

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky



Diplomová práce

Vytvoření metodického postupu měření
parametrů světelných zdrojů v kulovém
integrátoru spolu s provedením vzorových
měření pro vybrané světelné zdroje

Bc. Jiří Pavelka

Vedoucí práce: Ing. Petr Žák, Ph.D.

Studijní program: Elektrotechnika, energetika, management

Studijní obor: Elektroenergetika

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Bc. Jiří Pavelka

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: Vytvoření metodického postupu měření parametrů světelných zdrojů v kulovém integrátoru spolu s provedením vzorových měření pro vybrané světelné zdroje

Pokyny pro vypracování:

1. Popis teorie měření parametrů světelných zdrojů v kulovém integrátoru
2. Určení nejistot měření parametrů světelných zdrojů v kulovém integrátoru
3. Provedení měření parametrů světelných zdrojů v kulovém integrátoru
4. Ověření výsledků naměřených hodnot
5. Vytvoření metodického postupu měření v kulovém integrátoru

Seznam odborné literatury:

1. DiLaura, D.L. - Houser, K.W. - Mistrick, R.G. - Steffy, G.R The Lighting Handbook, Illuminating Engineering Society, 10th edition, 2011, ISBN 978-087995-241-9
2. Habel, J. - Dvořáček, K. - Dvořáček, V. - Žák, P. Světlo a osvětlování. 1. Praha: FCC Public, 2013, 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3
3. ČSN 13032 - Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů zdrojů a svítidel

Vedoucí: Ing. Petr Žák, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015



V Praze dne 21. 10. 2014

Prohlášení

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

V Praze, dne

.....

Podpis

Poděkování

Za vedení své diplomové práce bych rád poděkovat svému vedoucímu Ing. Petrovi Žákovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Tomáši Horákovi za umožnění provádět měření ve světelné laboratoři společnosti Vyrtých a za pomoc s měřením. Poděkování rovněž patří Ing. Zuzaně Pelánové a Ing. Janu Zálešákovi za konzultace a cenné připomínky.

Děkuji také své rodině a manželce za podporu jak během studia, tak při psaní této práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vytvořením metodického postupu měření parametrů světelných zdrojů pomocí kulového integrátoru. V této práci je popsáno zařízení fotometrické laboratoře a potřebné kroky k provedení úspěšného měření. Podstatnou částí práce je pak určení standardní nejistoty měření. Dále jsou prezentovány výsledky měření světelných zdrojů, které byly použity pro provedení vzorového měření. Hlavním výstupem této diplomové práce je uživatelská příručka sloužící jako manuál pro obsluhu měření. Tato příručka je vedena jako samostatný dokument.

Klíčová slova

Světelný tok; kulový integrátor; spektrometr; CCD detektor; standardní nejistota

Abstract

The purpose of this master thesis is to create a methodology for measurement of parameters of light sources by means of an integrating sphere. The thesis describes components of the photometric laboratory and all required steps which need to be carried out to perform a successful measurement. An emphasis is put on a standard measurement uncertainty assessment. Furthermore, a sample measurement of several types of light sources was performed and results of this measurement are presented. A user guide for measurement personnel is a substantial part of this work. However, the user guide is a standalone document.

Key words

Luminous flux; integrating sphere; spectroradiometer; CCD detector; standard uncertainty

Obsah

Úvod	1
1 Popis veličin	3
1.1 Zářivý tok.....	3
1.2 Spektrální zářivý tok.....	3
1.3 Světelný účinek	4
1.4 Světelný tok	5
2 Teorie měření v kulovém integrátoru	6
3 Teorie nejistot měření.....	10
3.1 Standardní nejistota typu A	10
3.2 Standardní nejistota typu B	12
3.3 Kombinovaná standardní nejistota.....	13
3.4 Rozšířená standardní nejistota	14
4 Měřicí sestava ve společnosti Vyrtých	15
4.1 Kulový integrátor OL IS 7600	16
4.2 Stabilizovaný zdroj proudu OL 410-200.....	17
4.3 Spektroradiometr OL 770 VIS	17
4.3.1 Spektrograf.....	18
4.3.2 CCD detektor	18
4.4 Normál světelného toku OL 220-TSF	20
5 Postup měření v laboratoři Vyrtých	22
5.1 Příprava světelných zdrojů.....	22
5.2 Nastavení parametrů systému.....	23
5.3 Kalibrace systému	23
5.3.1 Kalibrace korekčního zdroje.....	24
5.3.2 Kalibrace pro jednotlivé měřené zdroje.....	25

5.4	Měření světelného toku světelných zdrojů	26
6	Výpočet nejistoty měření světelného toku.....	27
6.1	Nejistota kalibrace etalonu světelného toku	27
6.2	Nestabilita etalonu světelného toku	28
6.3	Nestabilita použitých zařízení	28
6.4	Nepřesnost měření elektrických veličin.....	29
6.5	Chyba měřicího zařízení	30
6.6	Rozdílná pohltivost etalonu a měřených zdrojů	30
6.7	Rozdíl spektrálního složení etalonu a měřených zdrojů	31
6.8	Stanovení standardní nejistoty světelného toku	31
7	Měření parametrů světelných zdrojů.....	34
7.1	Kompaktní zářivky	35
7.2	Lineární zářivky T8	38
7.3	Lineární zářivky T5	40
7.4	LED zdroje	42
7.5	Žárovka.....	43
7.6	Halogenidová výbojka	44
7.7	Vysokotlaká sodíková výbojka	46
7.8	Vysokotlaká rtuťová výbojka	48
7.9	Nízkotlaká sodíková výbojka	49
8	Měření školních normálů světelného toku.....	52
9	Uživatelská příručka	55
	Závěr	57
	Seznam literatury	I
	Obsah přiloženého CD	III

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1.1: Průběh spektrální citlivosti $V(\lambda)$ pro normálního fotometrického pozorovatele</i>	4
<i>Obrázek 2.1: Schéma kulového integrátoru [3]</i>	6
<i>Obrázek 3.1: Normální rozdělení</i>	14
<i>Obrázek 4.1: Kulový integrátor OL 7600 IS [6]</i>	16
<i>Obrázek 4.2: Závislost činitele odrazu náteru kulového integrátoru na vlnové délce [6]</i>	16
<i>Obrázek 4.3: Schéma spektrografu</i>	18
<i>Obrázek 4.4: Struktura MOS kapacitoru</i>	19
<i>Obrázek 4.5: Čtení z CCD detektoru pomocí posuvných registrů [8]</i>	20
<i>Obrázek 4.6: Způsob upevnění normálu</i>	21
<i>Obrázek 5.1: Schéma měřící soustavy</i>	24
<i>Obrázek 5.2: Kalibrace korekčního zdroje</i>	25
<i>Obrázek 7.1: Analyzátor sítě Chauvin Arnoux C.A 8335</i>	34
<i>Obrázek 7.2: Vyzařované spektrum kompaktní zářivky výrobce Osram</i>	37
<i>Obrázek 7.3: Vyzařované spektrum kompaktní zářivky výrobce Philips</i>	37
<i>Obrázek 7.5: Vyzařované spektrum lineární zářivky 18 W T8 výrobce Osram</i>	39
<i>Obrázek 7.6: Vyzařované spektrum lineární zářivky 18 W T8 výrobce Philips</i>	39
<i>Obrázek 7.7: Vyzařované spektrum lineární zářivky 24 W T5 výrobce Osram</i>	41
<i>Obrázek 7.8: Vyzařované spektrum lineární zářivky 24 W T5 výrobce Sylvania</i>	41
<i>Obrázek 7.9: Vyzařované spektrum LED zdrojů Osram a Philips</i>	43
<i>Obrázek 7.10: Vyzařované spektrum klasické žárovky</i>	44
<i>Obrázek 7.11: Vyzařované spektrum halogenidové výbojky</i>	46
<i>Obrázek 7.12: Vyzařované spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky</i>	47
<i>Obrázek 7.13: Vyzařované spektrum vysokotlaké rtuťové výbojky</i>	49
<i>Obrázek 7.14: Vyzařované spektrum nízkotlaké sodíkové výbojky</i>	50

Seznam tabulek

<i>Tabulka 3.1: Hodnota koeficientu k_s pro daný počet měření.....</i>	<i>11</i>
<i>Tabulka 6.1: Přehled nejistot měření</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 7.1: Parametry kompaktních zářivek</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 7.2: Parametry lineárních zářivek T8.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 7.3: Parametry lineárních zářivek T5.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 7.4: Parametry LED zdrojů.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 7.5: Parametry žárovky</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 7.6: Parametry halogenidové výbojky.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7.7: Parametry vysokotlaké sodíkové výbojky.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 7.8: Parametry vysokotlaké rtuťové výbojky.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 7.9: Parametry nízkotlaké sodíkové výbojky</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 8.1: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-4.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 8.2: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-5.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8.3: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-7.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8.4: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 413.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 8.5: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu č. 3</i>	<i>54</i>

Úvod

Každý výrobce, ať už světelných zdrojů nebo svítidel, musí uvádět parametry svých výrobků. Tyto parametry mohou být například mechanické, elektrické anebo fotometrické. Právě pro světelné zdroje a svítidla hrají fotometrické parametry zásadní roli. Tím snad nejdůležitějším parametrem z hlediska světelně-technických veličin je světelný tok.

Světelný tok je zásadní veličina, pomocí které lze kvantifikovat účinek světelného záření na zrakový vjem. Světelný tok hraje rovněž důležitou roli při kvalitativním posuzování a porovnávání světelných zdrojů. Světelný tok světelných zdrojů je podstatným vstupem pro výpočet světelného toku svítidel. Světelný tok svítidel je pak důležitý parametr pro návrh osvětlovacích soustav.

Z těchto důvodů je nutné znát světelný tok vyráběných světelných zdrojů a svítidel. Proto je také důležité mít možnost světelný tok vhodně měřit. Za tímto účelem existují světelné laboratoře, které disponují potřebnými měřicími zařízeními.

Diplomová práce se zabývá měřením světelného toku v nově vybudované světelné laboratoři výrobce svítidel. Konkrétně se jedná o měření světelného toku pomocí kulového integrátoru.

Cílem této diplomové práce je vytvořit metodický postup pro měření parametrů světelných zdrojů (potažmo svítidel) v kulovém integrátoru. Za tímto účelem bylo potřeba se seznámit s přístroji k tomuto měření sloužícími, pochopit princip jejich fungování a stanovit nejistotu měření světelného toku. Rovněž bylo provedeno měření řady světelných zdrojů, na kterých bylo měření otestováno.

Metodický postup byl vytvořen ve formě uživatelské příručky, která bude v dané fotometrické laboratoři sloužit jako manuál pro obsluhu měření. Jelikož majitelem a

provozovatelem této laboratoře je soukromá společnost, tak není žádoucí, aby vypracovaný manuál byl veřejně dostupný. Z tohoto důvodu není uživatelská příručka přímo součástí diplomové práce, ale je zařazena jako samostatný dokument. Uživatelská příručka je k nahlédnutí ve světelné laboratoři společnosti Vyrtych a.s. po dohodě s příslušnou osobou tuto společnost zastupující.

Kapitola 1

Popis veličin

Z důvodu snadnější orientace v následujícím textu a vytvoření uceleného přehledu o fotometrických veličinách budou v této kapitole popsány a odvozeny vybrané veličiny související se světelným zářením.

1.1 Zářivý tok

Zářivý tok je celkový výkon elektromagnetického záření, které je vyzařováno do prostoru libovolným zdrojem. Celkovým výkonem se myslí výkon na všech vlnových délkách záření [1]. Dále v textu bude zářivý tok označován symbolem Φ_e (W).

1.2 Spektrální zářivý tok

Spektrální zářivý tok je veličina, která vyjadřuje velikost zářivého výkonu dané vlnové délky určitého záření, případně nějakého rozsahu vlnových délek [1]. Matematické vyjádření spektrálního zářivého toku je zapsané rovnicí (1.1).

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{d\Phi_e}{d\lambda} \quad (W \cdot nm^{-1}) \quad (1.1)$$

1.3 Světelný účinek

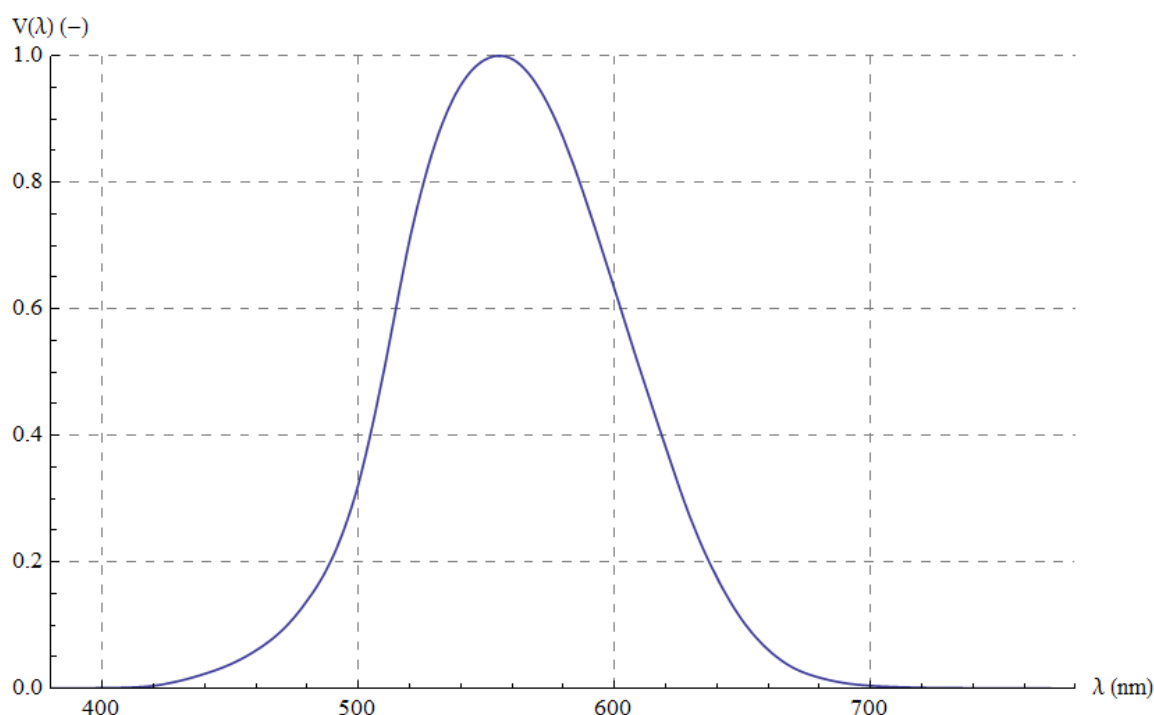
V historii byla provedena řada experimentů, z kterých vyplynulo, že lidské oko vnímá světelný účinek viditelného záření v závislosti na vlnové délce. Bylo zjištěno, že maximální světelný účinek vnímá normální fotometrický pozorovatel pro fotopické vidění na vlnové délce 555 nm. Právě ve vztahu k vlnové délce 555 nm byla vytvořena relativní funkce světelné účinnosti viditelného záření, která bývá označována jako $V(\lambda)$ [1].

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} \quad (-) \quad (1.2)$$

Kde $K(\lambda)$ ($lm \cdot W^{-1}$) je světelný účinek zářivého toku o dané vlnové délce;

K_m ($lm \cdot W^{-1}$) je maximální hodnota světelného účinku.

Jak bylo zmíněno výše, maximální hodnota světelného účinku je dosahována pro vlnovou délku 555 nm. Pro tuto vlnovou délku byla stanoven světelný účinek $K_m = 683 \text{ lmW}^{-1}$ [3].



Obrázek 1.1: Průběh spektrální citlivosti $V(\lambda)$ pro normálního fotometrického pozorovatele

Průběh $V(\lambda)$ funkce je znázorněn na obrázku 1.1. Jednotlivé hodnoty $V(\lambda)$ funkce jsou normalizovány a tabelovány CIE a jsou publikovány například v [1][3].

1.4 Světelný tok

Světelný tok je veličina, která ve své podstatě udává schopnost zářivého toku vyvolat zrakový vjem [3]. Pro stanovení světelného toku je tedy nutné počítat s citlivostí lidského oka. Funkce popisující citlivost oka na spektrální zářivý tok byla odvozena v předchozí kapitole. Světelný tok, jak je popsán rovnicí (1.3), je integrál přes všechny vlnové délky součinu světelný účinek zářivého toku a spektrálního zářivého toku.

$$\Phi = \int_0^{\infty} K(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (lm) \quad (1.3)$$

Po dosazení za $K(\lambda)$ z rovnice (1.2) dostaneme v praxi používaný vztah:

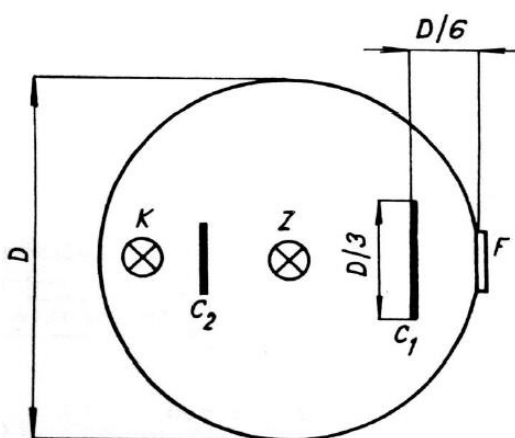
$$\Phi = \int_0^{\infty} K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = 683 \int_0^{\infty} V(\lambda) \cdot \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (lm) \quad (1.4)$$

Pomocí tohoto vztahu je světelný tok vypočítáván například spektrometrem, který měří zářivý tok pro jednotlivé vlnové délky a následně provádí součin s $V(\lambda)$ křivkou a integraci.

Kapitola 2

Teorie měření v kulovém integrátoru

Kulový integrátor se používá pro měření světelného toku svítidel a světelných zdrojů. Měření v kulovém integrátoru je založeno na porovnání světelného toku měřeného zdroje s referenčním zdrojem (normálem), pro který je světelný tok znám [2].



Obrázek 2.1: Schéma kulového integrátoru [3]

Schematický řez kulovým integrátorem je znázorněn na obrázku 2.1. Měřený zdroj **Z** se umísťuje co nejbližšímu prostředku koule. **C1** je clona, která brání dopadu přímého záření na okénko s měřicím čidlem **F** (např. fotočlánek). **C2** je clona zamezující dopadu přímého záření korekčního zdroje **K** na měřený zdroj či na měřicí čidlo [3]. Korekční zdroj by měl být umístěn na opačné straně kulového integrátoru, než je měřicí čidlo a zároveň co nejbližší povrchu koule [4]. Výše zmíněné předměty umístěné v integrátoru způsobují, že integrace není dokonalá. Nicméně pokud má měřený zdroj podobné rozměry, spektrální složení, rozložení svítivosti

a pohltivost jako referenční zdroj, je nepřesnost v integraci velmi malá. V opačném případě je nutné měřené hodnoty korigovat [1].

Teorie měření je založena na následujících úvahách. Předpokládá se, že vnitřní povrch koule je ideálně difúzní s neselektivním činitelem odrazu. To znamená, že činitel odrazu povrchu není závislý na vlnové délce dopadajícího záření [1].

Za těchto předpokladů je záření dopadající na jakýkoli bod povrchu koule odraženo do všech bodů povrchu koule. Takto dochází uvnitř integrátoru k mnohonásobným odrazům. Osvětlenost jakékoli plochy uvnitř integrátoru se tedy skládá ze složky přímo dopadajícího světelného toku a toku odraženého od stěn koule.

Jestliže Φ_z je světelný tok vyzářený zdrojem, pak výsledný světelný tok vzniklý mnohonásobnými odrazy Φ je dán vztahem

$$\Phi = \rho\Phi_z + \rho^2\Phi_z + \rho^3\Phi_z + \dots = \Phi_z \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n \quad (lm) \quad (2.1)$$

kde ρ je činitel odrazu povrchu.

V podstatě se jedná o geometrickou posloupnost s kvocientem ρ , od které je odečten první člen. Rovnice (2.1) lze tedy upravit jako

$$\Phi_z \sum_{n=1}^{\infty} \rho^n = \Phi_z \left(\sum_{n=0}^{\infty} \rho^n - 1 \right) \quad (lm) \quad (2.2)$$

Protože kvocient ρ nabývá hodnot $(0; 1)$, je součet této geometrické řady

$$\Phi_z \left(\sum_{n=0}^{\infty} \rho^n - 1 \right) = \left(\frac{1}{1-\rho} - 1 \right) \Phi_z \quad (lm) \quad (2.3)$$

Po úpravě rovnice (2.3) a dosazením do rovnice (2.1) dostáváme vztah mezi celkovým světelným tokem integrátoru a vyzářeným světelným tokem

$$\Phi = \frac{\rho}{1-\rho} \Phi_z \quad (lm) \quad (2.4)$$

V případě, že je nějaká plocha uvnitř integrátoru zastíněna, tak osvětlenost této plochy je dána pouze odraženým světelným tokem a je úměrná vyzářenému světelnému toku daného zdroje či svítidla [1]. Zároveň platí, že složka osvětlenosti, daná odraženým světelným tokem, je ve všech bodech stejná. Osvětlenost plochy je definována jako

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (lx) \quad (2.5)$$

Kde A (m^2) je plocha, na kterou dopadá daný světelný tok.

Proto osvětlenost plochy kulového integrátoru, kde je umístěn fotočlánek, je

$$E = \frac{\Phi}{\pi D^2} \quad (lx) \quad (2.6)$$

kde D (m) je průměr kulového integrátoru.

Dosadíme-li do rovnice (2.6) rovnici (2.4), dostaneme

$$E = \frac{\Phi_z}{\pi D^2} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} = k_i \Phi_z \quad (lx) \quad (2.7)$$

kde k_i ($lx \cdot lm^{-1}$) je takzvaná integrační konstanta [3].

Při měření světelného toku měřeného zdroje je tedy obvykle prvním krokem zjištění integrační konstanty. To se provede tak, že se změří hodnota osvětlenosti daná normálem světelného toku a konstanta se dopočte dle vztahu:

$$k_i = \frac{E_N}{\Phi_N} \quad (m^{-2}) \quad (2.8)$$

Kde Φ_N (lm) je světelný tok normálu;

E_N (lx) je naměřený údaj osvětlenosti pro normál.

Světelný tok měřeného zdroje je pak dán vztahem

$$\Phi_z = \frac{E_z}{k_i} = \Phi_N \frac{E_z}{E_N} \quad (lm) \quad (2.9)$$

Kde E_z (lx) je osvětlenost pro měřený světelný zdroj.

Protože různé činitele pohlcení a rozměry měřeného zdroje a normálu mohou způsobit odchylky naměřených hodnot, je možné měření korigovat doplňkovým měřením s pomocným

(korekčním) světelným zdrojem. Světelný tok měřeného zdroje je pak dán následujícím vztahem [4].

$$\Phi_z = \Phi_N \frac{Y_z}{Y_N} \cdot \frac{Y_{HN}}{Y_{Hz}} \quad (lm) \quad (2.10)$$

Kde Y_z je naměřená hodnota měřeného zdroje;

Y_N je naměřená hodnota normálu;

Y_{HN} je naměřená hodnota pro korekční světelný zdroj, kdy je osazen zhasnutý normál;

Y_{Hz} je naměřená hodnota pro pomocný světelný zdroj, kdy je osazen zhasnutý měřený světelný zdroj.

Výše popsanou korekci není nutné provádět v případech, kdy jsou chyby měření známé nebo zanedbatelné [4].

Kapitola 3

Teorie nejistot měření

Žádné měření ve skutečnosti nedokáže vyjádřit skutečnou hodnotu měřené veličiny. Pomocí určení nejistoty měření je ale možné stanovit, v jakém intervalu od změřené hodnoty se skutečná hodnota s určitou pravděpodobností nachází. Mírou nejistoty je tedy směrodatná odchylka udávané nejistoty. Nejistota daného měření závisí na celé řadě faktorů. Mezi ně patří přesnosti měřících přístrojů, metoda měření a náhodné vlivy, které měření ovlivňují, ale není možné je dopředu stanovit a vyloučit.

Podle způsobu vyhodnocování se rozlišují dva typy nejistot, a sice standardní nejistota typu A a standardní nejistota typu B.

3.1 Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A je zpracovávána statistickými metodami. Příčiny způsobující tuto nejistotu se obecně považují za náhodné. Uvažuje se normální rozdělení. Tento typ nejistoty je aplikovatelný pouze tehdy, bylo-li měření dané veličiny opakováno. Jednotlivá měření musí být nezávislá a musí být provedena za stejných podmínek [10].

Standardní nejistota typu A se stanovuje jako výběrová směrodatná odchylka průměru měřené veličiny. Nejprve je tedy určena střední hodnota z n provedených měření.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.1)$$

Kde q_i je hodnota i -tého měření.

Výběrový rozptyl měřené veličiny je dán vztahem:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2 \quad (3.2)$$

Výběrový rozptyl průměru měřené veličiny je pak jako:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (3.3)$$

Protože směrodatná odchylka se obecně určí jako druhá odmocnina z rozptylu, je standardní nejistota typu A dána výrazem:

$$u_A = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \quad (3.4)$$

Aby však nejistota vyjádřená vztahem (3.4) měla určitou vypovídající hodnotu, mělo by být provedeno minimálně deset měření. V případě, že to možné není, je třeba učinit doplňkovou korekci, která zohledňuje malý počet měření. Tato korekce se provádí pomocí koeficientu k_s . Hodnota koeficientu se volí podle počtu provedených měření dle tabulky 3.1 [11].

$$u_A = k_s \cdot s(\bar{q}) \quad (3.5)$$

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k_s	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	2,3	7,0

Tabulka 3.1: Hodnota koeficientu k_s pro daný počet měření

3.2 Standardní nejistota typu B

Vyhodnocování standardní nejistoty typu B je založeno na jiných metodách, než je statistické zpracování, jak tomu je v případě standardní nejistoty typu A. Standardní nejistota typu B se vyhodnocuje na základě analýzy všech informací, které jsou pro dané měření dostupné. Známé faktory ovlivňující měření mohou být odvozeny například z dat předchozích měření, ze specifikace daného měřicího přístroje, z dat vycházejících z kalibrace, nebo na základě zkušenosti a znalosti chování a vlastností daného přístroje [10]. Další zdroje nejistot vycházejí z chyby metody měření. Ty jsou způsobeny především nepřesnostmi při měření, kterým není možné zabránit a není možné je ani nijak korigovat. Dále pak to jsou nejistoty vyplývající z podmínek měření, jako je například kolísání teploty nebo jiných veličin [2].

Při určování standardní nejistoty typu B se pro každý zdroj nejistoty stanoví interval od měřené veličiny. Nejistota je, jak bylo již zmíněno, směrodatná odchylka od změřené hodnoty. Proto je potřeba určit, jaký typ rozdělení pravděpodobnosti odchylek danému jevu přísluší. Obvykle se předpokládá rozdělení rovnoměrné [2].

Rovnoměrné rozdělení má ve všech bodech intervalu stejnou hodnotu hustoty pravděpodobnosti. Budeme-li mít interval (a_-, a_+) , tak hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny x je:

$$f(x) = \frac{1}{a_+ - a_-} \text{ pro } x \in (a_-, a_+) \quad (3.6)$$

$$f(x) = 0 \text{ pro } x \notin (a_-, a_+)$$

Střední hodnota rovnoměrného rozdělení je:

$$\mu = \frac{a_- + a_+}{2} \quad (3.7)$$

Rozptyl spojitě náhodné veličiny x je tedy dle své definice:

$$s^2(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = \int_{a_-}^{a_+} \left(x - \frac{a_- + a_+}{2}\right)^2 \frac{1}{a_+ - a_-} dx \quad (3.8)$$

Dosazením do rovnice (3.8) za střední hodnotu μ a za hustotu pravděpodobnosti $f(x)$ bude rozptyl roven:

$$s^2(x) = \int_{a_-}^{a_+} \left(x - \frac{a_- + a_+}{2}\right)^2 \frac{1}{a_+ - a_-} dx \quad (3.9)$$

Po integraci a úpravách výrazu (3.9) dostaneme rozptyl pro rovnoměrné rozdělení:

$$s^2(x) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} \quad (3.10)$$

Pokud za rozdíl limitních hodnot intervalu dosadíme hodnotu $2a$, tak z výrazu (3.9) dostaneme:

$$s^2(x) = \frac{a^2}{3} \quad (3.11)$$

Po odmocnění rozptylu dostaneme směrodatnou odchylku, což je standardní nejistota typu B:

$$u_B = \pm s(x) = \pm \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Obvykle je měření zatíženo vícero různými nejistotami. Výsledná standardní nejistota typu B se pak určí jako druhá odmocnina součtu kvadrátů dílčích nejistot. Případná korelace mezi jednotlivými nejistotami se zde nijak nezohledňuje [12].

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + \dots} \quad (3.13)$$

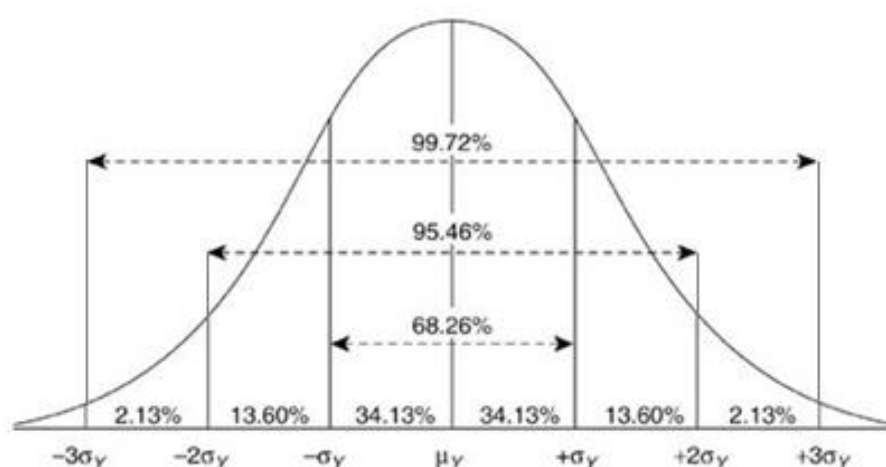
3.3 Kombinovaná standardní nejistota

Měření bývá často takové povahy, že je vhodné brát při vyhodnocování nejistoty měření jak standardní nejistotu typu A, tak standardní nejistotu typu B. Z toho důvodu se zavádí takzvaná kombinovaná standardní nejistota, která oba typy standardních nejistot slučuje dohromady.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (3.14)$$

3.4 Rozšířená standardní nejistota

Obvykle je možné považovat rozdělení pravděpodobnosti standardní nejistoty vyhodnocené výše popsaným způsobem jako normální. Pro normální rozdělení platí, že \pm jedna směrodatná odchylka (tedy vypočtená nejistota) pokrývá 68 % možných výsledků [11].



Obrázek 3.1: Normální rozdělení

Vzhledem k tomu, že tato pravděpodobnost není zcela dostačující, tak se daná nejistota násobí koeficientem rozšíření, pomocí kterého dojde k pokrytí možných výsledků vyšší pravděpodobností. Pro koeficient 2 je pravděpodobnost pokrytí zhruba 95 % a pro koeficient 3 je pravděpodobnost pokrytí zhruba 99,7 %. Rozšířená nejistota kombinované standardní nejistoty je tedy:

$$U = k_r u_C \quad (3.15)$$

Kde k_r je rozšiřující koeficient.

Rozšířená nejistota lze rovněž uvádět pouze pro nejistotu typu A nebo pro nejistotu typu B. Například rozšířená nejistota typu B bývá často uváděna výrobcem v kalibračním listu přístroje.

Kapitola 4

Měřicí sestava ve společnosti Vyrtých

Ve světelné laboratoři společnosti Vyrtých je pro potřeby měření světelného toku nainstalovaná měřicí sestava od výrobce Gooch & Housego. Základ měřicího pracoviště tvoří kulový integrátor typu OL IS 7600, stabilizovaný zdroj proudu OL 410-200 pro napájení etalonu a korekčního zdroje, spektrometr typu OL 770, optické vlákno a stolní počítač.

Protože měření světelného toku není prováděno pomocí fotočlánku, ale pomocí spektrometru, je možné měřit následující parametry:

- světelný tok (lm)
- zářivý tok (W)
- spektrální zářivý tok ($\text{W}\cdot\text{nm}^{-1}$)
- teplotu chromatičnosti (K)
- index podání barev (-)
- dominantní vlnovou délku (nm)
- spektrální čistotu (%)
- chromatické souřadnice (-)

Podrobnější popis jednotlivých částí měřicí sestavy je popsán v podkapitolách níže.

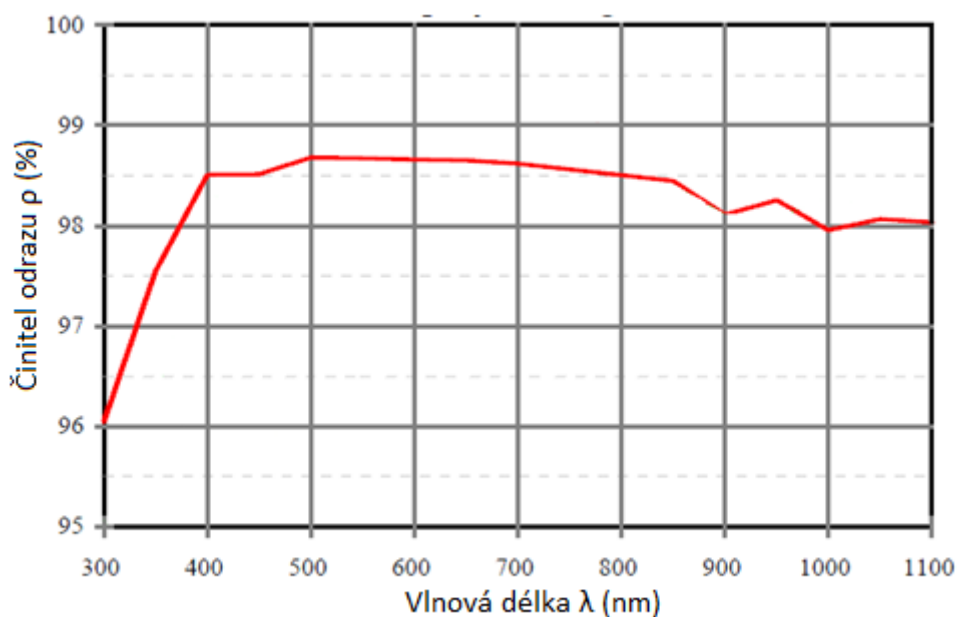
4.1 Kulový integrátor OL IS 7600

Kulový integrátor s označení OL 7600 IS je kulový integrátor o průměru 2 metry.



Obrázek 4.1: Kulový integrátor OL 7600 IS [6]

Vnitřní povrch integrátoru je pokryt speciálním omyvatelným nátěrem s názvem Optolon 2. Tento nátěr je aplikovatelný ve spreji a jeho složení je na bázi síranu barnatého. Činitel odrazu povrchu kulového integrátoru s tímto nátěrem je pro rozsah viditelného a infračerveného záření téměř konstantní. V oblasti viditelného záření je střední hodnota činitele odrazu 0,986.



Obrázek 4.2: Závislost činitele odrazu nátěru kulového integrátoru na vlnové délce [6]

V kulovém integrátoru je umístěn korekční zdroj a dvě clony, jejichž účel byl popsán v kapitole 2. Součástí je také vyměnitelný nástavec pro upevnění světelných zdrojů s patičí E27,

nástavec pro lineární zářivky a nástavce pro etalon světelného toku, který slouží ke kalibraci korekčního zdroje.

4.2 Stabilizovaný zdroj proudu OL 410-200

OL 410-200 je mikroprocesorově řízený zdroj stejnosměrného proudu. Slouží primárně k napájení referenčních zdrojů a kalibračních zdrojů. Při napájení světelných zdrojů je kladen požadavek na vysokou přesnost a stabilitu proudu, který světelným zdrojem protéká. Odchylka od jmenovité hodnoty proudu vede k chybě měřeného spektrálního složení světelného zdroje.

Napájecí zdroj OL 410-200 je schopen dodávat elektrický výkon o maximální hodnotě 200,00 W. Maximální výstupní napětí je 32,00 V a maximální výstupní proud je 8,000 A. Udávaná odchylka výstupního proudu je $\pm 0,02$ % z celkového rozsahu. Aby nedocházelo k proudovému nárazu při zapnutí světelného zdroje, je výstupní proud řízeně zvyšován od nulové hodnoty až na nastavenou jmenovitou hodnotu.

Napájecí zdroj rovněž umožňuje vytvoření knihovny až deseti používaných světelných zdrojů a pro tyto zdroje měří čas, po který byly v provozu.

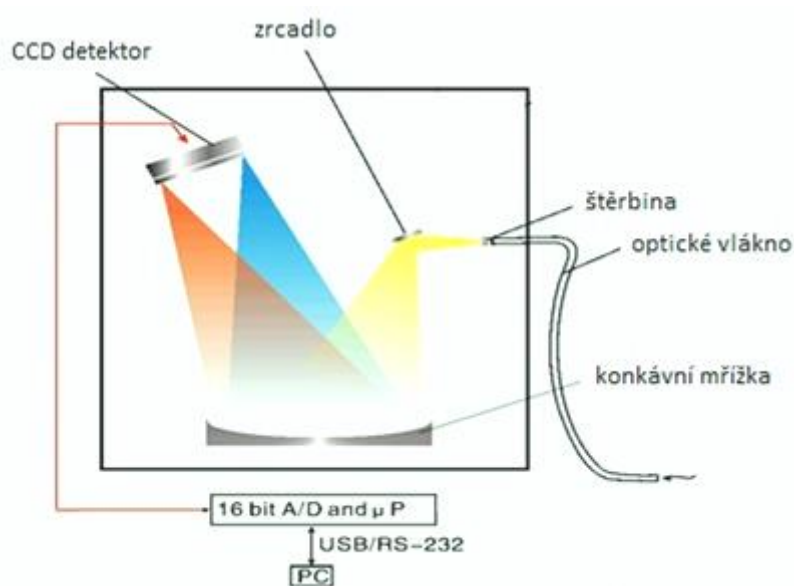
4.3 Spektroradiometr OL 770 VIS

OL 770 VIS je spektroradiometr, který je schopen měřit zářivý tok v rozsahu 380 – 780 nm. Jeho součástí je vnitřní spektrograf, CCD detektor a řídicí obvody. K ovládání spektroradiometru a vizualizaci naměřených dat je možné připojit spektroradiometr k počítači pomocí sériové linky RS-232 nebo pomocí USB [5].

Záření je do spektroradiometru přiváděno optickým kabelem. Takto je k spektroradiometru možné připojit různé měřící zařízení. Těmi jsou například právě kulové integrátory pro měření svítidel a světelných zdrojů. Především je to ale řada měřících prvků pro měření parametrů jednotlivých LED. Jedná se například o malý kulový integrátor o průměru 15,6 cm pro měření světelného toku a spektrálního složení LED. Dalším možným nástavcem je válcový tubus pro měření intenzity záření LED čipů. Dále je možné připojit automatizovaný goniofotometr pro měření čar svítivosti LED [5].

4.3.1 Spektrograf

Spektrograf je optické zařízení, které slouží k rozložení záření na jeho jednotlivé spektrální složky. Spektrograf ve spektrometru OL 770 VIS je navržen tak, aby rozkládal světelné záření o vlnové délce 380 – 780 nm. Na vstupu spektrografu je vstupní štěrbinu o velikosti 100 μm [5]. Štěrbínou prochází pouze část celkového záření. Hlavní částí celého spektrografu je konkávní plochá mřížka. Po dopadu světelného svazku na mřížku se záření rozkládá na jednotlivé vlnové délky, přičemž po odrazu se každý paprsek šíří jiným směrem. Takto rozložené světelné záření dopadá na CCD detektor.

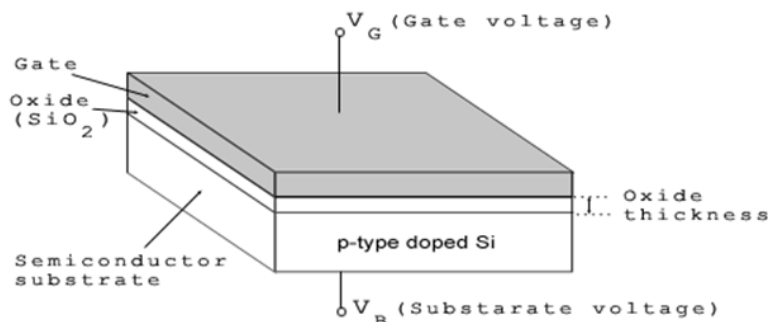


Obrázek 4.3: Schéma spektrografu

4.3.2 CCD detektor

Hlavním měřícím prvkem celé sestavy je termoelektricky chlazený plošný CCD detektor. CCD představuje zkratku z anglického názvu Charge-Coupled Device, což se do češtiny překládá jako nábojově vázané prvky. CCD je polovodičový prvek, který je citlivý na záření v oblasti ultrafialového, viditelného a části infračerveného záření. CCD detektor je tedy převodník záření na napětí. Je tvořen obvykle tisíci jednotlivými prvky, které jsou označovány jako pixely. Popisovaný CCD detektor má rozložení pixelů 122 x 1024. Přičemž rozlišení pixelů je 0,39 nm. Jednotlivé pixely odpovídají příslušné vlnové délce daného záření [7]. Výsledkem měření je tedy soubor 1024 hodnot zářivého toku pro dané vlnové délky s krokem 0,39 nm. Z těchto hodnot jsou dále vypočítávány další veličiny, jako je například světelný tok.

Pixely mají strukturu MOS kapacitoru, která je znázorněna na obrázku 4.4.



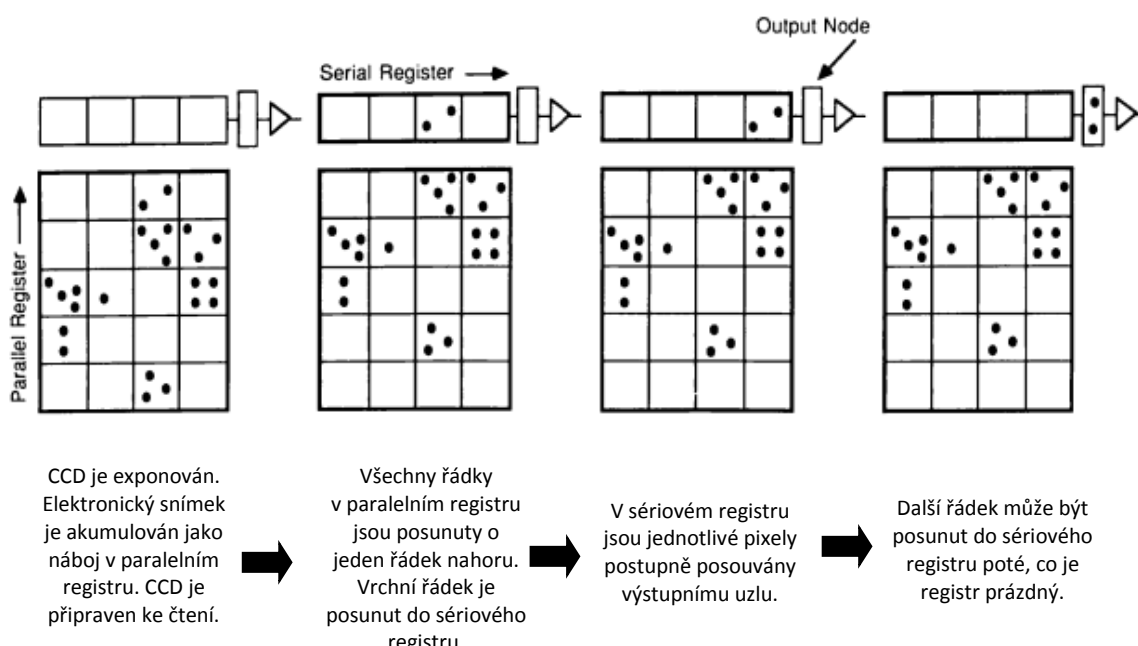
Obrázek 4.4: Struktura MOS kapacitoru

Funkce CCD je založena na principu fotoefektu. Foton, který dopadne na pixel, je absorbován atomem a excituje elektron, čímž dojde ke generaci páru elektron-díra. Na elektrodu V_G je přivedeno kladné napětí. Protože elektroda je od polovodiče izolována tenkou vrstvou izolantu SiO_2 , není možné elektron odvést. Elektrony jsou přitahovány k elektrodě a dochází k akumulaci náboje. Naakumulovaný náboj je poté z jednotlivých pixelů pomocí posuvného registru postupně přiváděn k zesilovači, který jej převádí na napětí [8]. Napětí je pomocí 16 bitového A/D převodníku převáděno do digitální podoby k následnému zpracování [5].

Měření pomocí CCD detektoru se skládá ze tří fází. Prvním krokem je získání takzvaného temného snímku. Ten se provádí bez přístupu světla a doba jeho snímání je stejná, jako při samotné světelné expozici. Temný snímek se provádí z důvodu eliminace šumu způsobeného náhodnou generací elektronů v polovodiči bez přístupu světla. Množství takto generovaných elektronů lineárně klesá s teplotou. Proto je CCD detektor termoelektricky chlazen. Změřený signál z temného snímku se odečítá od signálu získaného při expozici CCD detektoru světlem.

Druhým krokem je expozice CCD detektoru po určitou dobu. Během této doby se v jednotlivých pixelech naakumuluje určité množství náboje, které je úměrné intenzitě záření dané vlnové délky.

Třetím krokem je již zmíněné postupné odvedení nábojů z jednotlivých pixelů a zpracování signálu.



Obrázek 4.5: Čtení z CCD detektoru pomocí posuvných registrů [8]

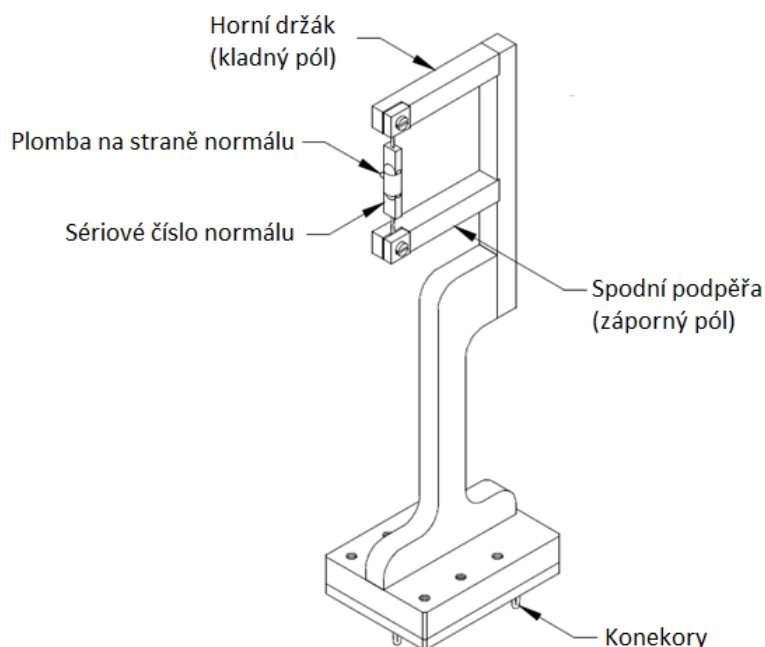
CCD detektory obvykle umožňují takzvané slučování pixelů, které je označováno jako binning. Pomocí binningu se tedy sloučí náboje z více pixelů dohromady. Až poté je náboj odveden. Binning může být prováděn vertikálně i horizontálně. Při aplikaci binningu je získán signál s vyšší citlivostí [8].

4.4 Normál světelného toku OL 220-TSF

Jako normál světelného toku je v laboratoři k dispozici halogenová žárovka o výkonu 200 W, která nese označení OL 220-TSF. Jedná se o metrologicky navázaný normál na NIST (National Institute of Standards and Technology). Tento zdroj se napájí stejnosměrným proudem o hodnotě 6,500 A. Při tomto proudu je jeho světelný tok roven 5364 lm. Rozšířená nejistota světelného toku je $\pm 1\%$, a to s koeficientem rozšíření $k = 2$. Tato hodnota by dle výrobce měla být stabilní pod dobu 50 hodin provozu. Nicméně výrobce zároveň udává možné odchylky v rozsahu menším než 0,06 % za hodinu provozu. Po uplynutí 50 hodin provozu zdroje anebo po dobu jednoho roku by měl být zdroj znovu překalibrován [9].

OL 220-TSF není pouze normálem světelného toku, ale také normálem spektrálního zářivého toku. Nejistota spektrálního zářivého toku je závislá na vlnové délce záření. Pro záření

v rozmezí vlnových délek 380 – 780 nm je výrobcem uváděna relativní rozšířená nejistota spektrálního zářivého toku na méně než $\pm 2\%$ s koeficientem rozšíření $k = 2$. Pro rozmezí vlnových délek 790 – 1100 nm je pak rozšířená nejistota méně než $\pm 3\%$ s koeficientem rozšíření $k = 2$ [9].



Obrázek 4.6: Způsob upevnění normálu

Při kalibraci je nutné normál upevnit definovaným způsobem do speciálního nástavce, který je pro normál určen. Způsob upevnění je znázorněn na obrázku výše.

Kapitola 5

Postup měření v laboratoři Vyrtých

V této kapitole bude popsán postup měření světelného toku světelných zdrojů v kulovém integrátoru ve světelné laboratoři společnosti Vyrtých. Postup se týká měření na zařízeních popsaných v kapitole 4. Detailní popis jednotlivých kroků je popsán v uživatelské příručce.

5.1 Příprava světelných zdrojů

Aby bylo možné světelné zdroje kvalifikovaně proměřit, musí se nechat před prvním měřením stárnout. Pro výbojové zdroje je tato doba stárnutí stanovena na 100 hodin. Pro žárovky je to pak alespoň 6 hodin. Zdroje musí být připojeny na jmenovité napětí. Teplota okolí musí být v rozmezí 15 - 50 °C. Stárnutí musí probíhat při normálních provozních podmínkách. Pro lineární zářivky T5 však platí, že mají stárnout ve svislé poloze, kdy je chladný bod zářivky orientován směrem dolů [4].

Před každým novým měřením by se výbojové zdroje měly nechat zahořet po dobu 24 hodin. Pro zahoření by měl být použit stejný předřadník, jaký je následně použit při samotném měření. Teplota okolí musí být opět v rozsahu 15 - 50 °C. Bezprostředně před měřením by měly být zdroje zapnuty přímo v místě měření, aby došlo ke stabilizaci jejich světelně-technických parametrů. Pro výbojové zdroje platí, že jejich parametry jsou stabilní, pokud za posledních 15 minut se jejich světelný tok držel v rozmezí $\pm 0,5\%$ [4].

5.2 Nastavení parametrů systému

Prvním krokem celého měřicího procesu v kulovém integrátoru je nastavení parametrů měřicího systému. Konfigurace se provádí prostřednictvím počítačového programu OL 770. V rámci uživatelského nastavení systému je možné zvolit velikost vstupní štěrby, nakonfigurovat způsob slučování řad pixelů CCD detektoru, nastavení hardwarového nebo softwarového typu spuštění měření a nastavit automatické činnosti systému před provedením samotného měření. Těmi jsou automatické nastavení integračního času, provedení temného snímku

Integrační doba určuje, jak dlouho bude CCD detektor vystaven dopadajícímu záření. Uživatel může sám nastavit integrační čas od 20 ms do 60 s. V případě automatického nastavení integrace systém sám zvolí nejvhodnější integrační čas pro daný světelný zdroj.

Při konfiguraci systému hraje důležitou roli nastavení binningu CCD detektoru, protože ten ovlivňuje citlivost spektrometru. Uživatel má možnost zvolit mezi minimálním, středním, maximálním a uživatelským rozsahem. V případě, že je zvolen minimální rozsah, jsou pro získání záznamu sloučeny pouze 3 středové řady pixelů. Pro střední rozsah je sloučeno 12 řad a pro maximální rozsah je sloučeno všech 122 řad CCD detektoru [5].

Nastavení uživatelského rozsahu se uplatní především tehdy, když je úroveň signálu příliš vysoká a CCD detektor se dostane do saturace. V takovém případě je vhodné snížit citlivost systému. Měření na minimálním rozsahu má zhruba 40 krát menší citlivost než měření na rozsahu maximálním. Střední rozsah má citlivost zhruba 10 krát nižší [5].

Protože odezva systému je závislá na nastavení binningu, je nutné mít nastaven stejný rozsah binningu jak pro kalibrační měření, tak pro samotné měření měřených světelných zdrojů.

5.3 Kalibrace systému

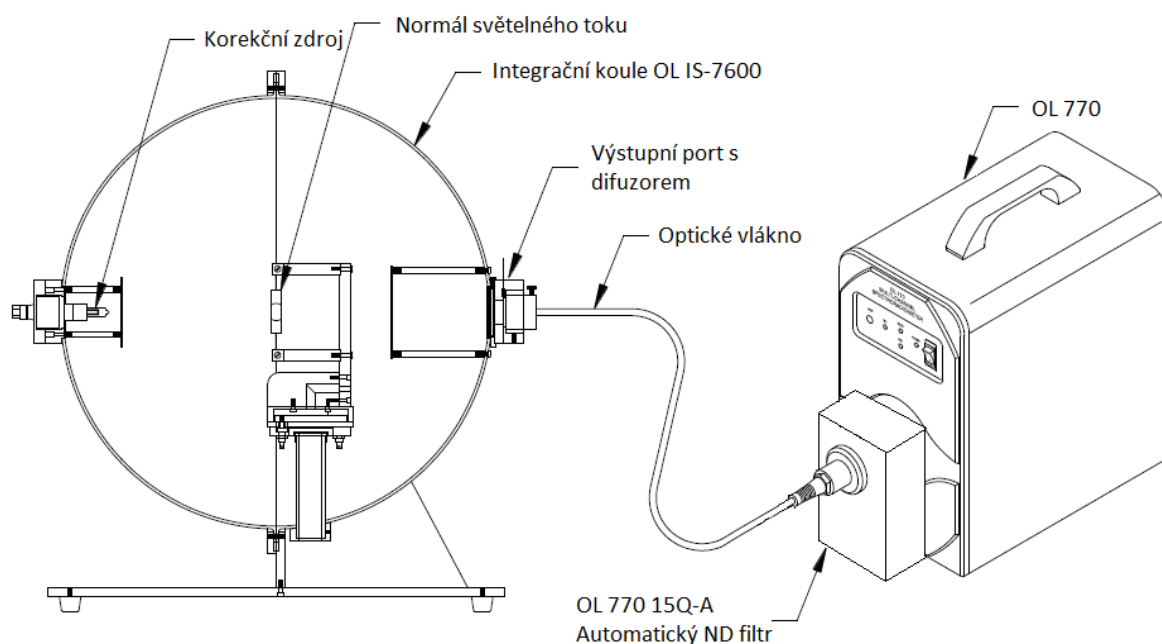
Zvýšenou pozornost je potřeba věnovat procesu kalibrace odezvy systému. Správnost provedení kalibrace zcela zásadně ovlivňuje výsledky měření měřených zdrojů. Výstupem procesu kalibrace je vytvoření kalibračního souboru, který pak dále vstupuje do samotného měření měřených zdrojů. Kalibrace měřicího systému s kulovým integrátorem má ve své podstatě dvě části. Prvním krokem je kalibrace korekčního zdroje ve vztahu k normálu

světelného toku. Druhým krokem je vytvoření kalibračních souborů odezvy systému pro jednotlivé typy světelných zdrojů, případně i pro různé rozsahy sloučení pixelů [13].

5.3.1 Kalibrace korekčního zdroje

Cílem kalibrace korekčního zdroje je vytvoření kalibračního souboru označovaného jako soubor ST7. Životnost korekčního zdroje je výrobcem uváděna minimálně na 100 hodin. Kalibrace korekčního zdroje by měla být prováděna zhruba po 10 hodinách provozu. Čas provozu korekčního zdroje je měřen pomocí stabilizovaného napájecího zdroje OL-410-200.

Při této kalibraci se umístí normál světelného toku do kulového integrátoru a připojí se na napájecí zdroj OL-410-200. Na tomto zdroji se zvolí z knihovny světelných zdrojů příslušný normál. Poté se zapne napájení normálu a nechá se 15 minut usádit.



Obrázek 5.1: Schéma měřicí soustavy

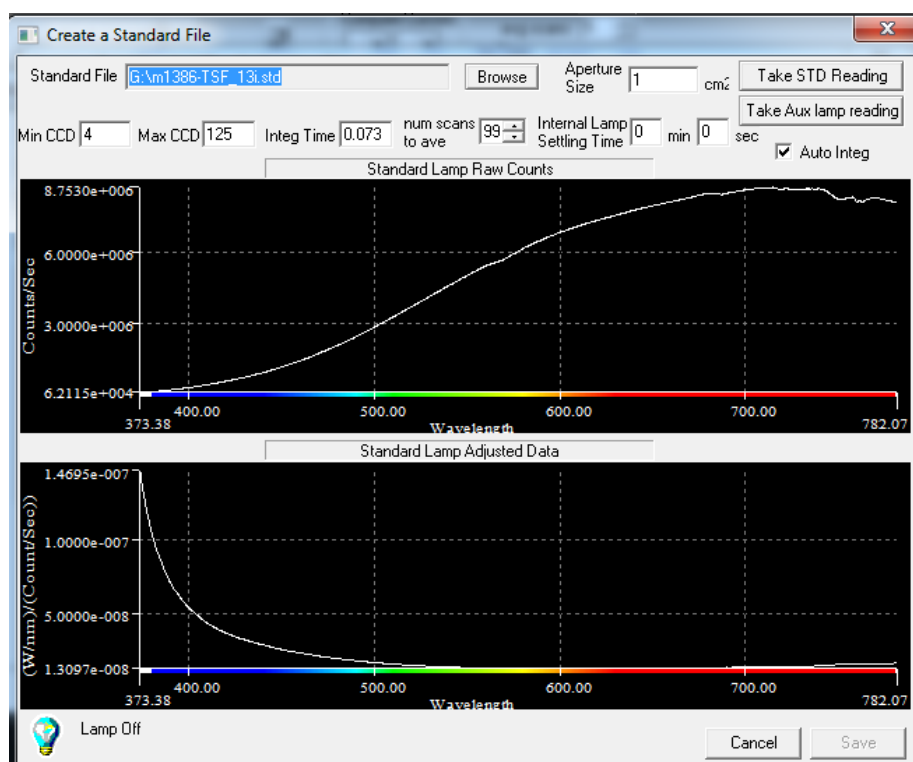
Pomocí softwaru OL 770 je třeba definovat, jaký normál je ke kalibraci použit. Pro tyto účely je v paměti spektrometru uložen takzvaný STD soubor, který obsahuje informace o daném normálu světelného toku. Dále je vhodné využívat plný rozsah CCD binningu a nastavit počet snímků, ze kterých bude vytvořen aritmetický průměr, na maximum – tedy 99.

Po uplynutí 15 minut uživatel zadá pokyn pro měření. Systém si sám nastaví integrační čas a provede 99 temných snímků a 99 expozic. Následně je třeba normál vypnout a místo něj připojit k napájecímu zdroji korekční zdroj a v knihovně zdrojů zvolit odpovídající položku.

Normál musí zůstat upevněn v kulovém integrátoru. Korekční zdroj má být zapnut 5 minut před provedením měření. Po 5 minutách uživatel zadá pokyn k měření korekčního zdroje. Výsledkem tohoto měření je kalibrační soubor ST7, který je základem pro kalibraci pro jednotlivé měřené zdroje. Proto je potřeba tento soubor uložit.

$$\Phi_z = \Phi_N \frac{Y_z}{Y_N} \cdot \frac{Y_{HN}}{Y_{Hz}} \quad (5.1)$$

Touto kalibrací se de facto stanoví tučně zvýrazněná část vztahu pro výpočet světelného toku měřeného zdroje. Tento vztah je stejný jako rovnice (1.4).



Obrázek 5.2: Kalibrace korekčního zdroje

Na obrázku 5.2 je v horní části spektrální průběh zářivého toku normálu. Ve spodní části je zobrazena korekční křivka.

5.3.2 Kalibrace pro jednotlivé měřené zdroje

Tato kalibrace bere v úvahu již známý světelný tok korekčního zdroje. Na jeho základě je vytvořen kalibrační soubor odezvy systému pro měřený světelný zdroj. Tato kalibrace musí být vytvořena pro každý typ světelného zdroje, protože jednotlivé zdroje se svými geometrickými

a absorpčními parametry liší, a tím mění podmínky uvnitř kulového integrátoru, což vede ke změně odezvy systému.

Při této kalibraci je do kulového integrátoru umístěn měřený světelný zdroj. Zůstává však zhasnutý. Naopak korekční zdroj je připojen k napájecímu zdroji. Korekční zdroj je nutno nechat 5 minut ustálit. Pomocí počítačového programu OL 770 se zvolí, že kalibrace měřeného zdroje má být založena na předem vytvořeném kalibračním souboru ST7. Počet snímků se opět nastaví na 99. Poté, co se provede kalibrace, je soubor uložen a je k dispozici pro samotné měření. Tento kalibrační soubor je označován jako CAL soubor a obsahuje v sobě informace potřebné k samotnému měření testovaných zdrojů. Což je mimo již známé členy vztahu (5.2) ještě hodnota Y_{Hz} .

$$\Phi_z = \Phi_N \frac{Y_z}{Y_N} \cdot \frac{Y_{HN}}{Y_{Hz}} \quad (5.2)$$

Jedinou neznámou tak zůstává měřená hodnota měřeného světelného zdroje, která se zjistí při samotném jeho měření.

5.4 Měření světelného toku světelných zdrojů

Jestliže je pro daný zdroj vytvořen kalibrační soubor, tak je možné tento zdroj proměřit. V programu OL 770 je potřeba vybrat příslušný kalibrační soubor CAL daného měřeného světelného zdroje. Je možné zvolit, z kolika měření má být vypočtena výsledná průměrná hodnota světelného toku. Počet měření je v rozsahu mezi 1 až 99. Samozřejmě platí, že čím je větší počet měření, z kterých je průměr počítán, tím lze výslednou hodnotu světelného toku považovat za přesnější, neboť se redukuje různé náhodné vlivy mající dopad na přesnost měření.

Měřený světelný zdroj je nutné upevnit odpovídajícím způsobem v kulovém integrátoru. Pro různé typy světelných zdrojů jsou k dispozici nástavce, které zajišťují vhodné umístění daného zdroje. Zároveň je vhodné ověřit, že daný zdroj je zcela zakryt clonou, takže na výstupní port integrátoru nedopadá žádné přímé záření. Toto ověření je možné provést pomocí pozorovacího otvoru, který je umístěn vedle výstupního portu.

Měřený světelný zdroj musí být připojen na stabilizovaný napájecí zdroj. Pro tyto účely je v laboratoři používán napájecí zdroj Kikusui PCR 1000LA. Jeho výstupní výkon je až 1 kVA. Stabilita napětí tohoto zdroje je 0,1 % nastavené hodnoty.

Kapitola 6

Výpočet nejistoty měření světelného toku

Tato kapitola popisuje výpočet rozšířené standardní nejistoty měření světelného toku pomocí měřicí sestavy popsané v kapitole 4 a 5. Protože se jedná o měření jednorázové, jehož výsledkem je jedna hodnota světelného toku, nelze standardní nejistotu typu A určovat. Proto zde hraje roli pouze standardní nejistota typu B. Ta se skládá z množství různých dílčích nejistot. Pro popisovanou soustavu jsou uvažovány následující:

- nejistota kalibrace etalonu světelného toku
- nestabilita etalonu světelného toku
- nestabilita použitých zařízení
- nepřesnost měření elektrických veličin
- chyba A/D převodníku
- nelinearita CCD detektoru
- spektrální citlivost CCD detektoru
- rozdílná pohltivost etalonu a měřených zdrojů
- rozdíl spektrálního složení etalonu a měřených zdrojů

6.1 Nejistota kalibrace etalonu světelného toku

Nejistota kalibrace etalonu u_{Be} je dílčí nejistota, která se přímo podílí na celkové standardní nejistotě typu B. Tato nejistota musí být uvedena v kalibračním listu každého normálu. Obvykle je tato nejistota uváděna v relativní hodnotě vůči deklarovanému světelnému

toku. Pro výše popisované měření je použit normál se světelným tokem 5364 lm. Nejistota kalibrace je uváděna jako $\pm 1 \%$ s koeficientem rozšíření $k = 2$. Za účelem stanovení celkové standardní nejistoty typu B je třeba uvažovat nerozšířenou nejistotu. Proto dílčí nejistota kalibrace etalonu je

$$u_{Be} = 0,005 \approx 0,5 \%$$

6.2 Nestabilita etalonu světelného toku

Jak bylo popsáno v kapitole 4.4, nestabilita normálu světelného toku je výrobcem určena na hodnotu $< \pm 0,06 \%$ za hodinu provozu. Tato nestabilita by měla vstupovat do dílčí nejistoty kalibrace normálu. Bohužel není možné přesnou změnu světelného toku normálu dostupnými prostředky zjistit. Jelikož by však normál měl být po 50 hodinách překalibrován, lze se pokusit odhadnout nejhorší možnou odchylku světelného toku po této době. V této úvaze se předpokládá změna světelného toku přesně $0,06 \%$ za hodinu. Tato odchylka je uvažována za každou hodinu vždy jako negativní nebo pozitivní. To znamená, že světelný tok neosciluje a vychyluje se pouze jedním směrem. Za těchto předpokladů bude maximální odchylka světelného toku za 50 hodin provozu:

$$u_{Bse1} = (1,0006)^{50} - 1 = 0,033 \approx 3,3 \% \quad (6.1)$$

Na druhou stranu výrobce normálu uvádí, že testy na podobných normálech při správném zacházení po dobu 50 hodin vykazují odchylku:

$$u_{Bse2} = 0,01 \approx 1 \%$$

Z tohoto důvodu bude pravděpodobně vhodnější použít tuto hodnotu.

6.3 Nestabilita použitých zařízení

Do nestability použitých zařízení se zahrnuje několik faktorů. Těmi jsou nestabilita světelného zdroje, nestabilita napájecího napětí, nestabilita CCD detektoru a nestabilita teploty okolí. Zjistit vliv jednotlivých faktorů na celkovou nestabilitu není prakticky možné. Možnost, jak zjistit nestabilitu použitých zařízení, je provést po zahoření světelného zdroje v určitých

časových intervalech řadu měření a z nich určit nestabilitu. Maximální odchylka od naměřené hodnoty je pak vyjádřena vztahem:

$$z_{max} = \left| \frac{Y_{max} - Y_{min}}{Y_{min}} \right| = \left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right| \quad (6.1)$$

Kde Y_{max} je maximální naměřená hodnota;

Y_{min} je minimální naměřená hodnota.

Pro tento typ měření je vhodné uvažovat rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti. Odvození výpočtu standardní nejistoty pro toto rozdělení bylo popsáno v kapitole 3. Pak je tedy dílčí nejistota způsobená vlivem nestability použitých zařízení rovna [2]:

$$u_{Bs} = \frac{z_{max}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1 \right| \quad (6.3)$$

Protože měření světelného toku, tak jak bylo popsáno v předchozích kapitolách, primárně nepočítá s prováděním série měření, ale pouze s měřením jednorázovým, není tato metoda určení dílčí nejistoty vhodná. Nejistotu způsobenou vlivem nestability použitých zařízení je nicméně možné stanovit na základě faktu, že zdroj je považován za zahořený tehdy, když měřený světelný tok za posledních 15 minut nekolísá více než $\pm 0,5 \%$ [4]. Odhadnutá dílčí nejistota vlivem nestability zařízení je:

$$u_{Bs} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} \quad (6.4)$$

6.4 Nepřesnost měření elektrických veličin

Napájecí napětí měřeného zdroje musí být napětí jmenovité. Určitý vliv na nejistotu měření světelného toku má tak přesnost měření elektrických veličin – napětí a proudu. Světelný tok zdrojů je závislý na těchto dvou veličinách. Obecně platí, že s poklesem hodnoty napájecího napětí klesá i světelný tok. Proto je při měření světelného toku obvyklé, je-li to možné, měřit napětí a proud. Avšak například pro zdroje napájené z předřadníku tato možnost často snadno dostupná není.

Napájecí zdroj obvykle měření napětí a proudu umožňuje. Zároveň je možné tyto veličiny měřit i jinými prostředky, například analyzátozem sítě apod. Přesnost měření těchto přístrojů je důležitá především proto, že podle měřených údajů může být nastavováno napájecí napětí. V případě nepřesného měření tak dochází k nastavení chybného napájecího napětí, a tím pádem ke zkreslení informace o měřeném světelném toku.

Bohužel není dostačující zjistit nepřesnost měření výše zmíněných přístrojů a určit jejich nejistotu měření. Jednotlivé světelné zdroje mají totiž vlastní závislosti světelného toku na napětí, potažmo proudu. Tyto závislosti není zcela snadné zjistit. Proto není jednoduchými prostředky možné tuto nejistotu odhadnout a ve výpočtu se dále uvažuje, že napájecí napětí je přesně napětí nominální.

6.5 Chyba měřícího zařízení

Na chybě měřícího zařízení se podílejí především následující vlivy:

- chyba A/D převodníku
- nelinearita CCD detektoru
- spektrální citlivost CCD detektoru

Určit jednotlivé vlivy těchto chyb na dílčí nejistotu chyby měřícího zařízení nebylo možné, protože výrobce měřícího zařízení takto podrobné informace neposkytuje. Nicméně výrobce poskytuje celkovou chybu zahrnující právě tyto tři faktory. Udávaná odchylka je menší než 2 % [6]. Protože rozdělení pravděpodobnosti je normální, tak dílčí nejistota způsobená chybou měřícího zařízení je:

$$u_{Bz} = \frac{0,02}{\sqrt{3}} \quad (6.5)$$

6.6 Rozdílný činitel odrazu etalonu a měřených zdrojů

Dalším jevem ovlivňující přesnost měření je rozdílný činitel odrazu etalonu a ostatních měřených zdrojů. Při měření v kulovém integrátoru dochází k pohlcení části záření jednotlivými prvky kulového integrátoru. Jsou to zejména konstrukční části světelných zdrojů a nosné nástavce, ve kterých jsou měřené zdroje upevněny [2]. Protože zejména geometrie etalonu a jeho nosného nástavce a geometrie měřených zdrojů a příslušných nástavců se značně liší, je i

relativní poměr pohlceného záření rozdílný. Za účelem eliminace tohoto nepříznivého jevu je možno provést korekci. Tato korekce se provádí pomocí korekčního zdroje metodou popsanou vztahem (2.10). Ve skutečnosti je tato korekce v popsaném postupu měření již zahrnuta v procesu kalibrace a není možné ji vynechat.

6.7 Rozdíl spektrálního složení etalonu a měřených zdrojů

V případě, že etalon světelného toku a měřený zdroj mají různé spektrální složení záření, je měření zatíženo chybou, která je způsobena závislostí činitele odrazu vnitřního povrchu koule na vlnové délce. Dále je chyba způsobena závislostí spektrální citlivosti CCD detektoru. Tato chyba je však již zohledněna v dílčí nejistotě měřícího zařízení. Chyba způsobená závislostí činitele odrazu na vlnové délce by se dala korigovat korekčním faktorem:

$$k_{\rho} = \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)} \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S_N(\lambda) \cdot \frac{\rho(\lambda)}{1 - \rho(\lambda)} \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_0^{\infty} S_N(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (6.6)$$

Kde $S(\lambda)$ je spektrální složení záření měřeného světelného zdroje;
 $S_N(\lambda)$ je spektrální složení záření normálu světelného toku;
 $\rho(\lambda)$ je spektrální závislost činitele odrazu

Závislost činitele odrazu vnitřního povrchu koule na vlnové délce je pro viditelné spektrum téměř konstantní, jak je ukázáno v kapitole 4.1. Rozdíl mezi jeho maximální a minimální hodnotou je 0,35 %. Proto chyba způsobená rozdílností spektrálního složení etalonu a měřených zdrojů je zcela zanedbatelná, a proto nebude brána v úvahu při výpočtu celkové standardní nejistoty typu B.

6.8 Stanovení standardní nejistoty světelného toku

Po uvážení všech výše zmíněných faktorů je možné přistoupit k samotnému výpočtu standardní nejistoty typu B. Ta se vypočítá na základě zákona šíření nejistot podle vztahu (3.12).

$$u_B = \sqrt{u_{Be}^2 + u_{Bse2}^2 + u_{Bs}^2 + u_{Bz}^2} = \sqrt{0,005^2 + 0,01^2 + \left(\frac{0,005}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,02}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (6.7)$$
$$= 0,016033 \approx 1,6 \%$$

Rozšířená standardní nejistota s koeficientem rozšíření $k = 2$ je pak:

$$U = k \cdot u_B = 2 \cdot u_B = 2 \cdot 0,016033 = 0,03266 \approx 3,3 \% \quad (6.8)$$

Měření světelného toku s rozšířenou standardní nejistotou 3,3 % je považováno za velmi přesné měření.

Zdroj nejistoty	Označení nejistoty	Hodnota nejistoty (%)
Kalibrace etalonu	u_{Be}	0,5
Nestabilita etalonu	u_{Bse2}	1,0
Nestabilita použitých zařízení	u_{Bs}	0,5
Chyba měřicího zařízení	u_{Bz}	2,0
Standardní nejistota typu B	u_B	1,6
Standardní rozšířená nejistota (k = 2)	U	3,3

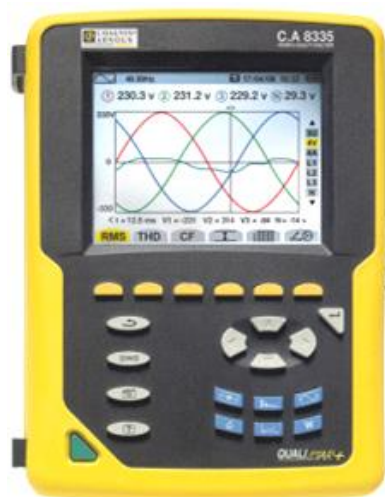
Tabulka 6.1: Přehled nejistot měření

V tabulce 6.1 je uveden přehled všech dílčích nejistot, které vstupují do výpočtu standardní nejistoty typu B. Dále je zde uvedena i standardní nejistota typu B a standardní rozšířená nejistota.

Kapitola 7

Měření parametrů světelných zdrojů

V této kapitole budou prezentovány výsledky měření světelných zdrojů. Pro vybrané typy zdrojů byly měřeny dva parametry co nejvíce podobné zdroje, avšak od dvou různých výrobců. Zbylé zdroje jsou zastoupeny pouze jedním výrobcem. Až na výjimky byly použity zdroje od výrobců Osram a Philips. V rámci měření se primárně zjišťoval světelný tok. Zároveň byly ale zaznamenávány i další parametry: teplota chromatičnosti, měrný výkon, příkon, napájecí napětí, proud, účinník, power factor a harmonické zkreslení. Pro měření elektrických parametrů byl použit analyzátor sítě Chauvin Arnoux C.A 8335.



Obrázek 7.1: Analyzátor sítě Chauvin Arnoux C.A 8335

Naměřené hodnoty světelného toku pomocí kulového integrátoru byly dále ověřeny měřením na goniofotometru. Hodnoty měřené v kulovém integrátoru by se od hodnot

naměřených pomocí goniofotometru neměly lišit více než o $\pm 2\%$ [4]. Tento relativní rozdíl se vypočte jako:

$$r = \left| \left(1 - \frac{\Phi_{KI}}{\Phi_{GF}} \right) \cdot 100 \right| \quad (\%) \quad (7.1)$$

Kde Φ_{KI} (lm) je hodnota světelného toku změřená v kulovém integrátoru;

Φ_{GF} (lm) je hodnota světelného toku změřená pomocí goniofotometru.

Naměřené parametry světelných zdrojů jsou dále porovnány s hodnotami uváděnými výrobcí v technických listech daných zdrojů. Typově stejné zdroje od dvou různých výrobců jsou rovněž porovnány.

Veškeré měřené parametry a parametry udávané výrobcem jsou uvedeny v následujících podkapitolách v tabulkách. Ve spodní části tabulek je pak uvedena hodnota světelného toku, který byl změřen pomocí goniofotometru, a relativní rozdíl vůči hodnotě z kulového integrátoru. Veličiny, které například pro daný světelný zdroj nemají význam nebo nebyly z nějakého důvodu měřeny či výrobcem uvedeny, v dané tabulce uvedeny nejsou a příslušná buňka je proškrtnuta.

Takovou veličinou je například účinník, který sice byl analyzátozem sítě měřen, ale výrobcí ho nikdy neudávají. V technických listech výrobců je vždy udáván power factor, tedy souhrnný účinník, který není počítán jen pro první harmonickou, ale i pro vyšší harmonické. V technických listech bývá buď označován jako λ , v anglických verzích technických listů jako PF (power factor). V českých verzích technických listů pak bývá mnohdy označován pouze jako účinník, což je v české terminologii poněkud zavádějící.

7.1 Kompaktní zářivky

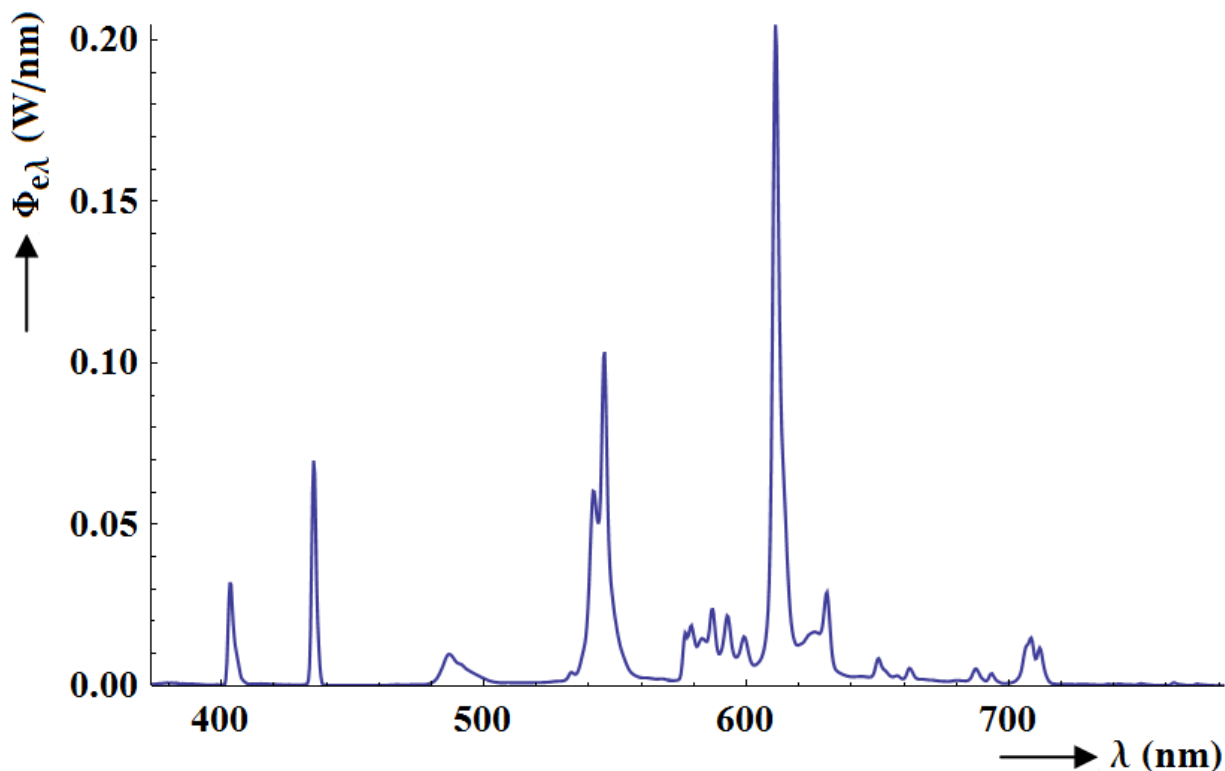
Pro měření kompaktních zářivek byly zvoleny zdroje s patičkou E27, aby bylo možné je snadno upevnit v nosném nástavci, který je právě pro tento typ závitu určený. Při porovnání naměřených fotometrických hodnot je vidět, že kompaktní zářivka od výrobce Osram se s hodnotami uváděnými prakticky shoduje. Naopak kompaktní zářivka od výrobce Philips deklarovaného světelného toku nedosahuje, čímž klesá i její měrný výkon. Teplota chromatičnosti se rovněž poměrně liší, a to o více než 100 K.

Kompaktní zdroje s příkonem menším než 25 W musí mít $PF \geq 0,55$. Zdroje s příkonem 25 W a více musí mít hodnotu $PF \geq 0,90$ [14]. To oba zdroje splňují.

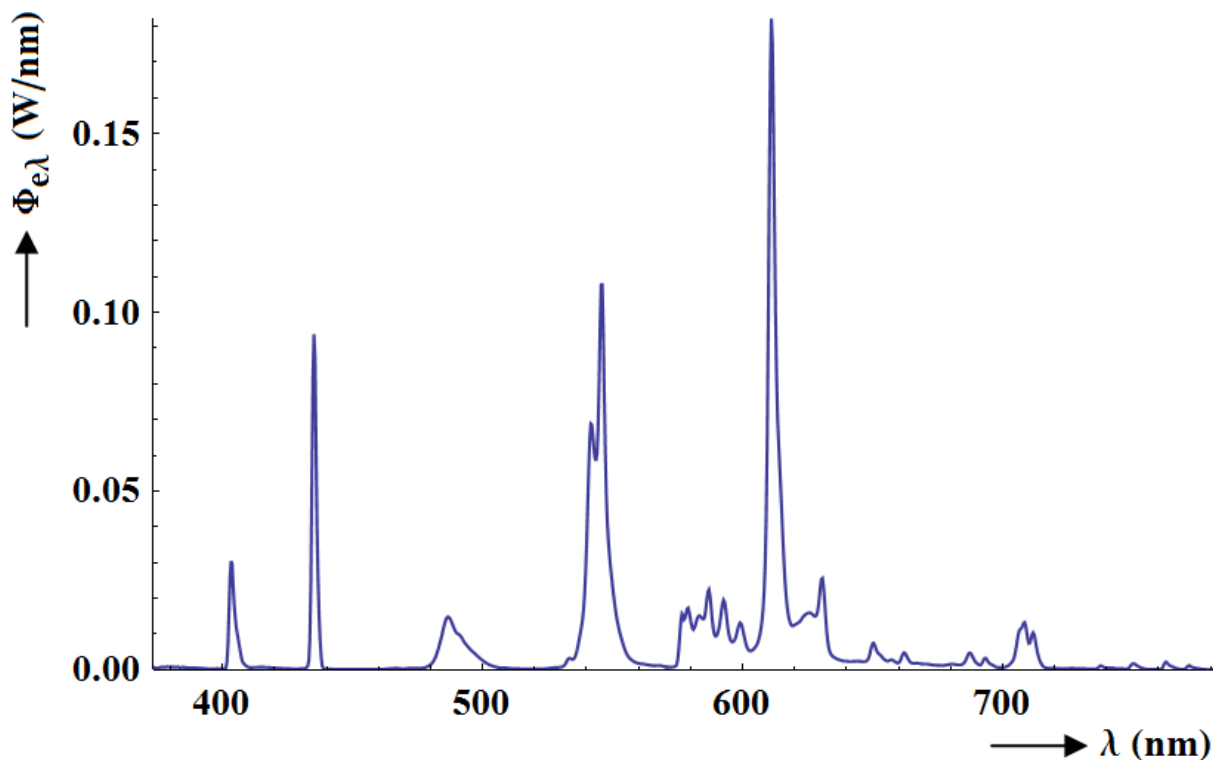
Parametr			Výrobce			
			Osram		Philips	
Název veličiny	Označení	DSST FCY 18 W/825 E27		MASTER PLE-R 20W/827 E27 220-240V 1CT		
		změřeno	uváděno	změřeno	uváděno	
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	1073	1050	1056	1220	
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2503	2500	2808	2700	
Měrný výkon	η_E (lm/W)	58,9	58,3	51,9	60,0	
Napětí	U (V)	230	220 - 240	230	220 - 240	
Proud	I (mA)	128	180	147	140	
Příkon	P (W)	18,23	18	20,35	20	
Účinnost	$\cos \varphi$ (-)	0,887	-	0,851	-	
Power factor	PF (-)	0,617	0,55	0,600	0,6	
Harmonické zkreslení	THD (%)	102,9	-	100,4	-	
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	1083		1058		
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	0,92		0,19		

Tabulka 7.1: Parametry kompaktních zářivek

Na následujících grafech je vidět vyzařované spektrum ve viditelné oblasti obou světelných zdrojů.



Obrázek 7.2: Vyzařované spektrum kompaktní zářivky výrobce Osram



Obrázek 7.3: Vyzařované spektrum kompaktní zářivky výrobce Philips

7.2 Lineární zářivky T8

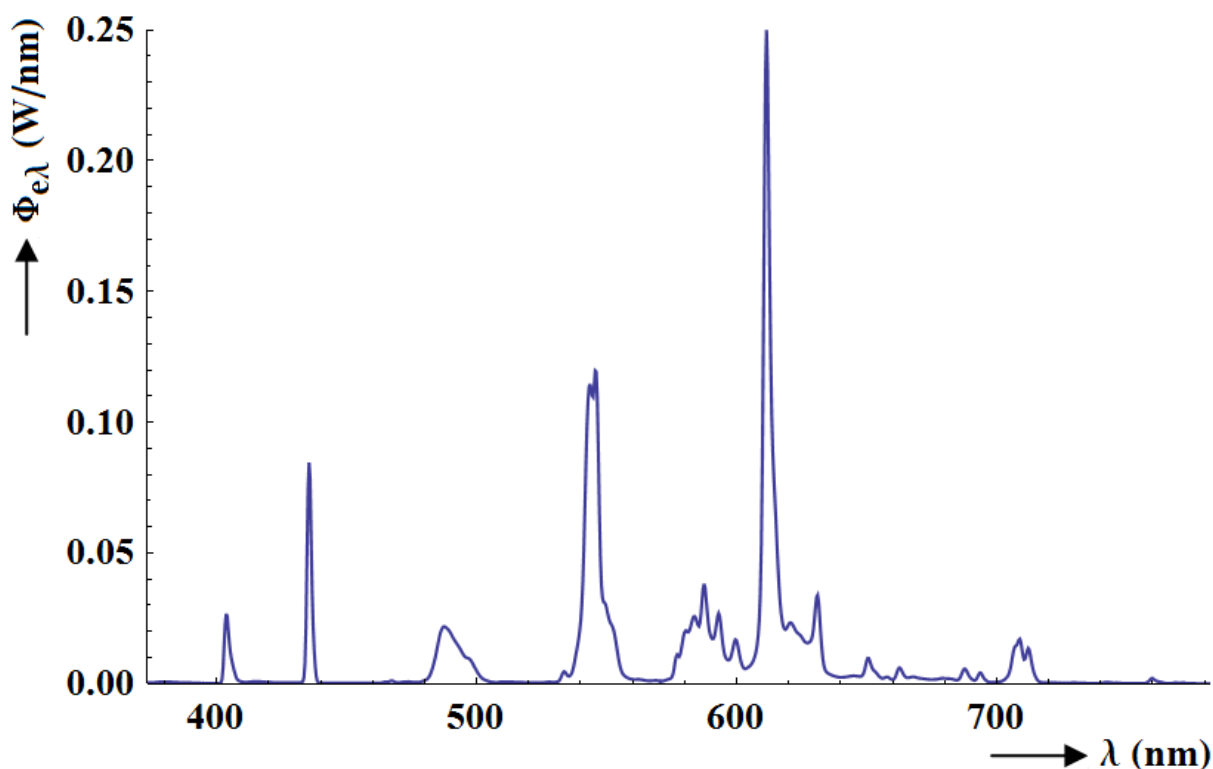
Pro napájení lineárních zářivek T8 byl použit předřadník TRIDONIC PC 1x18 T8 Ip. Protože oba světelné zdroje mají stejný příkon, byl použit tentýž předřadník. Jelikož jsou zdroje napájeny z předřadníku, tak změřené elektrické veličiny ve skutečnosti nevypovídají o parametrech světelného zdroje, ale právě o parametrech předřadníku. Pro tento předřadník jsou uváděny hodnoty proudu 80 mA a hodnota PF 0,97. Jak je vidět z tabulky, tak tyto hodnoty byly v jisté toleranci skutečně naměřeny.

Hodnoty změřených světelných toků jsou blízké uváděným hodnotám. Teplota chromatičnosti světelného zdroje Philips však deklarované hodnoty nedosahuje.

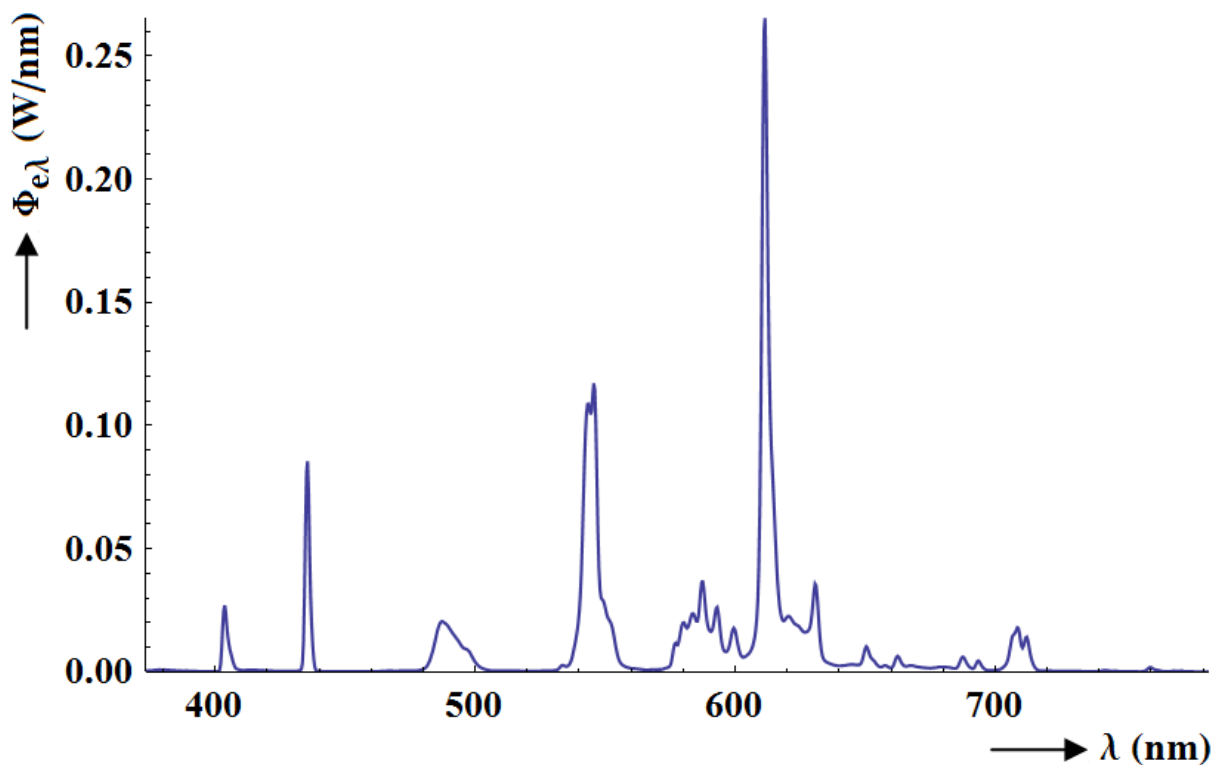
Parametr		Výrobce			
		Osram		Philips	
Název veličiny	Označení	Lumilux T8 L 18W/827		MASTER TL-D Super 80 18W/827 1SL	
		změřeno	uváděno	změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	1349	1350	1323	1350
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2686	2700	2528	2700
Měrný výkon	η_E (lm/W)	70,2	75	70,9	75
Napětí	U (V)	230	-	230	-
Proud	I (mA)	87	-	84	-
Příkon	P (W)	19,22	18	18,66	18
Účinnost	$\cos \varphi$ (-)	0,996	-	0,964	-
Power factor	PF (-)	0,961	-	0,960	-
Harmonické zkreslení	THD (%)	8,1	-	8,2	-
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	1343		1323	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	0,45		0,00	

Tabulka 7.2: Parametry lineárních zářivek T8

Na grafech níže je zobrazeno vyzařované spektrum obou světelných zdrojů. Je vidět, že obě spektra jsou prakticky identická.



Obrázek 7.5: Vyzařované spektrum lineární zářivky 18 W T8 výrobce Osram



Obrázek 7.6: Vyzařované spektrum lineární zářivky 18 W T8 výrobce Philips

7.3 Lineární zářivky T5

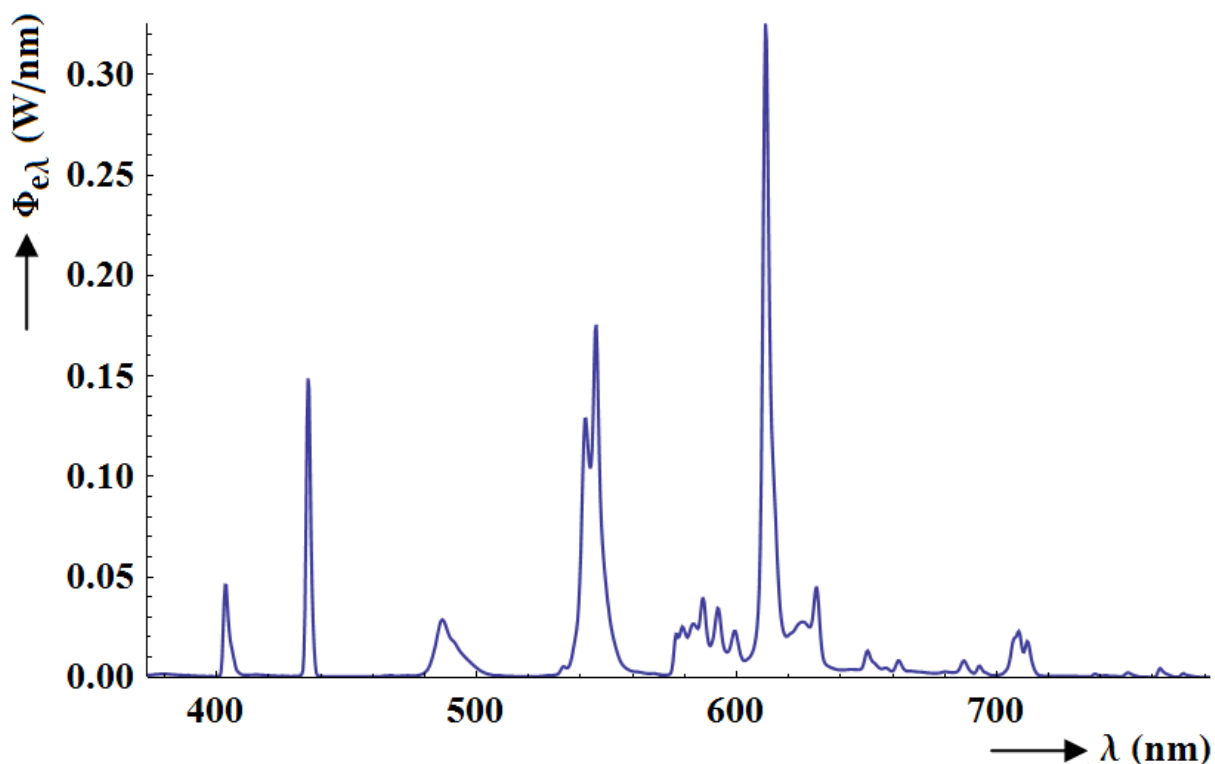
Pro napájení lineárních zářivek T5 byl použit elektronický předřadník TRIDONIC PC 1x24 PRO Ip. Je vidět, že změřené světelné toky obou zdrojů jsou vyšší, než udává výrobce.

Parametr		Výrobce			
		Osram		Philips	
Název veličiny	Označení	Lumilux T5 HO 24W/827		Luxline Plus FHE 24W/T5/824	
		změřeno	uváděno	změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	1818	1750	1826	1700
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2829	2700	2662	2700
Měrný výkon	η_E (lm/W)	71,6	77,8	69,0	70,8
Napětí	U (V)	230	-	230	-
Proud	I (mA)	111	-	116	-
Příkon	P (W)	25,4	22,5	26,48	24
Účinník	$\cos \varphi$ (-)	0,987	-	0,987	-
Power factor	PF (-)	0,983	-	0,983	-
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	1825		1800	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	0,38		1,44	

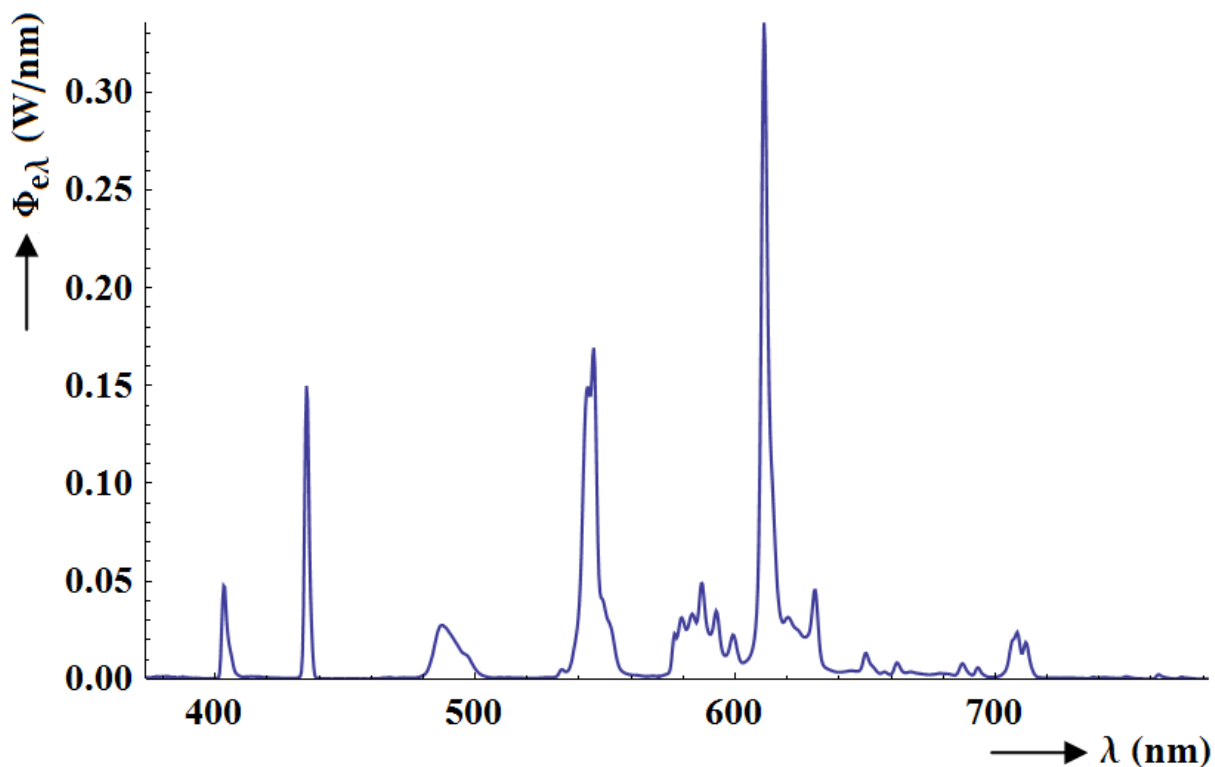
Tabulka 7.3: Parametry lineárních zářivek T5

Opět platí, že měřené hodnoty elektrických veličin vypovídají o parametrech elektronického převodníku, nikoliv o světelném zdroji.

Na grafech níže je zobrazeno vyzařované spektrum pro oba světelné zdroje. Obecně je na grafech všech zářivkových zdrojů dobře patrné, že charakter vyzařovaného spektra je stejný.



Obrázek 7.7: Vyzařované spektrum lineární zářivky 24 W T5 výrobce Osram



Obrázek 7.8: Vyzařované spektrum lineární zářivky 24 W T5 výrobce Sylvania

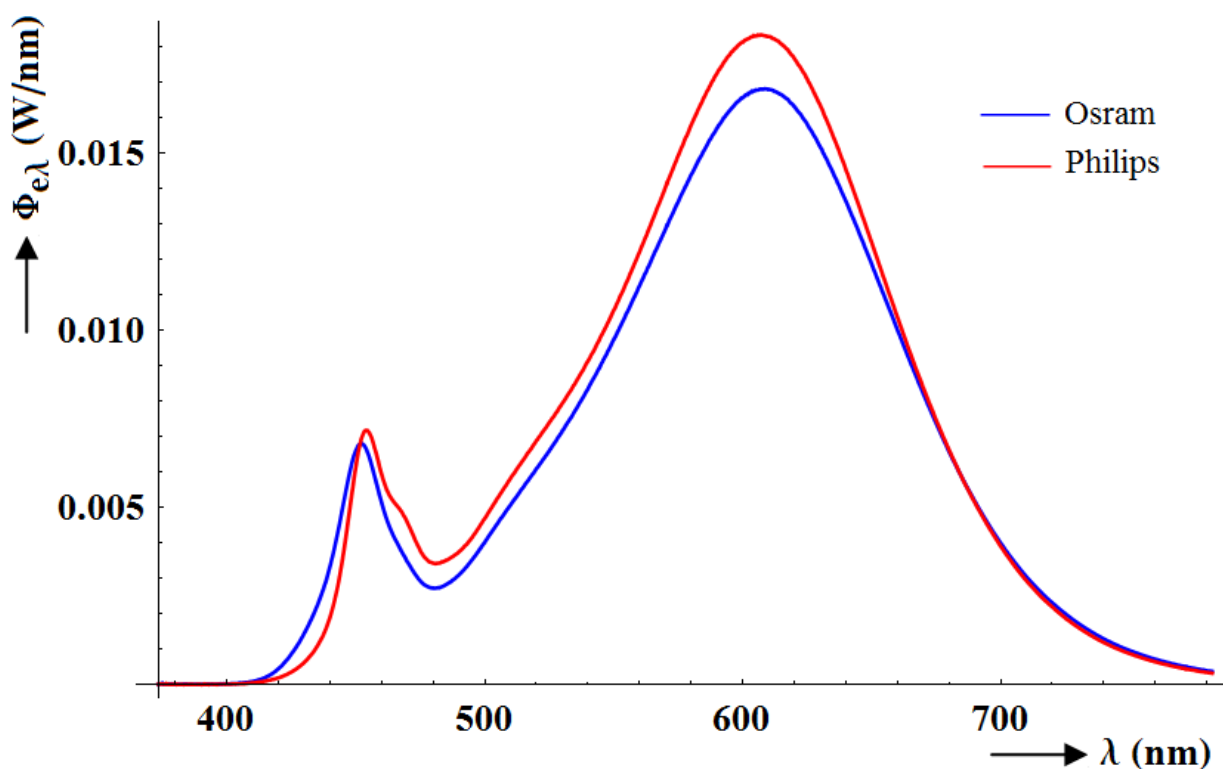
7.4 LED zdroje

Pro měření LED zdrojů byly zvoleny zdroje s patičí E27, protože je snadné je upevnit do nosného nástavce v kulovém integrátoru. LED zdroj výrobce Osram měl zhruba o 2 % nižší světelný tok a LED zdroj značky Philips měl zhruba o 3 % vyšší světelný tok, než výrobce udával. Rovněž relativní rozdíl světelného toku je v deklarovaných mezích.

Parametr			Výrobce			
			Osram		Philips	
Název veličiny	Označení	LED STAR CLASSIC A 60 10 W/827 E27		CorePro LEDBulb 9.5- 60W E27 827		
		změřeno	uváděno	změřeno	uváděno	
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	790	806	830	806	
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2684	2700	2692	2700	
Měrný výkon	η_E (lm/W)	71,5	80,6	95,2	84,8	
Napětí	U (V)	230,1	230	230,1	220 - 240	
Proud	I (mA)	49	45	40	53	
Příkon	P (W)	11,05	10,00	8,72	9,5	
Účinník	$\cos \varphi$ (-)	0,956	-	0,936	-	
Power factor	PF (-)	0,955	0,51	0,840	0,5	
Harmonické zkreslení	THD (%)	4,5	-	49,3	-	
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	802		840		
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	1,43		1,19		

Tabulka 7.4: Parametry LED zdrojů

Na následujícím grafu je zobrazeno spektrum jak LED zdroje společnosti Osram, tak zdroje společnosti Philips. Na grafu je názorně vidět, že světelný zdroj výrobce Philips dosahuje vyšších hodnot spektrálního zářivého toku, a to na většině celého rozsahu. Tento fakt se tedy projeví i vyšší hodnotou světelného toku, jak je vidět v tabulce výše.



Obrázek 7.9: Vyzařované spektrum LED zdrojů Osram a Philips

7.5 Žárovka

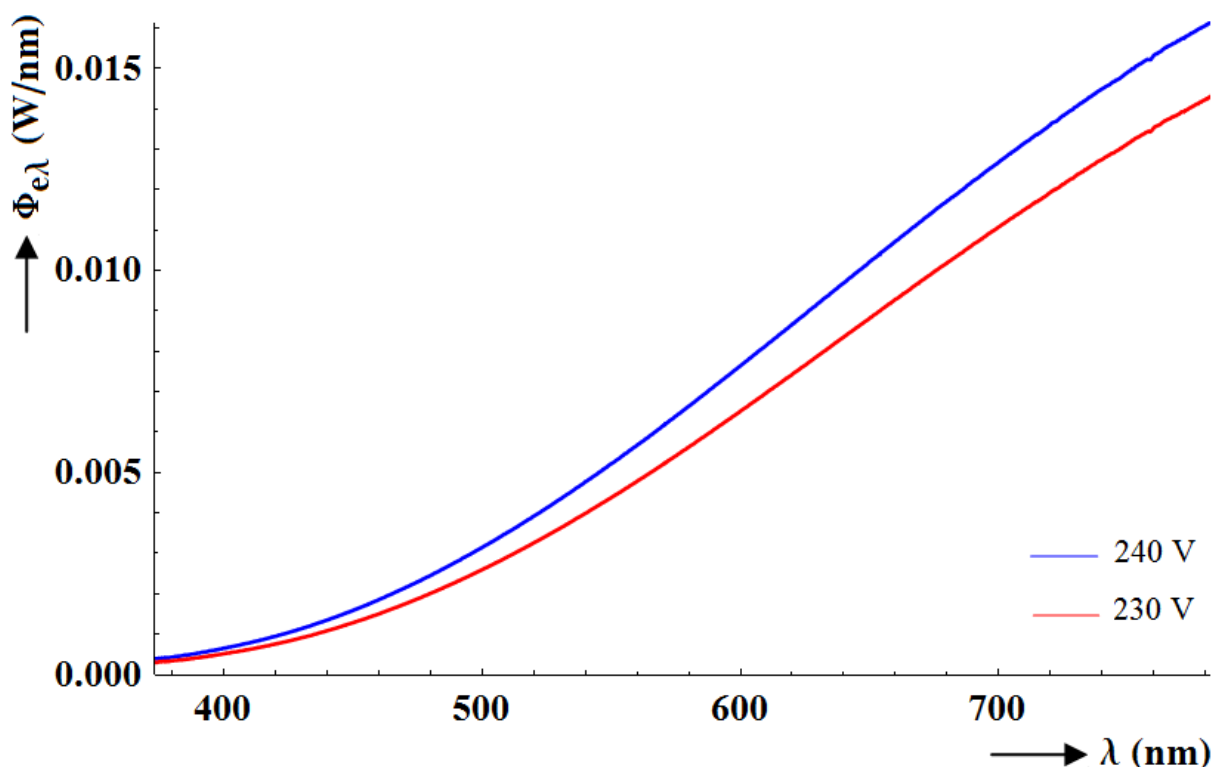
Pro měření žárovky byl použit pouze jeden zdroj. Výrobcem je TES-LAMP. Jedná se o klasickou čirou žárovku s příkonem 40 W a závitem E27. Jak je vidět v tabulce, měřené hodnoty se shodují s hodnotami uváděnými výrobcem.

Parametr			Výrobce	
			TES-LAMP	
Název veličiny	Označení	Žárovka čirá 240-40 E27		
		změřeno	uváděno	
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	423	420	
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2668	2700	
Měrný výkon	η_E (lm/W)	10,2	10,5	
Napětí	U (V)	240,0	240	
Proud	I (mA)	173	180	
Příkon	P (W)	41,62	40	
Účinnost	$\cos \varphi$ (-)	1,000	-	
Power factor	PF (-)	1,000	-	

Harmonické zkreslení	THD (%)	-	-
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	427	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	1,43	

Tabulka 7.5: Parametry žárovky

Jmenovité napětí této žárovky je 240 V. Světelný tok této žárovky byl rovněž změřen pro napájecí napětí 230 V.



Obrázek 7.10: Vyzařované spektrum klasické žárovky

Při tomto napětí bylo dosaženo světelného toku 358 lm. Je zde tedy vidět silná závislost mezi hodnotou napájecího napětí a hodnotou světelného toku. Při poklesu napětí o 4 % poklesl světelný tok o 16 %.

7.6 Halogenidová výbojka

Jako zástupce halogenidových výbojek byla vybrána 50W výbojka od společnosti Osram se závitem E27. Tato výbojka byla napájena z předřadníku Osram POWERTRONIC PTo 50/220-240. Obdobně jako u lineárních zářivek platí, že změřené elektrické veličiny neodpovídají hodnotám, kterými je světelný zdroj skutečně napájen, ale jedná se o parametry elektronického

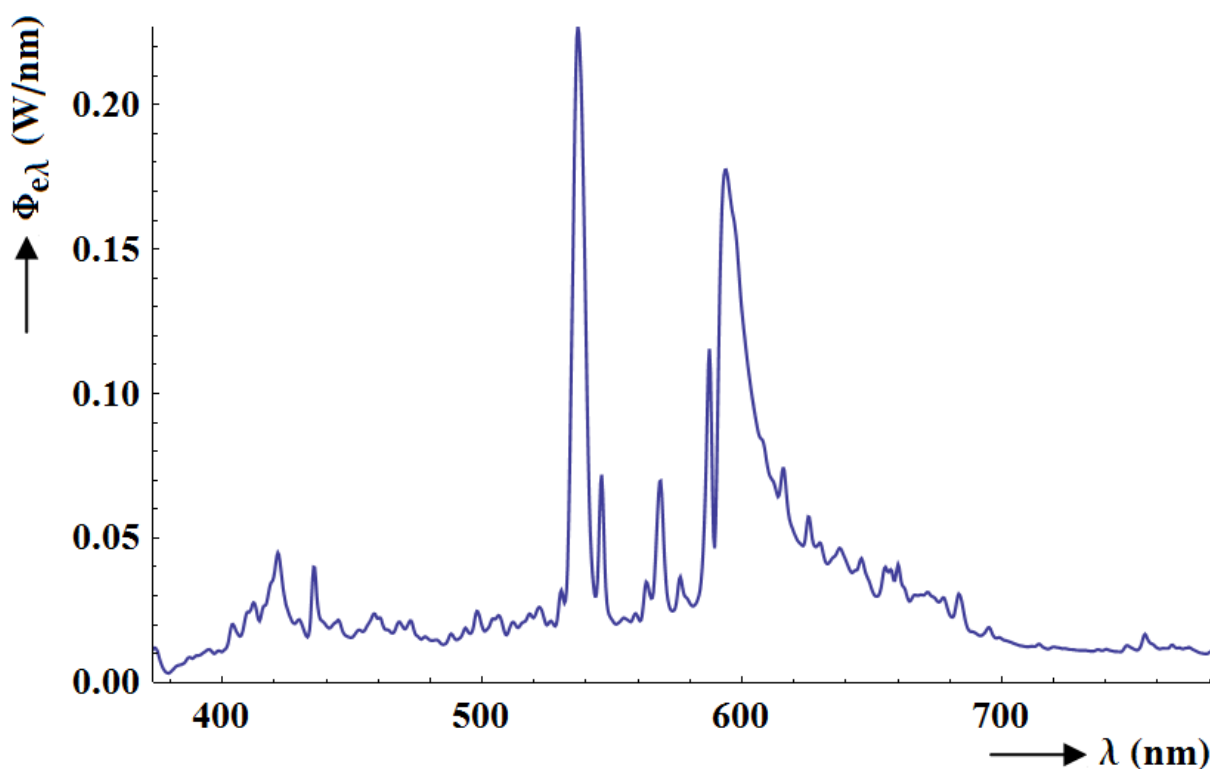
předřadníku. Skutečné elektrické parametry halogenidové výbojky při provozu bohužel nebylo možné měřit.

Pro elektronický předřadník tohoto zdroje byl vytvořen plechový kryt s bílým nátěrem, aby se zredukovalo množství pohlcené záření předřadníkem. Tento kryt byl použit i pro další předřadníky dalších výbojových zdrojů, aby se vliv předřadníku na odezvu kulového integrátoru unifikoval.

Parametr		Výrobce	
		Osram	
Název veličiny	Označení	HCI-E/P 50 W/830 WDL PB coated	
		změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	3882	4000
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	2990	3000
Měrný výkon	η_E (lm/W)	68,9	75,5
Napětí	U (V)	230,5	-
Proud	I (mA)	248	760
Příkon	P (W)	56,34	53,00
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	3782	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	2,64	

Tabulka 7.6: Parametry halogenidové výbojky

Rozdíl mezi světelným tokem měřeným pomocí goniometru a pomocí kulového integrátoru je větší než 2 %. Tato hodnota už je poměrně značná. Nicméně stále v rozsahu nejistoty. Je rovněž možné, že zdroj nebyl při měření dostatečně stabilní. Na grafu níže je vidět spektrální rozložení záření halogenidové výbojky.



Obrázek 7.11: Vyzařované spektrum halogenidové výbojky

7.7 Vysokotlaká sodíková výbojka

Pro měření vysokotlaké sodíkové výbojky byla použita 50W výbojka od společnosti Osram se závitem E27. Tato výbojka byla napájena stejně jako halogenidová výbojka z předřadníku Osram POWERTRONIC PTo 50/220-240.

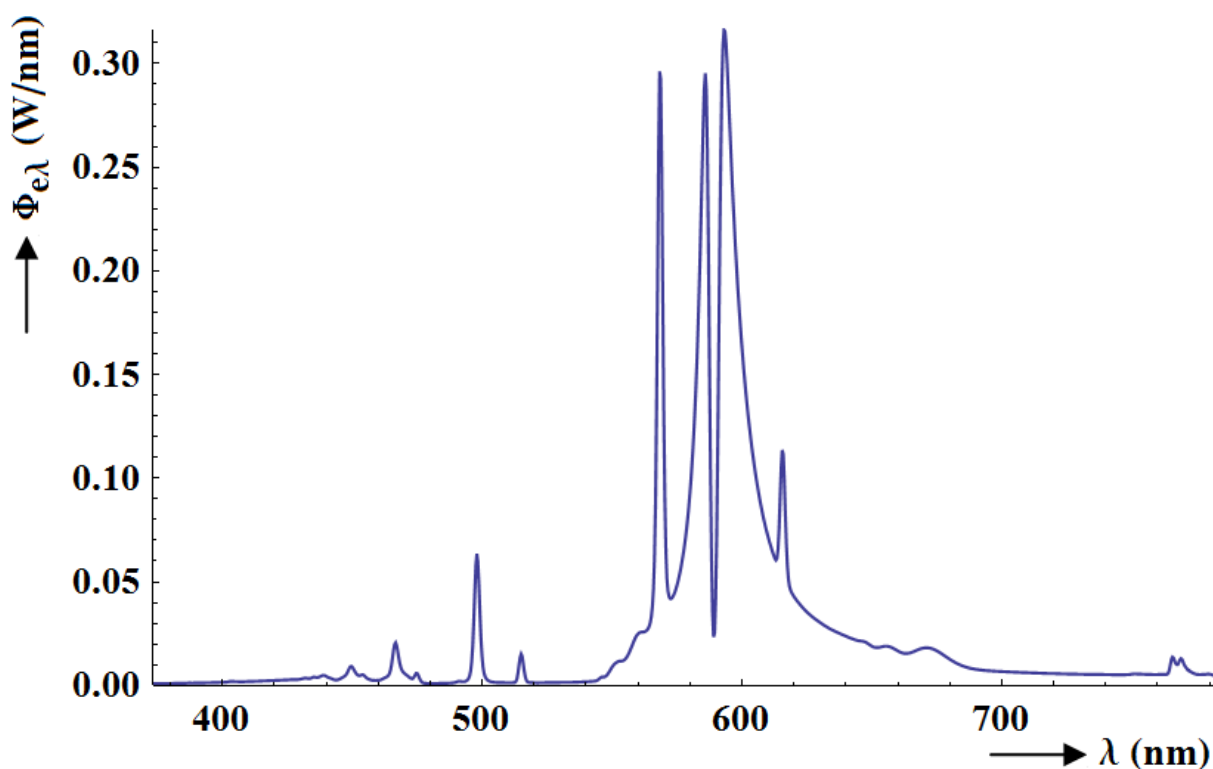
Parametr		Výrobce	
		Osram	
Název veličiny	Označení	NAV-E 50 W E27	
		změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	3970	3600
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	1848	2000
Měrný výkon	η_E (lm/W)	70,9	72,0

Napětí	U	(V)	230,5	-
Proud	I	(mA)	247	770
Příkon	P	(W)	56,02	50,00
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF}	(lm)	3908	
Relativní rozdíl světelného toku	r	(%)	1,59	

Tabulka 7.7: Parametry vysokotlaké sodíkové výbojky

Naměřený světelný tok byl poněkud vyšší, než udává výrobce. Jak již bylo zmíněno, u zdrojů s předřadníkem elektrické veličiny nevypovídají o světelném zdroji, ale o předřadníku. Při porovnání hodnot elektrických veličin v tabulce 7.7 a v tabulce 7.8 je hezky vidět, že pro oba zdroje jsou měřené elektrické veličiny prakticky totožné.

Jmenovitý proud předřadníku je pro napětí 230 V 270 mA. Jmenovitý příkon je 55 W. Těmto hodnotám v podstatě odpovídají i naměřené hodnoty.



Obrázek 7.12: Vyzařované spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky

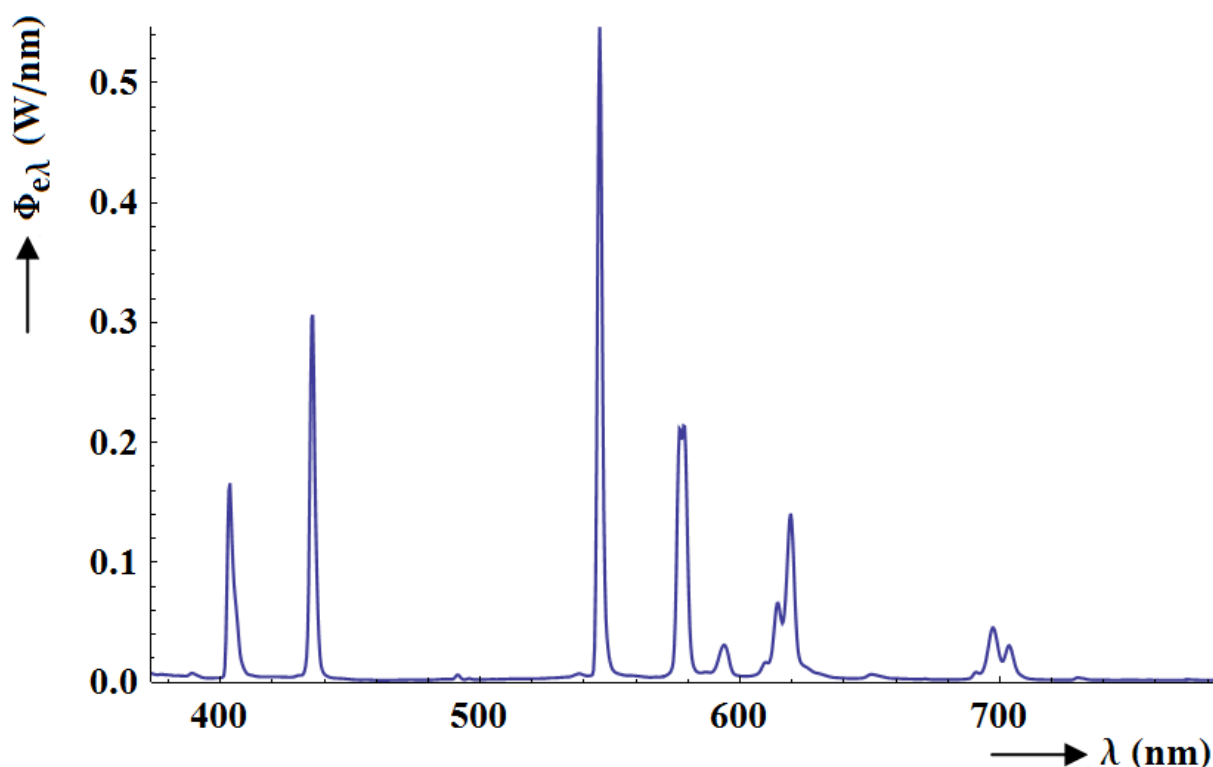
7.8 Vysokotlaká rtuťová výbojka

Jako vysokotlaká rtuťová výbojka byla měřena 50W výbojka od výrobce Osram se závitem E27. Pro napájení této výbojky byl použit indukční předřadník TRIDONIC OMBS 50.

Parametr		Výrobce	
		Osram	
Název veličiny	Označení	HQL 50 W E27	
		změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	2066	1800
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	-	4200
Měrný výkon	η_E (lm/W)	34,4	36,0
Napětí	U (V)	230,5	-
Proud	I (mA)	610	610
Příkon	P (W)	60,00	50,00
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	2014	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	2,58	

Tabulka 7.8: Parametry vysokotlaké rtuťové výbojky

Bohužel nebylo možné změřit teplotu chromatičnosti. Pravděpodobně to bylo způsobeno tím, že jednotlivé spektrální čáry jsou příliš úzké a algoritmus, který vypočítává teplotu chromatičnosti z naměřeného spektra, tak nebyl schopen teplotu chromatičnosti dopočítat.



Obrázek 7.13: Vyzářované spektrum vysokotlaké rtuťové výbojky

Rovněž pro tento světelný zdroj platí, že rozdíl mezi světelným tokem měřeným pomocí goniofotometru a pomocí kulového integrátoru se liší více než o 2 %. Situace je obdobná jako pro halogenidovou výbojku.

7.9 Nízkotlaká sodíková výbojka

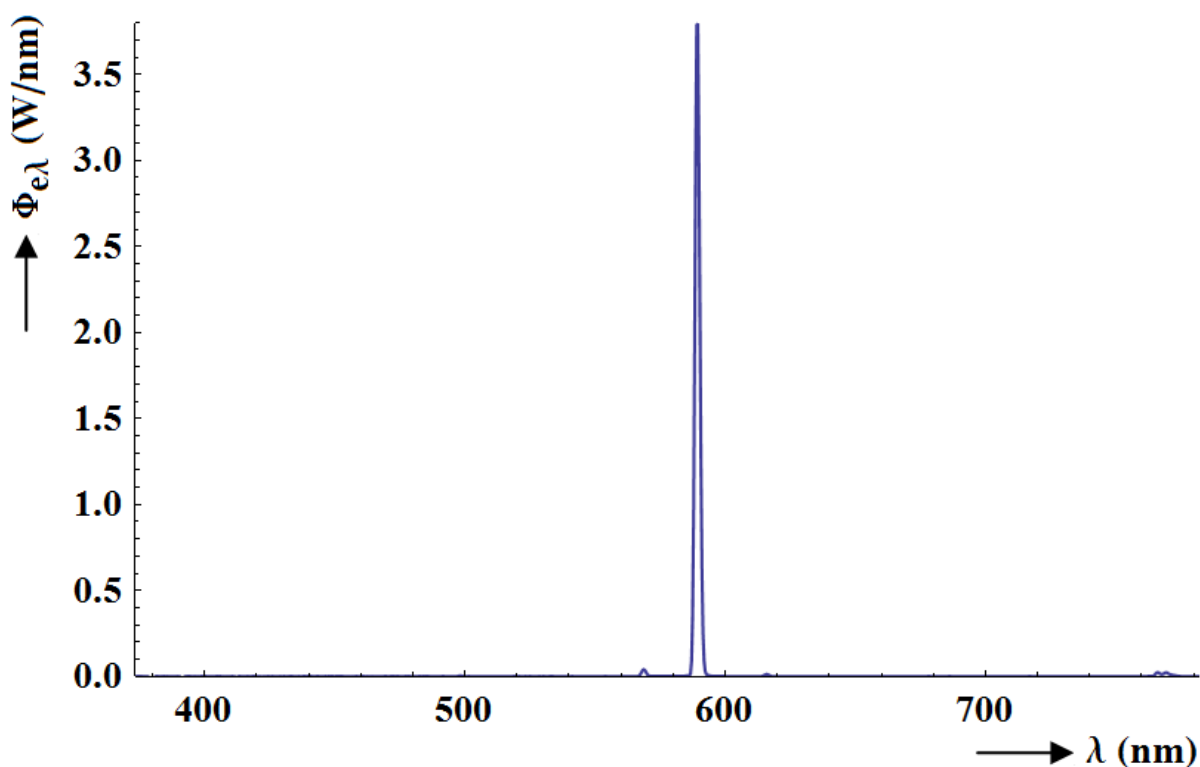
Pro měření nízkotlaké sodíkové výbojky byl zvolen zdroj od výrobce Sylvania s příkonem 35 W. Typ použitého zapalovače byl Layrton IG-020, který je schopen vygenerovat minimálně 800 μ s dlouhý zapalovací impulz se špičkovou hodnotou napětí 0,7-1 kV. Bohužel opět nebylo možné změřit teplotu chromatičnosti. Důvod byl stejný jako v případě měření vysokotlaké rtuťové výbojky.

Opět platí, že změřené elektrické veličiny odpovídají předřadníku a ne samotnému světelnému zdroji. Přesto je překvapivá změřená hodnota příkonu, která je výrazně vyšší, než je jmenovitá hodnota zapalovače. Z tohoto důvodu je pak i nízká vypočtená hodnota měrného výkonu.

Parametr		Výrobce	
		Sylvania	
Název veličiny	Označení	SA SLP 35W BY22D SLV	
		změřeno	uváděno
Světelný tok	Φ_{KI} (lm)	4650	4500
Teplota chromatičnosti	T_c (K)	-	1800
Měrný výkon	η_E (lm/W)	89,3	128,5
Napětí	U (V)	230,5	70
Proud	I (mA)	635	530
Příkon	P (W)	52,10	35
Světelný tok - goniofotometr	Φ_{GF} (lm)	4771	
Relativní rozdíl světelného toku	r (%)	2,54	

Tabulka 7.9: Parametry nízkotlaké sodíkové výbojky

Rozdíl mezi dvěma měřenými světelnými toky je větší než 2 %. Opět platí, že je to hodnota v rozsahu nejistoty měření. Na grafu níže je vidět spektrální čára nízkotlaké sodíkové výbojky. Nízkotlaká sodíková výbojka vyzařuje v úzké oblasti vlnových délek kolem maximální vlnové délky 589 nm.



Obrázek 7.14: Vyzařované spektrum nízkotlaké sodíkové výbojky

Ve skutečnosti nízkotlaká sodíková výbojka vyzařuje na dvou blízkých čárách svítivosti s maximem 589,0 a 589,6 nm. Kvůli rozlišení CCD detektoru se ovšem spektrum jeví jako pouze jedna spektrální čára. Bohužel spektrometr stejně jako v případě vysokotlaké rtuťové výbojky nebyl schopen určit teplotu chromatičnosti.

Kapitola 8

Měření školních normálů světelného toku

Vzhledem k tomu, že výše popsané měření světelného toku probíhalo na měřících zařízeních velmi vysoké úrovně, jevílo se jako vhodné proměřit také světelně-technické parametry normálů, které se používají pro laboratorní měření v laboratoři katedry elektroenergetiky FEL ČVUT.

Celkem bylo proměřeno pět normálů. Normály s označením 13-4 a 13-5 byly vytvořeny z halogenové žárovky Philips Krypton E 60 pomocí normálu s označením 413. Normál označený jako 13-7 byl vytvořen z halogenové žárovky Osram Halolux Ceram pomocí normálu označovaného jako č. 3.

Hodnoty uvedené pro daný normál a hodnoty naměřené jsou uvedeny v tabulkách níže.

Označení	13-4	
	změřeno	uváděno
Φ (lm)	1467	1508 \pm 6 %
U (V)	230	230
I (mA)	441	437
P (W)	101	101

Tabulka 8.1: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-4

Označení		13-5	
		změřeno	uváděno
Φ	(lm)	1432	1475 ± 6 %
U	(V)	230	230
I	(mA)	439	437
P	(W)	101	101

Tabulka 8.2: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-5

Jak je vidět v tabulce 8.1 a 8.2, tak naměřená hodnota světelného toku pro oba normály je nižší než hodnota uváděná. Nicméně tato hodnota je v mezích nejistoty 6 %, která je pro oba normály stanovena.

Označení		13-7	
		změřeno	uváděno
Φ	(lm)	3981	4262 ± 6 %
U	(V)	230	230
I	(mA)	1017	1015
P	(W)	234	233

Tabulka 8.3: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 13-7

Při porovnání hodnot změřeného a uváděného světelného toku normálu 17-7 je patrné, že hodnota změřená je výrazně nižší než hodnota uváděná, a to i v rozsahu uváděné nejistoty. Tento normál byl proměřen i na goniofotometru a hodnota světelného toku byla zcela totožná s hodnotou změřenou v kulovém integrátoru, tedy 3981 lm. Lze tedy usuzovat, že uváděná hodnota normálu 13-7 neleží v uváděném intervalu.

Označení		413	
		změřeno	uváděno
Φ	(lm)	1258	1262
U	(V)	120	120
I	(mA)	764	763
P	(W)	91,7	100

Tabulka 8.4: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu 413

Na základě porovnání změřené a uváděné hodnoty normálu 413 lze považovat jeho uváděnou hodnotu světelného toku za hodnotu ležící v toleranci.

Označení		č. 3	
		změřeno	uváděno
Φ	(lm)	1931	1838
U	(V)	220	220
I	(mA)	866	855
P	(W)	190	188

Tabulka 8.5: Porovnání uváděných a změřených parametrů normálu č. 3

Světelný tok pro normál č. 3 byl rovněž změřen pomocí goniofotometru. Jeho hodnota byla 1934 lm. Rozdíl mezi světelným tokem uváděným a světelným tokem změřeným je poměrně výrazný. Pomocí tohoto normálu byl připravován normál s označením 13-7. Proto i stanovená hodnota světelného toku normálu 13-7 je tolik odlišná od hodnoty změřené.

Rozdíl mezi změřenou a uváděnou hodnotou světelného toku může být způsoben tím, že ačkoli napětí bylo nominální, tak proud při měření zdroje byl o 11 mA vyšší. Příkon zdroje byl tak o 2 W vyšší, než nominální hodnota. To mohlo být způsobeno například změnou odporu vlákna světelného zdroje nebo změnou odporu celé soustavy napájecí vodiče-žárovka. Další možností je, že měření napětí, ať už při měření zdroje či při jeho cejchování, nebylo zcela přesné. Mohlo se tak stát, že ve skutečnosti napájecí napětí bylo odlišné od odečtené hodnoty. Zde by se pak projevil vliv nepřesnosti měření elektrických veličin, jako popsáno v podkapitole 6.4.

Kapitola 9

Uživatelská příručka

Podstatnou součástí této diplomové práce bylo vypracování uživatelské příručky pro měření světelného toku a dalších světelně-technických parametrů světelných zdrojů a svítidel. Tato uživatelská příručka popisuje metodiku měření pomocí měřící sestavy popsané v kapitole 4 a v kapitole 5. Protože uživatelská příručka bude sloužit pro potřeby Centra vývojových a zkušebních laboratoří, není možné, aby příručka byla plně veřejně dostupná. Proto je vytvořena jako samostatný dokument, který bude umístěn do příslušné světelné laboratoře v Centru vývojových a zkušebních laboratoří.

Hlavním účelem této uživatelské příručky je poskytnout obsluze měření na popsané měřící sestavě přehledný návod, jak v daných krocích měření postupovat. Příručka je členěna do logických kapitol vztahujících se k danému kroku měření. Jednotlivé kapitoly pak podrobně popisují dílčí kroky, které je nutné vykonat k úspěšnému provedení měření. Součástí uživatelské příručky je rovněž popis dílčích nejistot měření a výpočet standardní rozšířené nejistoty měření světelného toku.

Pro vytvoření uživatelské příručky bylo nutné se důkladně seznámit s měřícím zařízením laboratoře. Za tímto účelem bylo pořádáno školení prováděné společností, která měřící systém dodávala. Hlubší prozkoumání měřícího systému a jeho možnosti pak probíhaly během jednotlivých měření světelných zdrojů. Důležitým zdrojem informací byla také dokumentace k danému měřícímu zařízení. Jednalo se o manuál k spektrometru OL 770, kalibrační manuál, kalibrační listy a řadu dalších dokumentů souvisejících s jednotlivými částmi měřící sestavy.

Za účelem provedení vzorového měření bylo nutné vytipovat světelné zdroje takovým způsobem, aby bylo možné proměřit prakticky všechny typy běžné používaných zdrojů. Zároveň bylo třeba navrhnout způsob umístění světelných zdrojů s předřadníkem do kulového integrátoru tak, aby podmínky uvnitř kulového integrátoru byly vždy pro daný světelný zdroj stejné. To znamená, aby bylo možné příslušný světelný zdroj měřit vícekrát za použití pouze jedné kalibrace. Uživatelská příručka čítá dohromady 29 stran. Nedílnou součástí je řada obrázků dílčích postupů měření z měřicího softwaru.

Závěr

V této diplomové práci se řeší tvorba metodického postupu měření parametrů světelných zdrojů pomocí kulového integrátoru. Za tímto účelem jsem provedl vzorové měření vybraných světelných zdrojů. Hlavním předmětem zájmu byl světelný tok těchto zdrojů. S ním souviselo i určení nejistoty jeho měření. Nicméně spolu se světelným tokem bylo měřeno i několik dalších světelně-technických parametrů. Těmi byl teplota chromatičnosti a spektrální rozložení zářivého toku.

Metodický postup měření parametrů světelných zdrojů v kulovém integrátoru byl popsán pro konkrétní světelnou laboratoř a pro konkrétní měřící sestavu. Podstatná část tohoto postupu je popsána přímo v této diplomové práci. Detailní popis jednotlivých kroků celého měřícího procesu, včetně ovládání softwaru, je pak vysvětlen v uživatelské příručce, která bude sloužit pro obsluhu měření v dané světelné laboratoři Centra vývojových a zkušebních laboratoří.

Hodnoty světelného toku, které byly naměřeny pomocí kulového integrátoru, byly porovnány s hodnotami změřenými pomocí goniofotometru. Tyto hodnoty a jejich relativní rozdíl jsou uvedeny v tabulkách v kapitole 7.

Pro použitou měřící sestavu byly analyzovány jednotlivé faktory, které mohou ovlivňovat přesnost měření. Výstupem tohoto rozboru je řada dílčích nejistot, které vstupují do výpočtu standardní nejistoty typu B. Z této nejistoty je následně vypočtena standardní rozšířená nejistota s koeficientem rozšíření $k = 2$. Standardní rozšířená nejistota měření světelného toku v kulovém integrátoru byla stanovena na 3,3 %. To tedy znamená, že při správném dodržení všech postupů je s pravděpodobností 95 % skutečná hodnota světelného toku v intervalu $\pm 3,3$ % od hodnoty změřené.

Za účelem provedení vzorového měření bylo pomocí dané měřící sestavy změřeno 13 světelných zdrojů. Tyto zdroje byly vybrány tak, aby pokrývaly prakticky celé spektrum dnes běžně používaných světelných zdrojů. Vybranými typy zdrojů byly kompaktní zářivky, lineární zářivky T5 a T8, zdroje LED s patičí E27, klasická žárovka, halogenidová výbojka, vysokotlaká

rtuťová výbojka, vysokotlaká a nízkotlaká sodíková výbojka. Měření probíhalo v souladu s vytvořenou uživatelskou příručkou.

Protože celá použitá měřící sestava je na vysoké technické úrovni a měření světelného toku na ní dosahuje velmi dobré přesnosti, tak bylo mimo vzorové měření provedeno měření normálů světelného toku, které se využívají ve světelné laboratoři katedry elektroenergetiky na FEL ČVUT.

Byl změřen světelný tok pro celkem 5 normálů. Jejich označení je 13-4, 13-5, 13-7, 413 a 3. Změřená hodnota světelného toku normálů 13-4 a 13-5 byla v rámci jejich nejistot v souladu s hodnotou uváděnou. Tyto dva normály byly vytvořeny pomocí normálu 413. Rovněž jeho změřená hodnota světelného toku se od hodnoty uváděné lišila o méně než 0,4 %. Naopak změřená hodnota světelného toku normálu 13-7, který byl vytvořen pomocí normálu 3, se od hodnoty uváděné liší výrazně více, než je oblast nejistoty. Je možné, že je to způsobeno poměrně značnou odchylkou měřené hodnoty světelného toku normálu 3 od hodnoty uváděné.

Seznam literatury

- [1] DiLaura, D. L., Houser, K. W., Mistrick, R. G., Steffy, G. R. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10th ed. Illuminating Engineering Society, 2011, ISBN 978-087995-241-9
- [2] Vlach, J. *Nejistoty světelně technických měření*. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. Praha, 2007
- [3] Habel, J., Žák, P. *Elektrické světlo 1*. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektroenergetiky. Praha, 2009
- [4] ČSN 13032 - Světlo a osvětlení - Měření a uvádění fotometrických údajů zdrojů a svítidel
- [5] *Manuál*. OL Series 770 Multi-Chanel Spectroradiometer. Gooch & Housego. Florida, 2014
- [6] Gooch & Housego. *goochandhousego.com*. [online]. [cit. 2014-10-03]. Dostupné z: <http://goochandhousego.com/product-categories/instrumentation/>
- [7] Horiba Scientific. *horiba.com*. [online]. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.horiba.com/fr/scientific/products/raman-spectroscopy/raman-academy/>
- [8] Aikens, R. S. *Solid-State Imagers for Microscopy* [online]. 1989. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.msq.ucsf.edu/aqard/Publications/BookChapters/Bk-5-Agard.pdf>
- [9] *Report of Calibration for One Standard of Total Spectral Radiant Flux and Total Luminous Flux OL 220-TSF-F*. Germany: Gooch & Housego, 10. 7. 2014
- [10] European co-operation for Accreditation. *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*. [online]. 18.10.2013 [cit. 2014-10-17]. Dostupné z: <http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-02-m>
- [11] Pernikář, J. *Hodnocení způsobilosti kontrolních prostředků*. [online]. [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: http://qps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/31_Pernikar_VUTBR.pdf
- [12] Bell, S. *A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement*. National Physical Laboratory, Teddington, 1999. ISSN 1368-6550
- [13] *Manuál*. OL Series 770 Multi-Chanel Spectroradiometer Calibration Manual. Gooch & Housego. Florida, 2014

- [14] Evropská komise. *Energeticky úsporné osvětlování v domácnostech - přehled technologií a legislativy* [online]. 2010 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/ceskarepublika/pdf/brozurazarovky.pdf>

Příloha A

Příloha A obsahuje vytvořenou uživatelskou příručku, která bude sloužit pro potřeby měření světelného toku v kulovém integrátoru ve společnosti Vyrtých. Tato příručka není veřejně dostupná. Je k dispozici ve společnosti Vyrtých.

Obsah přiloženého CD

Přiložené CD obsahuje následující soubory:

- tuto práci v elektronické podobě ve formátu *.pdf
- soubory s naměřenými daty ve formátu *.oli, který je možné otevřít pomocí poznámkového bloku
- zdrojové kódy výpočtů a grafů použitých v této práci ve formátu *.nb
- změřená spektra světelných zdrojů ve formátu *.xlsx