3.2 Fotometrická lavice

Fotometrická hlavice je fotometrický přístroj popsáný v kapitole 3.2.6. Tento přístroj slouží především k měření svítivosti bodových světelných zdrojů. Fotometrická lavice se skládá z luxmetru, soustavy clon, posuvného a upevňovacího systému. Tento systém obsahuje dílčí nejistoty typu B především v těchto oblastech:

- Nejistota měřicího přístroje - luxmetru u_{BE}
- Vliv konečných rozměrů vyzařovací plochy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bk}
- Vzájemná poloha světelného zdroje a fotočlánku u_{Bp}
- Nestabilita použitých zařízení a světelného zdroje u_{Bs}
- Metoda odměřování vzdálenosti fotočlánku od světelného zdroje u_{Bl}

Nejistota měřicího přístroje - luxmetru

Výrobci luxmetru udávají celkovou rozšířenou nejistotu v dokumentaci. Tato hodnota bývá rozšířená pro rovnoměrné rozložení pravděpodobnosti $k_u = \sqrt{3}$. Přesný výčet a popis fotometrických chyb je popsán v kapitole 5. Mezi nejvýznamnější patří chyba spektrální, směrová a chyba nestability. Obecně lze vyjádřit standardní relativní nejistotu luxmetru následujícím vztahem [38]:

$$u_{BE} = \frac{\frac{\delta_1}{100} + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% \quad (83)$$

kde δ_1 je maximální chyba udávaná výrobcem

N je počet platných číslic s možnou chybou

R je hodnota platné číslice s nejmenší váhou

X je hodnota zobrazená přístrojem.

V případě kalibrovaného luxmetru se počítá s nejistotou kalibrace, uvedenou v kalibračním listu. Tato hodnota platí pouze pro zdroj světla, na který byl přístroj kalibrován. V případě měření světelného zdroje odlišného spektra, než pro který byl přístroj kalibrován, je nutné vyčíslit chybu $f_1(Z)$ podle vztahu č.61 a 63.

Příklad výpočtu

Pro chroma metr CL-200 je udávána maximální chyba: $z_{\max} \pm (2\% + 5 \text{ digitů})$

V kapitole 4.2.3 je postupnými výpočty stanovena nejistota $u_B = 1,210\%$ pro naměřenou hodnotu 500,5 lx. Při použití vztahu č.74 je tato hodnota:

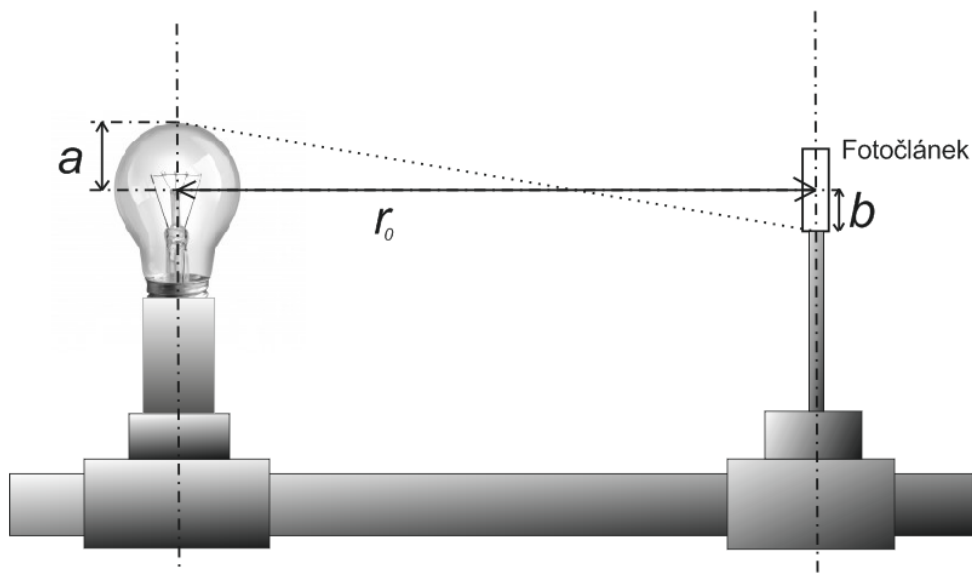
$$u_{BE} = \frac{\frac{\delta_1}{100} + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% = \frac{\frac{2}{100} + \frac{5 \cdot 0,1}{500,5}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% = 1,212\%$$

Poznámka: všechny standardní dílčí nejistoty jsou nerozšířené.

Vliv konečných rozměrů světelného zdroje a fotočlánku

Při měření svítivosti na fotometrické lavici se často považuje světelný zdroj za bodový. Nejistota měření způsobená konečnými rozměry se často zanedbává při splnění podmínky, kdy je vzdálenost světelného zdroje a luxmetru více než pětinásobná než je největší rozměr světelného zdroje.

Na obr. č.32 jsou znázorněny rozměry potřebné pro výpočet dílčí nejistoty.



Obrázek 36 Rozměry fotometrické lavice

Dílčí relativní standardní nejistota typu B konečných rozměrů se vypočítá dle vztahu:

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100\% \quad (84)$$

kde r_0 je vzdálenost od středu světelného zdroje ke středu přijímacímu povrchu fotočlánku

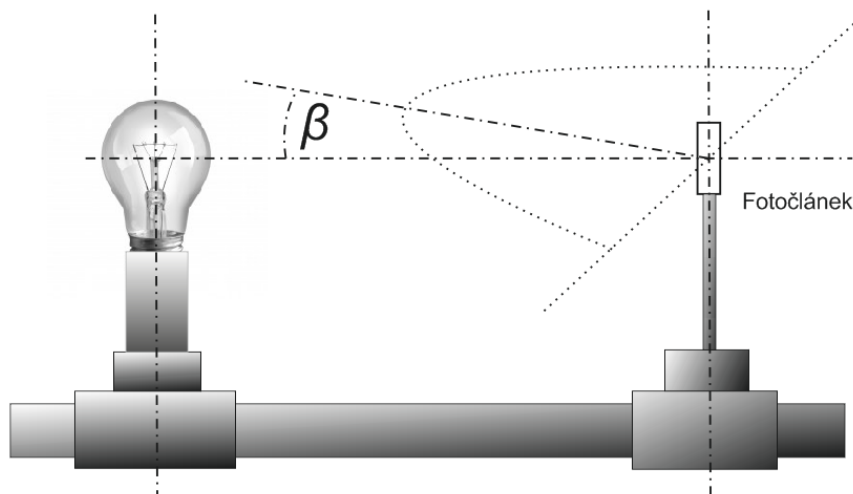
a je polovina charakteristického (největšího) rozměru světelného zdroje (bez patice)

b je poloměr přijímací části fotočlánku.

Tato dílčí nejistota je menší než 1 % při dodržení podmínky vzdálenosti luxmetru od světelného zdroje více než pětinásobku charakteristického rozměru světelného zdroje [38].

Vliv vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku

V případě odklonění fotočlánku od spojnice fotočlánku se světelným zdrojem, dochází ke vzniku chyby. Tato chyba se dá odstranit správně navrženým upevňovacím mechanismem s kontrolou kolmosti fotočlánku na spojnici se světelným zdrojem. Žárovky se vždy nastavují, aby wolframové vlákno bylo kolmé na spojnici s fotočlánkem. V případě LED žárovky je ideální nastavit žárovku do pozice, kdy jsou jednotlivé LED čipy opět kolmo na spojnici s luxmetrem.



Obrázek 37 Schéma fotometrické lavice

Dílčí relativní standardní nejistota nastavení polohy fotočlánku:

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (85)$$

Například při vyosení fotočlánku o $\beta = 5^\circ$ vzniká dílčí nejistota $u_{Bp} = 0,19\%$.

Nestabilita použitých zařízení

Tato nejistota zahrnuje nestabilitu napájecího zdroje, světelného zdroje a měřícího fotočlánku. V praxi není možné vyčíslit všechny tyto nejistoty zvlášť a proto se zavádí nejistota nestability použitých zařízení, která respektuje změny naměřené veličiny v čase a za stejných podmínek.

Dílčí standardní nejistota nestability použitých zařízení:

$$u_{Bs} = \frac{\left| \frac{Y_{\max}}{Y_{\min}} - 1 \right|}{\sqrt{3}} \quad (86)$$

kde $Y_{\max}$ je maximální hodnota výstupu během času $t = 0$ s (po zahoření zdroje)

$Y_{\min}$ je minimální hodnota výstupu během stanoveného testovacího času τ .

Tato nejistota nabývá v laboratorních podmínkách přibližně $u_{Bs} \approx 0,5\%$ [38].

Dílčí nejistota odměřování vzdálenosti

Měření vzdálenosti je vždy zatíženo dílčí nejistotou, která závisí nejen na systému odměřování, ale i na zkušenosti pracovníka. Pomocí laserových odměřovacích přístrojů je možné tuto nejistotu dostatečně minimalizovat. V praxi se u fotometrických lavic používá pravítko s přesností 1 mm. Vzdálenost se odměřuje mezi pojezdem se světelným zdrojem a pojezdem s fotočlánkem.

Dílčí standardní nejistota odměřování vzdálenosti dána vztahem:

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l\max}}{l_d \sqrt{3}} \quad (87)$$

kde $Z_{l\max}$ je největší chyba odměřování vzdálenosti středu světelného zdroje a okraje přijímací plochy fotočlánku, l_d je vzdálenost středu zdroje po okraj fotočlánku.

Při uvažování chyby odměřování $Z_{l\max} = 0,25 \text{ mm}$ a chyby umístění středu zdroje a okraje fotočlánku mimo osu pojezdů $Z_k = 1 \text{ mm}$, je tato dílčí nejistota při vzdálenosti $l_d = 1 \text{ m}$:

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l\max}}{l_d \sqrt{3}} = \frac{1 + 0,25}{1000 \cdot \sqrt{3}} = 0,0722 \%$$

Výsledná nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici:

$$u_{cl} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bl}^2} \quad (88)$$

Výsledná rozšířená standardní nejistota je dána vztahem:

$$u_I = k \cdot u_c = 2 \cdot u_c \quad (89)$$

Tato rozšířená nejistota nabývá přibližné hodnoty $u_I \sim 6\%$.

V následující tabulce č.14 je znázorněn přehled jednotlivých dílčích nejistot a jejich přibližných hodnot, kterých nabývají:

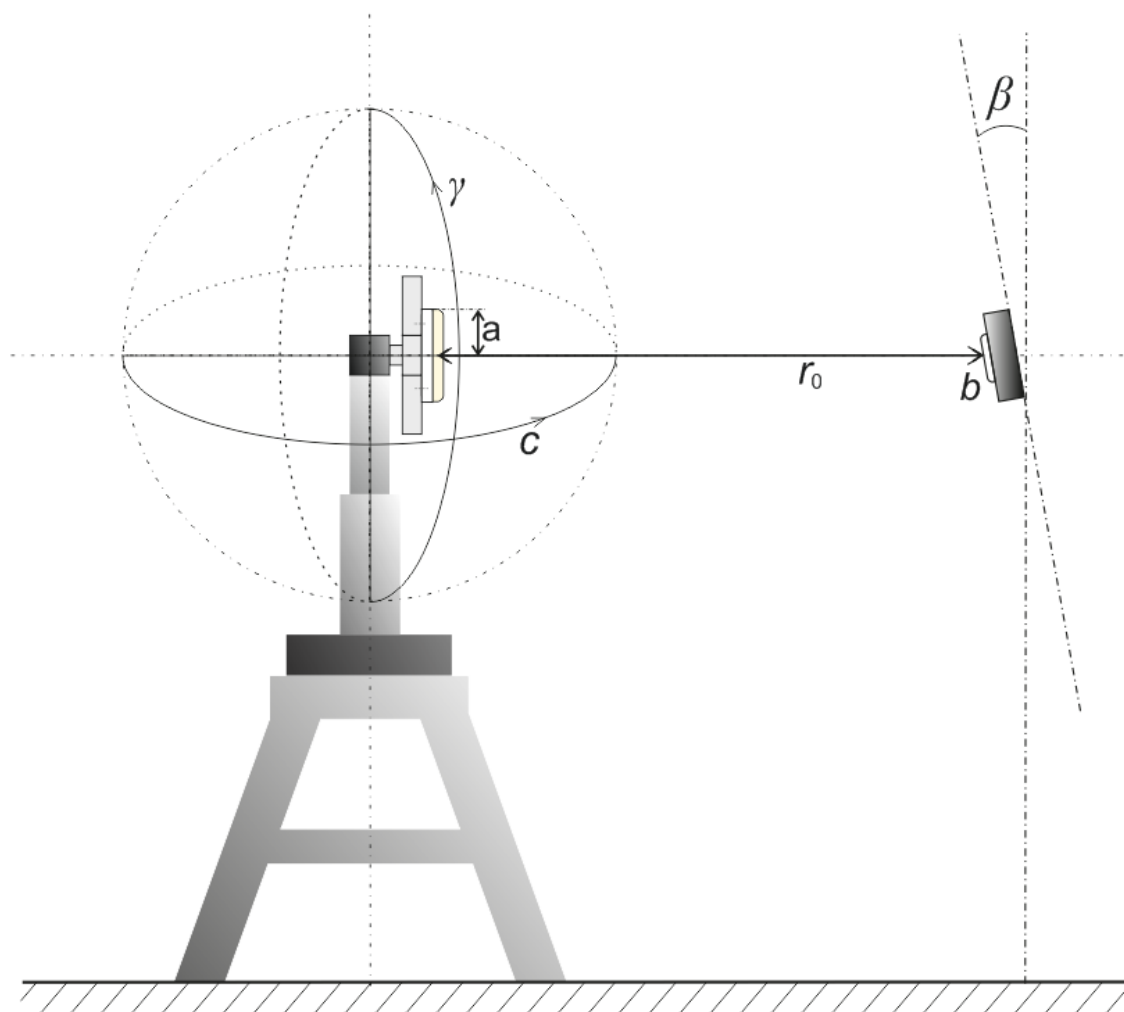
Název dílčí nejistoty	Symbol	Hodnoty [%]
Chyba měřícího luxmetru	u_{BE}	1 - 3
Vliv konečných rozměrů	u_{Bk}	< 1
Vliv vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku	u_{Bp}	< 0,2
Nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}	0,5 - 1
Odměřování vzdálenosti	u_{Bl}	< 0,1

Tabulka 14 Dílčí nejistoty fotometrické lavice [38]

5.3.3 Goniofotometr

Goniofotometr je fotometrický přístroj pro měření křivek svítivosti. Více informací je poskytnuto v kapitole 3.2.5. Skládá se z otočného systému, upevnění světelného zdroje a z fotočlánku - luxmetru. Dílčí standardní nejistoty jsou totožné s uvedenými nejistotami pro fotometrickou lavici. Navíc je uvažována pouze nejistota úhlového posunu ramene goniofotometru. Mezi dílčí nejistoty goniofotometru patří nejistoty:

- Úhlového posunu ramene $u_{B\lambda}$
- Měřicího přístroje - luxmetru u_{BE}
- Vlivu konečných rozměrů vyzařovací plochy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bk}
- Vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bp}
- Nestability použitých zařízení a světelného zdroje u_{Bs}
- Metody odměřování vzdálenosti fotočlánku od světelného zdroje u_{Bl}

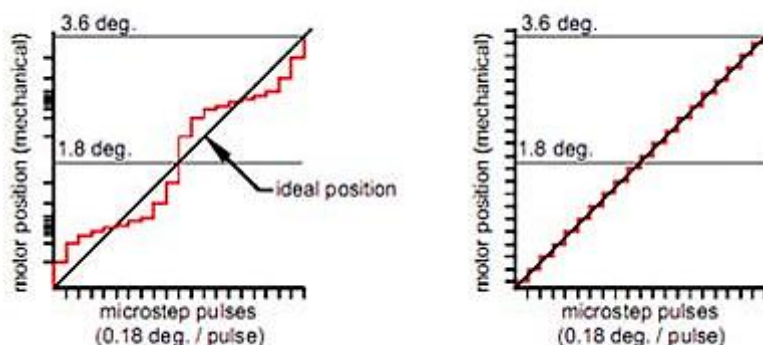


Obrázek 38 Schéma goniofotometru

Poznámka: b je poloměr přijímací plochy luxmetru, který lze dohledat v příslušné dokumentaci.

Nejistota úhlového posunu ramene

Tato chyba závisí především na pohonu ramene a jeho řídicí elektronice. Nejčastěji se využívá krokových motorů s inkrementálním čidlem a analogově digitálního převodníku. V kombinaci s řetězovou převodovkou je pohon schopný kroku $0,1^\circ$. Řídicí elektronika navíc umožňuje tzv. mikrokrokování, který sníží krok až na jednotky úhlových vteřin [38]. Samotná nejistota může mít svůj původ i v nelinearitě mikrokroků. To v praxi znamená, že pohyb není konstantní. Dochází ke shlukování impulsů a naopak k jejich oddálení. Na obr. č.39 je znázorněn ideální lineární průběh posunu motoru (vpravo) a reálný nelineární průběh (vlevo).



Obrázek 39 Nelinearita krokového motoru [39]

Na ose x je počet pulsů a na ose y je úhlové natočení motoru. Úhlu natočení $1,8^\circ$ odpovídá 10 mikrokroků. V praxi se při stanovení dílčí nejistoty vychází především z rozlišení inkrementálního čidla. Dílčí standardní nejistota úhlového posunu se vypočítá vztahem:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{\gamma_{\text{vzt}} \sqrt{3}} \quad (90)$$

kde $\Delta\gamma_{\max}$ je maximální chyba úhlu γ

γ_{vzt} je vztažná hodnota úhlu γ

Při měření křivek svítivosti s krokem 1° při chybě inkrementálního čidla $\Delta\gamma_{\max} = 0,025$ dostaneme dílčí nejistotu úhlového posunu:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{\gamma_{\text{vzt}} \sqrt{3}} = \frac{0,025}{1 \cdot \sqrt{3}} = 1,443 \%$$

Všechny ostatní dílčí nejistoty jsou uvedeny v kapitole 5.3.2.

Výsledná kombinovaná standardní nejistota měření rozložení svítivosti:

$$u_{cl} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bl}^2} \quad (91)$$

Výsledná rozšířená kombinovaná standardní nejistota měření rozložení svítivosti:

$$U_I = k \cdot u_{cl} = 2 \cdot u_{cl} \quad (92)$$

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá nejistotami měření ve fotometrii. V první části práce jsou definovány a matematicky vyjádřeny fotometrické veličiny s příklady hodnot pro jednotlivé světelné zdroje. Dále práce popisuje konstrukční řešení fotometrických přístrojů s nastíněním, kde vznikají jednotlivé nejistoty, a metodami měření, které mohou svojí podstatou ovlivňovat celkovou nejistotu měření. V další kapitole jsou stručně a přehledně popsány základy statistiky, které jsou nezbytné pro pochopení matematického aparátu pro stanovení jednotlivých typů nejistot u_A , u_B a u_C .

Nejistota typu A se stanovuje jako směrodatná odchylka výběrového průměru při měřeních, kde okolí nebo metoda měření neumožňuje dodržení stejných podmínek měření. Například při ručním umísťování přístroje do sítě bodů. Tuto nejistotu je možné minimalizovat zvýšenou pečlivostí a přípravou měření. Pro měření s více jak 20 hodnotami se používá klasická statistická metoda, ale v praxi je počet měření ovlivněn vnějšími vlivy a není vždy možné měření tolikrát opakovat. Potom je třeba nejistotu U_A vyjádřit pomocí Hornova postupu. V laboratorních podmínkách je rušení okolních světelných zdrojů minimální a všechny světelné zdroje jsou napájeny stabilizovaným zdrojem proudu. Při dostatečném ustálení měřené hodnoty, lze tedy nejistotu typu A v laboratorních podmínkách zanedbat.

Nejistota U_B zahrnuje dílčí standardní nejistoty měřících přístrojů, ale i nejistoty konstrukčního charakteru. Ve většině fotometrických měřeních je výsledná nejistota závislá především na celkové chybě fotometrického přístroje. Tato chyba je systematická a nelze ji odstranit. Chyby fotometru jsou uvedeny v dokumentaci přístroje. Dále je nutno počítat s chybou kalibrace a nejistotou použitého normálu. Tyto údaje musí být uvedeny v kalibračním listu, společně i s koeficientem rozšíření. Pokud výrobce poskytuje hodnoty spektrální citlivosti fotočlánku, lze vypočítat nejistotu měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován. Další dílčí standardní nejistoty zahrnují zanedbání konečných rozměrů světelného zdroje a přijímací plochy fotočlánku. Při nedodržení jisté vzdálenosti mezi nimi může tato nejistota nabývat značných hodnot. Také nesprávné umístění fotometru nebo světelného zdroje způsobuje určitou nejistotu měření. Při stanovení výsledné dílčí standardní nejistoty tedy nestačí počítat pouze s nejistotou měřícího přístroje. Z dílčích nejistot se dále stanovuje celková kombinovaná nejistota u_C pomocí Gaussova zákona šíření nejistot. Kombinovaná nejistota udává interval, ve kterém leží správná hodnota s pravděpodobností 68,3 %. Proto se kombinovaná nejistota rozšiřuje koeficientem rozšíření pro pokrytí většího intervalu. Výsledná rozšířená kombinovaná nejistota se uvádí ke každému výsledku měření.

Dalším cílem této práce bylo stanovit výsledné rozšířené nejistoty měření pro vybrané úlohy ve světelné laboratoři na Ústavu elektroenergetiky VUT. Výsledky jsou uvedeny s postupem výpočtu v příloze A.

Byly vybrány tyto úlohy:

- Měření rozložení intenzity osvětlení na pracovním stole.
- Měření svítivosti na fotometrické lavici.
- Měření křivek svítivosti na goniometru.
- Měření světelného toku v kulovém integrátoru.

Měření rozložení intenzity osvětlení bylo vybráno pro názornou demonstraci chování nejistoty typu A. Pro tuto úlohu byla vyrobena potišťená deska s rastrem pro přesné umístění hlavice fotometru. Pro zvýšení přesnosti umístění hlavice luxmetru a tím snížení nejistoty typu A byl vyroben poziční nástavec z plexiskla s vyfrézovaným středem pro umístění hlavice. Při porovnání naměřených a vypočítaných hodnot bylo zjištěno, že nástavec zcela eliminoval tuto nejistotu typu A. Celková kombinovaná rozšířená nejistota měření rozložení intenzity osvětlení s luxmetrem PRC Krochmann RadioLux 111 byla stanovena na hodnotu $u_E = 2,084 \%$.

Výsledná kombinovaná nejistota měření na fotometrické lavici s spektoradimetrem JeTi SCB 1211 UV byla stanovena na hodnotu $u_I = 2,800 \%$. Při nouzovém použití chroma metru KM CL-200 vzroste tato nejistota na hodnotu $u_I = 9,543 \%$. U goniometru s luxmetrem PRC Krochmann radiolux 111 je nejistota měření křivek svítivosti $u_I = 3,860 \%$. Tato nejistota je vyšší z důvodu nejistoty konečných rozměrů světelného zdroje. Měření celkového světelného toku kulového integrátoru je zatíženo nejistotou $u_\phi = 2,974 \%$.

Největším přínosem této práce je podrobný a ucelený popis všech nejistot vyskytujících se ve fotometrii a jejich názorném praktickém stanovení v laboratoři světelné techniky na Ústavu elektroenergetiky VUT. Zjištěné nejistoty mohou sloužit k budoucímu hodnocení jednotlivých měření v laboratoři.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Marek BÁLSKÝ, Zdeněk BLÁHA, Zbyněk CARBOL, Daniel DIVIŠ, Blahoslav SOCHA, Jaroslav ŠNOBL, Jan ŠUMPICH a Petr ZÁVADA. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Světlo* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sv%C4%9Btlo&oldid=10757855>>
- [3] KREJČÍ, Robert a Eduard HULICIUS. Microdesignum: Polovodičové lasery a LED-ky. [online]. 23.04.2007 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z:
<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>
- [4] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Hvězda* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hv%C4%9Bzda&oldid=10762374>>
- [5] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Wienův posunovací zákon* [online]. c2013 [citováno 26. 03. 2014]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Wien%C5%AFv_posunovac%C3%AD_z%C3%A1kon&oldid=11008568>
- [6] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Světelný zdroj* [online]. c2014 [citováno 26. 03. 2014]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sv%C4%9Bteln%C3%BD_zdroj&oldid=11229647>
- [7] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Radiometrické veličiny* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Radiometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny&oldid=10915222>
- [8] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotometrické veličiny* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotometrick%C3%A9_veli%C4%8Diny&oldid=10690717>
- [9] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Prostorový úhel* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW:
<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Prostorov%C3%BD_%C3%BAhel&oldid=10290670>
- [10] *Electrical-engineering-portal: Luminous Measurement Graphic Representation* [online]. [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>
- [11] DOBROTINŠKA, Leona. Fosilum: iilumination-lux. [online]. 2010 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.fosilum.si/en/why-led-lights/iilumination-lux/>

- [12] MICHL, Beneš. Gigalighting: Parametry světelných zdrojů. [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.gigalighting.cz/parametry-svetelnych-zdroju.htm>
- [13] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Barevná teplota* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Barevn%C3%A1_teploata&oldid=10610856>
- [14] Esolite: Barevná teplota a index Ra. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.esolite.com/barevna-teplota-a-index-ra>
- [15] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotočlánek* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Foto%C4%8Dl%C3%A1nek&oldid=9863632>>
- [16] Taw: fotovoltaika solarni systemy. [online]. 2013 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.taw.cz/index.php/fotovoltaiika-solarni-systemy.html>
- [17] HABEL, Jiří. Světlo: Základy světelné techniky. 2013, roč. 2009, č. 3, s. 44-48. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf>
- [18] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Luxmetr* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Luxmetr&oldid=10193404>>
- [19] CARBOL, Zbyňek a Tomáš NOVÁK. Měření světelných zdrojů: Měření parametrů moderních světelných zdrojů a svítidel. s. 39-41. Dostupné z: http://www.elektroatrh.cz/pdf/mereni_parametru_modernich_svetelnych_zdroju_a_sv_itidel.pdf
- [20] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Jasoměr* [online]. c2009 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <<http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Jasom%C4%9Br&oldid=3557032>>
- [21] UEEN: *laboratoř světelné techniky* [online]. 2006 [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/?section=about>
- [22] Wikipedia contributors. "Spectroradiometer." *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 11 Mar. 2016. Web. 27 Apr. 2016.
- [23] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Kulový integrátor* [online]. c2013 [citováno 11. 12. 2013]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Kulov%C3%BD_integr%C3%A1tor&oldid=9863684>
- [24] HABEL, Jiří. Fotometrie. *Powerwiki* [online]. , 71 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/resene_priklady.pdf
- [25] EDVARD. Electrical-engineering-portal: Luminous Measurement Graphic Representation. [online]. 16.1.2012. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: <http://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>

- [26] Cd3wd: Lighting Installation - Basic vocational knowledge. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.cd3wd.com/cd3wd_40/cd3wd/ELECTRIC/GTZ024E/EN/B609_4.HTM
- [27] Edumad: components. [online]. [cit. 2013-12-12]. Dostupné z: http://www.edumad.it/en/components/com_virtuemart/shop_image/product/8405_Banco_ottic_4f0bfb17d702c.jpg
- [28] BAŠTINEC, Jromír. *Pravděpodobnost, statistika a operační výzkum: Skriptum MPSO*. Brno VUT. a
- [29] ČSN 36 0011-1: *Měření osvětlení prostorů*. 1. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: UNMZ, 2014.
- [30] RYBÁR, Peter. Neistota merania osvetlenia: Část 1. *Světlo* [online]. **2014**: 1 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/neistota-merania-osvetlenia-cast-1--882-analyza-malych-vyberu>
- [31] *Analýza malých výběrů: Hornova metoda* [online]. [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://meloun.upce.cz/docs/lecture/chemometrics/slidy/35horn.pdf>
- [32] *Nejistoty měření: Přesnost a chyby měřících přístrojů* [online]. Praha ČVUT [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://www1.fs.cvut.cz/cz/u12110/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>
- [33] BELL, Stephanie. *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement* [online]. In: . [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/UK_NPL/mgpg11.pdf
- [34] PERNIKÁŘ, Jiří. *Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků* [online]. In: . s. 22 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf
- [35] Wikipedia contributors. Spectral power distribution [Internet]. Wikipedia, The Free Encyclopedia; [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Special:CiteThisPage&page=Spectral_power_distribution&id=669979083
- [36] OHNO, Yoshihiro. *NIST MEASUREMENT SERVICES: PHOTOMETRIC CALIBRATIONS* [online]. In: . s. 85 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.nist.gov/calibrations/upload/sp250-37.pdf>
- [37] IVAN, Perre. *Is measuring LEDs with lux metr accurate?* [online]. In: . s. 52 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/theilp/pls-2014-is-measuring-led-illuminance-with-a-lux-meter-accurate>
- [38] HABEL, Jiří. *Modernizace goniofotometru* [online]. , 4 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39390.pdf>
<http://www.geckodrive.com/support/step-motor-basics/accuracy-and-resolution.html>

- [39] *Geckodrive Motor Controls: Accuracy and Resolution* [online]. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.geckodrive.com/support/step-motor-basics/accuracy-and-resolution.html>
- [40] *Ověření vlastností kosinového nástavce* [online]. , 4 [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/sylabus/09_Overeni_vlastnosti_kosinoveho_nadstavce.pdf

PŘÍLOHA A

LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Stanovení nejistot měření pro vybrané úlohy

1 MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ INTENZITY OSVĚTLENÍ NA PRACOVNÍM STOLE

1.1 Popis úlohy

Tato úloha byla vybrána pro demonstraci nejistoty typu A. Tato nejistota se nejvíce projevuje v případě, kdy je hlavice luxmetru opakovaně umisťována na jinou pozici. V tomto případě bude umístění hlavice na přesnou pozici podle normálního rozložení pravděpodobnosti. Měření bylo provedeno pro dva případy.

- Umístění fotometrické hlavice vizuálně
- Umístění fotometrické hlavice pomocí nástavce

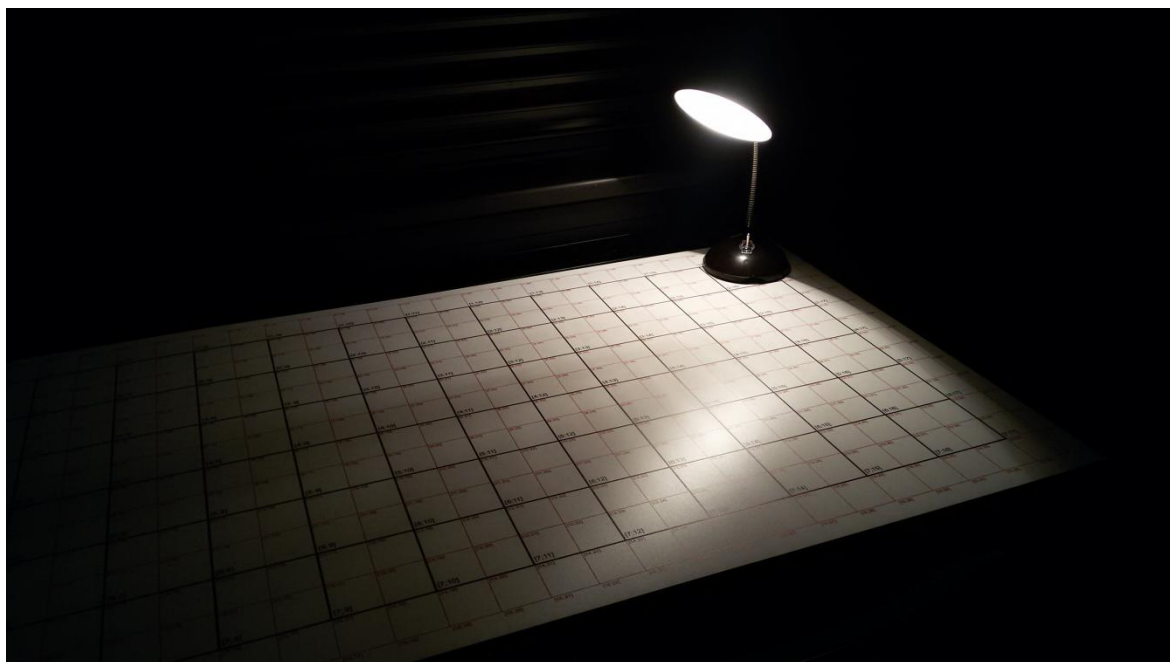
V prvním případě lze očekávat větší nepřesnost při umisťování hlavice do správné pozice. Navíc z laboratorní zkušenosti lze předpokládat i chybu v odečítání souřadnic z rastru, který je pro tuto úlohu vytisknutý na papíře. Pro odstranění této chyby byla v rámci této práce navržena a zhotovená potištěná PVC deska s rastrem 5 a 10 cm. V následujícím obr. č.40 je znázorněna část návrhu desky s rastrem pro umisťování hlavice luxmetru.

[1;1]	[1;2]	[1;3]	[1;4]	[1;5]	[1;5]
	[1;1]		[1;2]		[1;3]
[2;1]	[2;2]	[2;3]	[2;4]	[2;5]	[2;5]
[3;1]	[3;2]	[3;3]	[3;4]	[3;5]	[3;5]
	[2;1]		[2;2]		[2;3]
[4;1]	[4;2]	[4;3]	[4;4]	[4;5]	[4;5]

Obrázek 40 Náhled rastru desky

Deska má rozměry 1740 x 750 x 3 mm. Materiál je PVC, potištěn UV technologií, která by měla zabránit budoucímu poškrábání a zničení rastru. Na desce jsou dva rastry. První rastr je 5 cm červené barvy. Souřadnice jsou umístěny v dolním pravém rohu (4. kvadrant). Rastr obsahuje 15 řádků a 34 sloupců. Druhý rastr je 10 cm černé barvy, který má 7 řádků a 17 sloupců. Zde jsou souřadnice umístěny v horním pravém rohu (2. kvadrant).

Deska je umístěná na stole se světelným zdrojem v pravém horním rohu. Světelný zdroj je napájen přes stabilizovaný zdroj napětí Gooch Housego OL 83A, který je pravidelně kalibrován. Na obrázku č.41 je úloha připravena k měření.



Obrázek 41 Laboratorní úloha měření osvětlenosti pracovního stolu

Pro zpřesnění umístění hlavice luxmetru na průsečík dané souřadnice byl zhotoven nástavec z plexiskla. Nástavec má uprostřed vysoustružený otvor pro hlavici luxmetru. Rozměry má 5x5 cm. Pro správné umístění má nástavec viditelné risky, podle kterých je nástavec umístěn přesně na střed souřadnice. Na obrázku č.42 je detail nástavce.



Obrázek 42 Poziční nástavec pro hlavici luxmetru

1.2 Naměřené hodnoty

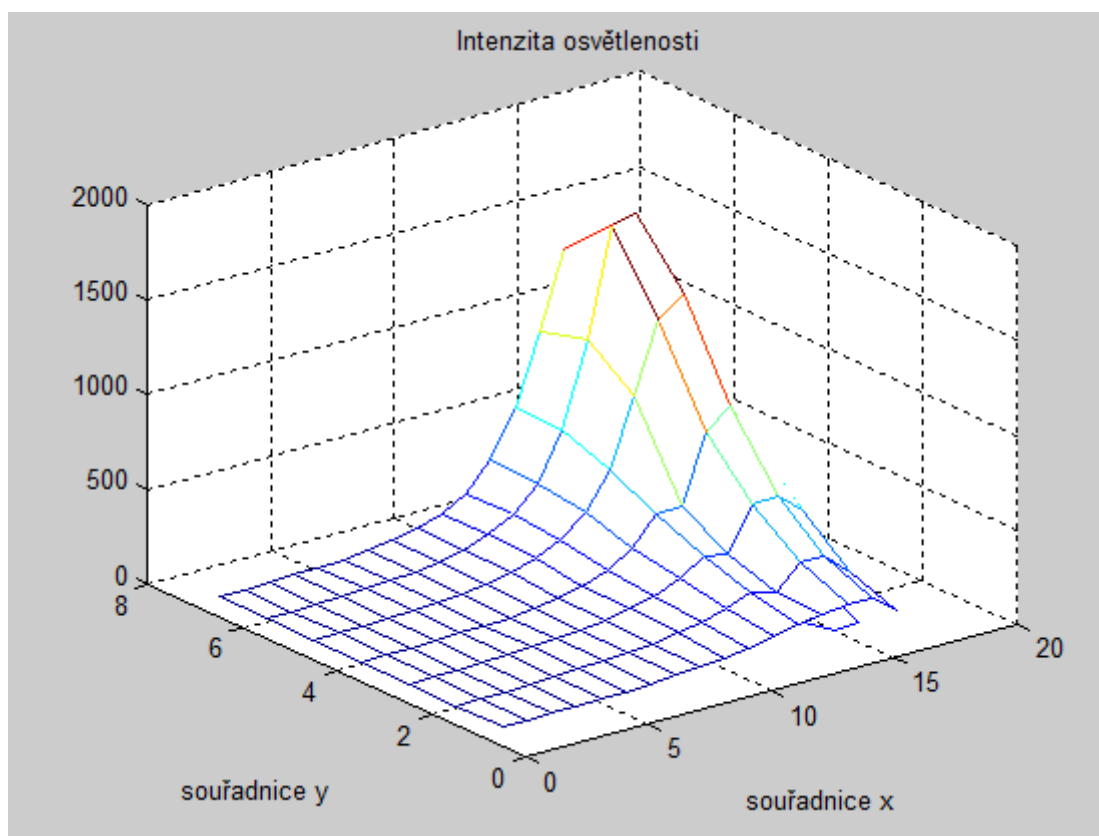
Y/X	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	11,61	13,85	16,66	20,82	26,17	33,96	45,11	61,36	89,45
2	11,91	14,09	16,90	21,11	26,54	34,45	45,84	63,92	92,45
3	12,37	14,39	17,03	21,07	26,17	32,74	43,48	59,40	85,71
4	10,74	12,56	14,94	18,15	22,67	26,38	34,52	48,04	69,77
5	10,44	11,77	14,08	17,46	21,58	28,37	38,50	50,99	70,25
6	10,26	12,25	14,65	17,72	21,64	26,86	33,95	42,34	56,56
7	10,12	11,92	13,63	15,93	18,63	22,88	29,03	38,53	49,29

Y/X	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	89,45	132,50	208,00	346,20	588,60	955,00	1359,0	0,00	0,00
2	92,45	138,90	215,30	339,90	587,70	1026,0	1600,0	1624,0	0,00
3	85,71	129,30	190,50	306,30	488,40	849,50	1215,0	1312,0	852,40
4	69,77	96,11	141,90	227,20	375,80	375,10	739,50	831,50	596,00
5	70,25	95,80	122,30	180,80	263,00	233,60	462,60	477,40	367,20
6	56,56	76,22	103,50	134,40	186,30	153,80	272,00	276,30	156,90
7	49,29	59,07	78,48	99,96	127,00	154,60	169,40	166,70	70,93

Tabulka naměřených a vypočítaných hodnot 1 Intenzita osvětlení pracovního stolu

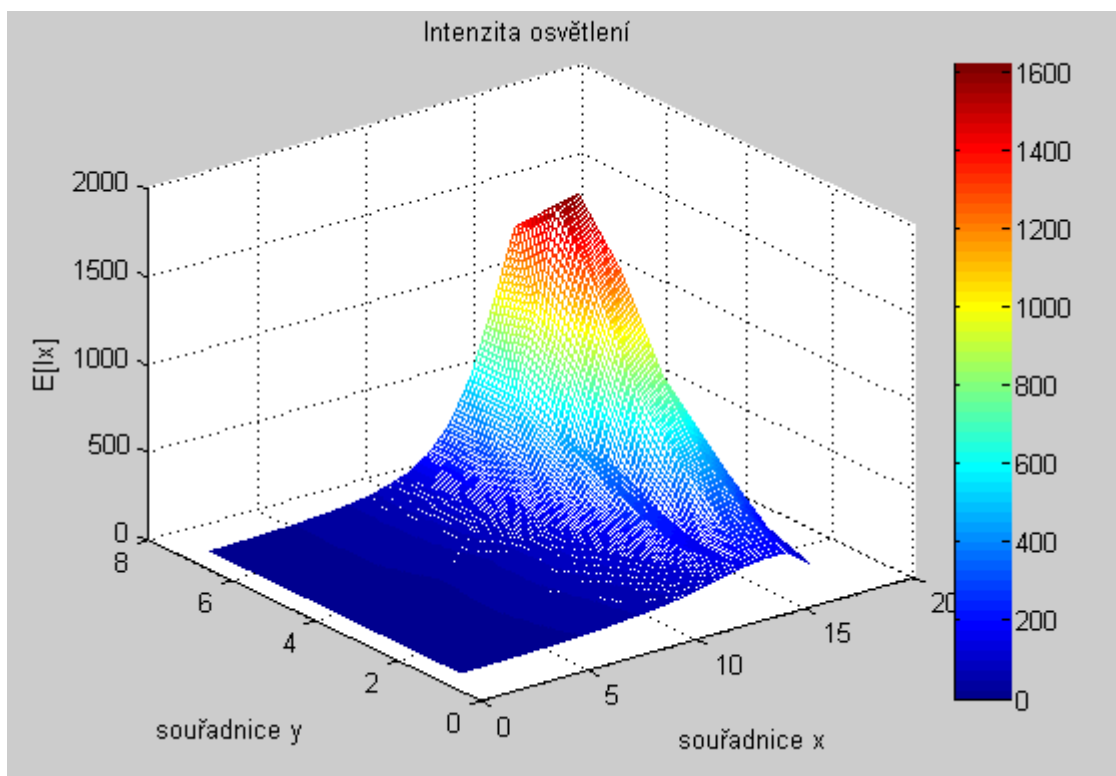
Poznámka: V pravém horním rohu je umístěn světelný zdroj a není zde možné naměřit žádné hodnoty intenzity osvětlenosti.

1.3 Grafické závislosti



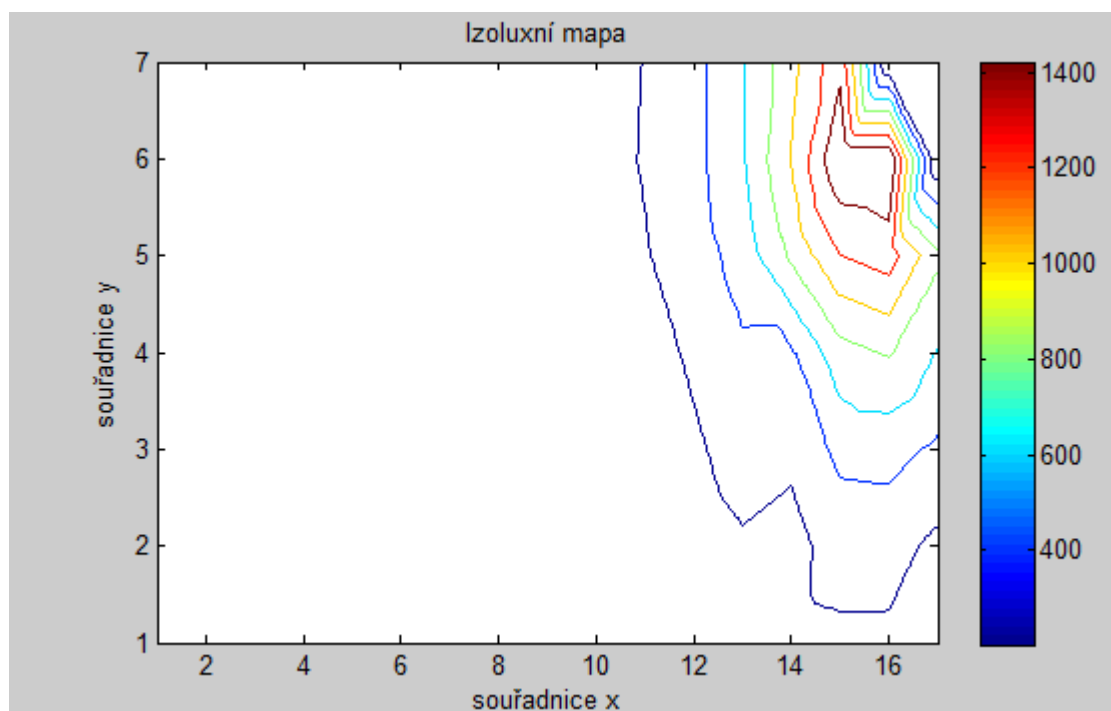
Obrázek 43 Prostorový graf intenzity osvětlení pracovního stolu

V následujícím obrázku č.44 je znázorněn totožný graf s použitím interpolace s krokem 0,1 pomocí funkce TriScatteredInterp v prostředí Matlab.



Obrázek 44 Interpolovaný prostorový graf intenzity osvětlení pracovního stolu

V obrázku č. 45 jsou zobrazeny izoluxy - křivky o stejné intenzitě osvětlení.



Obrázek 45 Izoluxy osvětleného pracovního stolu

1.4 Nejistota měření

1.4.1 Nejistoty typu A

Tato nejistota je podrobně popsána v kapitole 4.2.2. Počítá se pomocí směrodatné odchylky výběrové průměru. Pro stanovení této nejistoty bylo změřeno 20 hodnot pro vybrané souřadnice.

Příklad výpočtu pro souřadnici [3;15]

Umist'ování hlavičky luxmetru vizuálně

n	x	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1216	6,20	38,44
2	1206	-3,80	14,44
3	1206	-3,80	14,44
4	1217	7,20	51,84
5	1184	-25,80	665,64
6	1204	-5,80	33,64
7	1216	6,20	38,44
8	1208	-1,80	3,24
9	1216	6,20	38,44
10	1214	4,20	17,64
11	1206	-3,80	14,44
12	1225	15,20	231,04
13	1222	12,20	148,84
14	1213	3,20	10,24
15	1196	-13,80	190,44
16	1200	-9,80	96,04
17	1208	-1,80	3,24
18	1212	2,20	4,84
19	1202	-7,80	60,84
20	1225	15,20	231,04

Klasická analýza:

Rozsah souboru $n = 20$

Aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1209,80$

Součet čtverců $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 1907,20$

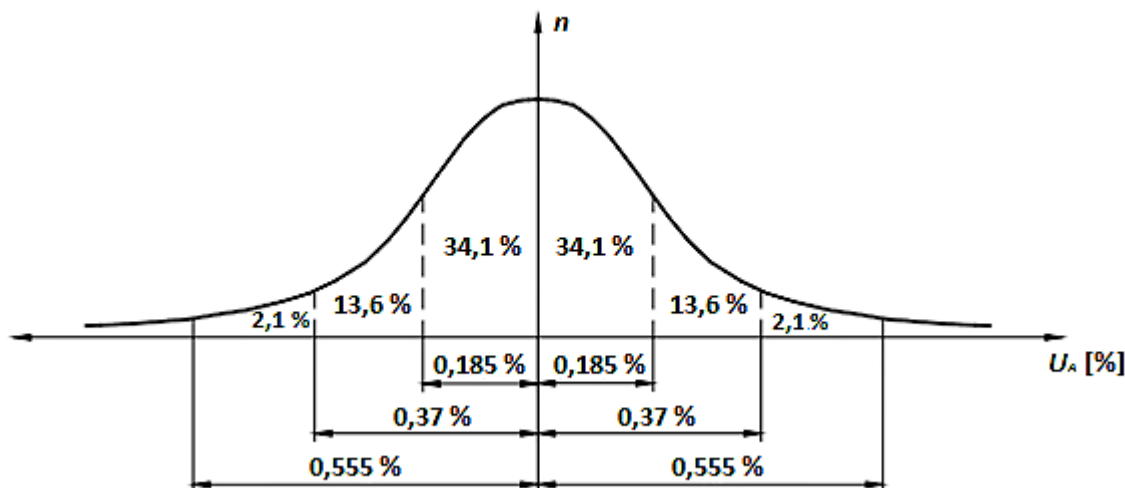
Absolutní nejistota typu u_A se vypočítá:

$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{20(20-1)} \cdot 1907,20} = 2,240$$

Relativní nejistota typu A

$$u_A = \frac{U_A}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{2,240}{1209,80} \cdot 100\% = 0,185\%$$

V obr. č. 46 je znázorněny pravděpodobnostní intervaly, ohraničené nejistotami typu A.



Obrázek 46 Rozložení pravděpodobnosti měření vizuálním umístěním

Umístování hlavice pomocí nástavce

n	x	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	1206	-0,65	0,42
2	1206	-0,65	0,42
3	1209	2,35	5,52
4	1207	0,35	0,12
5	1205	-1,65	2,72
6	1206	-0,65	0,42
7	1204	-2,65	7,02
8	1208	1,35	1,82
9	1208	1,35	1,82
10	1210	3,35	11,22
11	1209	2,35	5,52
12	1207	0,35	0,12
13	1204	-2,65	7,02
14	1208	1,35	1,82
15	1208	1,35	1,82
16	1204	-2,65	7,02
17	1206	-0,65	0,42
18	1208	1,35	1,82
19	1204	-2,65	7,02
20	1206	-0,65	0,42

Klasická analýza:

Rozsah souboru $n = 20$ Aritmetický průměr $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 1206,65$ Součet čtverců $\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 64,55$ Absolutní nejistota typu u_A se vypočítá:

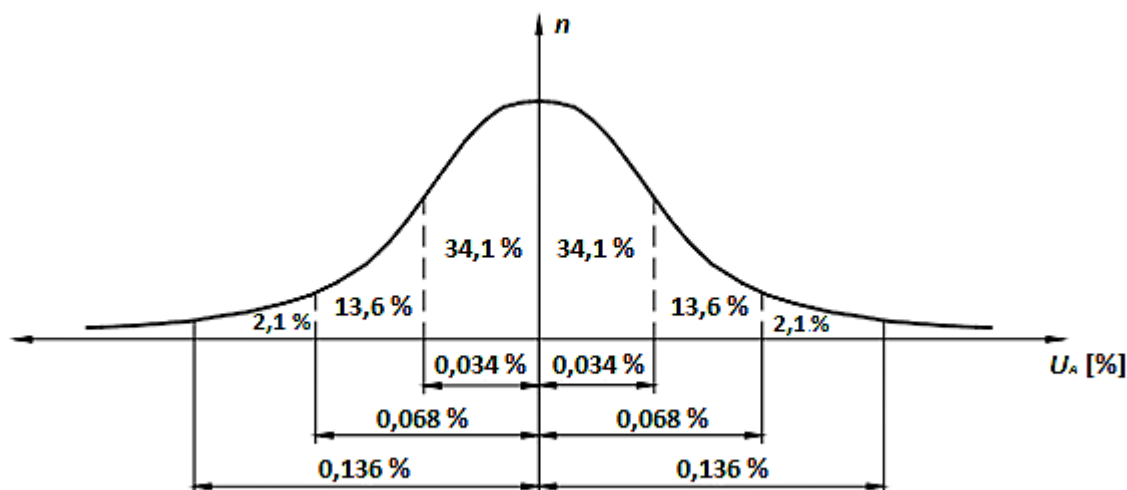
$$U_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{20(20-1)} \cdot 64,55} = 0,412$$

Relativní nejistota typu A

$$u_A = \frac{U_A}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{0,412}{1206,65} \cdot 100\% = 0,034\%$$

Pro ostatní naměřené body byla zjištěna jen nepatrně odlišná hodnota nejistoty typu A.



Obrázek 47 Rozložení pravděpodobnosti měření umístováním pomocí nástavce

Nejistota bez použití nástavce byla znatelně vyšší $u_A = 0,185\%$. Nejistota s nástavcem je rovna $u_A = 0,0342\%$. Lze konstatovat, že vyrobený nástavec minimalizoval nejistotu typu A na zanedbatelnou hodnotu.

1.4.2 Nejistota typu B

Měření osvětlenosti je provedeno pomocí luxmetru PRC Krochmann RadioLux 111. Certifikát o kalibraci přístroje poskytuje následující údaje.

- Spektrální chyba $f_1' = 1,16 \%$
- Směrová chyba $f_2 = 1,25 \%$,
- Nejistota použitého normálu $u_{n\%} = 0,6 \%$
- Nejistota kalibrace $u_{k\%} = 0,3 \%$

Dílčí standardní nejistota normálu

$$u_{Bn} = \frac{u_{n\%}}{k_u} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \%$$

Dílčí standardní nejistota kalibrace

$$u_{BE} = \frac{u_{k\%}}{k_u} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \%$$

Dílčí standardní nejistota spektrální chyby

$$u_{B1} = \frac{f_1'}{\sqrt{3}} = \frac{1,16}{\sqrt{3}} = 0,670 \%$$

Dílčí standardní nejistota směrové chyby

$$u_{B2} = \frac{f_2}{\sqrt{3}} = \frac{1,25}{\sqrt{3}} = 0,722 \%$$

Kombinovaná dílčí standardní nejistota

$$u_B = \sqrt{u_{Bn}^2 + u_{Bk}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2} = \sqrt{0,300^2 + 0,150^2 + 0,670^2 + 0,722^2} = 1,041 \%$$

Měřený světelný zdroj je klasická žárovka. Nejistotu chyby měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován, můžeme zanedbat. Dále zanedbáváme nejistotu napájecího zdroje.

1.4.3 Kombinovaná nejistota typu C

Kombinovaná nejistota typu C se vypočítá pomocí Gaussova zákona šíření nejistot typu A a B.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,0342^2 + 1,041^2} = 1,042 \%$$

Rozšířená kombinovaná nejistota

$$u_E = k_u \cdot u_C = 2 \cdot 1,042 = 2,084 \%$$

Měřená hodnota se zapisuje ve tvaru

$$E = (\bar{x} \pm u) = (1206,65 \pm 2,084\%) lx = (1206,65 \pm 25,15) lx$$

Měření osvětlenosti pracovního stolu je zatíženo nejistotou $u = 2,084 \%$. Náhodně změřená hodnota nebude zatížena větší nejistotou s pravděpodobností 95,44 %.

2 MĚŘENÍ NA FOTOMETRICKÉ LAVICI

Fotometrická lavice slouží k měření svítivosti bodových světelných zdrojů nebo ke kalibraci luxmetrů. Lavice se nachází v laboratoři dvě. První má délku 3 m a druhá 5 m. Odměrování je pomocí milimetrového cejkovaného pravítka. Dílčí nejistoty měření na fotometrické lavice jsou popsány v kapitole 5.3.2. Mezi tyto dílčí nejistoty patří:

- Nejistota měřicího přístroje
- Vliv konečných rozměrů vyzařovací plochy světelného zdroje a fotočlánku
- Vzájemná poloha světelného zdroje a fotočlánku
- Metoda odměrování vzdálenosti fotočlánku od světelného zdroje

Dílčí nejistoty jsou vypočítány pro dva měřicí přístroje:

- Spektroradiometr JeTi SCB 1211 UV
- Chroma metr KM CL-200

1. Fotometrická lavice s spektroradiometrem JeTi SCB 1211 UV

Kalibrační list uvádí nejistotu měření pro intenzitu osvětlenosti

$$u_k = 2,4 \%$$

Dílčí standardní nejistota kalibrace přístroje

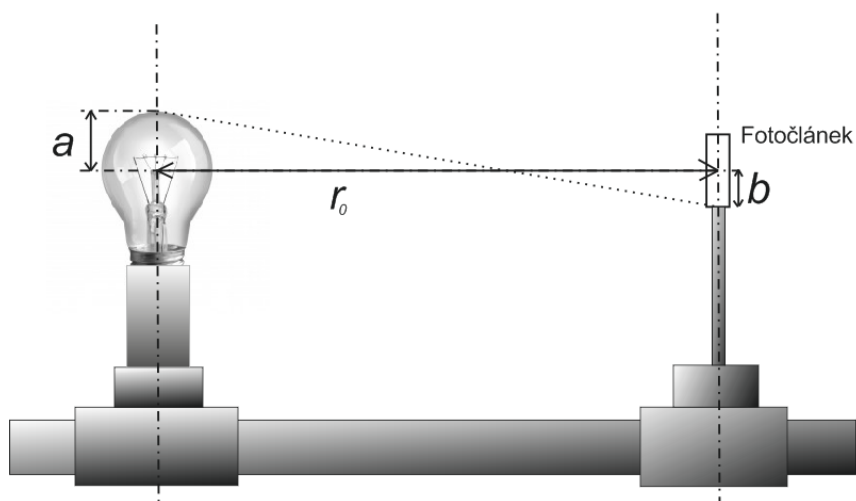
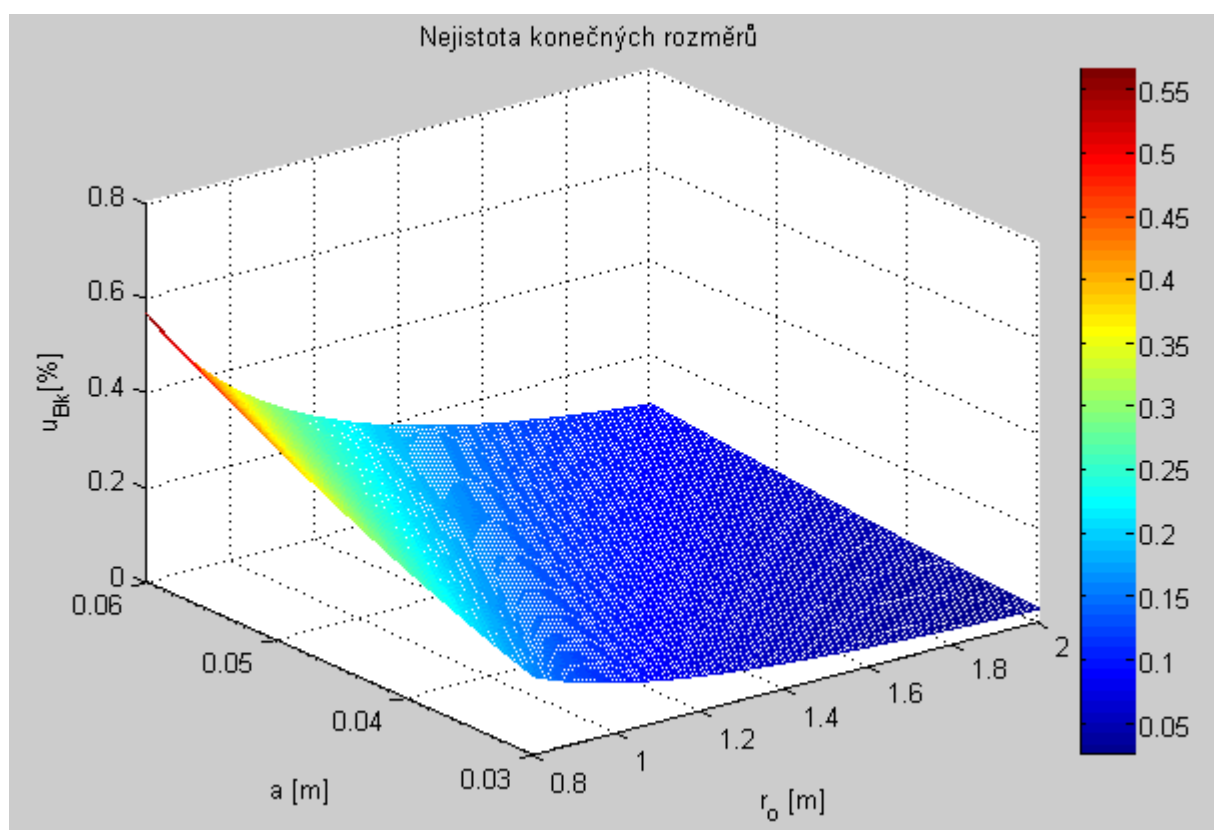
$$u_{BE} = \frac{u_k}{\sqrt{3}} = \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 1,386 \%$$

Dílčí standardní nejistota konečných rozměrů světelného zdroje a fotočlánku při uvažování vzdálenosti přijímací plochy spektroradiometru a středu světelného zdroje tvaru klasické žárovky $r_0 = 1 \text{ m}$. Průměr přijímací plochy přístroje je $d = 2b = 10 \text{ mm}$ a charakteristický rozměr žárovky $l = 2a = 80 \text{ mm}$.

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

$$= \frac{\left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1^2 + (0,04 + 0,005)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,175 \%$$

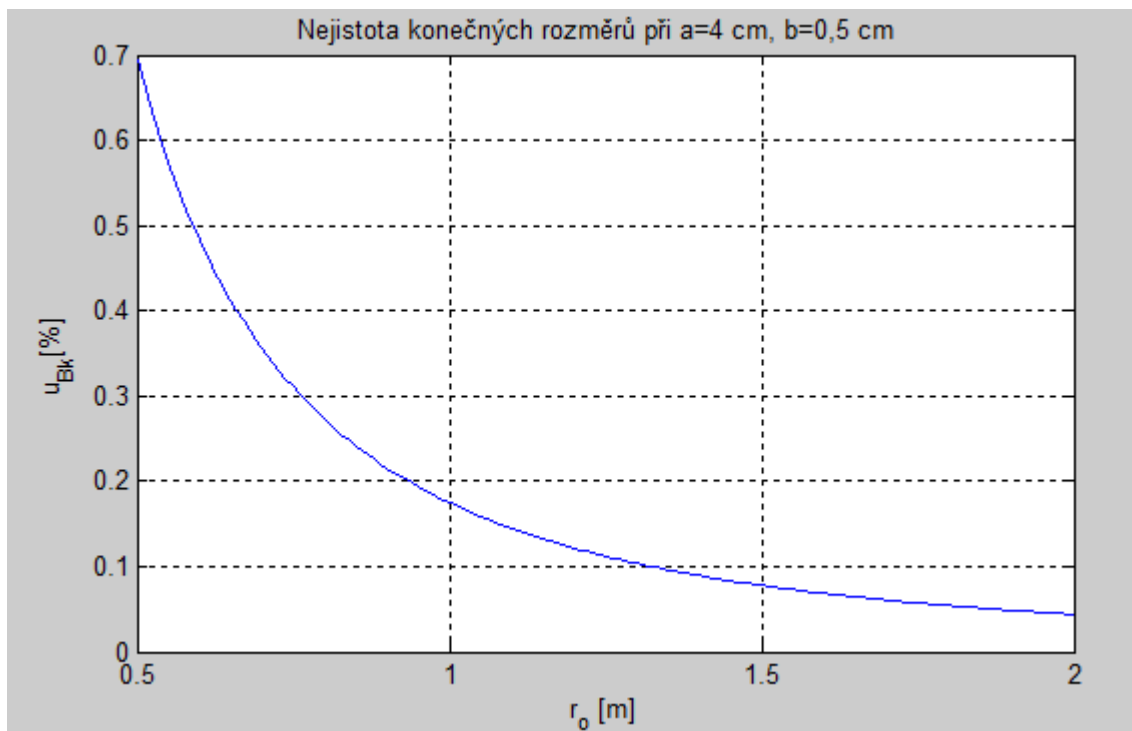
Při změně vzdálenosti r_0 a rozměru a se mění nejistota podle následujícího grafu na obr. č.48. Ze závislosti je patrné, že při dodržení vzdálenosti alespoň jednoho metru mezi měřicím přístrojem a světelným zdrojem přibližné velikosti klasické žárovky je dílčí standardní nejistota konečných rozměrů menší než 0,2 %. Přibližně od 2 m je možné tuto nejistotu zanedbat.



Obrázek 48 Nejistota konečných rozměrů fotometrické lavice

r_0 je vzdálenost od středu světelného zdroje ke středu přijímacímu povrchu fotočlátku
 a je polovina charakteristického (největšího) rozměru světelného zdroje (bez patice)
 b je poloměr přijímací části fotočlátku (5 mm).

Na obrázku č. 49 je graf závislosti nejistoty konečných rozměrů na vzdálenosti světelného zdroje velikosti žárovky od měřicího přístroje JeTi SCB 1211 UV.



Obrázek 49 Graf závislosti dílčí nejistoty konečných rozměrů na vzdálenosti světelného zdroje od měřicího přístroje

Dílčí standardní nejistota nastavení polohy fotočlánku při uvažování maximální výchylky od normály měřicího přístroje $\beta = 3^\circ$.

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} = \frac{1 - \cos(3^\circ)}{2} = 0,069\%$$

Dílčí standardní nejistota odměřování při maximální chybě odměřování $Z_{l\max} = 1\text{ mm}$ a při vzdálenosti $r_0 = 1\text{ m}$

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l\max}}{r_0 \sqrt{3}} \cdot 100\% = \frac{0,001}{1 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,057\%$$

Výsledná nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici:

$$u_{Bl} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bl}^2} = \sqrt{1,386^2 + 0,175^2 + 0,069^2 + 0,057^2} = 1,400\%$$

Výsledná kombinovaná rozšířená nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici:

$$u_I = k \cdot u_c = 2 \cdot 1,400 = 2,800\%$$

2. Fotometrická lavice s chroma metrem KM CL-200

Dokumentace přístroje uvádí následující údaje.

- Chyba měření intenzity osvětlení $u_E = \pm 2 \% \pm 1 \text{ digit}$
- Spektrální chyba $f'_1 = 8 \%$
- Průměr přijímací plochy $d = 2a = 25 \text{ mm}$

Dílčí standardní nejistota měření intenzity osvětlení

$$u_{BE} = \frac{\frac{\delta_1}{100} + \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% = \frac{\frac{2}{100} + \frac{1 \cdot 0,1}{500,5}}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% = 1,166 \%$$

Dílčí standardní nejistota spektrální chyby

$$u_{B1} = \frac{f'_1}{\sqrt{3}} = \frac{8}{\sqrt{3}} = 4,619 \%$$

Dílčí standardní nejistota konečných rozměrů

$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{1}{\sqrt{1^2 + (0,04 + 0,0125)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100 \% = 0,238 \%$$

Dílčí standardní nejistoty polohy fotočlánku a odměřování zůstávají stejné jako v předchozím případě $u_{Bp} = 0,069 \%$, $u_{Bl} = 0,057 \%$.

Dílčí standardní nejistotu měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován je zanedbána z důvodu neuvedení přesné spektrální citlivosti přístroje výrobcem.

Výsledná nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici s KM CL-200:

$$u_{BI} = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{B1}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bs}^2 + 4 \cdot u_{Bl}^2} = \\ = \sqrt{1,166^2 + 4,619^2 + 0,238^2 + 0,069^2 + 4 \cdot 0,057^2} = 4,772 \%$$

Výsledná kombinovaná rozšířená nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici:

$$u_I = k \cdot u_c = 2 \cdot 4,772 = 9,543 \%$$

3 MĚŘENÍ NA GONIOFOTOMETRU

Nejistoty goniofotometru jsou popsány v kapitole 5.3.3. V laboratoři se nachází goniofotometr s otočným světelným zdrojem a pevně umístěným fotočlánkem. Upevňovací mechanismus je vzdálen 11 metrů od měřicího přístroje PRC Krochmann RadioLux 111, který je upevněn na zdi. Pro úhlový posun jsou použity krokové motory. Uvažované dílčí nejistoty jsou zejména:

- Úhlového posunu ramene $u_{B\lambda}$
- Měřicího přístroje - luxmetru u_{BE}
- Vlivu konečných rozměrů vyzařovací plochy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bk}
- Vzájemné polohy světelného zdroje a fotočlánku u_{Bp}
- Metody odměřování vzdálenosti fotočlánku od světelného zdroje u_{Bl}

Světelný zdroj je napájen přes stabilizovaný zdroj napětí Gooch Housego OL 83A, který je pravidelně kalibrován a jeho nejistotu lze zanedbat.

Nejistoty měřicího přístroje PRC Krochmann RadioLux 111

Dílčí standardní nejistota normálu

$$u_{Bn} = \frac{u_{n\%}}{k_u} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \%$$

Dílčí standardní nejistota kalibrace

$$u_{BE} = \frac{u_{k\%}}{k_u} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \%$$

Dílčí standardní nejistota spektrální chyby

$$u_{B1} = \frac{f'_1}{\sqrt{3}} = \frac{1,16}{\sqrt{3}} = 0,670 \%$$

Dílčí standardní nejistota směrové chyby

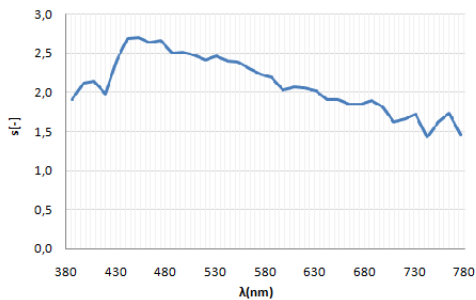
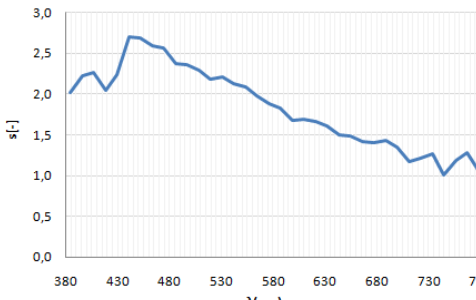
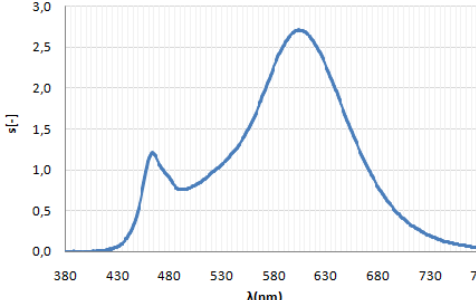
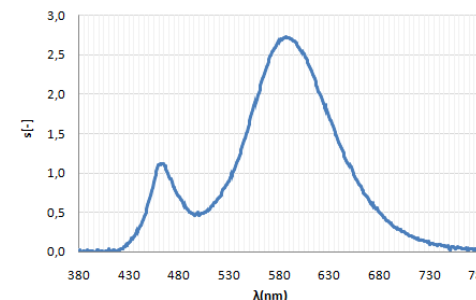
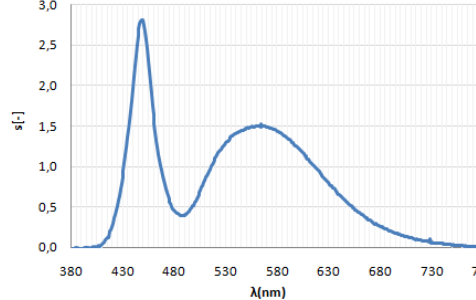
$$u_{B2} = \frac{f_2}{\sqrt{3}} = \frac{1,25}{\sqrt{3}} = 0,722 \%$$

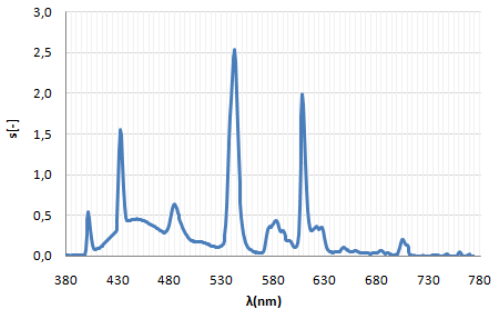
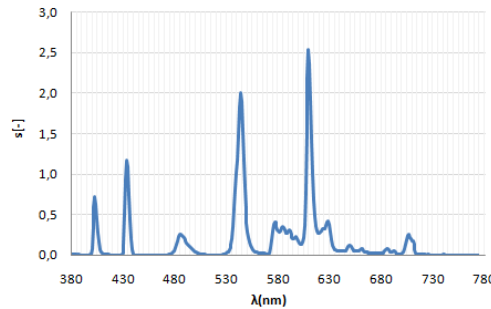
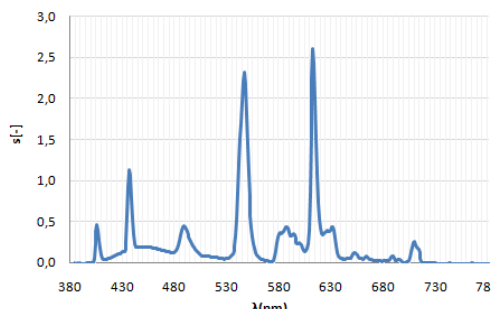
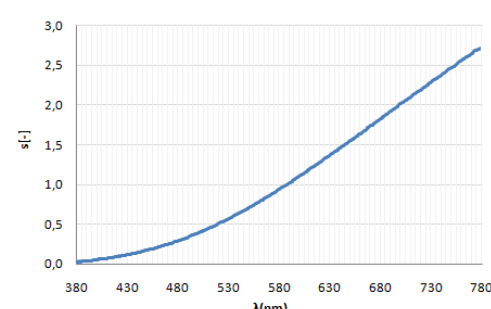
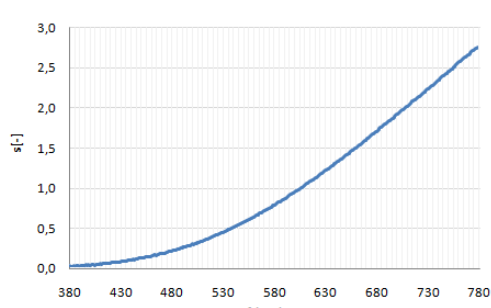
Dílčí standardní nejistota měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován.

$$u_{Bz} = \frac{f(Z)_{\max}}{\sqrt{3}} = \frac{0,228}{\sqrt{3}} = 0,132 \%$$

Ve vztahu je pro výpočet uvažována chyba měření $f(Z)_{\max}$ normalizovaného spektra D75. Pro vyjádření této nejistoty je třeba znát spektrální citlivost fotočlánku. Ta je uvedena v kalibračním protokolu s krokem 10 nm. Největší spektrální nejistota byla zjištěna pro měření zářivek, kde dosahuje nejistota až $u_{Bz} = 0,650 \%$. U LED světelných zdrojů je tato nejistota menší $u_{Bz} = 0,152 \%$. Obecně se doporučuje tuto nejistotu počítat pro normalizovaný typ světla D75. Nejistota pro spektrum D75 činí $u_{Bz} = 0,228 \%$. Normály, podle kterých se přístroje kalibrují, mají 2856 K. Při odlišné teplotě chromatičnosti se tato nejistota v malé míře také projevuje. Tuto nejistotu lze ale při měření klasických žárovek zanedbat.

V následující tabulce č. 15 jsou vypočítány chyby $f(Z)$ pro vybrané světelné zdroje.

Světelný zdroj	Spektrum	T [K]	$f(Z)$ [%]
Normalizovaný typ D65		6500	0,202
Normalizovaný typ D75		7500	0,228
Z-Light LED		2715	0,067
Osram LED Warm		2908	0,152
Osram LED Cool		6122	0,100

Světelný zdroj	Spektrum	T [K]	$f(Z)$ [%]
Kompaktní zářivka OSRAM 6500K	 The graph shows the relative spectral power distribution for an OSRAM 6500K compact fluorescent lamp. The x-axis represents wavelength λ in nm, ranging from 380 to 780. The y-axis represents relative intensity $s(\lambda)$, ranging from 0.0 to 3.0. The spectrum consists of several sharp, discrete peaks, with the most prominent ones occurring around 430 nm, 530 nm, and 630 nm.	6337	0,512
Kompaktní zářivka OSRAM 3000K	 The graph shows the relative spectral power distribution for an OSRAM 3000K compact fluorescent lamp. The x-axis represents wavelength λ in nm, ranging from 380 to 780. The y-axis represents relative intensity $s(\lambda)$, ranging from 0.0 to 3.0. The spectrum shows discrete peaks, with a notable peak around 530 nm and another around 630 nm.	2953	0,650
Kompaktní zářivka Megaman 4000K	 The graph shows the relative spectral power distribution for a Megaman 4000K compact fluorescent lamp. The x-axis represents wavelength λ in nm, ranging from 380 to 780. The y-axis represents relative intensity $s(\lambda)$, ranging from 0.0 to 3.0. The spectrum displays discrete peaks, with significant intensity around 530 nm and 630 nm.	3911	0,588
Klasická žárovka TESLA(150W) při $P=100W$	 The graph shows the relative spectral power distribution for a TESLA 150W incandescent lamp operating at $P=100W$. The x-axis represents wavelength λ in nm, ranging from 380 to 780. The y-axis represents relative intensity $s(\lambda)$, ranging from 0.0 to 3.0. The spectrum is continuous, showing a broad range of wavelengths with intensity increasing towards the longer wavelength (red) end of the visible spectrum.	2490	0,034
Klasická žárovka TESLA(150W) při $P=75W$	 The graph shows the relative spectral power distribution for a TESLA 150W incandescent lamp operating at $P=75W$. The x-axis represents wavelength λ in nm, ranging from 380 to 780. The y-axis represents relative intensity $s(\lambda)$, ranging from 0.0 to 3.0. The spectrum is continuous, showing a broad range of wavelengths with intensity increasing towards the longer wavelength (red) end of the visible spectrum.	2313	0,050

Tabulka 15 Tabulka nejistot měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován

Nejistoty konstrukčního charakteru

Při měření křivek svítivosti s krokem 1° a při maximální úhlové výchylce $\Delta\gamma_{\max} = 0,0055^\circ$ dostaneme dílčí nejistotu úhlového posunu:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{\max}}{\gamma_{\text{vzt}} \sqrt{3}} = \frac{0,0055}{1 \cdot \sqrt{3}} = 0,317 \%$$

Dílčí standardní nejistota konečných rozměrů při parametrech:

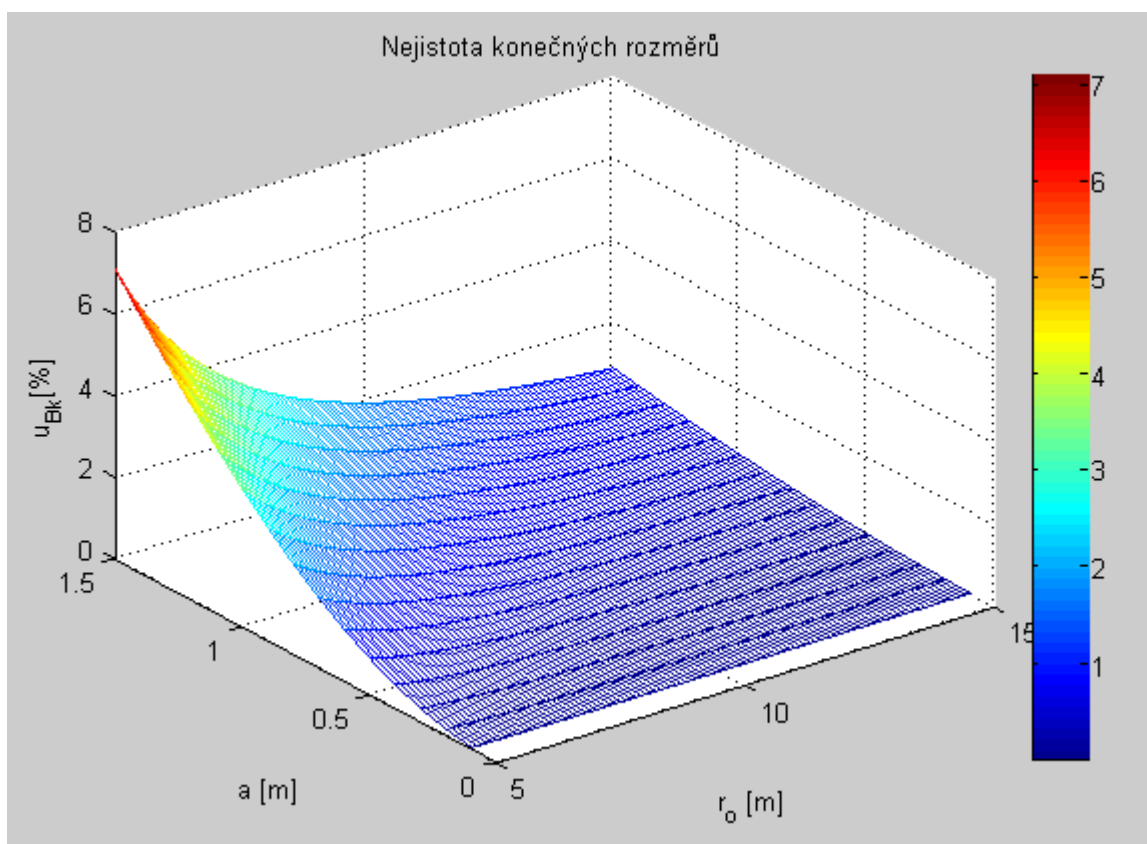
$$r_0 = 11 \text{ m}$$

$$a = 1,5 \text{ m}$$

$$b = 0,005 \text{ m}$$

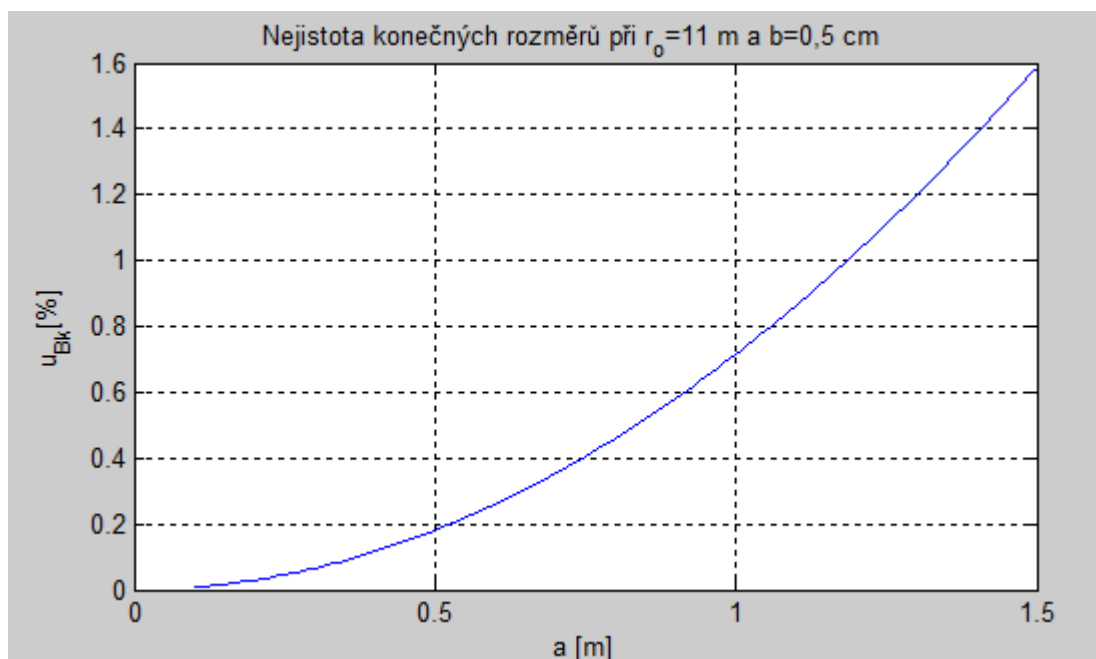
$$u_{Bk} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} = \frac{\left| 1 - \left(\frac{11}{\sqrt{11^2 + (1,5 + 0,005)^2}} \right)^3 \right|}{\sqrt{3}} \cdot 100\% = 1,584 \%$$

Z obrázku č.50 je patrné, že při nedostatečné vzdálenosti měřicího přístroje a světelného zdroje je tato nejistota značná. V ideálním případě by měla být tato vzdálenost 5-10 krát větší než je charakteristický rozměr svítidla.



Obrázek 50 Nejistota konečných rozměrů goniofotometru

Na obr.č.51 je znázorněna nejistota pro goniofotometr s vzdáleností $r_0 = 11\text{ m}$.



Obrázek 51 Nejistota konečných rozměrů goniofotometru v závislosti na velikosti svítidla

Dílčí standardní nejistota nastavení polohy fotočlánku při uvažování maximální výchylky od normály měřicího přístroje $\beta = 3^\circ$.

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} = \frac{1 - \cos(3^\circ)}{2} = 0,069\%$$

Dílčí standardní nejistota odměřování při maximální chybě odměřování:

$$Z_{l\max} = 1\text{ cm} \text{ a při vzdálenosti } r_0 = 11\text{ m}$$

$$u_{Bl} = \frac{Z_{l\max}}{r_0 \sqrt{3}} \cdot 100\% = \frac{0,01}{11 \cdot \sqrt{3}} \cdot 100\% = 0,052\%$$

Výsledná nejistota pro měření svítivosti na goniofotometru:

$$\begin{aligned} u_{Bl} &= \sqrt{u_{Bn}^2 + u_{Bk}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{Bz}^2 + u_{B\gamma}^2 + u_{Bk}^2 + u_{Bp}^2 + u_{Bl}^2 + 4 \cdot u_{Bl}^2} \\ &= \sqrt{0,3^2 + 0,15^2 + 0,67^2 + 0,722^2 + 0,132^2 + 0,317^2 + 1,584^2 + 0,069^2 + 4 \cdot 0,052^2} \\ &= 1,930\% \end{aligned}$$

Výsledná kombinovaná rozšířená nejistota pro měření svítivosti na goniometru:

$$U_I = k \cdot u_c = 2 \cdot 1,930 = 3,860\%$$

4 KULOVÝ INTEGRÁTOR

V kulovém integrátoru se měří celkový světelný tok světelného zdroje či svítidla. Jednotlivé nejistoty kulového integrátoru jsou popsány v kapitole 5.3.1. Měřicí přístroj je spektrometr JeTi SCB 1211 UV. Kulový integrátor má průměr 2,5 m. Vnitřní stěna je natřena oxidem hořečnatým. Uvnitř koule jsou dvě clony, první zakrývá fotočlánek a druhá testovací žárovku. Při stanovení výsledné nejistoty se uvažují tyto dílčí nejistoty.

- Nejistota kalibrace měřicího přístroje
- Nejistota časové stability normálu
- Nestejnoměrný povrch uvnitř koule

Kalibrační list uvádí nejistotu měření pro intenzitu osvětlení

$$u_k = 2,4 \%$$

Dílčí standardní nejistota kalibrace přístroje

$$u_{BE} = \frac{u_k}{\sqrt{3}} = \frac{2,4}{\sqrt{3}} = 1,386 \%$$

Nejistota časové stability normálu za předpokladu pravidelné kalibrace po 25 h.

$$u_{Bt} = 0,2 \%$$

Nejistota nestejnoměrného povrchu koule se v praxi odhaduje na hodnotu

$$u_{Bu} = 0,5 \%$$

Výsledná nejistota pro měření svítivosti na fotometrické lavici:

$$u_C = \sqrt{u_{BE}^2 + u_{Bt}^2 + u_{Bu}^2} = \sqrt{1,386^2 + 0,2^2 + 0,5^2} = 1,487 \%$$

Výsledná kombinovaná rozšířená nejistota pro měření svítivosti na goniometru:

$$u_\phi = k \cdot u_C = 2 \cdot 1,487 = 2,974 \%$$

V kulovém integrátoru byl změřen světelný tok svítidla s válcovým difuzorem s LED světelným zdrojem o výkonu 30 W a jeho menší varianta s 7 W. Hodnoty se po několika hodinách ustálily na hodnotu:

$$\phi_{30W} = (8811 \pm 2,974 \%) \text{ lm} = (8811 \pm 262) \text{ lm}$$

$$\phi_{7W} = (1861 \pm 2,974 \%) \text{ lm} = (1861 \pm 55) \text{ lm}$$

Pokud se měření zopakuje za stejných podmínek, bude naměřená hodnota v tomto intervalu s pravděpodobností 95,44 %

5 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

Měření rozložení intenzity osvětlení na pracovním stole s PRC Krochmann RadioLux 111

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty [%]
Nejistota typu A	u_A	0,034
Dílčí standardní nejistoty typu B		
Normálu	u_{Bn}	0,300
Kalibrace přístroje	u_{BE}	0,150
Spektrální chyby	u_{B1}	0,670
Směrové chyby	u_{B2}	0,722
Kombinovaná nejistota typu C	u_C	1,042
Rozšířená nejistota měření intenzity osvětlení	u_E	2,084

Tabulka 16 Přehled dílčích nejistot měření intenzity osvětlení pracovního stolu

Měření svítivosti na fotometrické lavici s spektrometrem JeTi SCB 1211 UV

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty [%]
Dílčí standardní nejistoty typu B		
Kalibrace přístroje	u_{BE}	1,386
Konečných rozměrů světelného zdroje	u_{Bk}	0,175
Polohy fotočlánku	u_{Bp}	0,069
Odměrování vzdálenosti	u_{Bl}	0,057
Kombinovaná nejistota typu C	u_C	1,400
Rozšířená nejistota měření svítivosti	u_I	2,800

Tabulka 17 Přehled dílčích nejistot měření svítivosti na fotometrické lavici s spektrometrem JeTi SCB 1211 UV

Měření svítivosti na fotometrické lavici s chroma metrem KM CL-200

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty [%]
Dílčí standardní nejistoty typu B		
Chyba měření intenzity osvětlení	u_{BE}	1,116
Spektrální chyba	u_{B1}	4,619
Konečných rozměrů světelného zdroje	u_{Bk}	0,238
Polohy fotočlánku	u_{Bp}	0,069
Odměrování vzdálenosti	u_{Bl}	0,057
Kombinovaná nejistota C	u_C	4,772
Rozšířená nejistota měření svítivosti	u_I	9,543

Tabulka 18 Přehled dílčích nejistot měření svítivosti na fotometrické lavici s chroma metrem KM CL-200

Měření křivek svítivosti na goniofotometru s PRC Krochmann RadioLux 111

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty [%]
Dílčí standardní nejistoty typu B		-
Normálu	u_{Bn}	0,300
Kalibrace přístroje	u_{BE}	0,150
Spektrální chyby	u_{B1}	0,670
Směrové chyby	u_{B2}	0,722
Měření odlišného spektra od typu A	u_{Bz}	0,132
Úhlového posunu	$u_{B\gamma}$	0,317
Konečných rozměrů	u_{Bk}	1,584
Polohy fotometru	u_{Bp}	0,069
Měření vzdálenosti	u_{Bl}	0,052
Kombinovaná nejistota C	u_C	1,930
Rozšířená nejistota měření svítivosti	u_I	3,860

Tabulka 19 Přehled dílčích nejistot měření křivek svítivosti na goniofotometru s PRC Krochmann RadioLux 111

Měření celkového světelného toku v kulovém integrátoru

Název nejistoty	Symbol	Hodnota nejistoty [%]
Dílčí standardní nejistoty typu B		-
Kalibrace přístroje	u_{BE}	1,386
Časové stability normálu	u_{Bt}	0,200
Nestejnoměrného povrchu uvnitř koule	u_{Bu}	0,500
Kombinovaná nejistota C	u_C	1,487
Rozšířená nejistota měření intenzity osvětlení	u_ϕ	2,974

Tabulka 20 Přehled dílčích nejistot kulového integrátoru

V laboratorních podmínkách je rušení okolních světelných zdrojů minimální a všechny světelné zdroje jsou napájeny stabilizovaným zdrojem napětí. Po ustálení měřené hodnoty lze tedy nejistotu typu A zanedbat.

Ve všech fotometrických měřeních je výsledná nejistota závislá ve velké míře na celkové chybě fotometrického přístroje. Tato chyba je systematická a nelze ji odstranit. Tyto chyby jsou zahrnuty nejistotou typu B. Chyby fotometru jsou uvedeny v dokumentaci přístroje. Někdy zde bývají uvedeny další chyby jako je spektrální nebo směrová. Dále je nutno počítat s nejistotou kalibrace a nejistotou použitého normálu. Tyto údaje musí být uvedeny v každém kalibračním listu, společně i s koeficientem rozšíření. Pokud výrobce poskytuje hodnoty spektrální citlivosti fotočlánku, lze vypočítat nejistotu měření odlišného spektra, než pro který je přístroj kalibrován. U goniofotometru a fotometrické lavice se projevuje do výsledné nejistoty také zanedbávání konečných rozměrů světelného zdroje a přijímací plochy fotočlánku a přesnost jejich umístění.