



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

MĚŘENÍ SMĚROVÉ NEUNIFORMITY NÁHRADNÍ TEPLOTY CHROMATIČNOSTI LED SVÍTIDEL URČENÝCH K OSVĚTLOVÁNÍ POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

MEASUREMENT OF DIRECTIONAL NON-UNIFORMITY OF THE CORRELATED COLOR TEMPERATURE OF
LED LUMINAIRES FOR ROAD LIGHTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Josef Růžička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

BRNO 2022

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Josef Růžička

ID: 203332

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Měření směrové neuniformity náhradní teploty chromatičnosti LED svítidel určených k osvětlování pozemních komunikací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše přístrojů pro měření náhradní teploty chromatičnosti a jejich nejistot měření
2. Rešerše svítidel a světelných zdrojů využívaných ve veřejném osvětlení
3. Laboratorní měření rozložení náhradní teploty chromatičnosti vybraných svítidel
4. Terénní měření rozložení náhradní teploty chromatičnosti již instalovaných svítidel
5. Zpracování a vyhodnocení naměřených hodnot
6. Vpracování doporučení pro měření rozložení náhradní teploty chromatičnosti svítidel

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího závěrečné práce

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 24.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření náhradní teploty chromatičnosti. Vzhledem k požadavkům vydaných ministerstvem průmyslu a obchodu na rekonstrukci veřejného osvětlení se zvýšila poptávka po přesném měření náhradní teploty chromatičnosti u venkovních svítidel. Hlavním cílem práce je tedy zhodnotit, jakým způsobem a kterými měřicími přístroji lze hodnotu náhradní teploty chromatičnosti co nejpřesněji a nejpraktičtěji určit.

Vyhodnocení probíhá na základě pěti laboratorních a dvou venkovních měření, kde hlavním subjektem měření je biodynamické svítidlo LED Tungsram SLBt. Verifikaci některých výsledných hodnot měření a simulaci situací, které by bylo obtížné změřit, poskytuje vytvořený výpočetní algoritmus v softwaru Matlab.

V závěrečné části práce se vyjasňují rozdíly v přesnosti jednotlivých metod měření a určování náhradní teploty chromatičnosti, jejich výhody a nevýhody a jsou zde uvedeny náměty pro další zpracování. Využití práce spočívá v odhalení chyb a nepřesností při měření a určování náhradní teploty chromatičnosti, se kterými se bude nutno do budoucna vypořádat. Zároveň může teoretická část posloužit jako výukový podklad ohledně témat ze světelné techniky.

Klíčová slova

náhradní teplota chromatičnosti; LED; spektrometr; jasový analyzátor; veřejné osvětlení; biodynamické svítidlo;

Abstract

This master's thesis deals with the topic of correlated color temperature measurements. There has been an increase in the demand for accurate correlated color temperature measurements due to regulations concerning reconstruction of the street lighting made by Department of Industry and Business. The main objective of this work is to determine which measuring devices and methods would make correlated color temperature measurements to be done in the most accurate and practical way.

The evaluation is based on five laboratory measurements and two outdoor measurements. The main subject of these measurements is biodynamic LED lamp Tungsram SLBt. A verification of certain output data as well as simulating situations that would be too difficult to measure is made by an algorithm created in Matlab software.

Final part of the thesis deals with the accuracy differences among various correlated color temperature measuring methods. It describes advantages and disadvantages of these methods and proposes ideas for consequent inquiry. This thesis finds its use in correlated color temperature measurement error and uncertainty discoveries that will have to be dealt with in the future. Also, theoretical part of the thesis may be used as lighting technics learning material.

Keywords

correlated color temperature; LED; spectroradiometer; luminance analyser; street lighting; biodynamic lamp

Bibliografická citace

RŮŽIČKA, Josef. *Měření směrové neuniformity náhradní teploty chromatičnosti LED svítidel určených k osvětlování pozemních komunikací* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2022. 99 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142418>. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta: Bc. Josef Růžička

VUT ID studenta: 203332

Typ práce: Diplomová práce

Akademický rok: 2021/22

Téma závěrečné práce: Měření směrové neuniformity náhradní teploty chromatičnosti LED svítidel určených k osvětlování pozemních komunikací

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Martinu Motyčkovi, Ph.D., za aktivní, ochotný a laskavý přístup v průběhu vedení. Dále chci vyjádřit vděčnost své rodině, která mě skrz celé studium bezpodmínečně podporovala.

V Brně dne:

.....
podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek.....	11
Úvod.....	13
1 Světelně-technické veličiny	14
1.1 Parametry světelných zdrojů.....	14
1.1.1 Elektrický příkon	14
1.1.2 Světelný tok	14
1.1.3 Měrný výkon.....	15
1.1.4 Index podání barev.....	16
1.1.5 Teplota chromatičnosti.....	17
1.1.6 Střední doba života	17
1.2 Veličiny zahrnující geometrii vyzařovaného světla.....	18
1.2.1 Svítivost	18
1.2.2 Osvětlenost.....	18
1.2.3 Jas.....	19
1.2.4 Světlení	19
2 Metody výpočtu náhradní teploty chromatičnosti	20
2.1 Robertsonova metoda.....	22
2.2 Trojúhelníková metoda	25
2.3 Parabolická metoda	26
2.4 Kombinovaná metoda	27
3 Měřicí přístroje	28
3.1 Analyzátor barev	28
3.2 Kolorimetr.....	28
3.3 Spektroradiometr.....	29
3.4 Jasová kamera	31
3.5 Goniofotometr.....	31
4 Světelné zdroje	34
4.1 Halogenidové výbojky	34
4.1.1 Konstrukce a funkce	34
4.1.2 Spektrální složení.....	36
4.1.3 Parametry, výhody a nevýhody.....	36
4.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky	38
4.2.1 Konstrukce a funkce	38
4.2.2 Spektrální složení.....	39
4.2.3 Parametry, výhody a nevýhody.....	40
4.3 LED – světelné diody.....	41

4.3.1	Konstrukce a funkce	41
4.3.2	Spektrální složení.....	42
4.3.3	Parametry, výhody a nevýhody.....	45
5	Biodynamické LED svítidlo Tungsram SLBt	46
5.1	Konstrukce a funkce	46
5.2	Spektrální složení.....	47
5.3	Parametry svítidla	48
6	Praktická část.....	49
6.1	Laboratorní měření.....	49
6.1.1	Měření spektroradiometrem JETI Specbos 1211 UV	50
6.1.2	Měření v kulovém integrátoru	53
6.1.3	Měření na goniofotometru spektroradiometrem JETI Specbos 1211 UV	55
6.1.4	Měření na goniofotometru jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP	59
6.1.5	Měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem	65
6.2	Venkovní měření.....	71
6.2.1	Měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem	71
6.2.2	Měření prostorového rozložení náhradní teploty chromatičnosti	78
6.3	Simulace vlivu parazitního světla na chybu měření.....	80
6.3.1	Geometrie a popis prostoru	80
6.3.2	Parametry svítidel a požadavky simulace	82
6.3.3	Výsledky simulace	82
	Závěr.....	88
	Použitá literatura.....	90
	Seznam symbolů a zkratek.....	97

Seznam obrázků

<i>Obr. 1.1</i> Spektrální citlivost lidského oka – křivka $V(\lambda)$ [9]	15
<i>Obr. 1.2</i> Porovnání odlišných indexů podání barev [9]	16
<i>Obr. 1.3</i> Ukázka rozpětí náhradní teploty chromatičnosti [15]	17
<i>Obr. 1.4</i> Grafické znázornění veličin potřebných pro výpočet svítivosti [4]	19
<i>Obr. 2.1</i> Diagram chromatičnosti CIE 1931 [16]	21
<i>Obr. 2.2</i> Diagram chromatičnosti CIE 1960 [18]	22
<i>Obr. 2.3</i> Grafické znázornění principu Robertsonovy metody [20]	24
<i>Obr. 2.4</i> Grafické znázornění principu trojúhelníkové metody [17]	25
<i>Obr. 2.5</i> Parabolická metoda [17]	26
<i>Obr. 3.1</i> Analyzátor barev Konica Minolta CA-310 [24]	28
<i>Obr. 3.2</i> Kolorimetr Konica Minolta CR-400 [25]	29
<i>Obr. 3.3</i> Spektrometr Konica Minolta CS-1000A [29]	30
<i>Obr. 3.4</i> Jasová kamera TechnoTeam LMK 6 color [33]	31
<i>Obr. 3.5</i> Křivky svítivosti v jedné z polorovin C- γ [34]	32
<i>Obr. 3.6</i> Goniofotometr TechnoTeam RiGO801-L [36]	32
<i>Obr. 4.1</i> Konstrukce halogenidové výbojky [40]	34
<i>Obr. 4.2</i> Spektrální průběhy vybraných halogenidových výbojek [41-44]	36
<i>Obr. 4.3</i> Konstrukce VT sodíkové výbojky [45]	38
<i>Obr. 4.4</i> Spektrum VT sodíkové výbojky [47]	40
<i>Obr. 4.5</i> Pouliční LED svítidlo [48]	41
<i>Obr. 4.6</i> Spektrální průběhy LED retrofitů [54-57]	43
<i>Obr. 4.7</i> Spektrální složení LED PC Amber [65]	44
<i>Obr. 4.8</i> Spektrální složení LED NB Amber [66]	44
<i>Obr. 5.1</i> Konstrukce svítidla Tungstram SLBt	46
<i>Obr. 5.2</i> Uspořádání světelných diod ve svítidle	47
<i>Obr. 5.3</i> Uzavřené svítidlo	47
<i>Obr. 6.1</i> Otevřené svítidlo s vloženým ovladačem	49
<i>Obr. 6.2</i> Řídicí aplikace na dotykovém tabletu	49
<i>Obr. 6.3</i> Měřicí pracoviště – přímý pohled	50
<i>Obr. 6.4</i> Měřicí pracoviště – pohled z boku	50
<i>Obr. 6.5</i> Měření LED PC Amber 1 800 K	50
<i>Obr. 6.6</i> Měření LED neutrální bílá 4 000 K	50

<i>Obr. 6.7 Spektrální průběh samostatně svítících LED PC Amber</i>	52
<i>Obr. 6.8 Spektrální průběh míšeného světla z LED PC Amber a neutrálně bílých LED</i>	52
<i>Obr. 6.9 Spektrální průběh samostatně svítících neutrálně bílých LED</i>	53
<i>Obr. 6.10 Uchycení svítidla v kulovém integrátoru</i>	53
<i>Obr. 6.11 Sestava měření v kulovém integrátoru</i>	53
<i>Obr. 6.12 Simulace měření křivek svítivosti</i>	55
<i>Obr. 6.13 Svítidlo upnuté na goniofotometru</i>	55
<i>Obr. 6.14 Křivky svítivosti LED Tungsram SLBt v polárních souřadnicích</i>	56
<i>Obr. 6.15 Křivky svítivosti LED Tungsram SLBt v 3D prostoru</i>	57
<i>Obr. 6.16 Křivky svítivosti Tungsram SLBt udané výrobcem [71]</i>	57
<i>Obr. 6.17 Křivky náhradní teploty chromatičnosti pro režim $T_{cp} = 4\ 000\ K$</i>	58
<i>Obr. 6.18 Simulace měření jasu 1</i>	59
<i>Obr. 6.19 Simulace měření jasu 2</i>	59
<i>Obr. 6.20 Jasový snímek</i>	60
<i>Obr. 6.21 HDR snímek</i>	60
<i>Obr. 6.22 Trend vypočtené náhradní teploty chromatičnosti v závislosti na nastavení úhlu γ</i>	62
<i>Obr. 6.23 Měření povrchu pod svítidlem 1</i>	65
<i>Obr. 6.24 Měření povrchu pod svítidlem 2</i>	65
<i>Obr. 6.25 Pozice disků při měření</i>	66
<i>Obr. 6.26 Rozmístění disků při venkovním měření</i>	71
<i>Obr. 6.27 Pozice jasového analyzátoru</i>	71
<i>Obr. 6.28 Pozice měřených disků</i>	72
<i>Obr. 6.29 Změna náhradní teploty chromatičnosti na jednom z měřených disků</i>	72
<i>Obr. 6.30 Spektrální odraznost povrchu měřených disků</i>	74
<i>Obr. 6.31 Oblast určení náhradní teploty chromatičnosti na asfaltovém povrchu</i>	75
<i>Obr. 6.32 Průběhy spektrální odraznosti různých vzorků asfaltových povrchů [72]</i>	76
<i>Obr. 6.33 Geometrie při venkovním měření</i>	78
<i>Obr. 6.34 Měřicí přístroje</i>	78
<i>Obr. 6.35 Náčrt simulace vlivu parazitního světla</i>	80
<i>Obr. 6.36 Upravené křivky svítivosti svítidla s VT sodíkovou výbojkou [73]</i>	81
<i>Obr. 6.37 Upravené křivky svítivosti svítidla Tungsram SLBt</i>	81

Seznam tabulek

<i>Tab. 1.1 Příkony světelných zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [1-3]</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 1.2 Světelné toky zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [2, 5-8].....</i>	<i>14</i>
<i>Tab. 1.3 Měrné výkony zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13]</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 1.4 Indexy podání barev světelných zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13].....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 1.5 Náhradní teplota chromatičnosti sv. zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 1.6 Střední doba života světelných zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [3, 10-13]</i>	<i>18</i>
<i>Tab. 2.1 Parametry izoterm v diagramu chromatičnosti CIE 1960 [19].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2.2 Tabelované a vypočtené hodnoty pro trojúhelníkovou metodu [17]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 3.1 Rozšířené nejistoty měření vybraných spektrometrů [31].....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 3.2 Typy goniofotometru RiGO801 [37].....</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 4.1 Parametry halogenidových výbojek [3-4, 10].....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 4.2 Parametry VT sodíkových výbojek [3-4, 10].....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 4.3 Parametry LED běžně používaných ve veřejném osvětlení [11-13, 61, 68]</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5.1 Parametry světelných diod svítidla Tungsram SLBt [70]</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6.1 Náhradní teplota chromatičnosti svítidla pro různá procentní nastavení světelného toku</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6.2 Světelně-technické parametry svítidla Tungsram SLBt.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6.3 Srovnání vybraných teoretických a naměřených parametrů svítidla Tungsram SLBt.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 6.4 Záznam z hodnot měření křivek svítivosti pro $T_{cp} = 1\ 800\ K$.....</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 6.5 Nastavení parametrů fotoaparátu pro různé snímky</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6.6 Srovnání hodnot náhradních teplot chromatičnosti měřících přístrojů v rovině C0-C180</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 6.7 Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti určeny jasovým analyzátozem při $\gamma = 0$.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6.8 Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti vypočtené pomocí maskování v rovině C0-180 a $\gamma = 0$.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 6.9 Odchyšky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 6.10 Průměrné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti na povrchu disků.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 6.11 Změřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti spektrometrem JETI na jednotlivých discích.....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 6.12 Relativní odchyšky hodnot náhradní teploty chromatičnosti spektrometru JETI od reference.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 6.13 Vypočtené hodnoty T_{cp} na jednotlivých discích na základě měření jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP</i>	<i>69</i>

<i>Tab. 6.14 Relativní odchylky hodnot náhradní teploty chromatičnosti analyzátoru LDA-LumiDISP od reference.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 6.15 Měření spektrometrem Uprtek.....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 6.16 Rozložení náhradní teploty chromatičnosti na discích pod svítidlem.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 6.17 Relativní odchylky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty.....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 6.18 Simulace měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu disků.....</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 6.19 Vypočtená náhradní teplota chromatičnosti na vybraných druzích povrchu.....</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 6.20 Relativní odchylky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty na povrchu disku.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 6.21 Průměrná relativní odchylka δ_A a koeficient k_A pro vybrané světelné zdroje/svítidla...77</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 6.22 Výsledné T_{cp} v bodě 1 naměřené jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP a spektrometrem Uprtek.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 6.23 T_{cp} svítidel určená ze snímků jasového analyzátoru LDA-LumiDISP v různých bodech měřeného prostoru.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 6.24 T_{cp} svítidel naměřená spektrometrem Uprtek v různých bodech měřeného prostoru.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 6.25 Výběr a nastavení režimů použitých svítidel.....</i>	<i>82</i>
<i>Tab. 6.26 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 4 000 K....</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 6.27 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 4 000 K..</i>	<i>83</i>
<i>Tab. 6.28 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 3 400 K....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 6.29 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 3 400 K..</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 6.30 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 2 800 K....</i>	<i>84</i>
<i>Tab. 6.31 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 2 800 K..</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 6.32 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 2 200 K....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 6.33 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 2 200 K..</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 6.34 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 1 800 K....</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 6.35 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 1 800 K..</i>	<i>86</i>

Úvod

Oblast veřejného osvětlení prochází v současnosti důležitými změnami. Dochází k výměně starších typů světelných zdrojů, jako jsou nízkotlaké a vysokotlaké rtuťové výbojky, halogenidové výbojky a vysokotlaké sodíkové výbojky za technologicky vyspělejší LED svítidla. K obdržení dotací na nově instalovaná LED svítidla musí ovšem dojít dle nařízení ministerstva obchodu a průmyslu ke splnění podmínky velikosti náhradní teploty chromatičnosti menší nebo rovné 2 700 K. Důsledkem je zvýšená poptávka po přesném měření náhradní teploty chromatičnosti v prostoru pod svítidlem.

Hlavním cílem této práce je porovnat různé metody měření a určování náhradní teploty chromatičnosti mezi sebou a vypracovat doporučení, jakým způsobem a pomocí kterých přístrojů lze náhradní teplotu chromatičnosti nejpřesněji a nejpraktičtěji měřit. Zároveň by práce měla odhalit nedostatky a chyby spojené s určováním náhradní teploty chromatičnosti napříč dostupnými metodami a navrhnout podněty a zlepšení pro budoucí výzkum.

Teoretická část práce se zabývá popisem základních světelně-technických veličin, dále rešerší přístrojů pro měření náhradní teploty chromatičnosti a jejich nejistot, nejčastějšími metodami výpočtu náhradní teploty chromatičnosti, světelnými zdroji a svítidly využívanými ve veřejném osvětlení a podrobněji je zde probráno konkrétní biodynamické LED svítidlo Tungsram SLBt.

Praktická část sestává z pěti laboratorních a dvou venkovních měření. Primárním subjektem měření je svítidlo LED Tungsram SLBt, ale i další svítidla – s vysokotlakou sodíkovou výbojkou, halogenidovou výbojkou či neutrálně bílými LED. K měření se využívá přístrojů a pomůcek z laboratoře světelné techniky FEKT VUT – spektrometrů JETI a Uprtek, goniofotometru, jasového analyzátoru LDA-LumiDISP a kulového integrátoru. Postupně se zjišťuje náhradní teplota chromatičnosti měřená na aktivní ploše svítidla, na povrchu pod svítidlem a v prostoru pod svítidlem. Závěrečná kapitola zkoumá vliv parazitního světla na naměřenou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti při využití simulačního algoritmu vytvořeného v softwaru Matlab.

1 Světelně-technické veličiny

Pro popis světelných zdrojů, svítidel a měřicích přístrojů je nutné objasnit základní veličiny související s jejich provozem, funkcí a vlastnostmi. Světelné veličiny probírané v této práci se označují jako fotometrické – oproti veličinám radiometrických jsou přizpůsobeny subjektivnímu vnímání lidského zraku.

1.1 Parametry světelných zdrojů

1.1.1 Elektrický příkon

Elektrický příkon informuje o spotřebě elektrické energie za určitou časovou jednotku. Při popisu světelných zdrojů (případně svítidel) udává nejen výkon samotného zdroje, ale i ztráty např. v předřadných obvodech.

Značení: P

Jednotka: (W) – watt

Tab. 1.1 Příkony světelných zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [1-3]

Světelný zdroj	P (W)
Halogenidové výbojky	15 – 5 000
VT sodíkové výbojky	35 – 1 000
LED svítidla	10 – 1 000

1.1.2 Světelný tok

Světelný tok (jiným názvem „světelný výkon“) představuje množství světelné energie vygenerované světelným zdroje za jednotku času s respektováním citlivosti průměrného lidského oka k různým vlnovým délkám světla [4]. Jiná odborná literatura jej definuje jako schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek [3].

Značení: Φ

Jednotka: (lm) – lumen

Tab. 1.2 Světelné toky zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [2, 5-8]

Světelný zdroj	Φ (lm)
Halogenidové výbojky	1 200 – 525 000
VT sodíkové výbojky	2 200 – 130 000
LED svítidla	1 300 – 140 000

1.1.3 Měrný výkon

Měrný výkon určuje vazbu mezi elektrickým příkonem a světelným tokem. Udává hodnotu světelného toku, jež lze získat z jednoho wattu. Vypovídá tak o míře účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou [9].

Značení: M_z

Jednotka: $(\text{lm}\cdot\text{W}^{-1})$ – lumen na watt

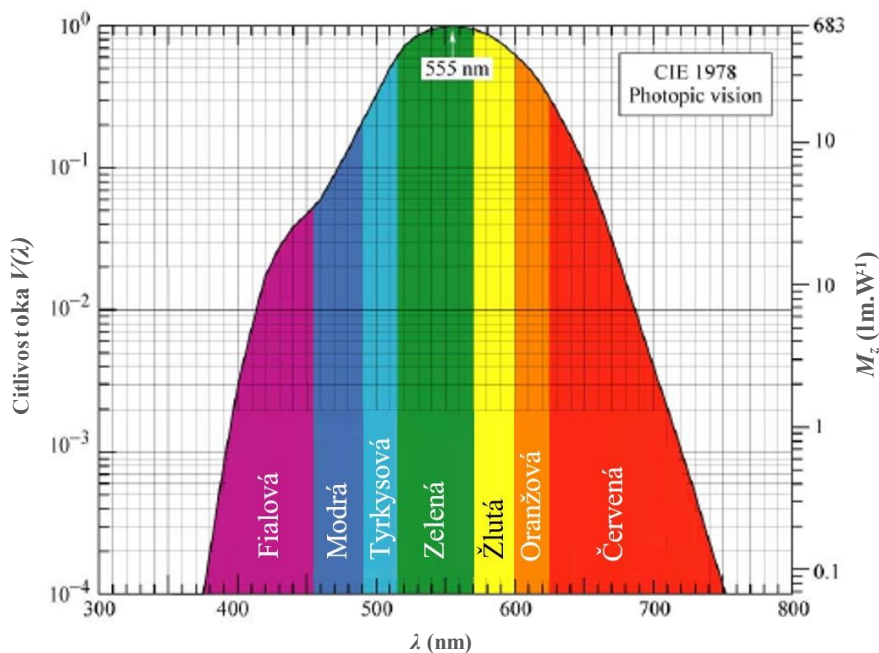
$$M_z = \frac{\Phi}{P} \quad (\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}) \quad (1.1)$$

Vyšší měrný výkon znamená ekologicky i ekonomicky úspornější světelný zdroj. Provozní náklady se snižují a efektivita využití elektrické energie se zvyšuje. U světelných zdrojů stejného typu (např. VT sodíkových výbojek) s vyšším elektrickým příkonem obvykle roste i jejich měrný výkon.

Tab. 1.3 Měrné výkony zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13]

Světelný zdroj	M_z ($\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$)
Halogenidové výbojky	50 – 130
VT sodíkové výbojky	63 – 150
LED svítidla	69 – 170

Lidský zrak různě intenzivně vnímá jednotlivé vlnové délky vyzářeného světla, což ve výsledku ovlivňuje měrný výkon světelného zdroje. Experimentálně zjištěnou citlivost zraku průměrného pozorovatele ukazuje obr. 1.1. Při svícení monochromatickým světlem žlutozelené barvy ($\lambda = 555 \text{ nm}$) lze dosáhnout u světelného zdroje teoreticky maximálního měrného výkonu až $683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$. Barevné parametry daného zdroje by ovšem byly zcela nedostatečné – nepřijatelná barva světla (teplota chromatičnosti) a nemožnost určení jednotlivých barev osvětlovaných předmětů (index podání barev) [9].



Obr. 1.1 Spektrální citlivost lidského oka – křivka $V(\lambda)$ [9]

1.1.4 Index podání barev

Barvy osvětlovaných předmětů se pozorovateli jeví odlišně v závislosti na použitém světle. Parametrem vyjadřujícím schopnost věrně zobrazit barvy osvětleného objektu je tzv. index podání barev. Je bezrozměrnou veličinou nabývající hodnot 0 – 100, kde hodnoty blízké nule značí nedostatečné podání barev, hodnoty blízké se stovce vypovídají naopak o velmi kvalitním podání barev.

Značení: R_a (anglicky *CRI*)

Jednotka: (-)

Největší vliv na velikost R_a má spektrální složení světelného zdroje. Čím více vlnových délek je ve spektru zastoupeno, tím vyšší index podání barev zdroj má. Metodika měření indexu podání barev vybraného světelného zdroje zahrnuje osvětlování specifických barevných vzorků a následné porovnání naměřených hodnot s referenčním zdrojem světla – teplotním zářičem (u zdrojů s $T_{cp} < 5000$ K) nebo denním světlem Slunce (u zdrojů s $T_{cp} \geq 5000$ K) [3].



Obr. 1.2 Porovnání odlišných indexů podání barev [9]

Obr. 1.2 ukazuje rozdíly v barevném podání při použití různých světelných zdrojů s konstantním světelným tokem a tab. 1.4 informuje o hodnotách R_a pro světelné zdroje VO.

Tab. 1.4 Indexy podání barev světelných zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13]

Světelný zdroj	R_a (-)
Halogenidové výbojky	65 – 100
VT sodíkové výbojky	20 – 25
LED svítidla	60 – 98

Přestože index podání barev poskytuje možnost rychlého porovnání světelných zdrojů mezi sebou, jeho nevýhoda spočívá v tom, že komplexní vlastnosti barevného spektra shrnuje jedním číslem – významná část informací tak zůstává neobjasněna a skryta [14].

V návaznosti na danou problematiku byl v roce 2017 vytvořen nový systém IES TM-30-15, který měří a popisuje barevné vlastnosti světelných zdrojů pomocí podstatně více proměnných. Jednou z nich je R_f (Color Fidelity Index), jenž je vylepšeným ekvivalentem k R_a , jelikož odlišnosti od referenčního světelného zdroje se zde vyhodnocují na vzorku 99 barev namísto klasických 14 barev u R_a [3, 14].

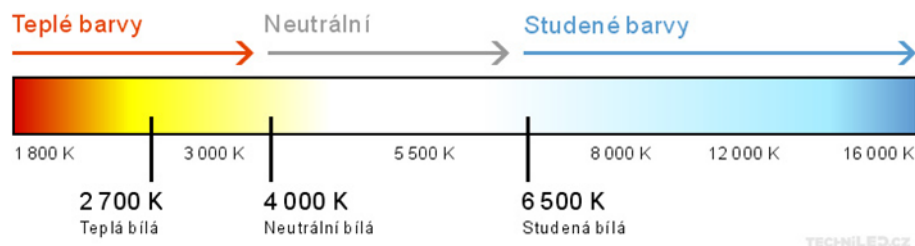
1.1.5 Teplota chromatičnosti

Míšením různých barev ve spektru světelného zdroje vzniká výsledný barevný vjem, který popisuje teplota chromatičnosti. Charakterizuje barvu světla jako ekvivalent k barvě absolutně černého tělesa zahřátého na určitou teplotu [9].

Značení: T_c , T_{cp} (anglicky CCT)

Jednotka: (K) – kelvin

Termín „náhradní teplota chromatičnosti“ označuje parametr takových světelných zdrojů, které vytváří světlo jiným způsobem než za pomoci tepelného žhavení [9]. Obr. 1.3 ukazuje, jaká barva přísluší jednotlivým hodnotám náhradní teploty chromatičnosti. Tab. 1.5 dále informuje o náhradních teplotách chromatičnosti světelných zdrojů ve VO.



Obr. 1.3 Ukázka rozpětí náhradní teploty chromatičnosti [15]

Tab. 1.5 Náhradní teplota chromatičnosti sv. zdrojů běžně používaných ve VO [3-4, 10-13]

Světelný zdroj	T_{cp} (K)
Halogenidové výbojky	3 000 – 20 000
VT sodíkové výbojky	2 000 – 2 500
LED svítidla	1 700 – 7 000

1.1.6 Střední doba života

Střední doba života vyjadřuje časový interval, po jehož překročení je 50 % všech použitých světelných zdrojů daného typu stále schopných provozu při zachování kritérií stanovených normami – úbytku světelného toku od počáteční hodnoty, změn spektrálních vlastností atd.

Značení: t_z

Jednotka: (h) – hodina

Tab. 1.6 Střední doba života světelných zdrojů běžně používaných ve veřejném osvětlení [3, 10-13]

Světelný zdroj	t_z (h)
Halogenidové výbojky	6 000 – 15 000
VT sodíkové výbojky	16 000 – 30 000
LED svítidla	25 000 – 132 000

1.2 Veličiny zahrnující geometrii vyzařovaného světla

1.2.1 Svítivost

Svítivost vyjadřuje prostorovou hustotu světelného toku v daném směru. Její výpočet se odvíjí od velikosti světelného toku zdroje a prostorového úhlu (vyjádřeného ve steradiánech), kterým generované světlo prochází [3].

Značení: I

Jednotka: (cd) – kandela

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{cd}) \quad (1.2)$$

Výpočet svítivosti má smysl tehdy, jedná-li se o bodový světelný zdroj (případně svítidlo). Rozměry vyzařovací plochy takového zdroje jsou zanedbatelné vzhledem ke vzdálenosti od kontrolního měřeného bodu [4].

1.2.2 Osvětlenost

Osvětlenost (jinak označovaná jako intenzita osvětlení) udává množství světelného toku dopadajícího na plochu jednotkové velikosti – reprezentuje tak plošnou hustotu světelného toku. Pomocí hodnot osvětlenosti se v praxi pro každý interiérový či exteriérový prostor definují požadavky na optimální zrakové vnímání a výkon [4].

Značení: E

Jednotka: (lx) – lux

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (\text{lx}) \quad (1.3)$$

U bodových zdrojů lze intenzitu osvětlení elementu plochy vyjádřit i za pomoci svítivosti dle vztahu (1.4) [4].

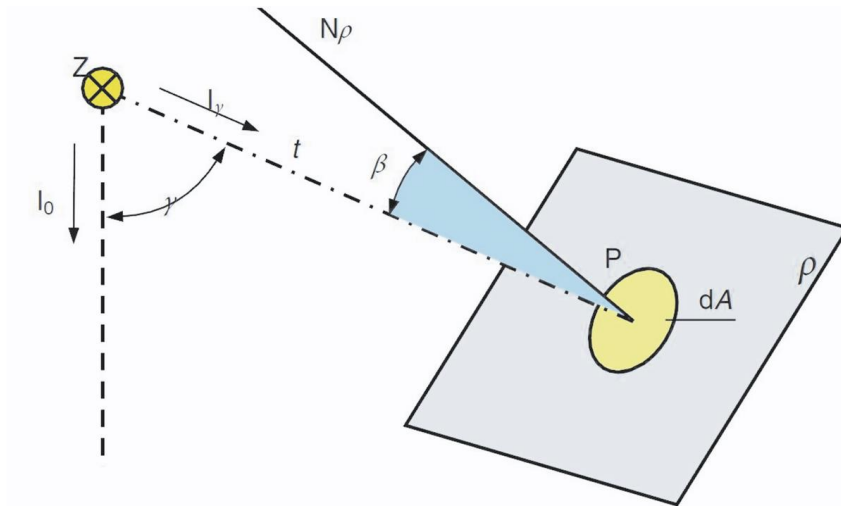
$$E = \frac{I_\gamma \cdot \cos \beta}{l^2} \quad (\text{lx}) \quad (1.4)$$

Význam jednotlivých veličin názorně ukazuje obr. 1.4, kde:

I_γ Svítivost bodového zdroje ve směru osvětlované plochy (cd)

β Úhel, který svírá paprsek dopadajícího světla s normálou osvětlované roviny (°)

l Vzdálenost bodového zdroje od osvětlované plochy (m)



Obr. 1.4 Grafické znázornění veličin potřebných pro výpočet svítivosti [4]

1.2.3 Jas

Kombinací plošné a prostorové hustoty světelného toku lze získat jas, který představuje klíčovou veličinu při posuzování reakce lidského oka na dopadající záření. Při nevhodně navrženém osvětlení dochází vlivem vysokého jasu k oslnění [10].

Značení: L

Jednotka: $(\text{cd}\cdot\text{m}^{-2})$ – kandela na metr čtvereční

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \beta} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1.5)$$

$$L = \frac{dI_\gamma}{dS \cdot \cos \beta} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1.6)$$

Veličina S (m^2) zde reprezentuje velikost zářivé plochy světelného zdroje.

1.2.4 Světlení

Ekvivalentní veličinou k osvětlenosti je tzv. světlení, které informuje o plošné hustotě vyzařování světelného zdroje. Jinými slovy udává množství světelného toku vycházející z jednotkové plochy [3].

Značení: M

Jednotka: $(\text{lm}\cdot\text{m}^{-2})$ – lumen na metr čtvereční

$$M = \frac{d\Phi_v}{dS} \quad (\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1.7)$$

2 Metody výpočtu náhradní teploty chromatičnosti

Subjektem této práce je především metodika měření a zpracování dat za účelem určení náhradní teploty chromatičnosti, proto je metodám jejího výpočtu věnována celá kapitola.

Samotný výpočet vychází nejprve ze specifikace měřeného světla pomocí trichromatických složek. Nejčastěji se používá trichromatická soustava XYZ. Jednotlivé složky X, Y, Z se převedou na trichromatické souřadnice x, y, z podle vztahů (2.1), (2.2) a (2.3) [16].

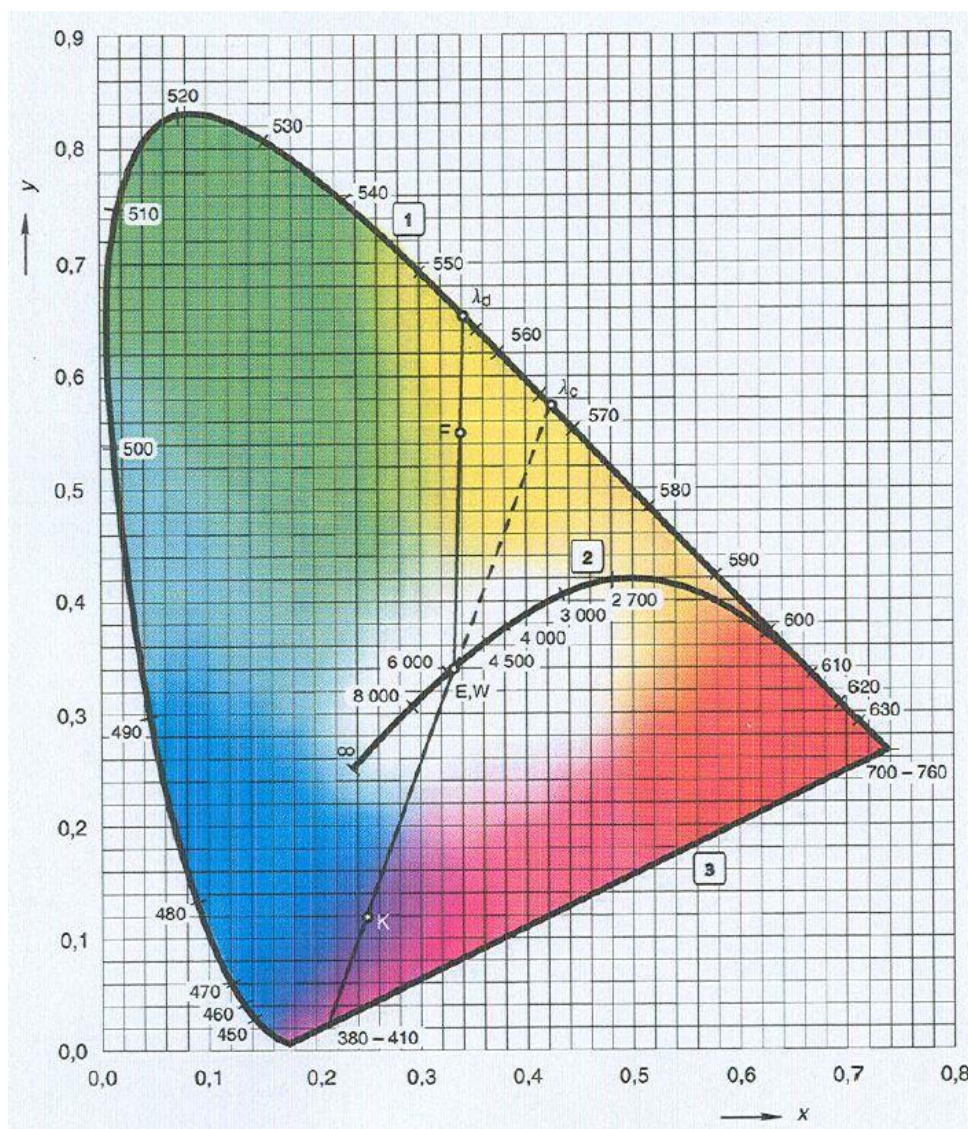
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (-) \quad (2.1)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (-) \quad (2.2)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (-) \quad (2.3)$$

Souřadnici z není při výpočtu nutno uvažovat, jelikož informaci o její hodnotě nesou složky x a y, což vychází ze vztahu (2.4). Rozložení barev pomocí souřadnic x, y ukazuje diagram chromatičnosti znázorněný na obr. 2.1.

$$x + y + z = 1 \quad (2.4)$$



Obr. 2.1 Diagram chromatičnosti CIE 1931 [16]

Vysvětlivky k obr. 2.1:

- 1 – křivka spektrálních světél s vyznačenými vlnovými délkami v nm
- 2 – čára teplotních zářičů s vyznačenou náhradní teplotou chromatičnosti v K
- 3 – přímka purpurů (spojnice koncových bodů křivky spektrálních světél)

W – bod představující chromatičnost smluvního bílého světla

F – bod chromatičnosti světla, které vzniklo smíšením spektrálního světla s určenou vlnovou délkou λ_d a smluvního bílého světla **W**

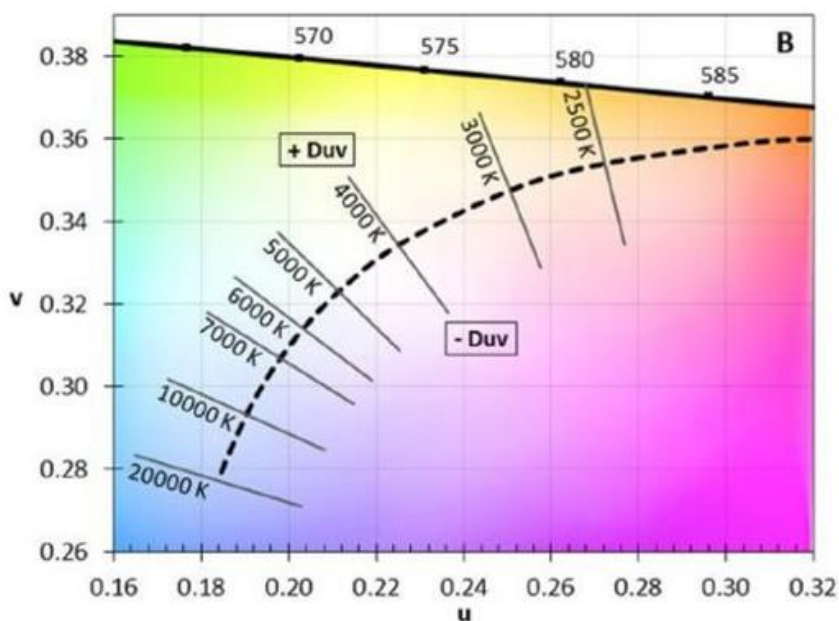
K – bod chromatičnosti purpurového podnětu, jehož smícháním se spektrálním světlem vlnové délky λ_c vznikne světlo **W**

Pro určení náhradní teploty chromatičnosti je dále nutné převést souřadnice x, y do soustavy UVW podle vztahů (2.5) (2.6) [17].

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3} \quad (-) \quad (2.5)$$

$$v = \frac{6y}{-2x+12y+3} \quad (-) \quad (2.6)$$

Výhoda soustavy UVW spočívá v tom, že přímky kolmé na čáru teplotních zářičů (izotermy) přímo určují konkrétní hodnoty náhradní teploty chromatičnosti daného světla, viz obr. 2.2. Určení T_{cp} lze tak realizovat buď graficky, nebo výpočtem [17].



Obr. 2.2 Diagram chromatičnosti CIE 1960 [18]

Důležitým parametrem soustavy UVW je D_{uv} , který určuje vzdálenost bodu v diagramu chromatičnosti od čáry teplotních zářičů. Nabývá kladných hodnot nad čárou teplotních zářičů a záporných hodnot pod ní (viz obr. 2.2). D_{uv} společně s náhradní teplotou chromatičnosti udávají polohu bodu v diagramu chromatičnosti stejně jako souřadnice u, v [10].

Při známých hodnotách u, v lze k výpočtu náhradní teploty chromatičnosti použít vícero metod, nicméně tato práce se věnuje pouze několika z nich: Robertsonové metodě, trojúhelníkové, parabolické a kombinované metodě.

2.1 Robertsonova metoda

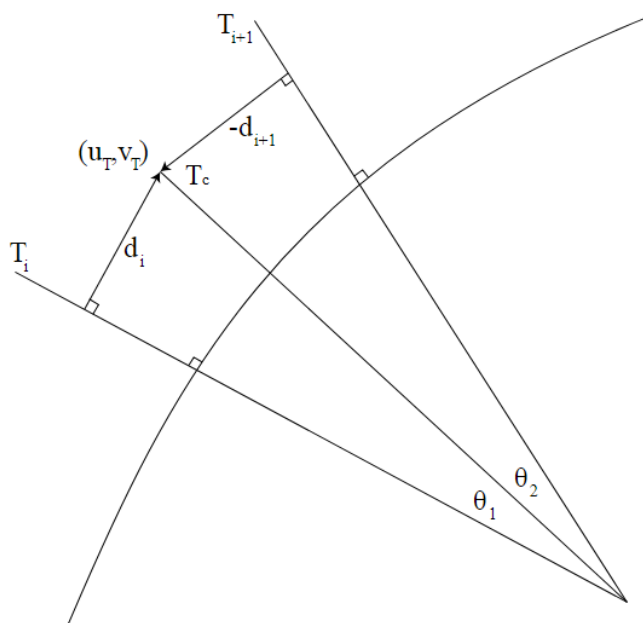
Určení náhradní teploty chromatičnosti u Robertsonovy metody spočívá v nalezení izotermy, na které definovaný bod v diagramu leží, pomocí interpolace vzdálenosti mezi dvěma sousedními izotermami, jejichž parametry jsou známy z tabulek (viz tab. 2.1). Graficky tento princip vyjadřuje obr. 2.3.

Tab. 2.1 Parametry izoterm v diagramu chromatičnosti CIE 1960 [19]

T_{cpT} (K)	u_t (-)	v_t (-)	$t_T(u_t, v_t)$ (-)
∞	0,18006	0,26352	-0,24341
100 000,00	0,18066	0,26589	-0,25479
50 000,00	0,18133	0,26846	-0,26876
33 333,33	0,18208	0,27119	-0,28539
25 000,00	0,18293	0,27407	-0,30470
20 000,00	0,18388	0,27709	-0,32675
16 666,67	0,18494	0,28021	-0,35156
14 285,71	0,18611	0,28342	-0,37915
12 500,00	0,18740	0,28668	-0,40955
11 111,11	0,18880	0,28997	-0,44278
10 000,00	0,19032	0,29326	-0,47888
8 000,00	0,19462	0,30141	-0,58204
6 666,67	0,19962	0,30921	-0,70471
5 714,29	0,20525	0,31647	-0,84901
5 000,00	0,21142	0,32312	-1,01820
4 444,44	0,21807	0,32909	-1,21680
4 000,00	0,22511	0,33439	-1,45120
3 636,36	0,23247	0,33904	-1,72980
3 333,33	0,24010	0,34308	-2,06370
3 076,92	0,24792	0,34655	-2,46810
2 857,14	0,25591	0,34951	-2,96410
2 666,67	0,26400	0,35200	-3,58140
2 500,00	0,27218	0,35407	-4,36330
2 352,94	0,28039	0,35577	-5,37620
2 222,22	0,28863	0,35714	-6,72620
2 105,26	0,29685	0,35823	-8,59550
2 000,00	0,30505	0,35907	-11,32400
1 904,76	0,31320	0,35968	-15,62800
1 818,18	0,32129	0,36011	-23,32500
1 739,13	0,32931	0,36038	-40,77000
1 666,67	0,33724	0,36051	-116,45000

Význam jednotlivých sloupců tab. 2.1 určují následující veličiny:

T_{cpT}	Náhradní teplota chromatičnosti dané izotermly	(K)
u_t, v_t	Chromatické souřadnice izotermly v diagramu chromatičnosti CIE 1960	(-)
$t_T(u_t, v_t)$	Směrnice izotermly	(-)



Obr. 2.3 Grafické znázornění principu Robertsonovy metody [20]

Z tabelovaných hodnot se určí vzdálenost zkoumaného bodu od i -té izotermy:

$$d_i = \frac{(v_T - v_{ii}) - t_{Ti} \cdot (u_T - u_{ii})}{\sqrt{1 + t_{Ti}^2}} \quad (-) \quad (2.7)$$

Sousední izotermy od zkoumaného bodu mají nejmenší vzdálenost d_i . Náhradní teplotu chromatičnosti lze dále vypočítat ze vztahu:

$$T_{cp} = \left[\frac{1}{T_i} + \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \cdot \left(\frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1} \quad (K) \quad (2.8)$$

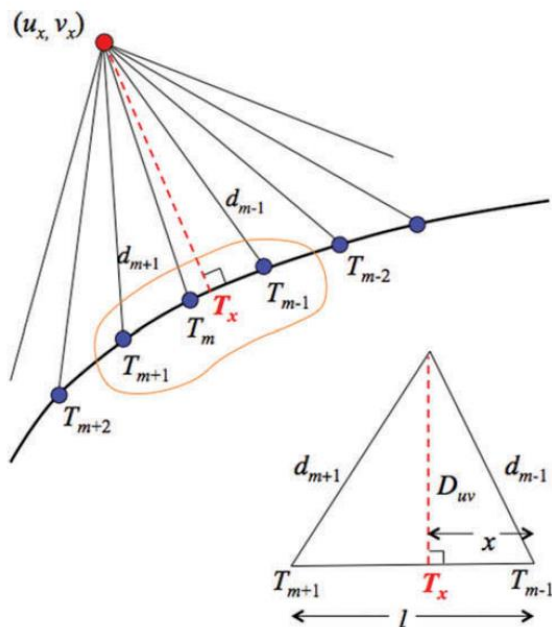
V případě, že jsou izotermy dostatečně blízko sebe, lze vztah (2.8) upravit následovně:

$$T_{cp} = \left[\frac{1}{T_i} + \frac{d_i}{d_i - d_{i+1}} \cdot \left(\frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1} \quad (K) \quad (2.9)$$

Určování náhradní teploty chromatičnosti interpolací patří ke starším metodám, jež se využívaly zejména před vznikem výpočetní techniky [20].

2.2 Trojúhelníková metoda

Pro výpočet náhradní teploty chromatičnosti u trojúhelníkové metody se využívá znalosti tabelovaných hodnot u , v souřadnic bodů na křivce teplotních zářičů (označení T_{m+2} , T_{m+1} , T_m , T_{m-1} a T_{m-2} na obr. 2.4). Dále se určí vzdálenost d_i mezi zkoumaným bodem (u_x, v_x) a každým z bodů T_i .



Obr. 2.4 Grafické znázornění principu trojúhelníkové metody [17]

Příklad výsledných hodnot ukazuje tab. 2.2. Parametr d_i se bude měnit pro různé měřené body, ostatní (tabelované) veličiny zůstávají vždy stejné [17].

Tab. 2.2 Tabelované a vypočtené hodnoty pro trojúhelníkovou metodu [17]

i (-)	T_{cp} (K)	u_i (-)	v_i (-)	d_i (-)
1	1 000,00	0,448011	0,354625	0,230361
2	1 010,00	0,445681	0,354826	0,228073
:	:	:	:	:
$m-1$	4 404,38	0,218633	0,329547	0,002536
m	4 448,42	0,218016	0,329042	0,002328
$m+1$	4 492,91	0,217407	0,328537	0,002377
:	:	:	:	:
302	19 986,35	0,183888	0,277100	0,061270
303	20 186,21	0,183838	0,276948	0,061423

Na základě údajů z tab. 2.2 lze pak určit náhradní teplotu chromatičnosti T_x a parametr D_{uv} měřeného bodu pomocí vztahů (2.11) – (2.13).

$$l = \sqrt{(u_{m+1} - u_{m-1})^2 + (v_{m+1} - v_{m-1})^2} \quad (-) \quad (2.10)$$

$$x = \frac{d_{m-1}^2 - d_{m+1}^2 + l^2}{2 \cdot l} \quad (-) \quad (2.11)$$

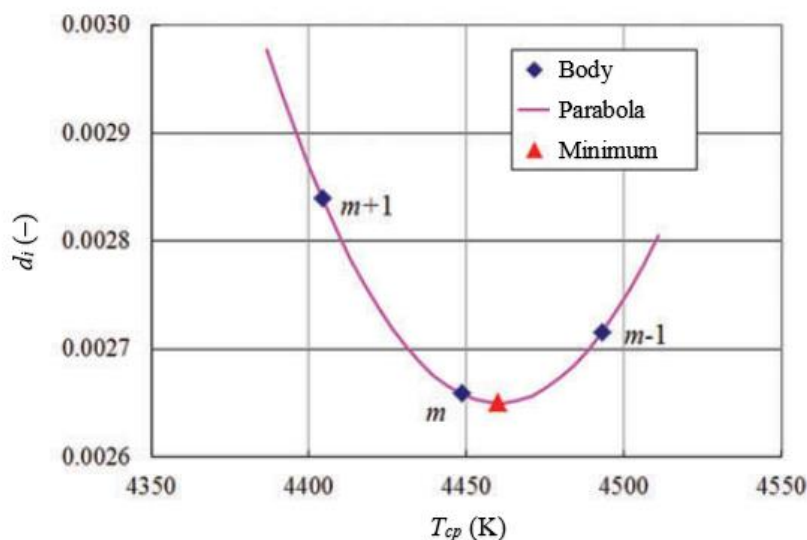
$$T_x = T_{m-1} + (T_{m+1} - T_{m-1}) \cdot \frac{x}{l} \quad (\text{K}) \quad (2.12)$$

$$D_{uv} = \pm \sqrt{d_{m-1}^2 - x^2} \quad (-) \quad (2.13)$$

Trojúhelníková metoda vykazuje vysokou přesnost na křivce teplotních zářičů a v jejím okolí. Se zvyšující se vzdáleností od křivky (rostoucím parametrem D_{uv}) roste i chyba metody, a to až k hodnotě $\Delta T_x = 10 \text{ K}$ [22].

2.3 Parabolická metoda

Postup parabolické metody vychází opět z obr. 2.4 a tab. 2.2 předchozí kapitoly, kde se tři nejbližší body (T_{m+1} , T_m a T_{m-1}) proloží křivkou paraboly. Pomocí derivace rovnice paraboly lze najít minimum, ve kterém se hledaná náhradní teplota chromatičnosti nachází (viz obr. 2.5). Výpočet probíhá dle vzorců (2.14) – (2.17), kde a , b , C jsou koeficienty rovnice paraboly [20].



Obr. 2.5 Parabolická metoda [17]

$$d(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + C \quad (-) \quad (2.14)$$

$$d(T)' = 2 \cdot a \cdot T + b = 0 \quad (-) \quad (2.15)$$

$$T_x = -\frac{b}{2 \cdot a} \quad (-) \quad (2.16)$$

$$D_{uv} = \pm (a \cdot T_x^2 + b \cdot T_x + C) \quad (-) \quad (2.17)$$

Parabolická metoda se chová opačně než trojúhelníková – má malou přesnost na křivce teplotních zářičů (až $\Delta T_x = 6$ K) a se zvyšující se vzdáleností od křivky její přesnost roste [22].

2.4 Kombinovaná metoda

Kombinovaná metoda využívá výhod obou předchozích metod:

- Pro $D_{uv} < 0,002$ Výpočet probíhá trojúhelníkovou metodou
- Pro $D_{uv} > 0,002$ Výpočet probíhá parabolickou metodou

Maximální chybu metody lze tímto způsobem redukovat až na $\Delta T_x = 1,5$ K [22].

3 Měřicí přístroje

V této kapitole jsou rozebrány dostupné přístroje pro měření náhradní teploty chromatičnosti a jejich nejistoty měření. Vyjma náhradní teploty chromatičnosti přístroje obvykle měří celou řadu dalších fotometrických a radiometrických veličin, jako jsou např. jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice, index podání barev a další.

3.1 Analyzátor barev

Analyzátor barev je měřicí přístroj určující barevné vlastnosti zejména zobrazovacích zařízení (monitorů, obrazovek atd.). Jeden z dostupných analyzátorů od japonské společnosti Konica Minolta je vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1 Analyzátor barev Konica Minolta CA-310 [24]

Pomocí analyzátoru barev lze měřit jas, trichromatické barevné souřadnice (XYZ, $L^*u^*v^*$, RGB,...) a náhradní teplotu chromatičnosti.

Měření barevných souřadnic probíhá v rozmezí jasů $0,05 - 1000 \text{ cd.m}^{-2}$ a v závislosti na velikosti jasů má přístroj několik stupňů přesnosti pro měření barevného spektra:

- | | | |
|--|---|-------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> • $\pm 0,005$ pro $L = 0,05 - 5 \text{ cd.m}^{-2}$ • $\pm 0,004$ pro $L = 5 - 20 \text{ cd.m}^{-2}$ • $\pm 0,003$ pro $L = 20 - 1000 \text{ cd.m}^{-2}$ • $\pm 0,002$ pro $L = 120 \text{ cd.m}^{-2}$ | } | při měření bílého světla |
| <ul style="list-style-type: none"> • $\pm 0,004$ pro $L = 0,05 - 1000 \text{ cd.m}^{-2}$ | | při měření monochromatického světla |

3.2 Kolorimetr

Funkcí kolorimetru je analýza barevných vlastností světla. Dopadající záření snímají fotočlánky vybavené filtry, které dokážou rozlišit jednotlivé vlnové délky světla. Kolorimetry nemají vlastní zdroj světla => jsou pasivní [20].

Využívají se pro měření spektra externích zdrojů, na analýzu barevných vlastností designových prvků, potravin atd. [25] Cena kolorimetrů se pohybuje v řádech desítek tisíc Kč za kus [26].



Obr. 3.2 Kolorimetr Konica Minolta CR-400 [25]

Model kolorimetru CR-400 společnosti Konica Minolta ukazuje obr. 3.2. Umožňuje měřit např. jas, náhradní teplotu chromatičnosti, index podání barev, barevný rozdíl odraznosti různých povrchů a další. Nabízí měření v mnoha barevných prostorech, z nichž nejznámější jsou XYZ a L^*u^*v [25].

3.3 Spektroradiometr

Spektroradiometr měří spektrum elektromagnetického záření. Na rozdíl od kolorimetru se zde světlo rozkládá na světelné mřížce nebo optickém hranolu. Barevné složky dále dopadají na snímací fotočlánek, odkud informace o světle putují do procesoru ke zpracování.

Obecně se spektroradiometr skládá z několika částí [27]:

- Vstupní optika – čočky, difuzory a filtry pro úpravu a směřování dopadajícího záření.
- Monochromátor – světelná mřížka nebo soustava optických hranolů a zrcadel, na které probíhá rozklad světla na jednotlivé vlnové délky.
- Fotočlánek – polovodičový prvek, který transformuje záření na elektrické napětí.
- Záznamový a komunikační systém – zpracovává naměřená data.

Na stejném principu pracuje přístroj měřící fotometrické veličiny – spektrofotometr. S jeho pomocí lze zjistit hodnoty veličin: jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice x,y (nebo u,v), náhradní teplota chromatičnosti, index podání barev, dominantní vlnová délka a kolorimetrická čistota [3]. Cena spektroradiometrů se opět pohybuje v řádech desítek tisíc Kč za kus [26].

Laboratoř světelné techniky VUT vlastní spektrometr Konica Minolta CS-1000A zachycený na obr. 3.3. Přístroj lze propojit s PC a za pomoci softwarové podpory je možno provést mnohá měření a výpočty z oblasti spektrofotometrie a kolorimetrie.



Obr. 3.3 Spektrometr Konica Minolta CS-1000A [29]

Se standartními optickými čočkami dokáže změřit spektrum a jas světelného zdroje v rozmezí $1 - 8000 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ve viditelné oblasti vlnových délek $380 - 780 \text{ nm}$ [30].

Pro nejistotu měření A přístroje platí [30]:

- 2 % (nebo ± 1 digit) při měření jasu
- 0,0015 pro barevnou souřadnici x
- 0,0010 pro barevnou souřadnici y

Dále je známa přesnost měření spektrálního složení ($\pm 0,3 \text{ nm}$) a polarizační chyba ($< 5 \%$) [30].

Rozšířené nejistoty měření vybraných spektrometrů pro měření osvětlenosti, náhradní teploty chromatičnosti a indexu podání barev udává tab. 3.1. Nejistoty měření kvalitních spektrometrů se tak zpravidla v pohybují řádech desetin až jednotek procent [31].

Tab. 3.1 Rozšířené nejistoty měření vybraných spektrometrů [31]

Veličina	Rozšířená nejistota U (%) při $k = 2$		
	Měření E	Měření T_{cp}	Měření R_a
JETI SCB 1211 UV	2,5 – 2,9	1,6 – 3,2	0,6 – 1,0
Avantes AvaSpec-2048	2,6 – 3,0	1,3 – 3,5	0,6 – 1,0
Konica Minolta CS-1000A	2,1 – 2,6	1,5 – 3,3	0,5 – 1,0
Sekonic C-700	5,1 – 5,2	3,3 – 5,4	0,2 – 1,3
Gossen Mavospec Base	3,1 – 7,5	2,4 – 12,1	0,2 – 2,9
Uprtek MK350S	5,1 – 5,5	3,4 – 5,3	0,2 – 1,3

3.4 Jasová kamera

Funkcí jasové kamery je vykreslení hladin jasu na zachyceném 2D snímku. Pokud je součástí kamery zabudovaný spektrometr nebo optický filtr, lze ji použít pro spektrální analýzu světla [20].

Moderní kamery disponují i přídatnými filtry pro vyhodnocování obrazu na základě nejen fotopického vidění $V(\lambda)$, ale i skotopického vidění $V'(\lambda)$, dále filtry určujícími funkci cirkadiánní odezvy $C(\lambda)$, funkci potlačující tvorbu melatoninu Smel, a speciálními filtry NIL či BLH („Blue Light Hazard“) [32].



Obr. 3.4 Jasová kamera TechnoTeam LMK 6 color [33]

Na obr. 3.4 lze vidět jasovou kameru LMK 6 color od společnosti TechnoTeam. Uvnitř kamery se nachází otočné kolo s barevnými filtry pro měření trichromatických barevných souřadnic (RGB, XYZ, $L^*u^*v^*$,...) [32].

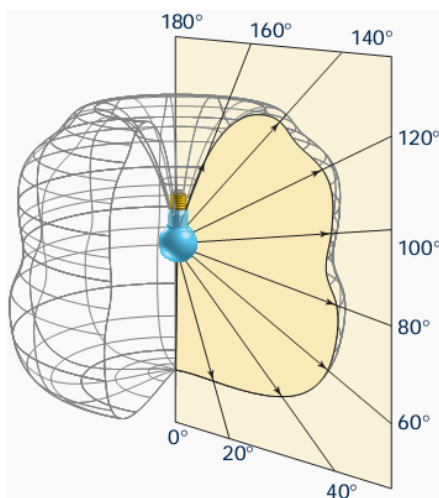
Ukazatele přesnosti měření kamery LMK 6 color [32]:

- kvalitativní ukazatel f_i 4 %
- nejistota s filtrem X (λ) 4 %
- nejistota s filtry C(λ), V'(λ), Z (λ) 6 %
- přesnost měření jasu (pro zářič typu A) 3 %

3.5 Goniofotometr

Primárním účelem goniofotometru je měřit rozložení svítivosti v prostoru. Hlavní část tvoří pohyblivý snímač (např. kamera), který umožňuje měřit svítivost pod různými úhly a ve všech bodech vymezeného prostoru. Vynesené vektory pak určují 3D prostorové rozložení svítivosti. Pro přehlednost lze 3D model zjednodušit pomocí systému rovin C- γ na 2D polární strukturu [27].

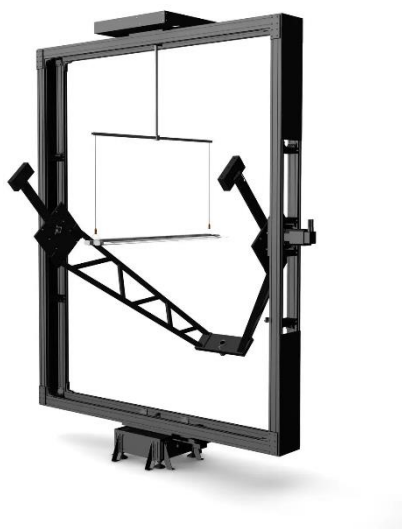
Prostorové rozložení svítivosti je důležitou charakteristickou vlastností světelných zdrojů a svítidel, jehož znalost umožňuje správně navrhnout osvětlení interiérů i exteriérů. Ukázkou křivek svítivosti světelného zdroje ve zvolené polorovině C poskytuje obr. 3.5.



Obr. 3.5 Křivky svítivosti v jedné z polorovin C - γ [34]

Dle způsobu měření svítivosti mají goniofotometry tři možná konstrukční řešení [35]:

- Otočný světelný zdroj (nebo svítidlo) a pevný fotočlánek – lze použít pouze tehdy, je-li rozložení svítivosti měřeného zdroje nezávislé na jeho funkční poloze.
- Pevný světelný zdroj a otočný fotočlánek – tato situace simuluje reálný provoz světelného zdroje v pracovní poloze.
- Pevný světelný zdroj i fotočlánek s otočným zrcadlem – využívá úplného odrazu světla na povrchu zrcadel k měření svítivosti pod různými úhly dopadajících paprsků. Využívaná zrcadla musí splňovat vysoké požadavky na optickou kvalitu.



Obr. 3.6 Goniofotometr TechnoTeam RiGO801-L [36]

Ukázku konstrukce konkrétního goniofotometru typu „pevný světelný zdroj a otočný fotočlánek“ znázorňuje obr. 3.6. Daný model od společnosti TechnoTeam je dostupný v několika provedeních, které definuje tab. 3.2.

Tab. 3.2 Typy goniofotometru RiGO801 [37]

Goniofotometr	Rozměr měřeného světelného zdroje
RiGO801-LED	$d \leq 200$ mm
RiGO801-300	$d \leq 300$ mm
RiGO801-600	$d \leq 600$ mm
RiGO801-L	$d \leq 2000$ mm

Oproti klasickým goniofotometrům má RiGO801 navíc funkce jasoměru, spektrometru a snímače teploty, což zajišťuje širokou škálu možných výstupů měření, jako jsou [38]:

- křivky svítivosti
- světelný tok svítidla
- účinnost svítidla
- spotřeba svítidla
- barevné spektrum
- index podání barev
- náhradní teplota chromatičnosti
- snímky rozložení jasu
- teplotní profil svítidla

Výše vyjmenované výstupy měření zajišťují integrované přístroje goniofotometru – jasová kamera LMK98-4 s barevnými filtry, spektrometr JETI Specbos 1211-LAN a příslušná výbava ve formě zesilovače fotoproudu a fotometrické hlavice od výrobce Czibula & Grundmann GmbH. Dále optické čočky s různými ohniskovými vzdálenostmi (4,2 mm; 8 mm a 25 mm) a šedé filtry s propustnostmi mezi 0,02 – 25 % [39].

4 Světelné zdroje

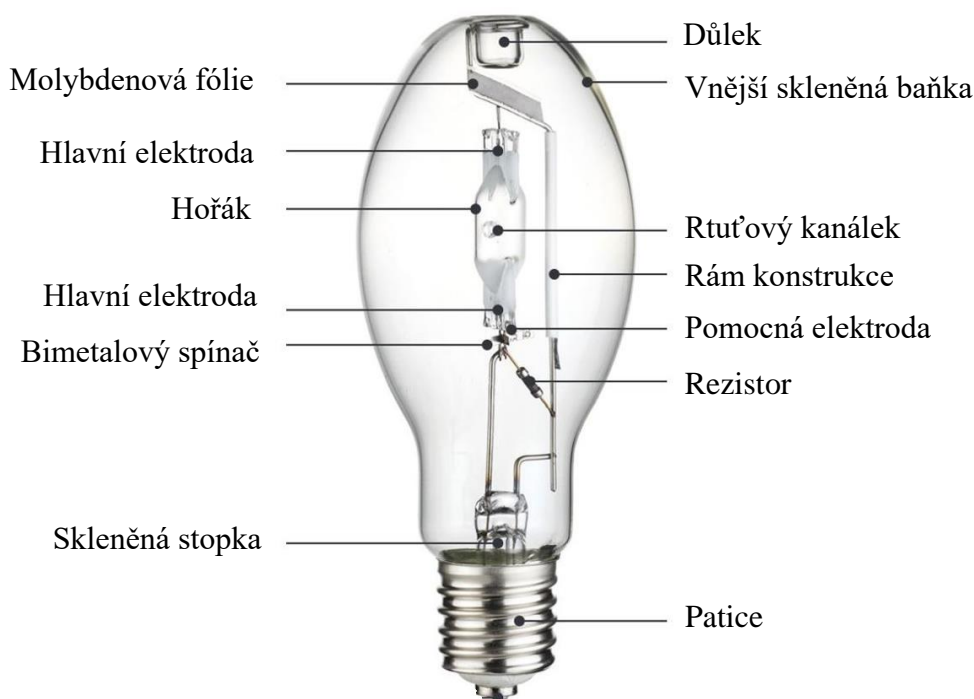
Cílem následující kapitoly je popis světelných zdrojů a svítidel používaných ve veřejném osvětlení ČR. Rozebírají se zde tři hlavní typy používaných světelných zdrojů: halogenidové výbojky, vysokotlaké (VT) sodíkové výbojky a LED.

Vyjma zmíněných se lze v ojedinělých případech setkat i s jinými typy světelných zdrojů (vysokotlaké či nízkotlaké rtuťové výbojky, indukční výbojky aj.), které jsou pro jejich horší provozní parametry postupně nahrazovány a jejich podíl ve VO klesá.

4.1 Halogenidové výbojky

4.1.1 Konstrukce a funkce

Halogenidové výbojky patří do skupiny vysokotlakých výbojových zdrojů. Byly vyvinuty jako náhrada za technologicky starší, dříve používané VT rtuťové výbojky, které se dnes ve veřejném osvětlení už téměř nevyskytují. Světlo zde vzniká hořením elektrického výboje mezi elektrodami ve směsi par rtuti a tzv. halogenidů → sloučenin kovových prvků (Na, Sn, Li, Cs, Tl, In, Dy,...) s vzácnými plyny (Cl, F, Br, I) [3]. Funkční části halogenidové výbojky znázorňuje obr. 4.1.



Obr. 4.1 Konstrukce halogenidové výbojky [40]

Zapálení výboje probíhá dvěma způsoby v závislosti na konstrukci výbojek [3]:

- Pomocným výbojem – mezi hlavní a pomocnou elektrodou vzniká v první fázi elektrický oblouk, který napomáhá ionizaci plynné náplně v prostoru hořáku, což vede ke snížení potřebného zapalovacího napětí mezi hlavními elektrodami. Jakmile napětí klesne pod určitou hodnotu, zapálí se výboj hlavní.

- Vysokonapětovým impulzem – na hlavní elektrody se přiloží napětí o velikosti $U = 1,8 - 5 \text{ kV}$ (dle příkonu výbojky), prostor se ionizuje a výboj začne hořet.

Největší odolnost proti vysoké teplotě ($1000 - 3000 \text{ }^\circ\text{C}$), vysokému tlaku a chemickému namáhání musí mít stěny hořáku a elektrody. Elektrody jsou wolframové, materiál hořáku může být dvojitý – křemenné sklo či keramický materiál. [10]

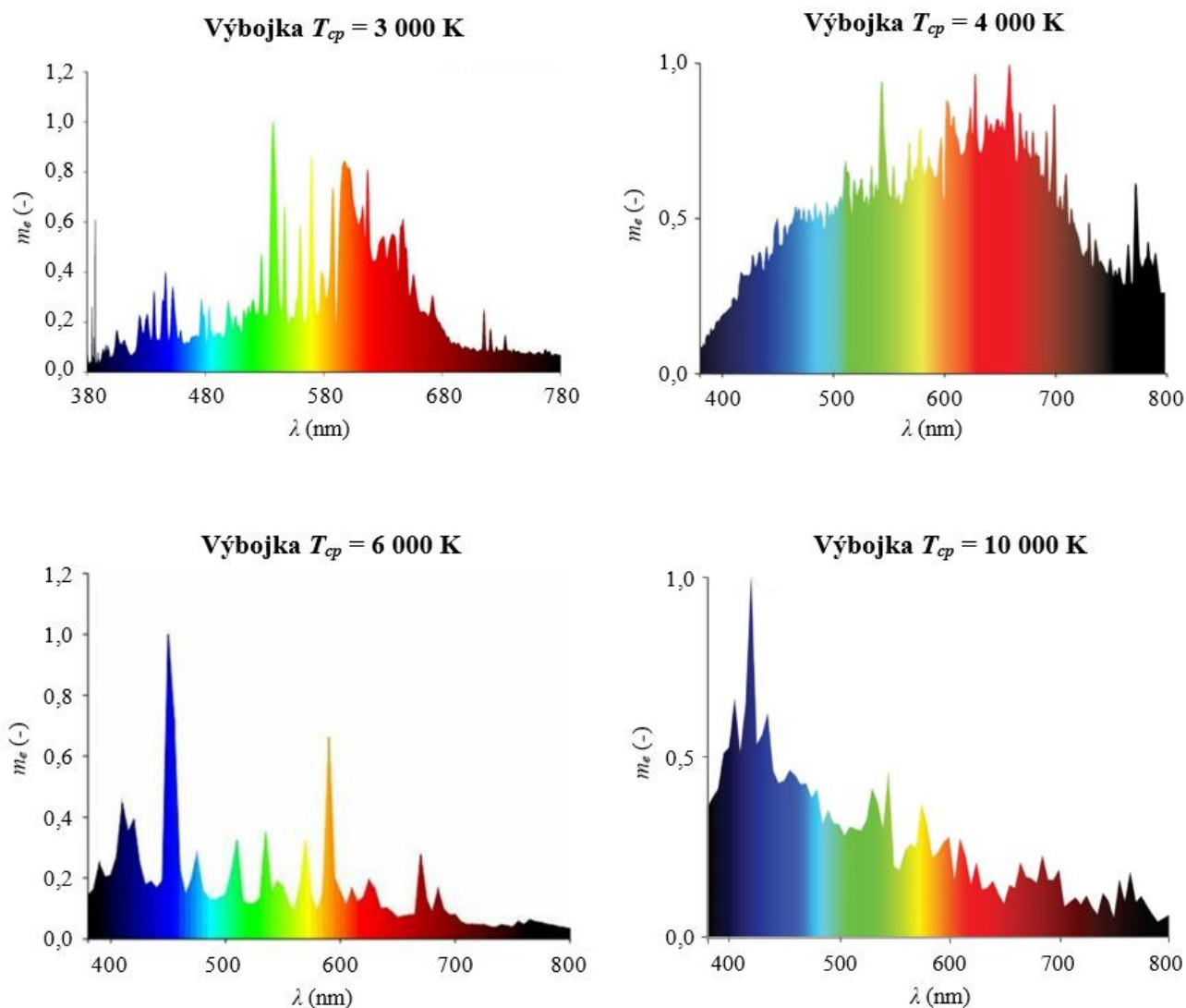
- **Křemenný hořák** – technologicky starší typ hořáku používaný hlavně u vysokotlakých rtuťových výbojek. Ve srovnání s keramickým má křemenný menší odolnost proti vysokým teplotám a tlaku. Náplň tvoří halogenidy, rtuť a inertní plyn – argon nebo směs argonu a neonu, případně xenon [3]. Inertní plyn zajišťuje jednodušší zapálení výboje a brání směs prvků před nadměrným vypařováním v počáteční fázi svícení. U klasických světelných zdrojů se používá hlavně argon, u např. výbojkových světlometů aut tvoří náplň xenon, který zároveň urychluje náběh výbojky do plné intenzity pro spolehlivou funkci světlometů [4].
- **Keramický hořák** – nejčastěji používaným materiálem je zde Al_2O_3 – oxid hlinitý, jinak nazývaný polykrystalický korund. Má větší tvrdost, mechanickou pevnost a chemickou i tepelnou odolnost. Může tak obsahovat širší výběr halogenidů a teplota výboje lze podstatně zvýšit, což vede k vyššímu měrnému výkonu.

Prvotní výboj po zapálení probíhá v inertním plynu obvykle v odstínech šedomodré barvy (excitace argonu), následuje odpařování rtuti a halogenidů v hořáku, kdy výbojka svítí nejdříve světle modře (páry rtuti) a posléze mění barvu světla dle složení halogenidu. Provoz výbojky se poté stabilizuje pomocí tlumivky nebo elektronického předřadníku [10].

Vnější baňka, do níž je hořák zatavený, chrání nosnou konstrukci hořáku a molybdenové fólie před oxidací. Výplň baňky tvoří inertní plyn (směs argonu a dusíku), případně je evakuovaná. Další funkcí je stabilizace teplotního a elektrického režimu výbojky => stabilizace světelného toku zdroje. Materiálem vnější baňky může být měkké sodnovápenaté sklo (pro nižší výkony) či tvrdé borokřemičité sklo (pro vyšší výkony) [10].

4.1.2 Spektrální složení

Spektra vybraných halogenidových výbojek znázorňují průběhy na obr. 4.2. Díky široké škále možných halogenidů použitých jako náplň hořáku lze dosáhnout téměř libovolného spektrálního složení vyzařovaného světla. Halogenové výbojky tak disponují širokým rozmezím indexů podání barev ($R_a = 65 - 100$) a náhradních teplot chromatičnosti ($T_{cp} = 3\,000 - 20\,000\text{ K}$) [3].



Obr. 4.2 Spektrální průběhy vybraných halogenidových výbojek [41-44]

4.1.3 Parametry, výhody a nevýhody

Příznačnou vlastností halogenidových výbojek je velká variabilita světelně-technických parametrů. Při výběru z 50 kovů lze vytvořit až 90 halogenidů pro výplň hořáku výbojek, což umožňuje vytvářet různorodé světelné zdroje s odlišným měrným výkonem, indexem podání barev, náhradní teplotou chromatičnosti i střední dobou života [3]. Výsledné parametry ukazuje tab. 4.1.

Tab. 4.1 Parametry halogenidových výbojek [3-4, 10]

Veličina	Hodnota
M_z (lm.W ⁻¹)	50 – 130
R_a (-)	65 – 100
T_{cp} (K)	3 000 – 20 000
t_z (h)	6 000 – 15 000

Vlivem vysokého tlaku uvnitř hořáku (stovky až tisíce kPa) mají výbojky velkou hustotu výkonu, z čehož vyplývají malé rozměry i při velkých elektrických příkonech. Vzhledem k náročnější technologii výroby je ekologicky vhodné vyrábět halogenidové výbojky s příkonem nad 15 W. V závislosti na materiálu hořáku se výbojky vyrábí v rozmezí dvou variant příkonů: 70 – 5000 W u hořáku z křemenného skla a 15 – 400 W u hořáku korundového (keramického) [3].

Výhody halogenidových výbojek [3-4, 10]:

- + široká škála možných parametrů – zejména náhradní teploty chromatičnosti a indexu podání barev
- + velké rozpětí příkonů zdrojů
- + velká hustota výkonu – kompaktní rozměry zdroje

Nevýhody halogenidových výbojek [3-4, 10]:

- vyšší cena v důsledku technologické náročnosti výroby
- vykazují velkou citlivost na kolísání napájecího napětí
- změna náhradní teploty chromatičnosti v průběhu života vlivem různého vyhořívání a chemických přeměn prvků ve směsi halogenidů (až ± 600 K)¹
- delší doba náběhu výbojky (cca 5 minut)
- dlouhý čas chladnutí a opětovného rozsvícení při výpadku napájení (10 až 15 min)
- nutnost ekologické likvidace – obsahují rtuť a jiné toxické látky
- závislost parametrů na poloze svícení zdroje => nutnost fixace zdroje v dané poloze²
- nutnost zapalovacího zařízení

Přestože se halogenidové výbojky stále vyskytují ve veřejném osvětlení, jejich podíl se zmenšuje a jsou nahrazovány novějšími a efektivnějšími zdroji, zejména LED.

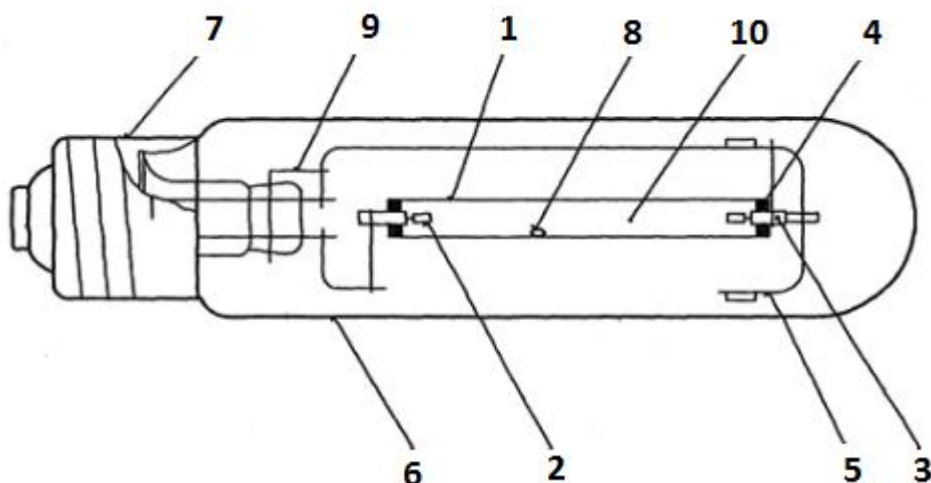
¹ Zejména u výbojek s hořákem z křemenného skla. U korundových hořáků se náhradní teplota chromatičnosti mění v rozptylu ± 200 K

² Opět problematické převážně u výbojek s křemenným hořákem

4.2 Vysokotlaké sodíkové výbojky

4.2.1 Konstrukce a funkce

VT sodíkové výbojky patří stejně jako halogenidové výbojky do skupiny vysokotlakých zdrojů. Generace světla zde probíhá hořením výboje v párách směsi rtuti a sodíku. Konstrukci VT sodíkových výbojek znázorňuje obr. 4.3.



Konstrukce výbojky:

1 – korundový hořák	5 – nosný rámeček	8 – amalgám sodíku
2 – wolframová elektroda	6 – vnější baňka	9 – getr
3 – niobová průchodka	7 – patice	10 – plynná náplň
4 – těsnící kroužek		

Obr. 4.3 Konstrukce VT sodíkové výbojky [45]

Vzhledem k velké chemické agresivitě sodíku a vysokým pracovním teplotám (až 1300 °C) a tlakům (3 – 60 kPa) je nutné používat pouze hořáky z korundu. Dochází zároveň k vyššímu chemickému, tepelnému a mechanickému namáhání průchodek elektrod, proto jsou vyrobeny z niobu, jediného kovu, který splňuje veškeré požadavky odolnosti. Vývody elektrod tvoří wolfram pokrytý emisní hmotou pro lepší zapalování a hoření oblouku. Změnou vzdálenosti mezi elektrodami a změnou polohy elektrod (vertikální nebo horizontální) lze výrazně ovlivnit teplotu výbojového prostoru, s níž souvisí i elektrické a světelné parametry výbojky [3].

Rtuť a sodík jsou v hořáku přítomny ve formě amalgámu³ – podíl složení jednotlivých prvků pak ve velké míře určuje parametry daného světelného zdroje. Výplň hořáku tvoří inertní plyn, který plní stejnou funkci jako u halogenidových výbojek [10].

³ Pevná nebo kapalná sloučenina rtuti s jiným kovem (sodík, stříbro, zlato, měď, olovo,...) [46].

Využívají se dva typy inertních plynů v závislosti na požadavcích provozu:

- **Xenon** – má ze skupiny vzácných plynů nejmenší tepelnou vodivost => udržuje teplo ve výboji a brání průchodu k povrchu hořáku, čímž redukuje ztráty teplem a zajišťuje tak největší možný měrný výkon výbojky.
- **Penningova směs** (99,5 % Ne + 0,5 % Ar) – umožňuje zapálení výboje bez zapalovače působením výhradně síťového napětí. Nevýhodou je zde snížení měrného výkonu přibližně o 25 %, proto se používá jen ve výjimečných případech.

U xenonové náplně je nezbytné použití zapalovacího zařízení schopného generovat napěťové impulzy v rozpětí 2,8 – 4,5 kV. Tlak xenonu určuje měrný výkon, podání barev a velikost zapalovacího napětí. Při maximálním tlaku je měrný výkon a zápalné napětí nejvyšší a index podání barev nejnižší. Pro stabilizaci provozu výbojky se používá tlumivka nebo elektronický předřadník [3].

Vnější baňka je evakuovaná a plní dvě funkce: chrání niobové průchodky před oxidací a redukuje tepelné ztráty v hořáku (tepelně jej izoluje od okolního prostředí) [10]. Po zapálení oblouku probíhá výboj nejdříve v xenonu generujícím světlo modrou barvu, dále přechází do vybledlé modré až šedé barvy při hoření v párách rtuti a později nabývá hutně žlutou až zlatavou barvu v odpařeném sodíku.

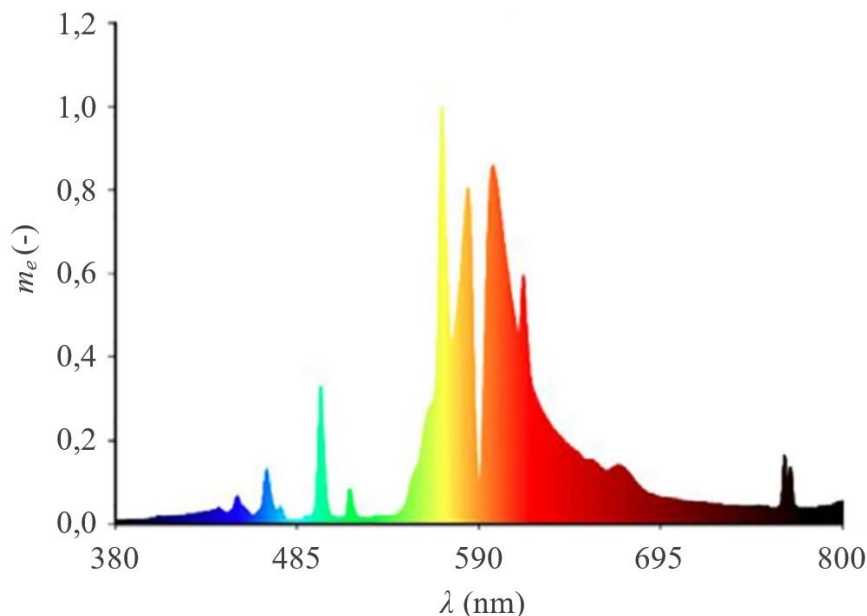
Konec životnosti výbojek signalizuje proces tzv. cyklování. Vlivem chemického reagování konstrukce hořáku s výbojovými parami dochází postupem času ke zvyšování provozního napětí potřebného k udržení výboje mezi elektrodami. Jakmile toto napětí přesáhne jmenovité napájecí napětí, výboj uhasne a pomalu chladne (řády jednotek minut). Po vychladnutí dostane zapalovač impuls k obnovení oblouku a výbojka znovu několik minut najíždí do maximální intenzity. Zvyšuje se tak teplota, tlak a provozní napětí a po dosažení maxima intenzity výboj opět uhasne. Tento proces se opakuje, dokud není výbojka nahrazena jiným světelným zdrojem.

Z ekologických důvodů (toxická rtuť) dochází ke snaze redukovat množství rtuti v hořáku. Rtuť přispívá ke snadnějšímu zapalování výboje, ke stabilizaci parametrů výboje při provozu a zároveň obohacuje barevné spektrum o kratší vlnové délky (odstíny modré barvy). Její úplné odstranění tak vede ke konstrukčním změnám ve výbojce a ke zmenšení měrného výkonu o 12 – 17 % [3].

4.2.2 Spektrální složení

Spektrum sodíkových výbojek se odvíjí od velikosti tlaku v hořáku. U NT výbojek dochází k vyzařování světla pouze na dvou rezonančních vlnových délkách 589,0 a 589,6 nm, charakterizováno intenzivní žlutou barvou s náhradní teplotou chromatičnosti okolo 1800 K. Kvůli absenci všech ostatních vlnových délek má zdroj nulový index podání barev [10].

Se zvyšujícím se tlakem se spektrum rozšiřuje zejména směrem k větším vlnovým délkám (oblast červené barvy), jak ukazuje obr. 4.4. Díky bohatšímu spektru roste i index podání barev na hodnotu $R_a = 20 - 25$ a zároveň i náhradní teplota chromatičnosti $T_{cp} = 2\,000 - 2\,500$ K [3].



Obr. 4.4 Spektrum VT sodíkové výbojky [47]

Specifické spektrální složení VT sodíkových výbojek reflektuje jednu z podstatných předností tohoto zdroje – velmi nízký obsah vlnových délek v oblasti modré barvy poskytuje při svícení ve večerních hodinách světlo podobné zapadajícímu slunci a je tak v souladu s cirkadiánními cykly člověka a jiných živočichů. Zmíněnou šetrnost k vlastnímu organismu lze pozorovat i skrze subjektivně příjemný pocit při vnímání světla v nočních hodinách ve srovnání s jinými světelnými zdroji.

4.2.3 Parametry, výhody a nevýhody

Hlavní posun oproti halogenidovým výbojkám nastal zejména ve zvýšení měrného výkonu (M_z) a prodloužení střední doby života (t_z). Parametry VT sodíkových výbojek, přednosti a nedostatky těchto zdrojů shrnuje tab. 4.2 a text pod ní.

Tab. 4.2 Parametry VT sodíkových výbojek [3-4, 10]

Veličina	Hodnota
M_z (lm.W ⁻¹)	63 – 150
R_a (-)	20 – 25
T_{cp} (K)	2 000 – 2500
t_z (h)	16 000 – 30 000

Výhody VT sodíkových výbojek [3-4, 10]:

- + velký měrný výkon
- + dlouhá střední doba života
- + jednoduchá údržba, velká spolehlivost
- + velká hustota výkonu, kompaktní rozměry
- + šetrnost k cirkadiánním rytům člověka a ostatních živočichů a subjektivně příjemná náhradní teplota chromatičnosti v noci
- + re-strike = rychlá doba náběhu (několik sekund) do plné intenzity při krátkodobé ztrátě napájení

Nevýhody VT sodíkových výbojek [3-4, 10]:

- nízký index podání barev – riziko z hlediska bezpečnosti
- nutnost zapalovacího zařízení
- závislost parametrů na poloze svícení zdroje => nutnost fixace zdroje v dané poloze
- delší doba náběhu výbojky (5 – 8 minut)
- nutnost ekologické likvidace – obsah toxické rtuti

Index podání barev lze zvýšit až na hodnoty $R_a > 80$, ovšem na úkor měrného výkonu, který tak významně klesá k hodnotám $M_z < 50 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, proto v běžných aplikacích nenalézají tyto speciální výbojky uplatnění [3].

Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou dostupné v příkonech 35 – 1 000 W a v dnešní době stále tvoří podstatnou část veřejných osvětlovacích soustav. V mnohých městech a vesnicích jsou již nahrazeny LED zdroji a předpokládá se, že postupem času zcela vymizí a zastoupí je technologicky novější světelné zdroje.

4.3 LED – světelné diody

4.3.1 Konstrukce a funkce

Technologicky nejpokročilejší skupinu světelných zdrojů tvoří světelné diody. Řadí se mezi tzv. elektroluminiscenční zdroje. Světlo zde vzniká průchodem elektrického proudu přes PN přechod polovodičového materiálu. Vlivem neustálé generace a rekombinace elektronů a děr dochází k uvolňování energie ve formě světla a tepla. Samotný světelný zdroj sestává z mnoha malých LED čipů umístěných blízko sebe, jejichž světelné toky se nasčítají a vytváří dojem jednotného plošného zdroje. Ukázka LED svítidla veřejné osvětlovací soustavy je vidět na obr. 4.5.



Obr. 4.5 Pouliční LED svítidlo [48]

LED čipy napájí elektronický předřadník, jehož součástí je i usměrňovač. Pro výkonové zdroje s příkonem nad 25 W se používá externí driver s aktivním PFC obvodem využívající PWM (pulzní šířkovou modulaci) pro řízení napětí a proudu v obvodu.

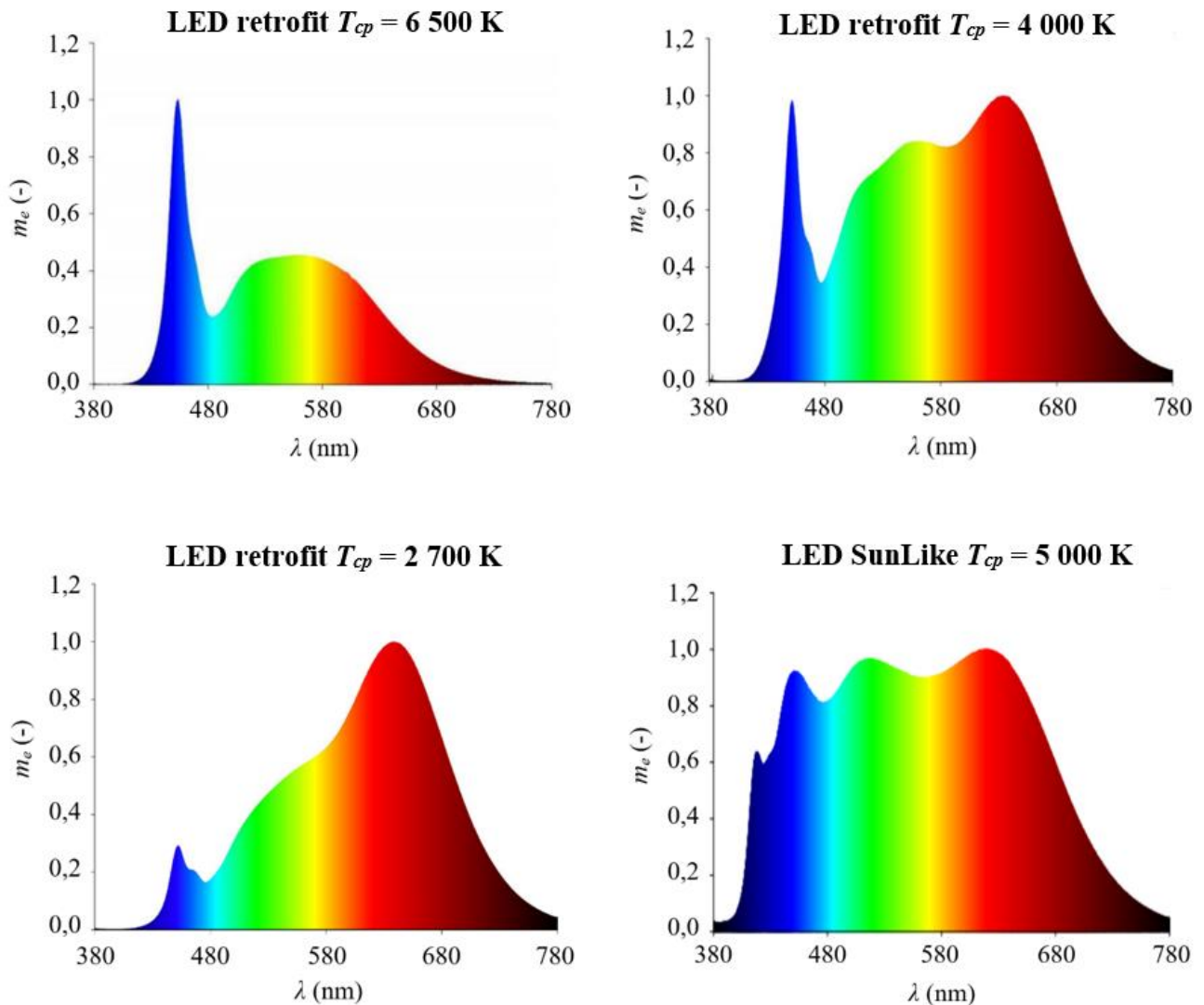
Přestože se jedná o neefektivnější zdroj, co se týče přeměny elektrické energie na světlo, dochází v LED k nezanedbatelným tepelným ztrátám. Jednotlivé LED čipy jsou plošné zdroje s velkým světlením (velký světelný tok na malou vyzařovací plochu) a mají tak velkou hustotu výkonu. Pro správnou funkci je tedy nutné zařídit dostatečné chlazení a odvod tepla z aktivní plochy. Využívají se žebrové chladiče a kryty svítidla vyrobené ze slitin hliníku 6061 a 6063, které mají poměrně dobrou tepelnou vodivost, jsou lehké a levné [49]. U běžných modelů LED svítidel veřejného osvětlení se provozní teploty pohybují v rozmezí $\vartheta = -40$ až $+50$ °C [50-53].

4.3.2 Spektrální složení

Struktura PN přechodu v diodách určuje energii, kterou nabude uvolněný foton při rekombinaci páru elektron-díra. Změnou materiálu PN přechodu tak lze měnit vlnovou délku vyzářeného světla. Tímto způsobem lze vytvořit monochromatický zdroj se světlem libovolné barvy. Bílou barvu nicméně nelze vytvořit přímo. Pro získání rozmanitého barevného spektra je nutno využít jeden ze dvou principů:

- **RGB míchání barev** – světelný zdroj obsahuje tři druhy LED čipů s různými vlnovými délkami vyzářeného světla (červené, zelené a modré) a jejich kombinací vzniká spektrum bílé barvy. Nevýhodou tohoto způsobu je nestejné stárnutí jednotlivých typů LED čipů vedoucí ke změně spektra a náhradní teplotě chromatičnosti během života. Navíc software i hardware potřebný pro realizaci tohoto řešení je náročný [3].
- **Průchod světla přes luminofor** – světlo monochromatického zdroje prochází přes vrstvu materiálu, která upravuje vlnovou délku a rozloží energii záření napříč širokou škálou spektra zdroje. Nejčastěji se používá buď luminofor yttrito-hlinitý granát aktivovaný cerem ($Y_3Al_5O_{12}Ce$) buzený světlem modré diody InGaN ($\lambda = 440 - 470$ nm), nebo třívrstvý luminofor, který budí ultrafialová dioda ($\lambda = 250 - 350$ nm). Tento způsob se nyní uplatňuje ve většině případů, oproti RGB míchání má pouze jednu nevýhodu – při průchodu světla luminoforem se totiž část energie přeměňuje na ztrátové teplo [10].

Náhradní teplota chromatičnosti se u LED retrofitů používaných pro osvětlování interiérů pohybuje nejčastěji v rozmezí 2 700 – 6 500 K, kde 2 700 K imituje klasickou vláknovou žárovku a 6 500 K denní svit slunce nejvýše na obzoru. Spektra vybraných LED zdrojů ukazuje obr. 4.6. Největší pík se nachází při vlnové délce přibližně 440 nm, kterou vyzařují zdrojové modré diody pod luminoforem.



Obr. 4.6 Spektrální průběhy LED retrofitů [54-57]

Se zajímavým technologickým vylepšením přišla jihokorejská společnost Seoul Semiconductor, když v roce 2019 představila LED s obchodním názvem „SunLike“. Světlo budí ultrafialová dioda v kombinaci s třívrstevným RGB luminoforem. Vyzářené spektrum je téměř identické se spektrálním složením slunečního svitu a navenek tak působí jako zdroj přírodní, nikoli umělý (viz obr. 4.6). To má za následek několik výhod [58]:

- + index podání barev $R_a = 97$
- + světlo LED by mělo více prospívat lidskému zraku
- + při svícení přes den by světlo LED mělo napomáhat lepšímu nočnímu spánku

Přestože světlo prochází přes tři vrstvy luminoforu, ztráty nejsou příliš velké a měrný výkon zůstává na poměrně dobré hodnotě okolo $M_z = 100 \text{ lm.W}^{-1}$ [59].

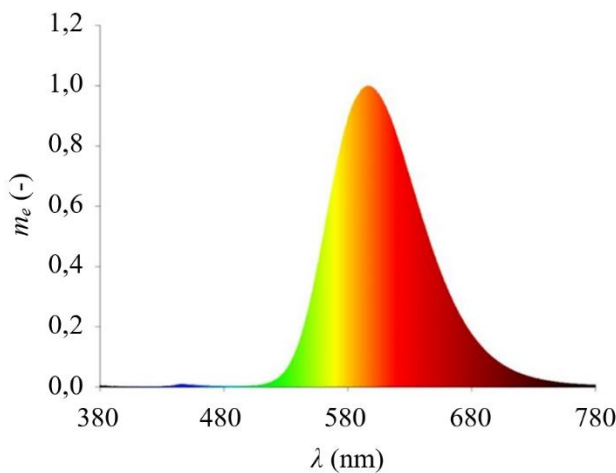
U LED používaných pro veřejné osvětlování se náhradní teplota chromatičnosti pohybuje v širším rozmezí 1 700 – 7 000 K [11-13]. Obecně platí, že se snižující se T_c (K) klesá i měrný výkon M_z (lm.W^{-1}), jelikož větší část vyzářeného záření musí projít přes luminofor a dochází k vyšším tepelným ztrátám. Na druhou stranu nižší náhradní teplota chromatičnosti méně interaguje s cirkadiánními cykly organismů – je tedy šetrnější (zejména) k lidskému zdraví. Ve spektru teplejších diod dochází k přeměně modré složky světla směrem k větším vlnovým

délkám, zejména do oblasti červené barvy, která podstatně méně potlačuje uvolňování melatoninu ve večerních a nočních hodinách [9].

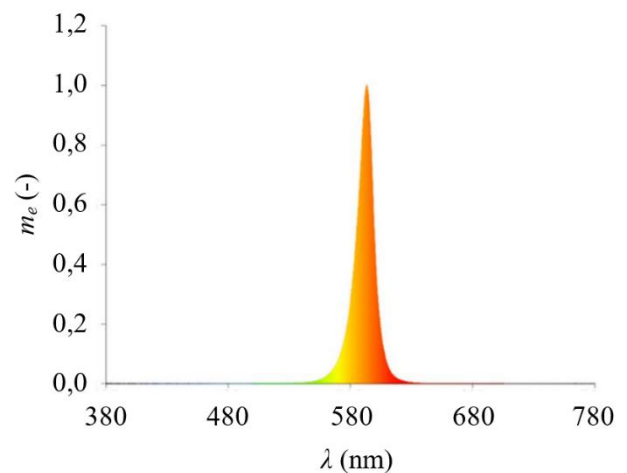
Zmíněné protichůdné faktory – velikost měrného výkonu a interakce s cirkadiánními cykly – se v současnosti stávají hlavním ohniskem pozornosti. Na jedné straně ekonomická úspora, na druhé lidské zdraví. LED svítidla ve veřejném osvětlení ČR se tímto způsobem v každé vesnici či městě liší v závislosti na hledisku, které se v tamějších podmínkách prosadilo. Podle časopisu Světlo by navíc mělo dojít do roku 2025 k výměně poloviny veřejného osvětlení v ČR, což ještě zvyšuje časový tlak na řešení dané problematiky [60].

Novou technologii v dané oblasti představují zdroje LED Amber. Existují dvě provedení, ve kterých jsou dostupné:

- **LED PC Amber** – typ s klasickým luminoforem („Phosphor-Converted“) se používá pro všeobecné osvětlovací účely, kde díky svým parametrům na pohled připomíná vysokotlakou sodíkovou výbojku. Náhradní teplota chromatičnosti se pohybuje mezi 1 700 – 2 200 K a spektrum obsahuje minimální množství vlnových délek modré barvy (viz obr. 4.7). Index podání barev nabývá hodnot okolo 60 a měrný výkon klesá k hodnotám blízkým 70 lm.W^{-1} [61]. V České republice se první svítidla tohoto typu nainstalovaly v Rokycanech v roce 2019 [62].
- **LED NB Amber** – využívají se v oblastech, kde se nachází živočišné citlivé na specifické vlnové délky světla, například na pobřeží moří, kde běžně používané umělé osvětlení interferuje s orientačním smyslem vodních želv. Při osvětlování klasickými zdroji jsou želvy oslepeny a zmatené pak putují do měst namísto do vody [63]. Ve spektru NBA („Narrow Band Amber“) dochází k úplné redukci modré složky a celkovému zúžení na vlnové délky žluté až červené barvy s vrcholem okolo 600 nm (viz obr. 4.8). Pro běžné osvětlování se nicméně nehodí kvůli špatným parametrům – index podání barev má velmi malou hodnotu, podobně jako nízkotlaká sodíková výbojka, a měrný výkon se pohybuje kolem 30 lm.W^{-1} [64].



Obr. 4.7 Spektrální složení LED PC Amber [65]



Obr. 4.8 Spektrální složení LED NB Amber [66]

4.3.3 Parametry, výhody a nevýhody

Technologický vývoj světelných diod jde zejména v současném století rychle kupředu. První červenou LED rozsvítil v roce 1962 Nick Holonyak, v roce 1992 představil Shuji Nakamura diodu modrou a krátce nato následovalo objevení luminoforu a využití bílé LED po celém světě. V roce 2003 bylo cílem dosáhnout měrného výkonu $60 - 80 \text{ lm.W}^{-1}$ [3, 59]. Za posledních osmnáct let tedy vzrostl měrný výkon u komerčních LED o více než dvojnásobek (viz tab. 4.3) a do budoucna se předpokládá další zvyšování.

Tab. 4.3 Parametry LED běžně používaných ve veřejném osvětlení [11-13, 61, 68]

Veličina	Hodnota
$M_z (\text{lm.W}^{-1})$	69 – 170
$R_a (-)$	60 – 98
$T_{cp} (\text{K})$	1 700 – 7 000
$t_z (\text{h})^4$	25 000 – 132 000

Výhody LED [1, 9, 50, 51]:

- + nejvyšší měrný výkon z dostupných zdrojů při zachování dobrých ostatních parametrů⁵
- + nejdelší střední doba života
- + rychlý náběh
- + polohovatelnost – nezávislost velikosti světelného toku a střední doby života na natočení a pozici svítidel
- + časté spínání nemá vliv na životnost LED
- + široký výběr svítidel s různými barevnými vlastnostmi (rozmanitost R_a a T_{cp})
- + neobsahují toxické látky a po vypršení životnosti je významná část zdrojů recyklovatelná
- + Srovnatelná cena svítidel VO v porovnání s ostatními typy světelných zdrojů:
 - modely s běžnými parametry a konstrukcí začínají na ceně přibližně 2000 Kč/kus
 - nejlevnější modely se zhoršenými parametry (kratší životnost, nižší měrný výkon, horší index podání barev nebo menší rozmezí provozních teplot) začínají na ceně 700 Kč/kus

Nevýhody LED [9]:

- závislost velikosti světelného toku a střední doby života na provozní teplotě

Vzhledem k množství výhod, dostupnosti a ceně světelných diod se postupem času ve veřejném osvětlení ČR předpokládá úplné vymizení všech ostatních typů světelných zdrojů. Další kapitola se věnuje konkrétnímu LED svítidlu potenciálně vhodnému pro budoucí nahrazování jiných zdrojů ve VO.

⁴ Udané hodnoty pochází z katalogů výrobců svítidel. Takto dlouhé střední doby života u nových svítidel v praxi zatím nelze ověřit, proto je nutno brát dané hodnoty s rezervou. LED retrofity určené pro vnitřní osvětlování vydrží maximálně 50 000 h [9] a předpokládá se, že svítidla VO by se od této hodnoty neměly příliš odchylovat.

⁵ Nízkotlaká sodíková výbojka dosahuje měrného výkonu až $M_z = 200 \text{ lm.W}^{-1}$, nicméně index podání barev $R_a = 0$

5 Biodynamické LED svítidlo Tungsram SLBt

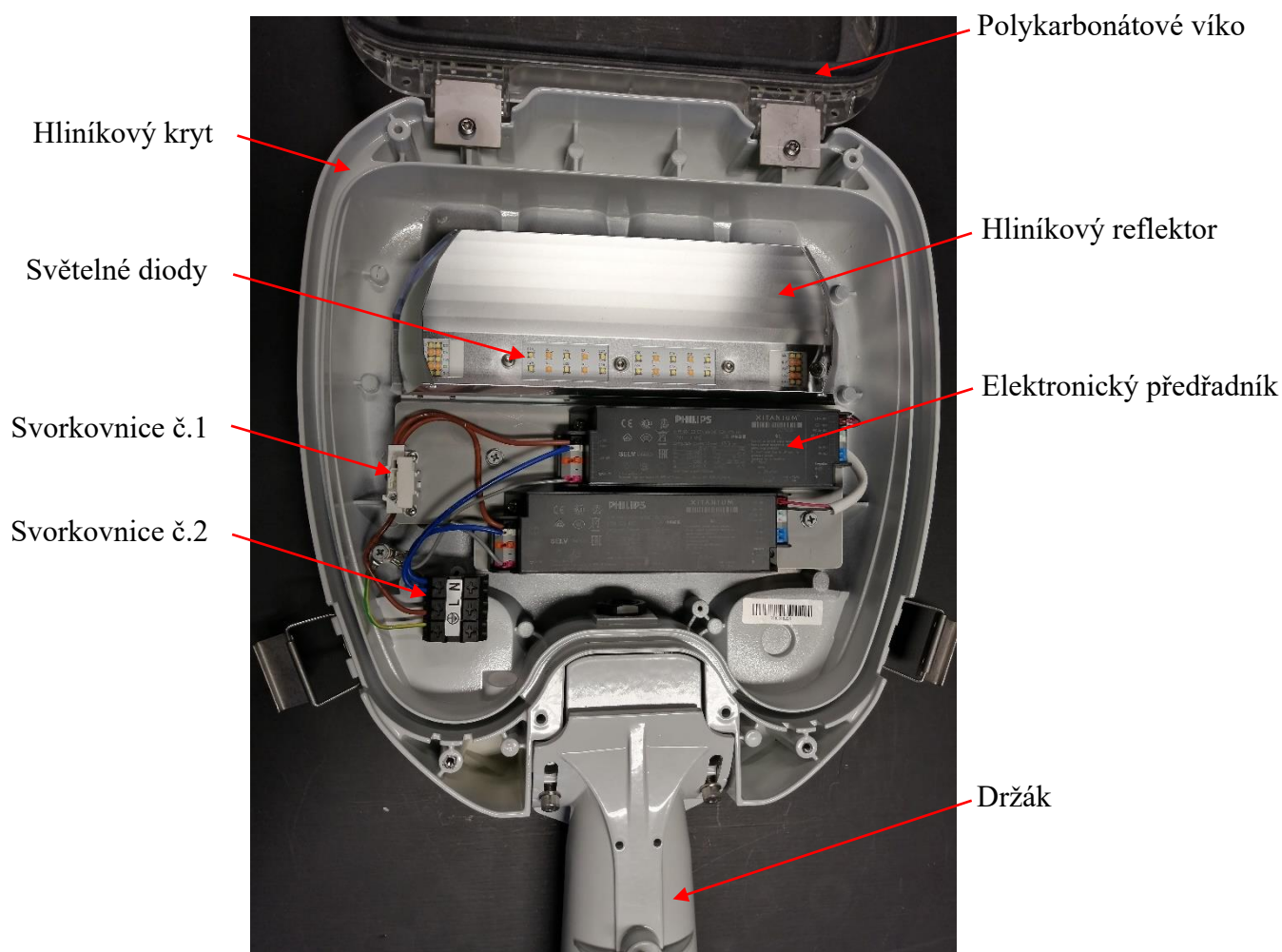
Biodynamické osvětlení splňuje požadavky na dodržování hladin osvětlenosti a zároveň pozitivně stimuluje lidský organismus z hlediska cirkadiánních rytmů. Při soumraku se rozsvěcuje s nejvyšší náhradní teplotou chromatičnosti a postupem času ji snižuje až na minimální hodnotu.

První biodynamické osvětlení v ČR bylo realizováno v Řevnicích v březnu roku 2018. LED svítidla Lumbio 100 W zde osvětlují pěší zónu s proměnnou teplotou chromatičnosti 2 200 – 4 000 K [69].

Tato práce se zabývá měřením barevných vlastností konkrétního svítidla SLBt od společnosti Tungsram. Deset takových svítidel osvětluje komunikaci mezi budovami T10 a T12 Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. Čtyři další kusy lze nalézt také v části Brno Kraví hora.

5.1 Konstrukce a funkce

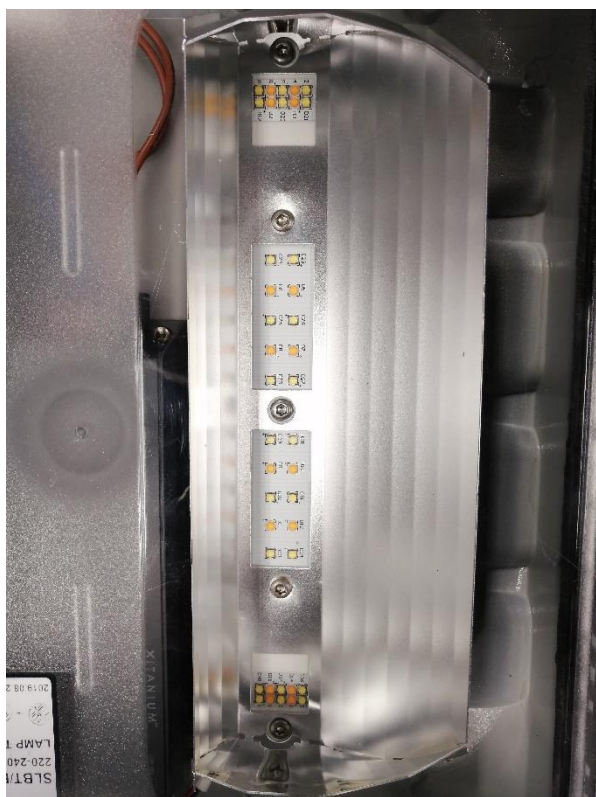
Svítidlo Tungsram SLBt obsahuje podobné funkční části jako klasická LED svítidla. Jeho strukturu ukazují obr. 5.1, obr. 5.2 a obr. 5.3.



Obr. 5.1 Konstrukce svítidla Tungsram SLBt

Mechanickou část tvoří kryt z hliníku vylitý pod vysokým tlakem, který funguje zároveň jako chladič a s ostatními částmi je pospojován nerezovými šrouby a držáky. Kryt lze zespodu uzavřít pomocí UV stabilizovaného polykarbonátového víka, které je průhledné v oblasti umístění světelných zdrojů a matné všude okolo. Kryt poskytuje celkový stupeň krytí IP 66 a stupeň mechanické odolnosti IK09 [70]. Optiku tvoří hliníkový reflektor zajišťující správné směřování generované záření.

Samotný zdroj světla tvoří 40 světelných diod ve dvou řadách (viz obr. 5.2). Využívají se diody dvou typů: $T_{cp1} = 1\,800\text{ K}$ a $T_{cp2} = 4\,000\text{ K}$ s různým spektrálním složením, jejichž míšením v určených poměrech lze získat výsledné barevné spektrum svítidla. Pro každý ze zmíněných typů diod je zde elektronický předřadník usměrňující střídavé napájecí napětí 220 – 240 V a regulující světelný tok diod [70].



Obr. 5.2 Uspořádání světelných diod ve svítidle



Obr. 5.3 Uzavřené svítidlo

5.2 Spektrální složení

Teoretické spektrální složení generovaného světla není prozatím v dostupných informačních zdrojích k dispozici. V praktické části diplomové práce dochází ke zjištění spektra světla každé z řad světelných diod i jejich kombinace pomocí spektrometrů JETI a Uprtek.

5.3 Parametry svítidla

Pro každý typ použitých světelných diod se v katalogovém listu uvádí parametry, které zachycuje tab. 5.1.

Tab. 5.1 Parametry světelných diod svítidla Tungsram SLBt [70]

Veličina	LED 1 800 K	LED 4 000 K
Φ (lm)	1 000 – 2 500	1 030 – 4 800
M_z (lm.W ⁻¹)	77	115
R_a (-)	> 60	> 70
T_{cp} (K)	1 800	4 000
t_z (h) ⁶	132 000	
P (W)	22 – 73	
ϑ (°C)	-40 až +35	

Celková hmotnost svítidla činí 5 kg. Doporučuje se montáž do výšky 4 – 15 m a při použití univerzální spojky je možno svítidlo naklánět pod úhly -15 až +15° po kroku 5° [70].

⁶ Hodnota dokládána výrobcem. V praxi zatím nelze prokázat, proto je třeba určité obezřetnosti.

6 Praktická část

V praktické části diplomové práce proběhlo několik laboratorních a venkovních měření zejména v souvislosti se svítidlem Tungsram SLBt, ale i s dalšími typy svítidel – vysokotlakou sodíkovou výbojkou, halogenidovou výbojkou a neutrálně bílým LED svítidlem. V závěrečné podkapitole došlo k vytvoření simulace v softwaru Matlab zhodnocující vliv parazitního světla cizích svítidel na přesnost měření.

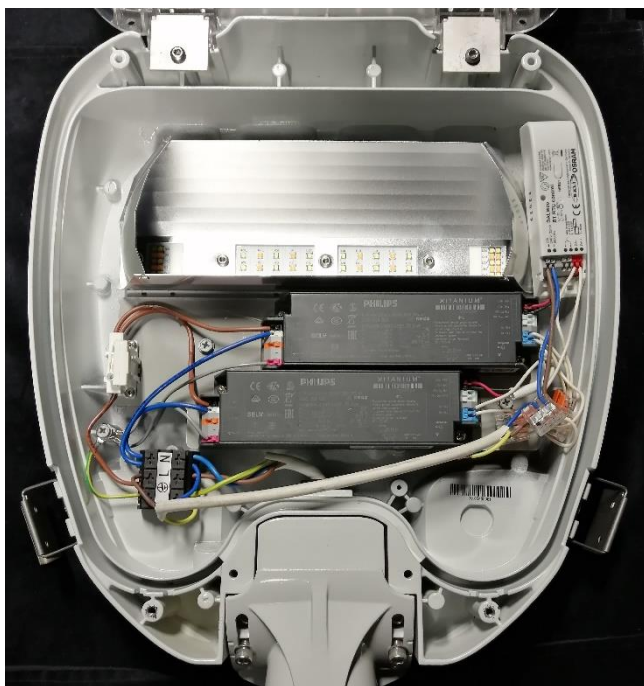
Využilo se měřicích přístrojů a pomůcek z laboratoře světelné techniky na ústavu elektroenergetiky FEKT VUT – spektrometru JETI a Uprtek, goniofotometru, jasového analyzátoru LDA-LumiDISP a kulového intergrátoru.

6.1 Laboratorní měření

Cílem prvních činností byla příprava svítidla Tungsram SLBt k měření v laboratoři světelné techniky, která zahrnovala řešení napájení a ovládání svítidla.

V první fázi došlo k připojení ovladače DALIeco BT RTC control k předřadníkům svítidla a ke svorce napájení svítidla. Ovladač se umístil do prostoru okolo reflektorů tak, aby kryt svítidla bylo možno bez problému zavřít (viz obr. 6.1). Řízení ovladače probíhá přes bluetooth pomocí aplikace OSRAM BT Config, která byla stažena do dotykového tabletu. Dosah ovládacího signálu byl experimentálně změřen na vzdálenost minimálně 5 metrů.

V aplikaci se vytvořily dvě skupiny pro ovládání, každá pro jeden daný předřadník. Díky posuvníku na displeji pak bylo možno měnit velikost světelného toku obou řad svítivých diod odděleně v rozmezí od 0 do 100 % po kroku 1 % (viz obr. 6.2).



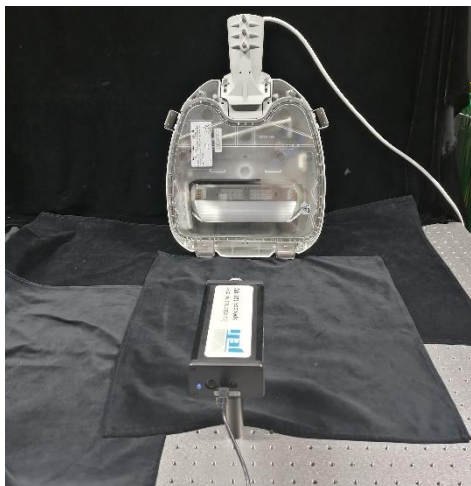
Obr. 6.1 Otevřené svítidlo s vloženým ovladačem



Obr. 6.2 Řídící aplikace na dotykovém tabletu

6.1.1 Měření spektrometrem JETI Specbos 1211 UV

Při měření v této kapitole se svítidlo napájené kabelem přes klasickou zásuvku 230 V umístilo před spektrometr JETI Specbos 1211 UV (viz obr. 6.3 a obr. 6.4). Na výstup ze spektrometru se nasadil difuzorový nástavec pro snímání světla z celého prostoru okolo aktivní plochy svítidla. Spektrometr se přes USB kabel připojil k PC a byl propojen se softwarem JETI LiVal.

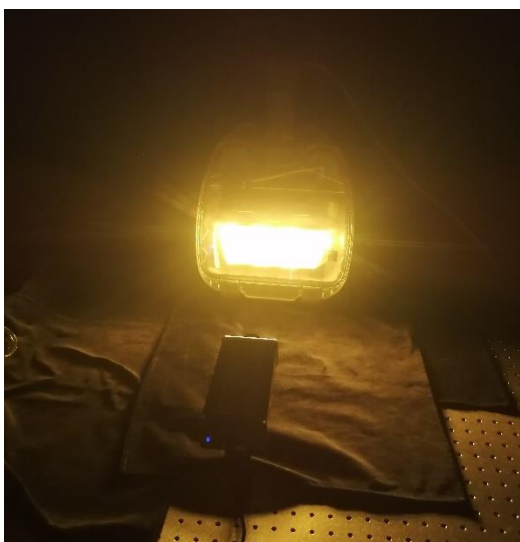


Obr. 6.3 Měřicí pracoviště – přímý pohled



Obr. 6.4 Měřicí pracoviště – pohled z boku

V rámci měření se vyhodnocovala procentní velikost celkového světelného toku každé z řad světelných diod 1 800 K a 4 000 K pro dosažení žádané náhradní teploty chromatičnosti. Požadovaná T_{cp} se nastavovala v rozmezí 1 800 – 4 000 K po kroku ideálně 100 K. Výsledky zachycuje tab. 6.1. Fotografický záznam měření ukazují obr. 6.5 a obr. 6.6.



Obr. 6.5 Měření LED PC Amber 1 800 K



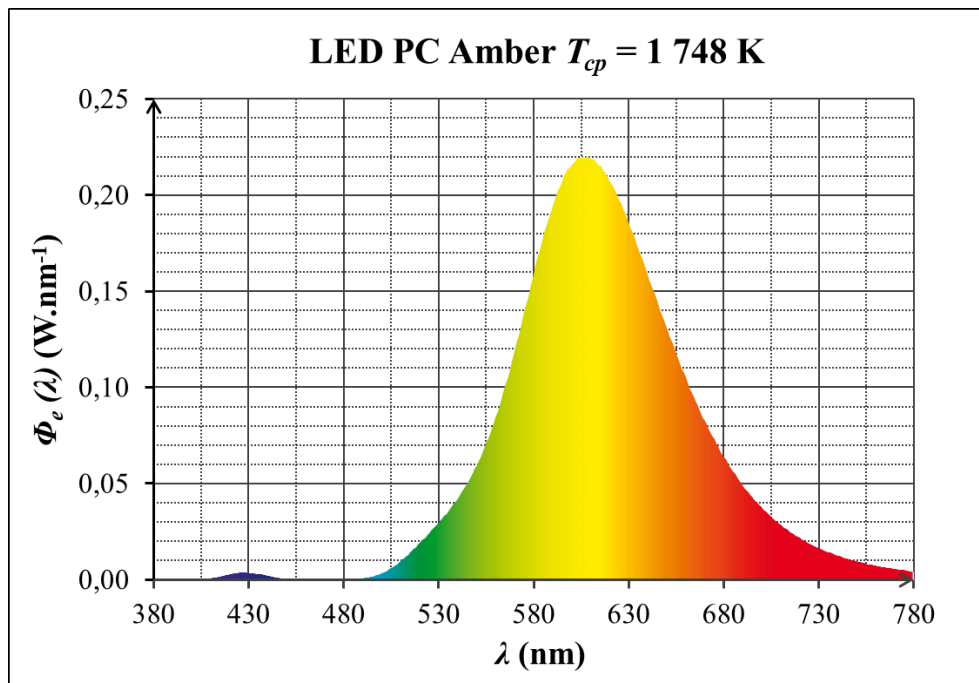
Obr. 6.6 Měření LED neutrální bílá 4 000 K

Tab. 6.1 Náhradní teplota chromatičnosti svítidla pro různá procentní nastavení světelného toku

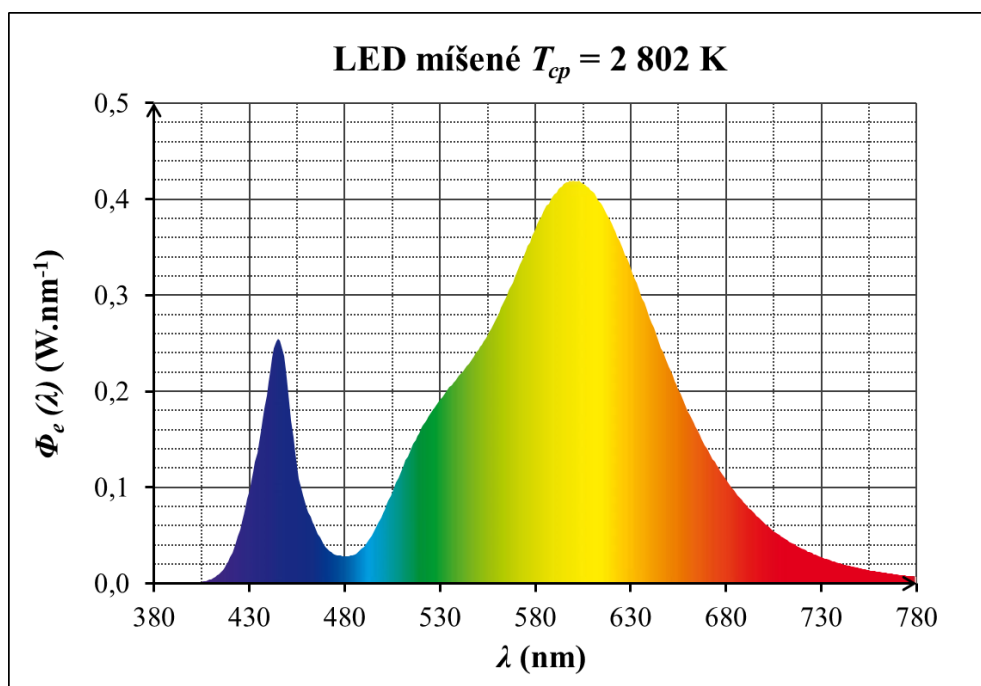
T_{cp} (K)	Nastavení světelného toku (%)	
	LED PC Amber	LED neutrální bílá
1 748	100	0
1 946	100	1
2 006	100	13
2 101	100	18
2 196	100	24
2 303	100	32
2 406	100	41
2 507	100	51
2 600	100	62
2 702	100	75
2 802	100	89
2 855	100	100
2 906	93	100
3 003	77	100
3 100	63	100
3 198	52	100
3 296	43	100
3 407	34	100
3 497	27	100
3 606	20	100
3 692	15	100
3 793	10	100
3 830	1	100
4 026	0	100

Z naměřených hodnot je vidět, že samotné LED PC Amber mají náhradní teplotu chromatičnosti o málo nižší (1 748 K) a neutrálně bílé LED naopak o málo vyšší (4026 K) oproti teoretickým hodnotám. Zároveň dochází k nepoměrným změnám v hodnotě T_{cp} ve fázi rozsvícení světelných diod jedné z řad (z 0 % na 1 % intenzity), pokud druhá řada svítí na 100 %. V ostatních oblastech nastavení se změna náhradní teploty chromatičnosti se změnou intenzity světelného toku jeví lineární.

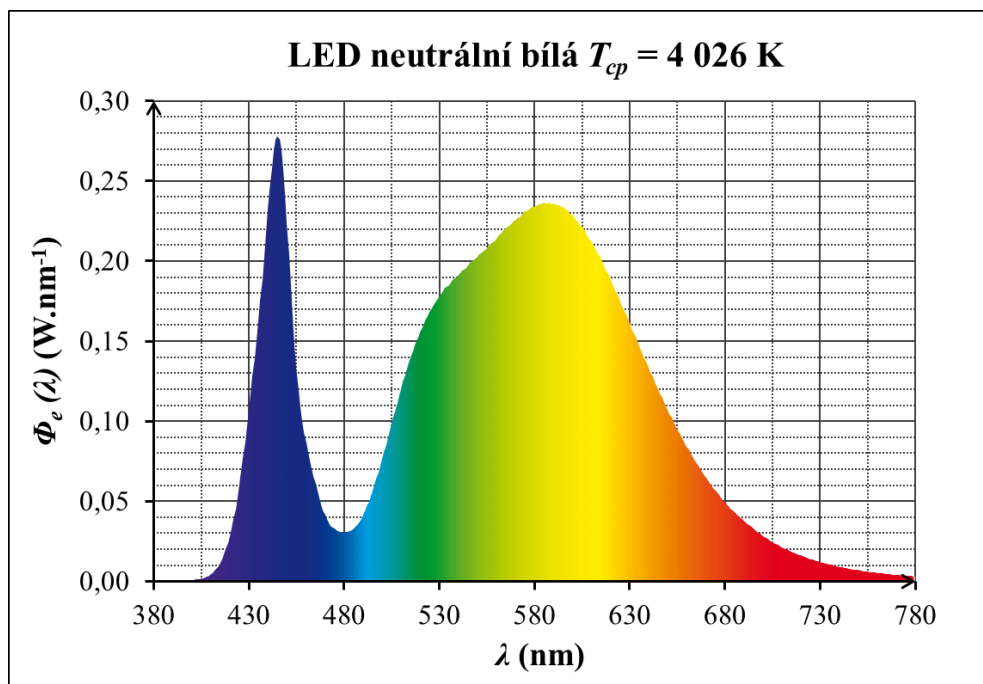
Pro každou z naměřených hodnot je zároveň k dispozici spektrum vyzařovaného světla. Ukázky vybraných spekter znázorňují obr. 6.7, obr. 6.8, a obr. 6.9. V souladu s teoretickými předpoklady s rostoucí hodnotou náhradní teploty chromatičnosti vzrůstá i podíl modré složky světla ve spektru.



Obr. 6.7 Spektrální průběh samostatně svítících LED PC Amber



Obr. 6.8 Spektrální průběh míšeného světla z LED PC Amber a neutrálně bílých LED



Obr. 6.9 Spektrální průběh samostatně svítících neutrálně bílých LED

6.1.2 Měření v kulovém integrátoru

Účelem měření v kulovém integrátoru bylo ověřit, zda teoretické hodnoty udané výrobcem odpovídají reálným provozním parametrům svítidla. Pro měření se využilo spektrometru JETI Specbos 1211 UV, který byl umístěn na optický výstup z integrátoru. Přes kabel se spektrometr propojil s laboratorním PC a měření probíhalo v softwaru JETI LiVal. Svítidlo samotné se zavěsilo na karabinu přes kovový prstenec a elastické vlákno obepínající kostru svítidla na dvou koncích, viz obr. 6.10 a obr. 6.11.



Obr. 6.10 Uchycení svítidla v kulovém integrátoru



Obr. 6.11 Sestava měření v kulovém integrátoru

Prvním krokem bylo provedení korekce na neaktivní část svítidla za pomoci korekční žárovky. Svítidlo v tomto kroku zůstává zhasnuté – bez napájení. Dále došlo k proměření několika režimů nastavení svítidla, kde výsledné světelně-technické veličiny ukazuje tab. 6.2. Porovnání naměřených a teoretických hodnot parametrů svítidla pak poskytuje tab. 6.3.

Tab. 6.2 Světelně-technické parametry svítidla Tungstram SLBt

Nastavení svítidla	T_{cp} (K)	R_a (-)	Φ (lm)	P (W)	M_z (lm.W ⁻¹)
Režim 1 800 K	1 756	57,5	2 547	34,6	73,6
Režim 2 200 K	2 205	69,1	3 825	46,5	82,3
Režim 2 800 K	2 815	74,5	6 894	74,0	93,2
Režim 3 400 K	3 422	75,1	5 737	56,8	101,0
Režim 4 000 K	4 044	73,5	4 817	45,4	106,1

Měrný výkon se spočítal dle vztahu (1.1) a pro první řádek tabulky platí:

$$M_z = \frac{\Phi}{P} = \frac{2547}{34,6} \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} = 73,6 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$$

Tab. 6.3 Srovnání vybraných teoretických a naměřených parametrů svítidla Tungstram SLBt

Parametry	Teoretické od výrobce		Naměřené v laboratoři	
	LED 1 800 K	LED 4 000 K	LED 1 800 K	LED 4 000 K
Φ (lm)	1 000 – 2 500	1 030 – 4 800	240 – 2 547	493 – 4 817
M_z (lm.W ⁻¹)	77	115	73,6	106,1
R_a (-)	> 60	> 70	57,5	73,5
T_{cp} (K)	1 800	4 000	1 756	4 044

Z hlediska náhradní teploty chromatičnosti se obě řady LED (1 800 K a 4 000 K) liší od teoretické hodnoty o 44 K. Index podání barev u amber LED vyšel nižší, než by teoreticky měl – 57,5 oproti minimální hodnotě 60. Zároveň je vidět, že nejvyšších hodnot dosahuje v režimech 2 800 K a 3 400 K, kde se svícení účastní oba typy LED.

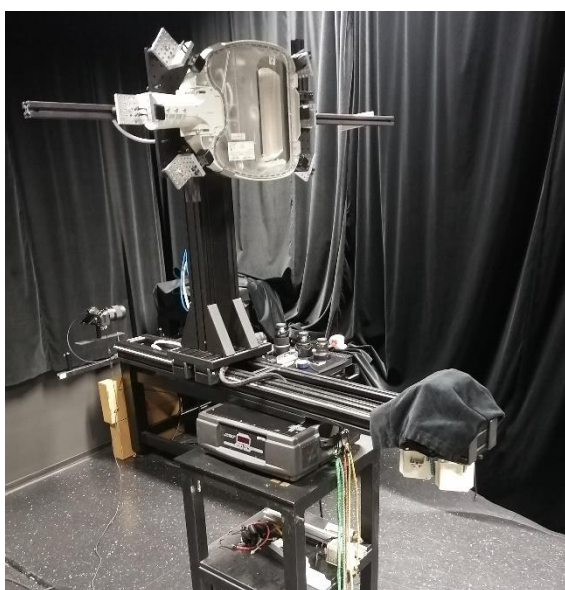
Maximální světelný tok se shoduje s teoretickým, nicméně minimální hodnota se značně liší – 240 lm oproti 1000 lm u amber LED a 493 lm oproti 1030 lm u neutrálně bílých LED. Výrobce pravděpodobně udává minimální hodnotu světelného toku, která je doporučena k používání ve veřejném osvětlení. Nejvyšší světelný tok byl zaznamenán u režimu 2 800 K, kde se obě řady LED využívají téměř naplno – amber LED na 100 % a neutrálně bílé LED na 89 %.

Měrný výkon podle očekávání vzrůstá spolu s rostoucí náhradní teplotou chromatičnosti, a tedy vyšším využitím neutrálně bílých LED. Nejnižší hodnota u amber LED – 73,6 lm.W⁻¹ – jen o málo nespĺňuje teoreticky očekávanou hodnotu 77 lm.W⁻¹. Do úvahy je ale nutné zahrnout nejistotu měření kulového integrátoru o velikosti přibližně 6,5 %. Skutečná hodnota měrného výkonu by tímto způsobem mohla mít velikost až 78,7 lm.W⁻¹ a splňovat tak dané požadavky. Nejvyšší měrný výkon vykazují samostatně svítící neutrálně bílé LED dosahující hodnoty 106,1 lm.W⁻¹, kde je ovšem rozdíl oproti teoretickým 115 lm.W⁻¹ znatelně vyšší.

6.1.3 Měření na goniofotometru spektrometrem JETI Specbos 1211 UV

Cílem měření a zpracování dat v této kapitole je zobrazení křivek svítivosti a náhradní teploty chromatičnosti svítidla SLBt v rovinách C - γ , které lze posléze porovnat s referenčními křivkami od výrobce, případně zhodnotit rovnoměrnost rozložení náhradní teploty chromatičnosti okolo svítidla.

Nejdříve bylo nutno svítidlo upnout do držáku a zabezpečit jej proti nežádoucím pohybům. Následně došlo k připevnění svítidla ke kostře goniofotometru VUT (viz obr. 6.12). Na stativ ve vzdálenosti $r = 2,02$ m od goniofotometru se umístil spektrometr JETI Specbos 1211 UV. Pomocí externích laserů se pozice spektrometru nastavila do požadované výšky. Následovala kalibrace goniofotometru přes připojení k PC softwarem GPM. Výslednou aparaturu zachycuje obr. 6.13.



Obr. 6.12 Svítidlo upnuté na goniofotometru



Obr. 6.13 Simulace měření křivek svítivosti

Tab. 6.4 Záznam z hodnot měření křivek svítivosti pro $T_{cp} = 1\,800$ K

Č. měření	T_{cp} (K)	C (°)	γ (°)	E (lx)	I (cd)
1	1 808	0	75	5,0	20,2
2	1 822	0	70	7,2	29,3
3	1 811	0	65	9,7	39,5
...
103	1 731	90	45	190,2	776,3
104	1 733	90	40	195,2	796,4
105	1 737	90	35	203,6	830,7
...
206	1 758	180	10	295,4	1205,5
207	1 761	180	5	273,9	1117,6
208	1 764	180	0	257,5	1050,6

Při samotném měření zaznamenával data software JETI LiVal. Byla provedena čtyři měření pro vybrané náhradní teploty chromatičnosti: 1 800 K, 2 200 K, 2 800 K a 4 000 K. Při každém z nich software GPM postupně měnil pozici svítidla změnou parametrů C (od 0° do 180°) a γ (od 75° do 0°), viz tab. 6.4. Čas měření celého cyklu pro jednu náhradní teplotu chromatičnosti se pohyboval okolo 90 min.

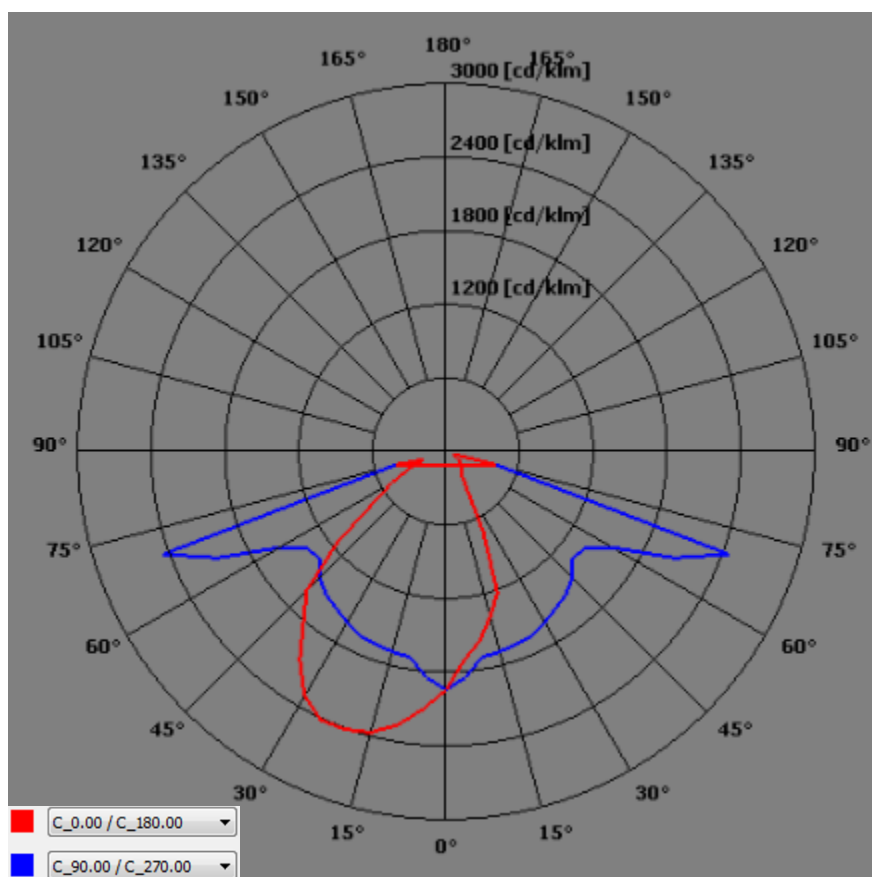
Svítivosti v jednotlivých bodech lze vypočíst při znalosti vzdálenosti $r = 2,02$ m dle vztahu:

$$I = E \cdot r^2 \quad (\text{cd}) \quad (6.1)$$

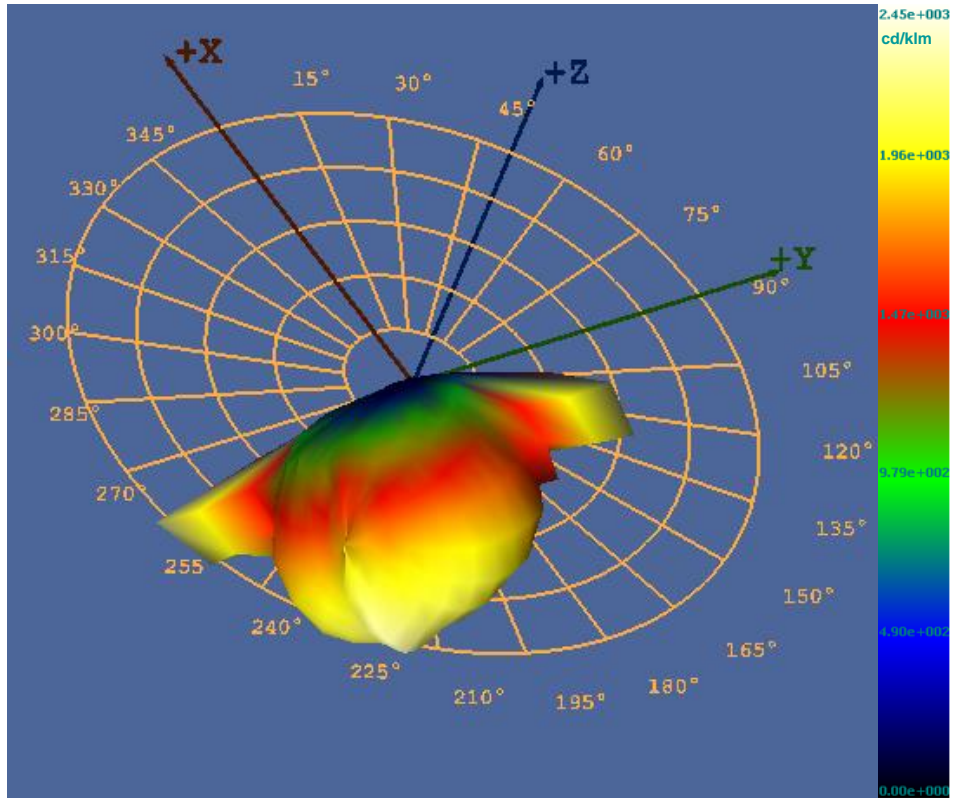
Pro první řádek tab. 6.4 pak platí:

$$I = 5,0 \cdot 2,02^2 \text{ cd} \doteq 20,2 \text{ cd}$$

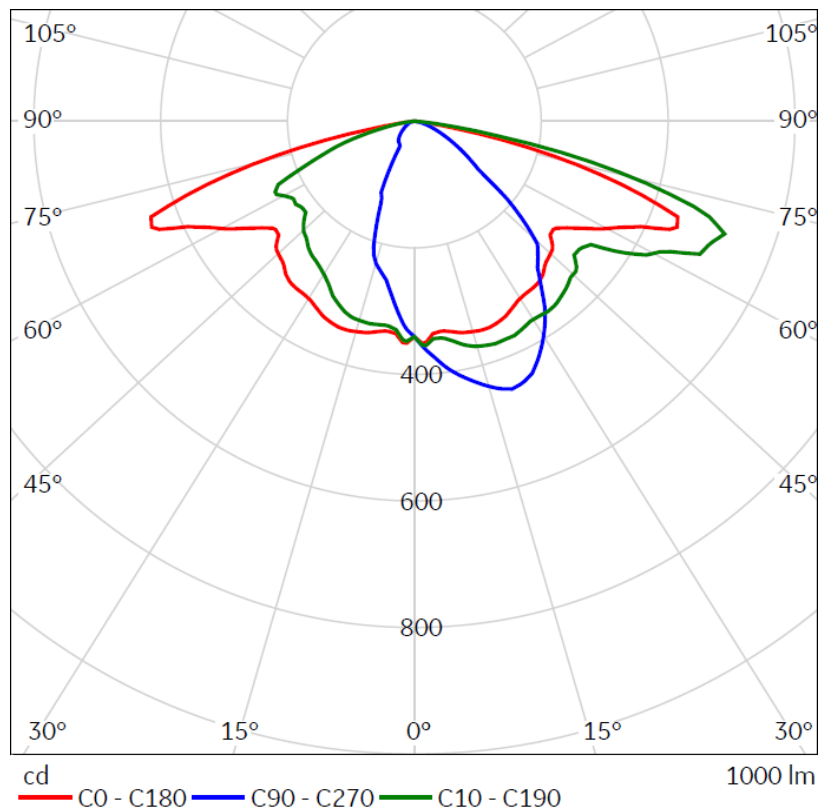
Výsledné rozložení křivek svítivosti pro $T_{cp} = 4\,000$ K zachycují obr. 6.14 a obr. 6.15. Křivky byly vykresleny v softwaru ILEXA Ray-Viever a z neznámých důvodů zde došlo k prohození rovin $C0-C180$ a $C90-C270$, které se nepodařilo změnit. Přesto lze konstatovat, že skutečné křivky svítivosti se do velké míry podobají teoretickým, které udává výrobce [71], viz obr. 6.16.



Obr. 6.14 Křivky svítivosti LED Tungstam SLBt v polárních souřadnicích

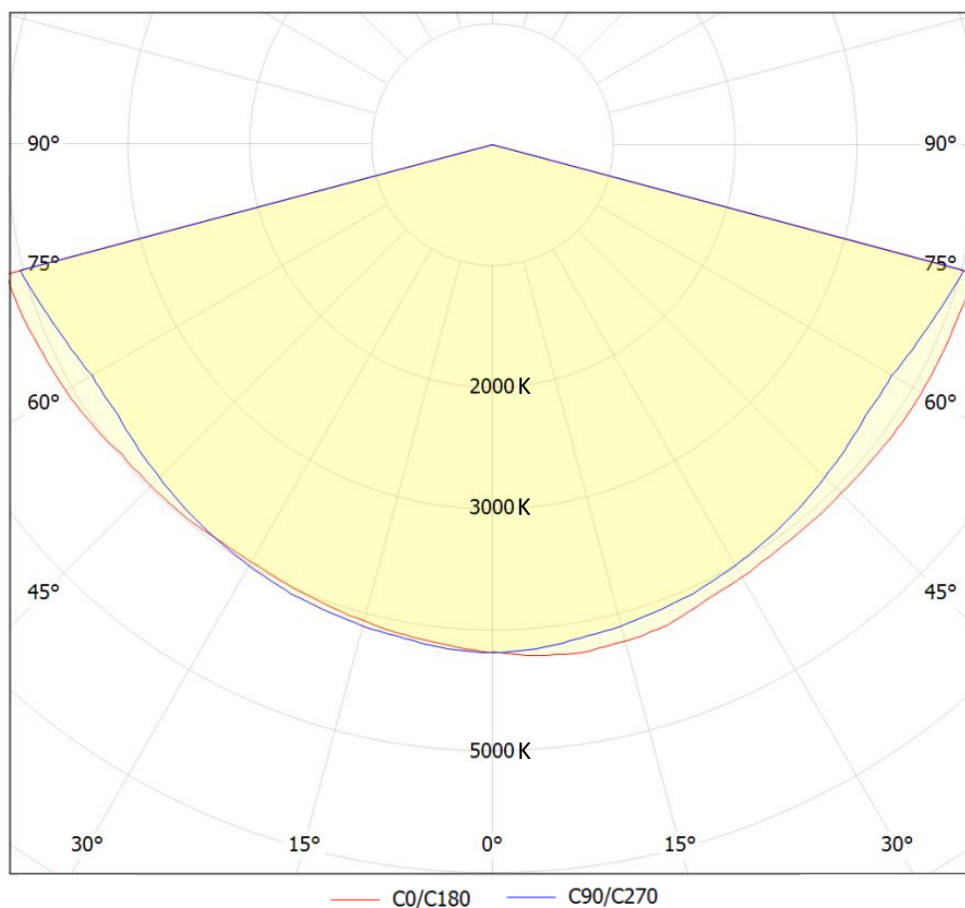


Obr. 6.15 Křivky svítivosti LED Tungsram SLBt v 3D prostoru



Obr. 6.16 Křivky svítivosti Tungsram SLBt udané výrobcem [71]

Rozložení křivek náhradní teploty chromatičnosti pro režim $T_{cp} = 4\,000\text{ K}$ ukazuje obr. 6.17. Hodnoty se zde v rovinách $C0-C180$ a $C90-270$ pohybují v intervalu od $3\,801\text{ K}$ do $4\,254\text{ K}$. Nejnížší hodnota byla naměřena při nastavení $C = 90^\circ$ a $\gamma = 55^\circ$, nejvyšší pak při $C = 0^\circ$ a $\gamma = 10^\circ$. Příčinou zmíněného rozptylu hodnot může být rozdílné množství světla, které spektrometr při jednotlivých nastaveních $C-\gamma$ zachycuje. V přímém pohledu zaznamenává největší množství světla a hodnota náhradní teploty chromatičnosti tak při malých úhlech γ vychází vyšší. Větší hodnota úhlu γ pak zpravidla vede k nižší hodnotě náhradní teploty chromatičnosti.



Obr. 6.17 Křivky náhradní teploty chromatičnosti pro režim $T_{cp} = 4\,000\text{ K}$

6.1.4 Měření na goniofotometru jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP

Za účelem získání jasových snímků svítidla došlo k využití jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, jenž byl navržen a sestaven na ústavu energetiky FEKT VUT. Svítidlo zůstalo upnuté v goniofotometru a na stativ se namísto spektroradiometru JETI umístil jasový analyzátor. Simulaci měření znázorňují obr. 6.18 a obr. 6.19.



Obr. 6.18 Simulace měření jasu 1

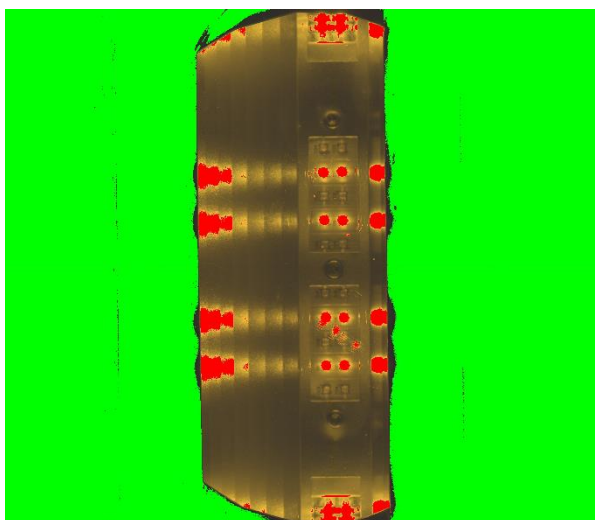


Obr. 6.19 Simulace měření jasu 2

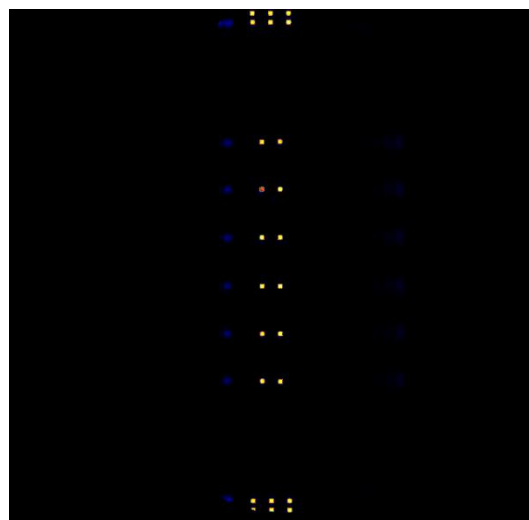
Jasový analyzátor se přes kabel propojil s PC a pomocí softwaru LumiDISP došlo k nastavení požadavků měření. Vzhledem k vysokému jasu čipů světelných diod bylo nutno snížit množství světla dopadající na čočku jasového analyzátoru aplikací ND1000 filtru, který se přišrouboval na objektiv fotoaparátu. Daný filtr tisícinásobně snižuje jas měřených bodů. Bez něj by došlo k přebuzení jednotlivých RGB kanálů jasového analyzátoru a snímky by nemělo smysl zpracovávat.

Optimálního vybuzení RGB kanálů bylo dosaženo nastavením parametrů „Aperture“, „Shutter“ a „ISO“. Parametr „Aperture“ – clonové číslo – je poměrem ohniskové vzdálenosti optické soustavy a průměru vstupní čočky. „Shutter“ – čas závěrky – určuje časový interval, po který je čočka otevřená při zachycování snímku. Nakonec „ISO“ – hodnota zesílení – udává míru zesílení signálu ze snímače. Zvýšením hodnoty libovolného z parametrů lze dosáhnout vyššího vybuzení RGB kanálů.

Samotné měření se skládalo ze čtyř částí vždy pro jinou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti: 1 800 K, 2 200 K, 2 800 K a 4 000 K. Natáčení svítidla pomocí softwaru GPM probíhalo v rozmezí $C = 0 - 180^\circ$ po kroku 15° a $\gamma = 0 - 75^\circ$ po kroku 5° . Příklad pořízeného jasového snímku zachycuje obr. 6.20.



Obr. 6.20 Jasový snímek



Obr. 6.21 HDR snímek

Každá část aktivní plochy svítidla – LED čipy, hliníkové reflektory, meziplošky – má jiný jas. Na pořízeném snímku se tak vyskytují místa s podbuzenými nebo naopak přebuzenými kanály RGB. Proto bylo nutno pro jednotlivé pozice svítidla pořídit čtyři snímky s různým nastavením času závěrky fotoaparátu, aby u každé části aktivní plochy došlo k optimálnímu vybuzení RGB kanálů jasového analyzátoru. Clonové číslo a hodnota zesílení zůstaly pro všechna měření konstantní, viz tab. 6.5. Ze skupiny čtyř snímků se poté vytvořil jeden tzv. HDR (High Dynamic Range) snímek, který sjednocoval všechny plochy s ideálním vybuzením dohromady. Příklad HDR snímku je na obr. 6.21.

Tab. 6.5 Nastavení parametrů fotoaparátu pro různé snímky

Označení snímku	Aperture (–)	Shutter (s)	ISO (–)
1	5,6	1/125	100
2		1/20	
3		1/1,6	
4		2,5	

Na základě jasu v jednotlivých bodech HDR snímku lze poté pomocí vytvořeného aritmetického modulu (výpočetní kód) spočítat hodnotu náhradní teploty chromatičnosti v každém bodě snímku váhovanou podle jasu. Zmíněný výpočet konkrétněji popisuje rovnice (6.2),

$$T_{cpV} = \frac{\sum T_{cp}(x, y) \cdot L(x, y)}{\sum L(x, y)} \quad (\text{K}) \quad (6.2)$$

kde:

T_{cpV}	Náhradní teplota chromatičnosti váhovaná podle jasu	(K)
$T_{cp}(x, y)$	Náhradní teplota chromatičnosti pixelu snímku o souřadnicích x, y	(K)
$L(x, y)$	Jas pixelu snímku o souřadnicích x, y	(K)

Každá ze čtyř měřených částí obsahovala celkem 1 064 jasových snímků, z nichž se vygenerovalo 266 HDR snímků. Jednotlivé snímky o počáteční velikosti cca 20 MB nakonec po zpracování zabraly přibližně 550 GB místa na disku počítače.

Zároveň bylo nutno zprovoznit pomocí softwaru MacroTools opakovanou sekvenci úkonů na PC, které se musely vykonat pro pořízení a následné zpracování jasových snímků. Měření a zpracování jedné ze čtyř částí trvalo v součtu přibližně 3,5 hodiny. Celý proces tak probíhal minimálně 14 hodin čistého času, při kterých nebylo možno PC k ničemu jinému využívat a uživatel musel po určitém intervalu přenastavit parametry a pouštět měření znovu. Navíc docházelo k tomu, že software MacroTools přestal v průběhu měření pracovat správně, a k dalším chybám, jež dále prodlužovaly celý proces.

Z předchozího tedy vyplývá, že sběr a vyhodnocování dat tímto způsobem je značně nepraktické, časově i paměťově náročné, a do budoucna jej bude nutné zautomatizovat a zdokonalit. Výsledné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti ve vybraných nastaveních pozice svítidla ukazuje tab. 6.6. Zároveň zde dochází k porovnání s naměřenými hodnotami náhradní teploty chromatičnosti spektrometrem JETI. Všechny hodnoty se vztahují k rovině C0-C180.

Tab. 6.6 Srovnání hodnot náhradních teplot chromatičnosti měřicích přístrojů v rovině C0-C180

Poloha svítidla	JETI Specbos 1211 UV	LDA LumiDISP	Relativní odchylka LDA
γ (°)	$T_{cp,J}$ (K)	$T_{cp,L}$ (K)	δ_{LDA} (%)
0	1 766	1 759	-0,4
25	1 766	1 745	-1,2
50	1 778	1 680	-5,5
75	1 808	1 584	-12,4
0	2 224	2 515	13,1
25	2 231	2 473	10,9
50	2 237	2 129	-4,8
75	2 260	2 040	-9,7
0	2 811	3 279	16,7
25	2 811	3 070	9,2
50	2 798	2 798	0,0
75	2 786	2 716	-2,5
0	4 185	4 294	2,6
25	4 152	4 263	2,7
50	4 073	4 110	0,9
75	4 132	3 982	-3,6

Relativní odchylka se spočítala dle vztahu:

$$\delta_{LDA} = \frac{T_{cp-L} - T_{cp-J}}{T_{cp-J}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (6.3)$$

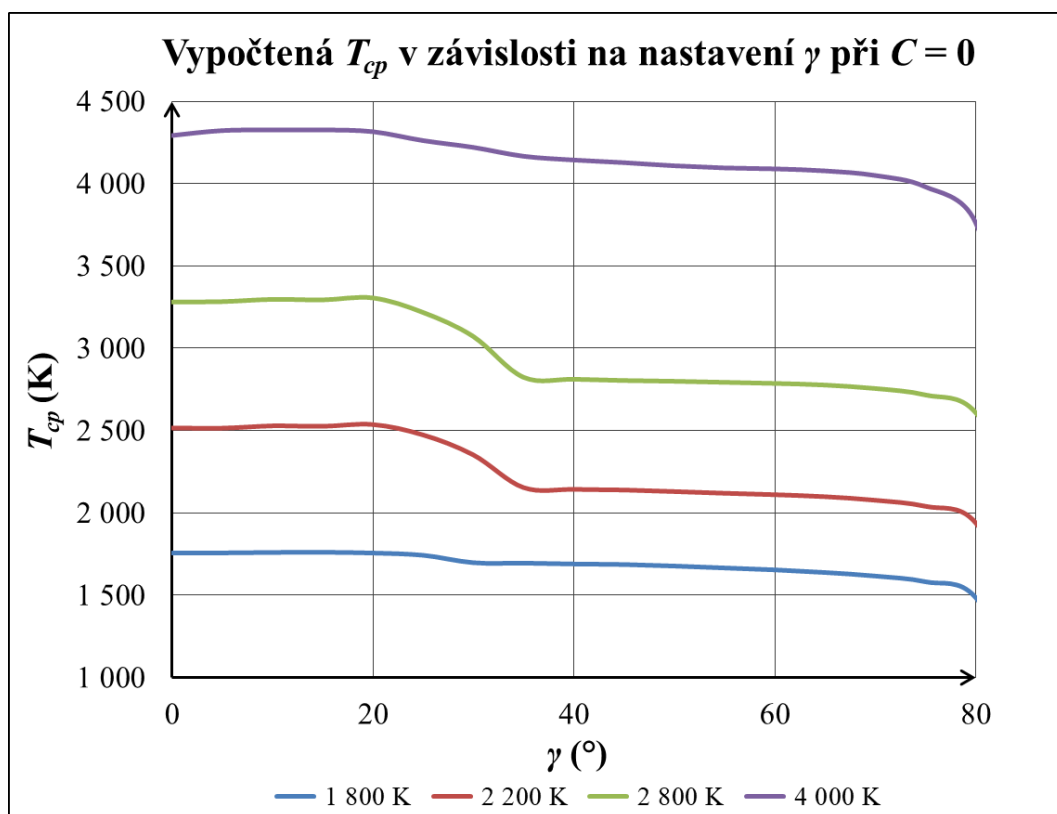
T_{cp-J} Náhradní teplota chromatičnosti změřena spektrometrem JETI (K)

T_{cp-L} Náhradní teplota chromatičnosti určena ze snímku jasového analyzátoru LDA (K)

Pro první řádek tab. 6.6 platí:

$$\delta_{LDA} = \frac{1759 - 1766}{1766} \cdot 100 \% = -0,4 \%$$

Relativní odchylky naměřených hodnot jasového analyzátoru LDA-LumiDISP od referenčních hodnot spektrometru JETI v některých případech přesahují $\pm 10 \%$ a dosahují velikosti až $16,7 \%$. Přesnost určování náhradní teploty chromatičnosti váhování jasu snímků je tak prozatím nedostatečná a do budoucna bude nutno algoritmus výpočtu modifikovat. Dále lze pozorovat, že s rostoucí hodnotou úhlu γ se snižuje vypočtená hodnota náhradní teploty chromatičnosti. Ve větším detailu tento jev zachycuje obr. 6.22.



Obr. 6.22 Trend vypočtené náhradní teploty chromatičnosti v závislosti na nastavení úhlu γ

S rostoucím úhlem γ se zmenšuje aktivní plocha, kterou jasový analyzátor snímá. Snižuje se tak počet bodů, které vstupují do výpočtu a roste vliv odrazných hliníkových ploch svítidla oproti ploše čipů LED. Hliníkový povrch odráží lépe část spektra s delšími vlnovými délkami, což vede ke snížení výsledné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti. Po překročení hranice $\gamma = 75^\circ$ hodnotu T_{cp} již nemá smysl počítat, dochází k příliš velké chybě.

Nutno také dodat, že změna nastavení poloroviny C nemá v přímém pohledu ($\gamma = 0^\circ$) na výsledné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti určené jasovým analyzátozem zásadní vliv, viz tab. 6.7. Maximální absolutní odchylka vychází nejvíce 49 K pro režim svítidla s $T_{cp} = 2\,800$ K.

Tab. 6.7 Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti určeny jasovým analyzátozem při $\gamma = 0$

Nastavení poloroviny	Náhradní teplota chromatičnosti pro různé režimy svítidla (K)			
	Režim 1 800 K	Režim 2 200 K	Režim 2 800 K	Režim 4 000 K
C ($^\circ$)				
0	1 759	2 515	3 279	4 294
15	1 755	2 517	3 284	4 294
30	1 754	2 518	3 283	4 293
45	1 753	2 517	3 282	4 292
60	1 752	2 515	3 281	4 290
75	1 751	2 514	3 280	4 290
90	1 751	2 513	3 280	4 291
105	1 751	2 513	3 280	4 290
120	1 752	2 514	3 281	4 291
135	1 751	2 517	3 322	4 297
150	1 751	2 519	3 323	4 299
165	1 752	2 518	3 328	4 300
180	1 751	2 520	3 295	4304
ΔT_{cp_max} (K)	8	7	49	14

Další možností určení náhradní teploty chromatičnosti je tzv. maskování HDR jasového snímku v softwaru LumiDISP. Princip spočívá opět ve využití stejného algoritmu na výpočet náhradní teploty chromatičnosti jako u metody váhování podle jasu. V tomto případě se určí minimální hodnota jasu, při které budou pixely snímku, které ji splňují, zahrnuty do výpočtu. Ostatní pixely jsou ignorovány a na výslednou hodnotu nemají žádný vliv. Při samotném výpočtu pak pixely mohou a nemusí být váhovány podle jasu, viz tab. 6.8. a tab. 6.9.

Tab. 6.8 Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti vypočtené pomocí maskování v rovině $C0-180$ a $\gamma = 0$

JETI Specbos	$L > 1\,000\text{ cd.m}^{-2}$		$L > 1\,000\,000\text{ cd.m}^{-2}$		Bez maskování
	T_{cp_P} (K)	T_{cp_V} (K)	T_{cp_P} (K)	T_{cp_V} (K)	
T_{cp_J} (K)					T_{cp_L} (K)
1 766	1 759	1 774	1 758	1 785	1 759
2 224	2 348	2 528	3 010	2 611	2 515
2 811	2 961	3 294	3 214	3 430	3 279
4 185	4 302	4 315	4 201	4 377	4 294

Tab. 6.9 Odchylky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty

Reference	$L > 1\,000\text{ cd.m}^{-2}$		$L > 1\,000\,000\text{ cd.m}^{-2}$		Bez maskování
	δ_P (%)	δ_V (%)	δ_P (%)	δ_V (%)	δ_{LDA} (%)
1 766	-0,4	0,5	-0,5	1,1	-0,4
2 224	5,6	13,7	35,3	17,4	13,1
2 811	5,3	17,2	14,3	22,0	16,7
4 185	2,8	3,1	0,4	4,6	2,6

T_{cp_J}	Náhradní teplota chromatičnosti změřena spektrometrem JETI	(K)
T_{cpm_P}	Aritmetický průměr hodnot náhr. tep. chromatičnosti vybraných pixelů	(K)
T_{cpm_V}	Náhr. tep. chromatičnosti vypočtena váhováním podle jasů vybraných pixelů	(K)
T_{cp_L}	Náhr. tep. chromatičnosti vypočtena váhováním podle jasů bez maskování	(K)
δ_P	Relativní odchylka maskování při výpočtu pomocí aritmetického průměru	(%)
δ_V	Relativní odchylka maskování při výpočtu váhováním podle jasů	(%)
δ_{LDA}	Relativní odchylka při výpočtu váhováním podle jasů bez maskování	(%)

Veškeré údaje se vztahují k polorovině $C0$ a $\gamma = 0$. Je vidět, že u režimu 1 766 K má každá z metod podobnou přesnost, kdy maximální relativní odchylka nepřekračuje 1,1 %. U ostatních režimů vyšla hodnota náhradní teploty chromatičnosti vždy vyšší nezávisle na způsobu určení.

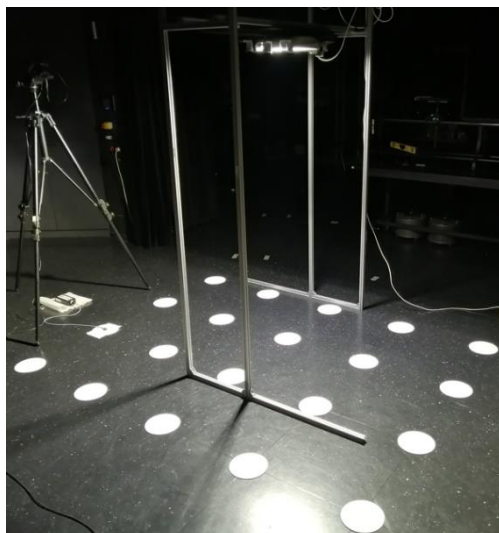
Největší přesnost maskování vychází při určování náhradní teploty chromatičnosti pomocí aritmetického průměru u pixelů s jasnem nad $1\,000\text{ cd.m}^{-2}$. Maximální relativní odchylka zde nepřevyšuje hodnotu 5,6 %. Nabízí se zde dvě nejpravděpodobnější příčiny. První z nich je fakt, že pixely vyzařovací plochy neutrálně bílých LED (4 000 K) mají vyšší jas než pixely u PC Amber LED (1 800 K) a ve výpočtu jsou přesto brány rovnocenně, což vede k nižší výsledné hodnotě náhradní teploty chromatičnosti. Druhou z příčin mohou být odrazné hliníkové plochy v aktivní části svítidla, které mají nižší jas a zároveň lépe odrážejí část světla s delšími vlnovými délkami. Tyto pixely mají ve výpočtu stejnou váhu jako pixely zářících LED čipů, což ještě více snižuje výslednou hodnotu T_{cp} .

Ze všech dostupných metod určení náhradní teploty chromatičnosti pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP tak vykazuje prozatím nejvyšší přesnost výpočet T_{cp} aritmetickým průměrem pixelů při maskování s $L > 1\,000\text{ cd.m}^{-2}$.

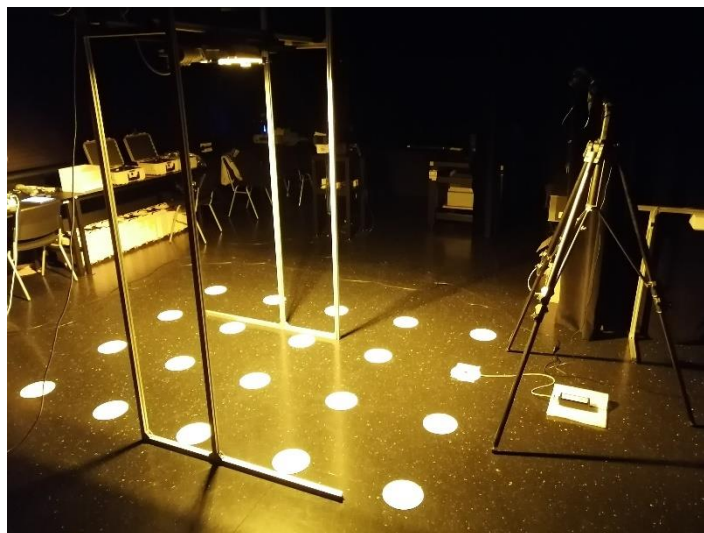
Hodnoty naměřené spektrometrem JETI se zde berou jako referenční, nicméně pro úplnost je nutno uvést také maximální relativní chybu spektrometru JETI oproti skutečným hodnotám, která se pohybuje okolo 3 % [31].

6.1.5 Měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem

Za účelem získání více dat k porovnání došlo v laboratoři k dalšímu měření s využitím spektorradiometru JETI a jasového analyzátoru LDA-Lumidisp. Objektem měření byl tentokrát osvětlovaný povrch pod svítidlem, kde se rozmístilo 20 kruhových disků o průměru 19 cm s bílým difuzním povrchem do mřížky 5x4, viz obr. 6.23 a obr. 6.24.



Obr. 6.23 Měření povrchu pod svítidlem 1



Obr. 6.24 Měření povrchu pod svítidlem 2

Svítidlo se připevnilo k hliníkové konstrukci do výšky 1,93 m nad podlahou. Na výstup spektorradiometru JETI byl přidán nástavec s 1 m dlouhým optickým vláknem a snímačem na jeho konci. Zároveň se vedle mřížky disků umístil stativ s jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP zachycujícím celou měřenou scénu. Oba přístroje byly přes kabel propojeny s počítačem přímo v laboratoři. Spektorradiometr bylo nutno v průběhu měření posouvat tak, aby snímač vždy dosáhl na střed měřeného disku. Jasový analyzátor zůstal po celou dobu v nezměněné poloze.

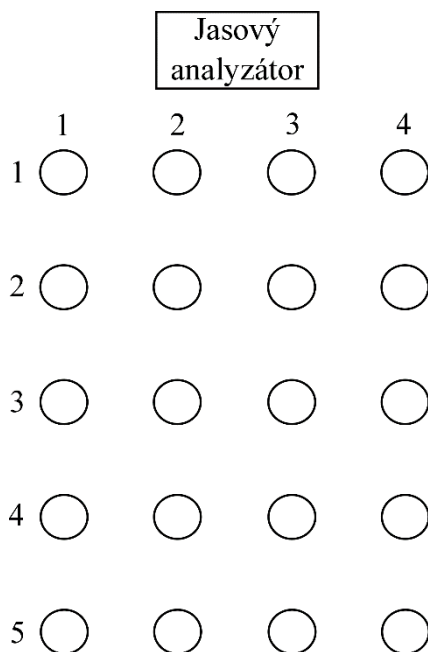
Postup spočíval v měření pěti různých režimů svítidla s odlišnou náhradní teplotou chromatičnosti – 1 800 K, 2 200 K, 2 800 K, 3 400 K a 4 000 K. Výsledné naměřené a vypočtené hodnoty ukazuje tab. 6.10. Jedná se o průměrné hodnoty z povrchů všech 20 měřených disků.

Tab. 6.10 Průměrné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti na povrchu disků

JETI Specbos 1211 UV	LDA LumiDISP	Relativní odchylka LDA
T_{cp_Jp} (K)	T_{cp_Lp} (K)	δ_{LDA} (%)
1 740	1 749	0,5
2 185	2 193	0,4
2 791	2 835	1,6
3 388	3 490	3,0
4 009	4 233	5,6

Relativní odchylka v tomto případě dosahuje maximální hodnoty 5,6 %. U měření odraženého světla od povrchů s nízkým jasem se tak může jevit, že jasový analyzátor dosahuje vyšší přesnosti než u měření aktivní plochy svítidla, kde maximální $\delta_{LDA} = 16,7\%$ (tab. 6.6 v kapitole 6.1.4). Nutno ovšem podotknout, že zde se jedná o průměrnou hodnotu z 20 různě rozmístěných odrazových ploch.

Spektroradiometr JETI v této úloze měří světlo přímé, kdežto jasový analyzátor LDA-LumiDISP snímá světlo odražené od bílého difúzního povrchu disků. Podrobnější popis této problematiky a chyb s ní spojených je rozvinut v následující kapitole 6.2.1.



Obr. 6.25 Pozice disků při měření

Rozložení náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem vychází z pozic disků znázorněných na obr. 6.25. Tab. 6.11 pak ukazuje naměřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti na jednotlivých pozicích spektroradiometrem JETI. Tab. 6.12 vypovídá o relativních odchylkách T_{cp} od referenční hodnoty pro daný režim svícení.

Tab. 6.11 Změřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti spektrometrem JETI na jednotlivých discích

Reference	Pozice	T_{cp} (K)			
		1	2	3	4
$T_{cp} = 1\,748\text{ K}$	1	1 719	1 720	1 731	1 740
	2	1 725	1 731	1 741	1 750
	3	1 742	1 749	1 758	1 771
	4	1 736	1 740	1 748	1 758
	5	1 725	1 728	1 738	1 751
$T_{cp} = 2\,196\text{ K}$	1	2 148	2 154	2 176	2 187
	2	2 168	2 179	2 198	2 205
	3	2 185	2 192	2 219	2 230
	4	2 175	2 181	2 206	2 210
	5	2 158	2 161	2 182	2 195
$T_{cp} = 2\,802\text{ K}$	1	2 725	2 735	2 777	2 799
	2	2 762	2 777	2 818	2 843
	3	2 778	2 799	2 856	2 874
	4	2 767	2 774	2 824	2 846
	5	2 733	2 741	2 784	2 811
$T_{cp} = 3\,407\text{ K}$	1	3 293	3 306	3 366	3 411
	2	3 339	3 371	3 438	3 477
	3	3 359	3 402	3 497	3 531
	4	3 338	3 360	3 435	3 481
	5	3 290	3 300	3 359	3 406
$T_{cp} = 4\,026\text{ K}$	1	3 877	3 896	3 975	4 037
	2	3 932	3 974	4 077	4 156
	3	3 957	4 037	4 172	4 227
	4	3 926	3 962	4 069	4 149
	5	3 866	3 886	3 962	4 034

Tab. 6.12 Relativní odchylky hodnot náhradní teploty chromatičnosti spektrometru JETI od referencie

		δ (%)			
Reference	Pozice	1	2	3	4
$T_{cp} = 1\ 748\ \text{K}$	1	-1,7	-1,6	-1,0	-0,5
	2	-1,3	-1,0	-0,4	0,1
	3	-0,3	0,1	0,6	1,3
	4	-0,7	-0,4	0,0	0,6
	5	-1,3	-1,1	-0,6	0,1
$T_{cp} = 2\ 196\ \text{K}$	1	-2,2	-1,9	-0,9	-0,4
	2	-1,3	-0,8	0,1	0,4
	3	-0,5	-0,2	1,1	1,5
	4	-0,9	-0,7	0,5	0,6
	5	-1,7	-1,6	-0,6	-0,1
$T_{cp} = 2\ 802\ \text{K}$	1	-2,7	-2,4	-0,9	-0,1
	2	-1,4	-0,9	0,6	1,5
	3	-0,9	-0,1	1,9	2,6
	4	-1,3	-1,0	0,8	1,6
	5	-2,5	-2,2	-0,7	0,3
$T_{cp} = 3\ 407\ \text{K}$	1	-3,3	-3,0	-1,2	0,1
	2	-2,0	-1,1	0,9	2,1
	3	-1,4	-0,1	2,6	3,6
	4	-2,0	-1,4	0,8	2,2
	5	-3,4	-3,1	-1,4	0,0
$T_{cp} = 4\ 026\ \text{K}$	1	-3,7	-3,2	-1,3	0,3
	2	-2,3	-1,3	1,3	3,2
	3	-1,7	0,3	3,6	5,0
	4	-2,5	-1,6	1,1	3,0
	5	-4,0	-3,5	-1,6	0,2

Díky podmíněnému formátování je vidět, že s rostoucí hodnotou referenční náhradní teploty chromatičnosti se zároveň zvyšuje chyba měření. Maximální relativní odchylka $\delta = 5\ \%$ nastává při měření s referenční $T_{cp} = 4\ 026\ \text{K}$. Jedná se o disk s pozicí [3;4], který se nachází v nejvíce osvětleném místě pod svítidlem. Zároveň na tomto disku dochází při každém režimu k nejvyšší kladné odchylce od referenční hodnoty.

Při měření náhradní teploty chromatičnosti pod libovolným svítidlem by tímto způsobem mělo docházet k relativním odchylkám v řádech jednotek procent, přičemž je pravděpodobné, že při měření svítidel s vyšší náhradní teplotou chromatičnosti ($T_{cp} > 4\ 000\ \text{K}$) přesáhne odchylka hodnotu $5\ \%$.

Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti určené ze snímků jasu analyzátoru LDA-LumiDISP na jednotlivých discích a hodnoty relativních odchylek od referenční hodnoty pak ukazují tab. 6.13 a tab. 6.14.

Tab. 6.13 Vypočtené hodnoty T_{cp} na jednotlivých discích na základě měření jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP

Reference	Pozice	T_{cp} (K)			
		1	2	3	4
$T_{cp} = 1\,748\text{ K}$	1	1 725	1 728	1 741	1 746
	2	1 734	1 738	1 755	1 755
	3	1 746	1 762	1 771	1 773
	4	1 742	1 748	1 760	1 768
	5	1 740	1 738	1 751	1 757
$T_{cp} = 2\,196\text{ K}$	1	2 151	2 153	2 183	2 196
	2	2 170	2 179	2 214	2 208
	3	2 185	2 211	2 235	2 234
	4	2 173	2 186	2 221	2 224
	5	2 170	2 161	2 193	2 210
$T_{cp} = 2\,802\text{ K}$	1	2 759	2 778	2 819	2 844
	2	2 801	2 811	2 872	2 873
	3	2 816	2 863	2 909	2 909
	4	2 800	2 813	2 877	2 888
	5	2 785	2 795	2 834	2 846
$T_{cp} = 3\,407\text{ K}$	1	3 383	3 402	3 467	3 507
	2	3 435	3 453	3 530	3 554
	3	3 452	3 525	3 591	3 584
	4	3 437	3 477	3 541	3 590
	5	3 412	3 424	3 512	3 523
$T_{cp} = 4\,026\text{ K}$	1	4 107	4 120	4 207	4 251
	2	4 156	4 168	4 265	4 310
	3	4 168	4 283	4 365	4 359
	4	4 144	4 238	4 284	4 378
	5	4 129	4 177	4 254	4 298

Tab. 6.14 Relativní odchytky hodnot náhradní teploty chromatičnosti analyzátoru LDA-LumiDISP od reference

Reference	Pozice	δ (%)			
		1	2	3	4
$T_{cp} = 1\ 748\ \text{K}$	1	-1,3	-1,1	-0,4	-0,1
	2	-0,8	-0,6	0,4	0,4
	3	-0,1	0,8	1,3	1,4
	4	-0,3	0,0	0,7	1,2
	5	-0,5	-0,6	0,2	0,5
$T_{cp} = 2\ 196\ \text{K}$	1	-2,0	-1,9	-0,6	0,0
	2	-1,2	-0,8	0,8	0,5
	3	-0,5	0,7	1,8	1,7
	4	-1,0	-0,5	1,2	1,3
	5	-1,2	-1,6	-0,1	0,6
$T_{cp} = 2\ 802\ \text{K}$	1	-1,5	-0,8	0,6	1,5
	2	-0,1	0,3	2,5	2,5
	3	0,5	2,2	3,8	3,8
	4	-0,1	0,4	2,7	3,1
	5	-0,6	-0,2	1,1	1,6
$T_{cp} = 3\ 407\ \text{K}$	1	-0,7	-0,1	1,8	2,9
	2	0,8	1,4	3,6	4,3
	3	1,3	3,5	5,4	5,2
	4	0,9	2,1	3,9	5,4
	5	0,1	0,5	3,1	3,4
$T_{cp} = 4\ 026\ \text{K}$	1	2,0	2,3	4,5	5,6
	2	3,2	3,5	5,9	7,1
	3	3,5	6,4	8,4	8,3
	4	2,9	5,3	6,4	8,7
	5	2,6	3,8	5,7	6,8

Podobně jako při měření spektrometrem JETI, i zde se velikost relativní odchytky zvyšuje s rostoucí hodnotou náhradní teploty chromatičnosti. Velikosti odchylek jsou ovšem v tomto případě vyšší – maximální hodnota činí 8,7 % oproti 5,0 % při měření spektrometrem JETI (srovnej tab. 6.12 a tab. 6.14).

Při nižších hodnotách T_{cp} – 2 800 K a méně – lze jasový analyzátor k hodnocení rozložení náhradní teploty chromatičnosti na osvětlovaném povrchu použít – velikosti odchylek mají zpravidla hodnotu do 2 %. Pro světelné zdroje s vyšší T_{cp} přesahující hodnotu 4 000 K je možné, že relativní odchylka překročí hodnotu 10 %. Výpočetní algoritmus v tomto ohledu ještě není dokonalý a do budoucna jej bude nutné modifikovat.

6.2 Venkovní měření

6.2.1 Měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem

Terénní měření probíhalo na pozemní komunikaci mezi budovami T10 a T12, která je osvětlena svítidly Tungsram SLBt. Pod jedním ze svítidel bylo umístěno 20 kruhových disků o průměru 19 cm s bílým difuzním povrchem do mřížky 5x4 (viz obr. 6.26). Zároveň došlo k zajištění bezpečnosti na vozovce pomocí umístění výstražného trojúhelníku a patníků ohraničujících měřenou oblast. Pro zachycení celé scény se jasový analyzátor umístil na vyvýšené místo nad komunikací, viz obr. 6.27.



Obr. 6.26 Rozmístění disků při venkovním měření



Obr. 6.27 Pozice jasového analyzátoru

Očekávalo se dosažení několika cílů:

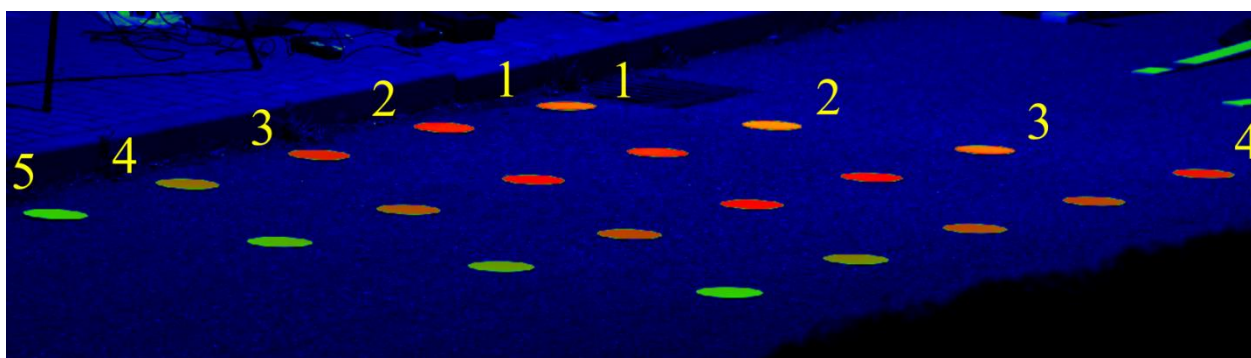
- 1) Zachytit postupnou proměnu světelného toku a náhradní teploty chromatičnosti svítidla
- 2) Z naměřených hodnot jasu a vybuzení RGB kanálu jasového analyzátoru vypočítat hodnoty náhradní teploty chromatičnosti na asfaltovém povrchu a discích
- 3) Porovnat hodnoty náhradní teploty chromatičnosti naměřené jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP a spektrometrem Uprtek
- 4) Zhodnotit uniformitu náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem
- 5) Zhodnotit, jaké chyby se dosahuje při měření za pomoci hliníkových disků a bez nich

Před samotným měřením došlo k prostému pozorování činnosti svítidla a bylo zjištěno, že ke změně náhradní teploty chromatičnosti nedochází postupným přechodem v delším časovém intervalu, ale několika skoky během pár minut. Diskrétní hodnoty zachycené během jedné hodiny spektrometrem Uprtek ukazuje tab. 6.15.

Tab. 6.15 Měření spektrometrem Uprtek

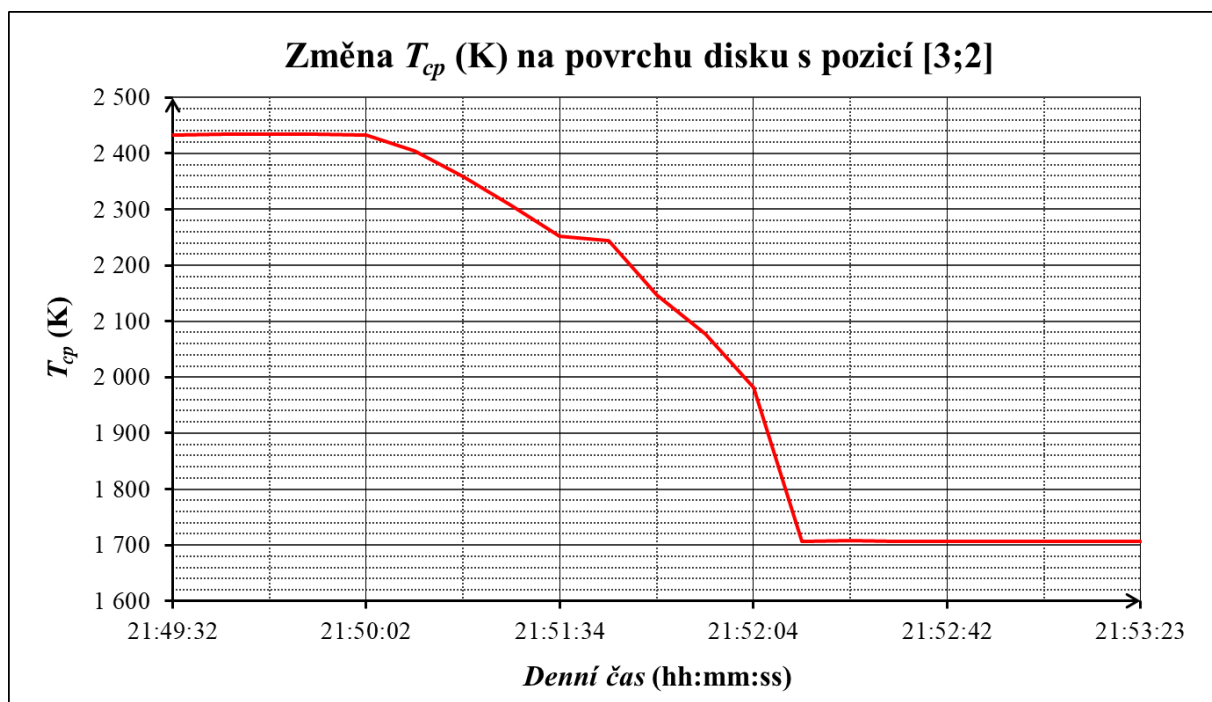
Číslo měření (-)	Čas (hh:mm:ss)	T_{cp} (K)
1	21:09:43	2573
2	21:50:12	2563
3	22:05:19	1851
4	22:08:12	1842

V kritickém časovém intervalu 21:50 až 22:05 dochází ke skoku o cca 700 K. Bližší průběh změny byl zachycen jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP, který snímal jas disků umístěných pod svítidlem. Pozice jednotlivých disků ukazuje obr. 6.28.



Obr. 6.28 Pozice měřených disků

Grafický průběh změny T_{cp} zachycuje obr. 6.29. Jasový analyzátoz snímal scénu s periodou přibližně 7 sekund a mezi dvěma různými režimy svítidla tímto způsobem pořídil 21 snímků. Pozice disku koresponduje s označením [řádek;soupec].



Obr. 6.29 Změna náhradní teploty chromatičnosti na jednom z měřených disků

Z obr. 6.29 vyplývá, že celková doba trvání přechodu se pohybuje okolo 2 minut. Zároveň se také liší hodnoty změřené ve stejný okamžik od různých přístrojů, kde např. v čase 21:50:12 naměřil spektrometr hodnotu náhradní teploty chromatičnosti 2 563 K a jasový analyzátor 2 435 K. Příčinou dané chyby jsou nestejné velikosti nejistot přístrojů a různé měřené objekty – aktivní plocha svítidla u spektrometru a povrch osvětlovaných disků u jasového analyzátoru.

Rozložení náhradní teploty chromatičnosti na měřených discích před a po změně režimu svícení zachycuje tab. 6.16. Relativní odchylky od referenční hodnoty naměřené spektrometrem Uprtek ukazuje tab. 6.17.

Tab. 6.16 Rozložení náhradní teploty chromatičnosti na discích pod svítidlem

		T_{cp} (K)			
Reference	Pozice	1	2	3	4
$T_{cp} = 2\ 563\ \text{K}$	1	2 455	2 447	2 423	2 410
	2	2 446	2 443	2 434	2 419
	3	2 442	2 432	2 416	2 404
	4	2 439	2 422	2 402	2 392
	5	2 423	2 407	2 388	2 383
$T_{cp} = 1\ 851\ \text{K}$	1	1 706	1 707	1 702	1 698
	2	1 705	1 706	1 701	1 698
	3	1 703	1 701	1 699	1 696
	4	1 702	1 698	1 695	1 694
	5	1 703	1 695	1 691	1 692

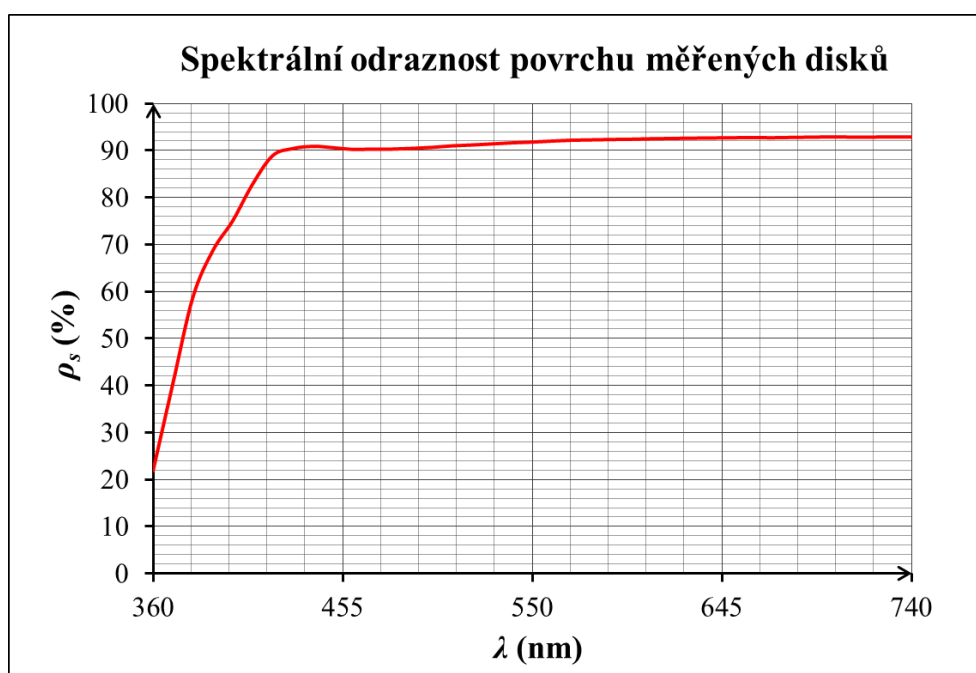
Tab. 6.17 Relativní odchylky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty

		δ (%)			
Reference	Pozice	1	2	3	4
$T_{cp} = 2\ 563\ \text{K}$	1	-4,2	-4,5	-5,5	-6,0
	2	-4,5	-4,7	-5,0	-5,6
	3	-4,7	-5,1	-5,7	-6,2
	4	-4,8	-5,5	-6,3	-6,7
	5	-5,5	-6,1	-6,8	-7,0
$T_{cp} = 1\ 851\ \text{K}$	1	-7,8	-7,8	-8,0	-8,2
	2	-7,9	-7,8	-8,1	-8,3
	3	-8,0	-8,1	-8,2	-8,4
	4	-8,1	-8,3	-8,4	-8,5
	5	-8,0	-8,4	-8,6	-8,6

Z tab. 6.17 vyplývá, že určování náhradní teploty chromatičnosti váhovaním snímků analyzátoru LDA-Lumidisp podle jasu vede k nižším vypočteným hodnotám oproti reálným. Velikost relativní odchylky roste se zvyšující se vzdáleností od svítidla (pozice [1;1] je přímo pod svítidlem). Zároveň se zvyšuje velikost relativní odchylky měření při přechodu na režim svícení s nižší hodnotou náhradní teploty chromatičnosti. Při měření T_{cp} na povrchu disků

pod svítidlem tak lze očekávat velikosti relativní odchyly v řádech jednotek procent s maximální hodnotou do 10 %.

Velikost relativní odchyly na povrchu disků se navzdory předpokladům zvyšuje se snižující se hodnotou náhradní teploty chromatičnosti. Použité disky jsou hliníkové a na povrchu mají nástřík malířské barvy Primalex polar, která zajišťuje ideální odrazové vlastnosti, viz obr. 6.30. Povrch disků rovnoměrně odráží celou oblast viditelného záření s výjimkou vlnových délek modré barvy. Nejnižší spektrální odrazností $\rho_s = 58,81\%$ disponuje vlnová délka $\lambda = 380$ nm. Důsledkem by tak měla být nižší naměřená hodnota náhradní teploty chromatičnosti a z ní plynoucí zhoršená přesnost měření. To platí zejména pro světelné zdroje s vyšším obsahem kratších vlnových délek ve spektru, tedy s vyšší skutečnou hodnotou náhradní teploty chromatičnosti. Pro demonstraci zmíněného jevu byla v softwaru Matlab (viz elektronická příloha „Odráznost_povrchu“) vytvořena simulace, jejíž výsledky ukazují tab. 6.18.



Obr. 6.30 Spektrální odraznost povrchu měřených disků

Tab. 6.18 Simulace měření náhradní teploty chromatičnosti na povrchu disků

Světelný zdroj/svítidlo	T_{cp_R} (K)	T_{cp_D} (K)	δ_D (%)
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 755	1 751	-0,2
VT sodíková výbojka	1 994	1 990	-0,2
Tungsrám SLBt 2 800 K	2 802	2 782	-0,7
Halogenidová výbojka	3 730	3 685	-1,2
Tungsrám SLBt 4 000 K	4 026	3 984	-1,0
Normalizované světlo D65	6 501	6 369	-2,0

T_{cp_R} Referenční náhradní teplota chromatičnosti (K)

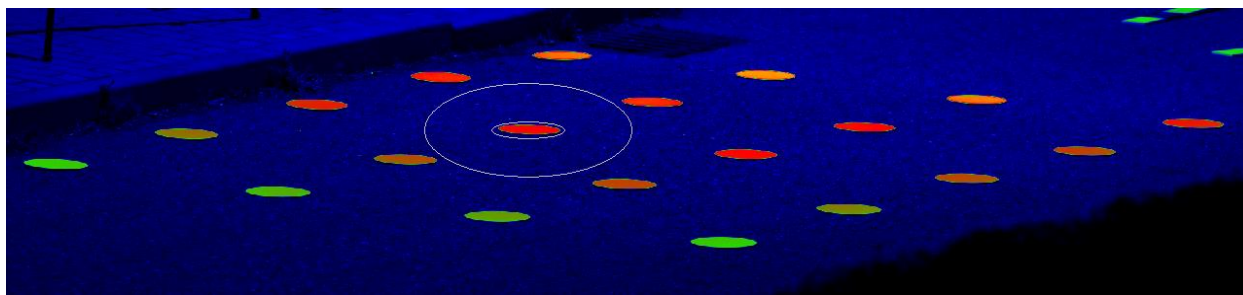
T_{cp_D} Náhradní teplota chromatičnosti na povrchu disku (K)

Výsledné hodnoty ve sloupci T_{cp_R} simulují 100% odraz na povrchu ideálního vzorku a hodnoty ve sloupci T_{cp_D} simulují odraz na povrchu používaných disků. Spektra světelných zdrojů pro výpočet pochází z laboratorního měření spektrometrem JETI v kapitole 6.1.1 a z venkovního měření spektrometrem Uprtek (viz následující kapitola 6.2.2). Spektrum normalizovaného světla D65 pak bylo převzato z databáze.

Z tab. 6.18 je patrné, že velikost relativní odchylky roste s vyšší hodnotou náhradní teploty chromatičnosti, tedy s vyšším obsahem kratších vlnových délek ve spektru. Pro běžně používané světelné zdroje se předpokládá, že $T_{cp} \leq 6\,500\text{ K}$, z čehož vyplývá velikost relativní odchylky při používání disků $\delta_D \leq 2\%$.

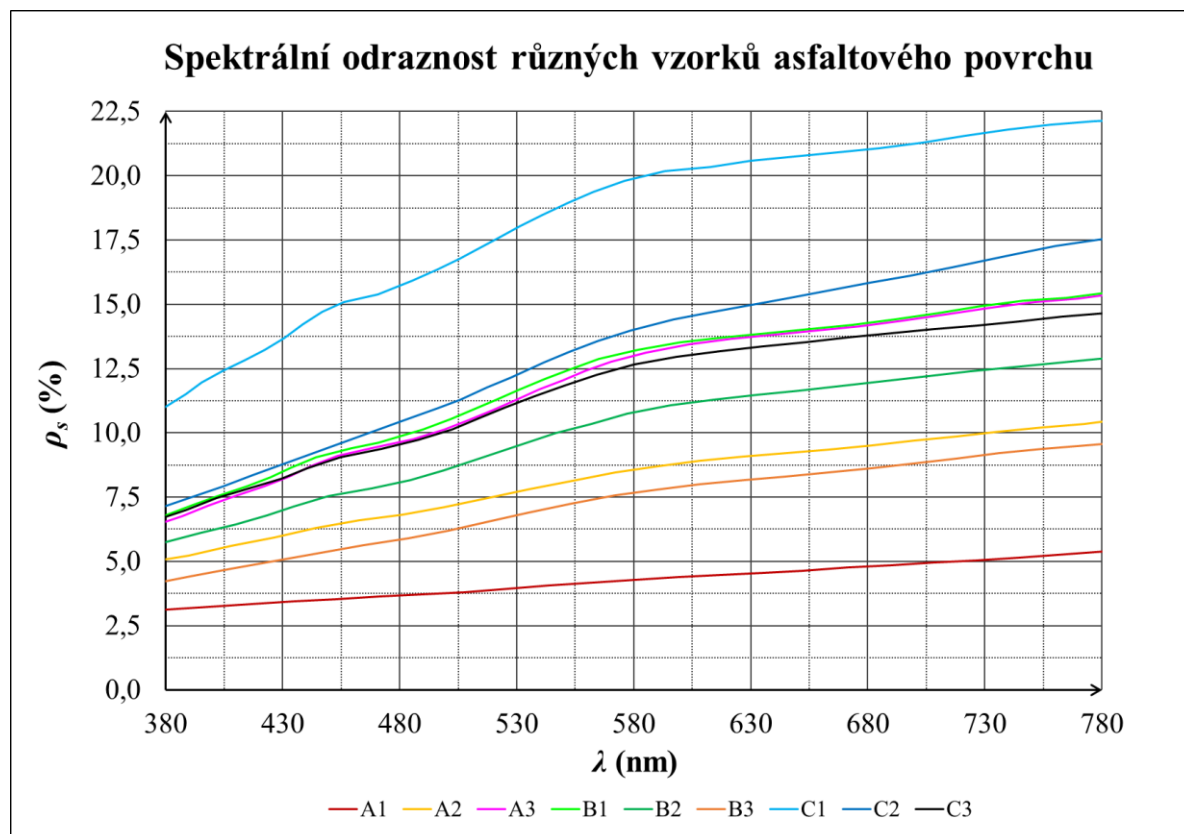
Při zpětném pohledu do tab. 6.17 pak lze tvrdit, že vyšší velikost relativní odchylky při nižší hodnotě náhradní teploty chromatičnosti světla je zapříčiněna spíše chybou výpočetní metody a jiných vlivů nežli samotnou charakteristikou povrchu měřených disků.

Pro srovnání došlo v čase (21:50:12) k určení náhradní teploty chromatičnosti na asfaltovém povrchu okolo disku s pozicí [3;2]. Vyhodnocovanou plochu znázorňuje obr. 6.31. Průměrná T_{cp} váhovaná podle jasu zde vyšla 2 408 K ve srovnání s 2 435 K přímo na disku. Absolutní odchylka se tedy pohybuje v řádech desítek kelvinů, což naznačuje, že asfaltový povrch odráží světlo srovnatelně rovnoměrně jako difúzní povrch hliníkového disku.



Obr. 6.31 Oblast určení náhradní teploty chromatičnosti na asfaltovém povrchu

Pro ověření předchozího tvrzení je nutné udělat simulační výpočet. Průběhy spektrální odraznosti různých asfaltových povrchů ve viditelné oblasti záření reprezentuje obr. 6.32. Pro všechny vzorky platí, že nejhůře odráží světlo kratších vlnových délek – oblast modré barvy. Nejvíce rovnoměrně, ale s nejmenší spektrální odrazností, odráží světlo povrch A1.



Obr. 6.32 Průběhy spektrální odraznosti různých vzorků asfaltových povrchů [72]

Typově se průběhy podobají spektrální odraznosti měřených disků (viz obr. 6.30), podstatným rozdílem je ale množství odraženého světla. Disky dosahují hodnot odraznosti až 93 % oproti nejlepšímu asfaltovému povrchu s maximální odrazností okolo 22,5 %. Na výslednou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti ovšem nemá míra odraznosti podstatný vliv. Důležitý je především podobný tvar křivky v grafu, proto se určená hodnota náhradní teploty chromatičnosti na povrchu disků a asfaltu nemusí výrazně lišit.

Simulace proběhla v softwaru Matlab (viz elektronická příloha „Odráznost_povrchu“), kde došlo k výběru několika světelných zdrojů/svítidel, kterými byly osvětlovány různé asfaltové povrchy (A1, B1, B3, C1 a C2) a povrch hliníkového disku. Výsledky simulačního výpočtu ukazují tab. 6.19 a tab. 6.20.

Tab. 6.19 Vypočtená náhradní teplota chromatičnosti na vybraných druzích povrchu

Světelný zdroj/svítidlo	T_{cp} (K)					
	Disk	A1	B1	B3	C1	C2
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 751	1696	1687	1680	1701	1674
VT sodíková výbojka	1 990	1946	1934	1930	1946	1925
Tungsrám SLBt 2 800 K	2 782	2607	2543	2534	2590	2515
Halogenidová výbojka	3 685	3342	3196	3186	3288	3145
Tungsrám SLBt 4 000 K	3 984	3648	3489	3485	3578	3448
Normalizované světlo D65	6 369	5485	4991	5010	5217	4913

Tab. 6.20 Relativní odchylky náhradní teploty chromatičnosti od referenční hodnoty na povrchu disku

Světelný zdroj/svítidlo	Disk T_{cp}	δ (%)				
		A1	B1	B3	C1	C2
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 751 K	-3,1	-3,7	-4,1	-2,9	-4,4
VT sodíková výbojka	1 990 K	-2,2	-2,8	-3,0	-2,2	-3,3
Tungsrám SLBt 2 800 K	2 782 K	-6,3	-8,6	-8,9	-6,9	-9,6
Halogenidová výbojka	3 685 K	-9,3	-13,3	-13,5	-10,8	-14,7
Tungsrám SLBt 4 000 K	3 984 K	-8,4	-12,4	-12,5	-10,2	-13,5
Normalizované světlo D65	6 369 K	-13,9	-21,6	-21,3	-18,1	-22,9

Z tab. 6.20 je patrné, že při nízkých hodnotách náhradní teploty chromatičnosti světla zdrojů dochází k přijatelné velikosti relativní odchylky do 5 %. Při $T_{cp} = 2\,800$ K velikost relativní odchylky sahá k 10 % a pro nejhorší možné spektrum normalizovaného světla D65 dosahuje odchylka na povrchu C2 maximální velikosti 22,9 %. Zároveň se potvrzuje, že nejlepším odražečem z hlediska náhradní teploty chromatičnosti je povrch A1.

Databáze, ze které byly čerpány spektrální odraznosti, obsahuje celkem 13 různých vzorků asfaltového povrchu. Při výpočtu relativních odchylek u každého z těchto vzorků lze získat průměrnou odchylku pro jednotlivé světelné zdroje/svítidla. Více ukazuje tab. 6.21.

Tab. 6.21 Průměrná relativní odchylka δ_A a koeficient k_A pro vybrané světelné zdroje/svítidla

Světelný zdroj/svítidlo	δ_A (%)	k_A (-)
Tungsrám SLBt 1 800 K	-3,2	1,03
VT sodíková výbojka	-2,4	1,02
Tungsrám SLBt 2 800 K	-7,4	1,07
Halogenidová výbojka	-11,3	1,11
Tungsrám SLBt 4 000 K	-10,6	1,11
Normalizované světlo D65	-18,3	1,18

Výstupem je pak koeficient k_A , který upravuje výslednou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti podle použitého světelného zdroje/svítidla. Tento koeficient lze snadno vypočítat pro jakýkoliv světelný zdroj díky hodnotě průměrné relativní odchylky δ_A ze všech 13 asfaltových vzorků od referenční hodnoty T_{cp} vybraného zdroje podle vztahu:

$$k_A = 1 - \frac{\delta_A}{100} \quad (-) \quad (6.4)$$

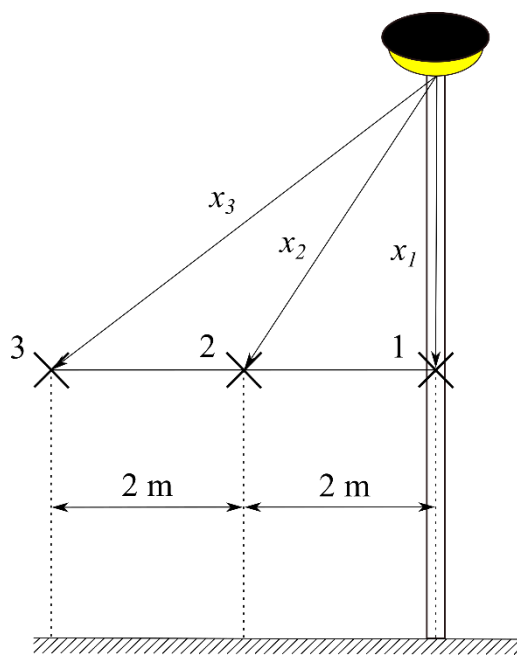
Při měření odraženého spektra od asfaltové vozovky by pak přibližná hodnota výsledné T_{cp} mohla být spočtena dle vzorce:

$$T_{cp} = k_A \cdot T_{cpm} \quad (K) \quad (6.5)$$

T_{cpm} Naměřená hodnota náhradní teploty chromatičnosti (K)

6.2.2 Měření prostorového rozložení náhradní teploty chromatičnosti

Účelem tohoto měření bylo zjistit, jakým způsobem se mění náhradní teplota chromatičnosti v osvětlovaném okolí svítidel. Subjektem měření bylo zejména svítidlo Tungsram SLBt, a to v režimech 3 200 K, 2 500 K a 1 800 K. Zároveň došlo také k proměření svítidel s vysokotlakou sodíkovou výbojkou, halogenidovou výbojkou a neutrálního LED svítidla. Všechna zmíněná svítidla osvětlují pozemní komunikaci vedle budovy T12 FEKT VUT.



Obr. 6.33 Geometrie při venkovním měření

Geometrii měřeného prostoru znázorňuje obr. 6.33. Pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP a spektrometru Uprtek (viz obr. 6.34) došlo ke změření spektra světla vyzařovaného svítidlem postupně v bodech označených 1, 2, 3. Vzdálenosti x_1 , x_2 a x_3 se měnily v závislosti na výšce stožáru svítidla a sklonu pozemní komunikace.



Obr. 6.34 Měřicí přístroje

Výsledné hodnoty náhradní teploty chromatičnosti v bodě 1 ukazuje tab. 6.22. Jako referenční se zde považují data změřená spektrometrem Uprtek. Relativní odchylka při určování T_{cp}

váhováním jasu pak nabývá značného rozptylu hodnot od -5,6 % do 14,7 %. Přesnost měření danou metodou se tak znovu jeví nevyhovující, podobně jako v kapitole 6.1.4, kde rozptyl při měření aktivní plochy svítidla v přímém pohledu činil -0,4 až 16,7 %.

Tab. 6.22 Výsledné T_{cp} v bodě 1 naměřené jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP a spektrometrem Uprtek

Svítidlo/režim	LumiDISP T_{cp} (K)	Uprtek T_{cp} (K)	δ (%)
Tungsrám SLBt 3 200 K	3 582	3 212	11,5
Tungsrám SLBt 2 500 K	2 925	2 551	14,7
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 731	1 787	-3,1
LED neutrální bílá 4 000 K	4 400	4 055	8,5
VT Sodíková výbojka	1 881	1 993	-5,6
Halogenidová výbojka	3 964	3 729	6,3

Hodnoty náhradní teploty chromatičnosti svítidel ve všech měřených bodech prostoru ukazují tab. 6.23 a tab. 6.24. Z porovnání maximální absolutní odchylky měřených hodnot u obou tabulek ΔT_{cp_max} vyplývá, že změna pozorovacího úhlu svítidla má nižší dopad na přesnost spektrometru Uprtek, kde nejvyšší hodnota odchylky činí 93 K oproti jasovému analyzátozu LDA-LumiDISP s nejvyšší hodnotou 302 K.

Tab. 6.23 T_{cp} svítidel určená ze snímků jasového analyzátozu LDA-LumiDISP v různých bodech měřeného prostoru

Svítidlo/režim	T_{cp} (K) v měřených bodech			ΔT_{cp_max} (K)
	1	2	3	
Tungsrám SLBt 3 200 K	3 582	3 488	–	94
Tungsrám SLBt 2 500 K	2 925	2 623	2 775	302
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 731	1 702	1 710	29
LED neutrální bílá 4 000 K	4 400	4 387	4 506	119
VT sodíková výbojka	1 881	1 838	1 869	43
Halogenidová výbojka	3 964	3 987	4 026	62

Tab. 6.24 T_{cp} svítidel naměřená spektrometrem Uprtek v různých bodech měřeného prostoru

Svítidlo/režim	T_{cp} (K) v měřených bodech			ΔT_{cp_max} (K)
	1	2	3	
Tungsrám SLBt 3 200 K	3 212	3 134	–	78
Tungsrám SLBt 2 500 K	2 551	2 549	2 513	38
Tungsrám SLBt 1 800 K	1 787	1 774	1 783	13
LED neutrální bílá 4 000 K	4 055	4 030	4 123	93
VT sodíková výbojka	1 993	1 991	1 998	7
Halogenidová výbojka	3 729	3 752	3 769	40

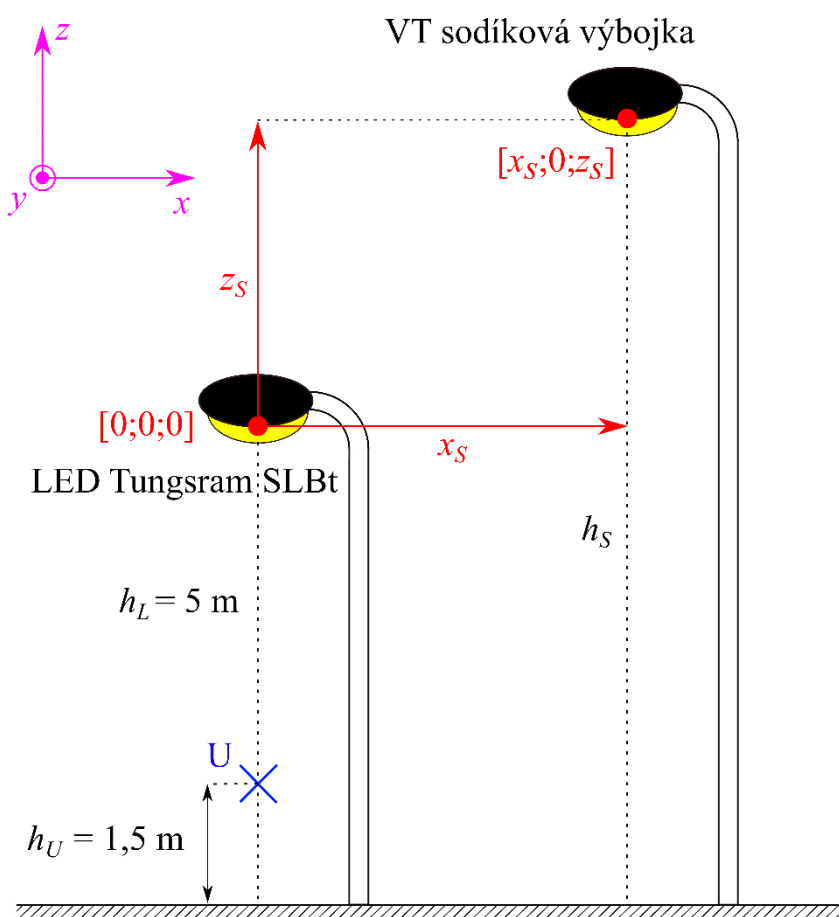
Při analýze dat naměřených spektrometrem Uprtek, u kterého se potvrdila vyšší přesnost měření, lze tedy dojít k závěru, že hodnota náhradní teploty chromatičnosti se v osvětlovaném prostoru pod svítidlem liší maximálně v řádech desítek kelvinů a lze ji tímto způsobem považovat za konstantní. Zároveň je dobré dodat, že nejistota měření T_{cp} spektrometru Uprtek má velikost přibližně 5 %.

6.3 Simulace vlivu parazitního světla na chybu měření

V této kapitole bylo pomocí softwaru Matlab (viz elektronická příloha „Vliv_parazitního_svetla“) vytvořeno fiktivní 3D prostředí, kam lze svévolně umístit jeden měřicí bod a libovolný počet svítidel. Účelem simulace je zjistit, nakolik ovlivňuje parazitní světlo cizího svítidla naměřená data.

6.3.1 Geometrie a popis prostoru

Jedná se o situaci, kdy se zkoumá vliv svítidla s vysokotlakou sodíkovou výbojkou na naměřenou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti pod svítidlem LED Tungsram SLBt. Simulace využívá systém souřadnic x, y, z , kde se v daném případě využije pouze rovina xz (y bude vždy rovno nule). Graficky znázorňuje situaci obr. 6.35.

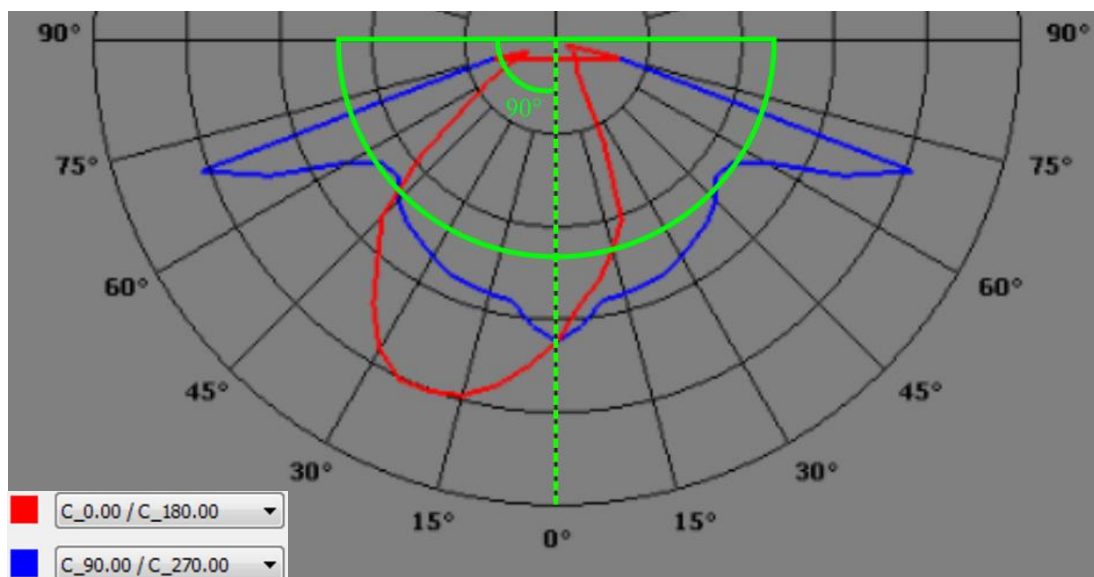


Obr. 6.35 Náčrt simulace vlivu parazitního světla

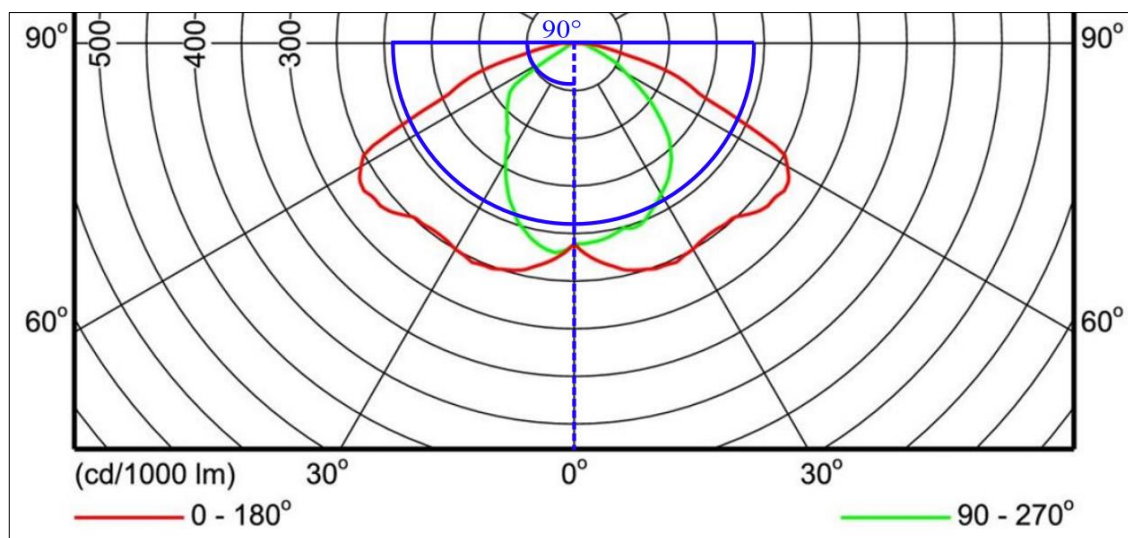
Počátek souřadnic leží přímo v aktivní ploše svítidla Tungsram SLBt. „U“ označuje měřený bod, ve kterém by se při skutečném měření ve výšce 1,5 m nad zemí jako měřicí přístroj použil např. spektrometr Uprtek. Výsledná náhradní teplota chromatičnosti bude vypočtena právě

v tomto bodě. Výška svítidla činí 5 m podobně jako u skutečných svítidel osvětlujících pozemní komunikaci mezi budovami T10 a T12 FEKT VUT. Pozice svítidla s VT sodíkovou výbojkou se bude měnit v závislosti na zadaných souřadnicích x_s a z_s .

Problematika směřování světelného toku obou svítidel vychází z křivek svítivosti znázorněných na obr. 6.37 a obr. 6.36.



Obr. 6.37 Upravené křivky svítivosti svítidla Tungstram SLBt



Obr. 6.36 Upravené křivky svítivosti svítidla s VT sodíkovou výbojkou [73]

Došlo zde k významnému zjednodušení, kdy se z obou svítidel vytvořily dolnozářiče s konstantní směrovou svítivostí. Tento krok zajišťuje, že ať se parazitní svítidlo umístí kamkoli nad měřený bod, vždy bude svým světlem ovlivňovat naměřené hodnoty. Generovaný světelný tok je tímto způsobem soustředěn do prostoru pod svítidlem s prostorovým úhlem vypočteným dle vztahu (6.6).

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \varphi) \quad (\text{sr}) \quad (6.6)$$

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos 90^\circ) \text{ sr} = 6,283 \text{ sr}$$

Nutno podotknout, že hodnota prostorového úhlu sama o sobě nemá, co se týče interference světla obou svítidel, podstatný význam. Důležitý je zejména poměr prostorových úhlů obou svítidel. Dané zjednodušení bylo nutno přijmout za účelem jednoduchosti algoritmu a do simulace vnáší určitou chybu. Výsledky simulace tak nejsou zcela přesné, jedná se o přibližné výpočty.

6.3.2 Parametry svítidel a požadavky simulace

Svítidlo LED Tungstram SLBt prochází během doby svícení (stmívání až úsvit) několika režimy. Pro účely simulace byly vybrány režimy a k nim přidělené světelné toky, které ukazuje tab. 6.25.

Tab. 6.25 Výběr a nastavení režimů použitých svítidel

Označení svítidla (-)	Světelný zdroj (-)	T_{cp} (K)	Φ (lm)
L	LED	1 755	1 500
		2 195	2 000
		2 802	2 500
		3 407	3 000
		4 026	3 000
S	VT sodíková výbojka	1 994	4 400
		1 994	10 300

Hodnoty světelného toku jednotlivých režimů vychází ze skutečného nastavení svítidel ve veřejném osvětlení, kde s klesající náhradní teplotou chromatičnosti klesá také hodnota světelného toku. Jako světelné zdroje simulující parazitní světlo byly vybrány sodíkové výbojky s příkonem 50 a 100 W [74, 75].

Světelná spektra různých nastavení svítidla Tungstram SLBt pochází z laboratorního měření spektrometrem JETI (kap. 6.1.1) a světelné spektrum VT sodíkových výbojek naměřil spektrometr Uprtek v jednom z předchozích venkovních měření (kap. 6.2.2). Odtud vychází hodnoty náhradních teplot chromatičnosti v tab. 6.25., které byly vypočteny ze spekter pomocí Robertsonovy metody.

6.3.3 Výsledky simulace

Vliv parazitního světla se vyhodnocuje na relativní odchylce hodnoty náhradní teploty chromatičnosti v bodě „U“ od referenční hodnoty svítidla Tungstram SLBt. Výpočet odchylky probíhá podle vztahu:

$$\delta = \frac{T_{cpU} - T_{cpR}}{T_{cpR}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (6.7)$$

T_{cpU} Náhradní teplota chromatičnosti změřena v bodě „U“ (K)

T_{cpR} Referenční hodnota náhr. tep. chromatičnosti Tungstram SLBt z tab. 6.25 (K)

Výsledné hodnoty ukazuje následujících 10 tabulek, ve kterých jsou pomocí podmíněného formátování zvýrazněny rozdíly mezi odchylkami.

Tab. 6.26 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 4 000 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-38,6	-28,4	-20,4	-14,9	-11,1	-8,6	-6,8	-5,4	-4,5
2		-34,2	-26,0	-19,1	-14,2	-10,7	-8,3	-6,6	-5,4	-4,4
4		-23,9	-20,2	-16,0	-12,4	-9,7	-7,7	-6,2	-5,1	-4,2
6		-14,3	-14,0	-12,2	-10,1	-8,3	-6,8	-5,6	-4,7	-3,9
8		-8,3	-9,2	-8,8	-7,9	-6,8	-5,8	-4,9	-4,2	-3,6
10		-5,0	-6,1	-6,3	-6,0	-5,4	-4,8	-4,2	-3,7	-3,2
12		-3,1	-4,1	-4,5	-4,5	-4,3	-3,9	-3,6	-3,2	-2,9
14		-2,1	-2,8	-3,3	-3,4	-3,4	-3,2	-3,0	-2,7	-2,5
16		-1,4	-2,0	-2,4	-2,6	-2,6	-2,6	-2,5	-2,3	-2,2

Při pohledu do tab. 6.26 je zřejmé, že k největší změně ve velikosti relativní odchylky dochází v prvních několika metrech od svítidla Tungstram SLBt. Nejvyšší odchylka (-38,6 %) nastává v případě, že parazitní zdroj je umístěn do přímo do místa referenčního SLBt svítidla.

Limitní hodnota souřadnice z_s se zvolila na 16 m, protože celková výška svítidla by v takovém případě činila 21 m. V praxi se nejčastěji používají svítidla s výškou v rozmezí 3 – 13 m, v některých případech ovšem výška dosahuje až 20 m [76].

Tab. 6.27 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 4 000 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-44,6	-38,0	-31,3	-25,3	-20,4	-16,5	-13,5	-11,2	-9,4
2		-42,0	-36,2	-30,0	-24,4	-19,8	-16,2	-13,3	-11,1	-9,3
4		-34,4	-31,1	-26,5	-22,1	-18,3	-15,1	-12,6	-10,6	-9,0
6		-24,5	-24,2	-21,8	-18,9	-16,1	-13,6	-11,5	-9,8	-8,4
8		-16,0	-17,6	-16,9	-15,4	-13,6	-11,8	-10,3	-8,9	-7,7
10		-10,3	-12,4	-12,7	-12,2	-11,2	-10,1	-8,9	-7,9	-7,0
12		-6,8	-8,7	-9,5	-9,5	-9,1	-8,4	-7,7	-6,9	-6,2
14		-4,6	-6,2	-7,1	-7,4	-7,3	-6,9	-6,5	-6,0	-5,5
16		-3,2	-4,5	-5,3	-5,7	-5,8	-5,7	-5,5	-5,2	-4,8

Oproti hodnotám v předchozí tabulce vykazuje tab. 6.27 podstatné navýšení velikosti relativních odchylek ve všech bodech vlivem výkonnějšího parazitního zdroje světla. Velikosti odchylek jsou v tomto případě nejvyšší ze všech variant simulace, jelikož spektra referenčního ($T_{cp} = 4\,026$ K) a parazitního ($T_{cp} = 1\,994$ K) světla se liší v největší možné míře.

Tab. 6.28 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 3 400 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-30,7	-22,1	-15,7	-11,4	-8,5	-6,5	-5,1	-4,1	-3,4
2		-27,0	-20,2	-14,7	-10,9	-8,2	-6,4	-5,0	-4,1	-3,3
4		-18,5	-15,6	-12,2	-9,5	-7,4	-5,9	-4,7	-3,9	-3,2
6		-10,9	-10,7	-9,3	-7,7	-6,3	-5,2	-4,3	-3,6	-3,0
8		-6,3	-7,1	-6,7	-6,0	-5,2	-4,4	-3,7	-3,2	-2,7
10		-3,8	-4,6	-4,8	-4,5	-4,1	-3,7	-3,2	-2,8	-2,4
12		-2,4	-3,1	-3,4	-3,4	-3,2	-3,0	-2,7	-2,4	-2,2
14		-1,6	-2,1	-2,5	-2,6	-2,5	-2,4	-2,3	-2,1	-1,9
16		-1,1	-1,5	-1,8	-2,0	-2,0	-2,0	-1,9	-1,8	-1,6

Dle očekávání relativní odchylka klesá se snižující se hodnotou náhradní teploty chromatičnosti. Velikosti odchylek do 10 % ovšem nastávají v tab. 6.28 až od vzdálenosti 6 m u obou souřadnic.

Tab. 6.29 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 3 400 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-36,1	-30,3	-24,5	-19,6	-15,7	-12,7	-10,4	-8,6	-7,2
2		-33,7	-28,7	-23,5	-18,9	-15,3	-12,4	-10,2	-8,5	-7,1
4		-27,2	-24,3	-20,6	-17,1	-14,1	-11,6	-9,6	-8,1	-6,8
6		-19,0	-18,7	-16,8	-14,5	-12,3	-10,4	-8,8	-7,5	-6,4
8		-12,3	-13,5	-13,0	-11,8	-10,4	-9,1	-7,8	-6,8	-5,9
10		-7,9	-9,5	-9,8	-9,3	-8,6	-7,7	-6,8	-6,0	-5,3
12		-5,2	-6,6	-7,2	-7,2	-6,9	-6,4	-5,8	-5,3	-4,7
14		-3,5	-4,7	-5,4	-5,6	-5,5	-5,3	-4,9	-4,6	-4,2
16		-2,5	-3,4	-4,0	-4,4	-4,4	-4,3	-4,2	-3,9	-3,7

Tab. 6.30 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 2 800 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-21,4	-15,5	-11,1	-8,1	-6,1	-4,7	-3,7	-3,0	-2,4
2		-18,9	-14,2	-10,4	-7,7	-5,9	-4,6	-3,6	-2,9	-2,4
4		-13,0	-11,0	-8,7	-6,8	-5,3	-4,2	-3,4	-2,8	-2,3
6		-7,8	-7,6	-6,6	-5,5	-4,5	-3,7	-3,1	-2,6	-2,2
8		-4,5	-5,0	-4,8	-4,3	-3,7	-3,2	-2,7	-2,3	-2,0
10		-2,7	-3,3	-3,4	-3,3	-3,0	-2,6	-2,3	-2,0	-1,8
12		-1,7	-2,2	-2,5	-2,5	-2,3	-2,2	-2,0	-1,8	-1,6
14		-1,1	-1,6	-1,8	-1,9	-1,8	-1,8	-1,6	-1,5	-1,4
16		-0,8	-1,1	-1,3	-1,4	-1,5	-1,4	-1,4	-1,3	-1,2

Tab. 6.31 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 2 800 K

x_S (m)	z_S (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-25,1	-21,1	-17,2	-13,8	-11,1	-9,0	-7,4	-6,1	-5,1
2		-23,5	-20,0	-16,4	-13,3	-10,8	-8,8	-7,2	-6,0	-5,1
4		-19,0	-17,1	-14,5	-12,0	-9,9	-8,2	-6,9	-5,8	-4,9
6		-13,4	-13,2	-11,9	-10,3	-8,8	-7,4	-6,3	-5,4	-4,6
8		-8,7	-9,6	-9,2	-8,4	-7,4	-6,5	-5,6	-4,9	-4,2
10		-5,6	-6,8	-6,9	-6,6	-6,1	-5,5	-4,9	-4,3	-3,8
12		-3,7	-4,8	-5,2	-5,2	-4,9	-4,6	-4,2	-3,8	-3,4
14		-2,5	-3,4	-3,9	-4,0	-4,0	-3,8	-3,6	-3,3	-3,0
16		-1,8	-2,5	-2,9	-3,1	-3,2	-3,1	-3,0	-2,8	-2,6

Tab. 6.32 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 2 200 K

x_S (m)	z_S (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-6,8	-4,9	-3,5	-2,6	-1,9	-1,5	-1,2	-1,0	-0,8
2		-6,0	-4,5	-3,3	-2,5	-1,9	-1,5	-1,2	-0,9	-0,8
4		-4,1	-3,5	-2,8	-2,2	-1,7	-1,3	-1,1	-0,9	-0,7
6		-2,5	-2,4	-2,1	-1,8	-1,4	-1,2	-1,0	-0,8	-0,7
8		-1,4	-1,6	-1,5	-1,4	-1,2	-1,0	-0,9	-0,7	-0,6
10		-0,9	-1,1	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,6
12		-0,5	-0,7	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,6	-0,6	-0,5
14		-0,4	-0,5	-0,6	-0,6	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,4
16		-0,3	-0,4	-0,4	-0,5	-0,5	-0,5	-0,4	-0,4	-0,4

Při přechodu z režimu 2 800 K na 2 200 K (srovnej tab. 6.30 a tab. 6.32) dochází k prudkému poklesu velikosti odchylek. Spektra referenčního a parazitního zdroje jsou si natolik podobná, že maximální velikost relativní odchylky zde nepřekračuje hodnotu 6,8 %. V tomto režimu je možné měřit v určitých případech s velikostí chyby menší než 1 %.

Tab. 6.33 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 2 200 K

x_S (m)	z_S (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		-8,0	-6,7	-5,5	-4,4	-3,5	-2,9	-2,4	-2,0	-1,6
2		-7,5	-6,4	-5,2	-4,2	-3,4	-2,8	-2,3	-1,9	-1,6
4		-6,0	-5,4	-4,6	-3,8	-3,2	-2,6	-2,2	-1,8	-1,6
6		-4,3	-4,2	-3,8	-3,3	-2,8	-2,4	-2,0	-1,7	-1,5
8		-2,8	-3,1	-2,9	-2,7	-2,4	-2,1	-1,8	-1,6	-1,4
10		-1,8	-2,2	-2,2	-2,1	-1,9	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2
12		-1,2	-1,5	-1,7	-1,7	-1,6	-1,5	-1,3	-1,2	-1,1
14		-0,8	-1,1	-1,2	-1,3	-1,3	-1,2	-1,1	-1,0	-1,0
16		-0,6	-0,8	-0,9	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8

Tab. 6.34 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 50 W a režim SLBt 1 800 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		10,3	7,6	5,6	4,1	3,1	2,4	1,9	1,5	1,3
2		9,2	7,0	5,2	3,9	3,0	2,3	1,9	1,5	1,2
4		6,5	5,5	4,4	3,4	2,7	2,2	1,7	1,4	1,2
6		3,9	3,9	3,4	2,8	2,3	1,9	1,6	1,3	1,1
8		2,3	2,6	2,5	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,0
10		1,4	1,7	1,8	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9
12		0,9	1,2	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,9	0,8
14		0,6	0,8	0,9	1,0	1,0	0,9	0,8	0,8	0,7
16		0,4	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6

Při pohledu do tab. 6.34 je vidět, že došlo ke změně znaménka u hodnot relativních odchylek. Kladné hodnoty odchylek zde zapříčiňuje nižší náhradní teplota chromatičnosti referenčního SLBt svítidla ($T_{cp} = 1\,755\text{ K}$) oproti parazitnímu ($T_{cp} = 1\,994\text{ K}$). Výsledná hodnota tak vychází vždy vyšší než referenční na rozdíl od všech ostatních případů.

Zároveň po srovnání velikostí odchylek v tab. 6.32 a tab. 6.34 dochází ke zjištění, že v případě režimu s $T_{cp} = 2\,195\text{ K}$ mají odchylky menší velikost než u režimu s $T_{cp} = 1\,755\text{ K}$. Přitom velikost absolutní odchylky od náhradní teploty chromatičnosti parazitního zdroje s $T_{cp} = 1\,994\text{ K}$ vychází velice podobně – 201 K v prvním a 239 K ve druhém případě. Hlavní příčinou je odlišná velikost světelného toku, který v případě s $T_{cp} = 2\,195\text{ K}$ činí 2 000 lm a v případě s $T_{cp} = 1\,755\text{ K}$ pouze 1 500 lm.

Tab. 6.35 Výsledné relativní odchylky pro VT sodíkovou výbojku 100 W a režim SLBt 1 800 K

x_s (m)	z_s (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16
0		12,0	10,2	8,4	6,8	5,5	4,5	3,7	3,1	2,6
2		11,3	9,7	8,1	6,6	5,4	4,4	3,7	3,1	2,6
4		9,2	8,4	7,2	6,0	5,0	4,2	3,5	2,9	2,5
6		6,6	6,5	5,9	5,1	4,4	3,8	3,2	2,7	2,4
8		4,4	4,8	4,6	4,2	3,8	3,3	2,9	2,5	2,2
10		2,9	3,4	3,5	3,4	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0
12		1,9	2,4	2,6	2,6	2,5	2,3	2,1	1,9	1,8
14		1,3	1,7	2,0	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,5
16		0,9	1,3	1,5	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,4

Po zhodnocení všech výsledků vychází závěr, že vliv parazitního zdroje světla na měření není zanedbatelný. V nejhorším možném případě simulace (viz tab. 6.27) lze dosáhnout velikosti relativní odchylky pod 30 % až u vzdáleností vyšších nebo rovno 4 m v obou souřadnicích. Velikosti pod 10 % nabývá odchylka až od pozice [6 m; 14 m] a nejmenší dosažitelná velikost odchylky činí 4,8 % v poloze [16 m; 16 m] od referenčního svítidla.

V nejpříhodnějším simulačním případě (viz tab. 6.32) činí velikost relativní odchylky 6,8 % v situaci, kdy je poloha parazitního svítidla totožná s referenčním. Velikosti odchylky pod 1 % zde

lze dosáhnout již při překročení hranic 8 m u obou souřadnic. Nejnižší možná velikost odchylky vychází 0,4 % pro krajní polohu [16 m; 16 m].

Ve skutečnosti by velikosti odchylek vycházely menší, jelikož svítivost v měřeném bodě od referenčního zdroje je poměrově značně vyšší než od zdroje parazitního. Vlivem úpravy křivek svítivosti (obr. 6.37 a obr. 6.36) tak došlo k podstatnému navýšení výsledných velikostí relativních odchylek.

Použitý algoritmus využívá k určení náhradní teploty chromatičnosti Robertsonovu metodu popsanou v kapitole 2.1. Kromě provedené simulace lze algoritmus využít pro zjištění hodnoty náhradní teploty chromatičnosti libovolného světelného zdroje při znalosti jeho spektra nebo barevných souřadnic U , V , W , případně X , Y , Z . Dále lze vykreslit výsledné spektrum v měřeném bodě při příspěvku světla z různých světelných zdrojů. Součástí je také databáze spekter 24 normalizovaných světelných zdrojů a dalších 8 změřených spekter v kontextu této práce. Software dále umožňuje zjistit koloritu a odražené spektrum z 13 druhů asfaltových povrchů při znalosti jejich spektrální odraznosti (viz průběhy na obr. 6.32).

Závěr

S využitím informací z dostupných zdrojů došlo v rámci diplomové práce k teoretickému a rešeršnímu popisu vybraných světelně-technických veličin, nejčastěji používaných metod pro výpočet náhradní teploty chromatičnosti, přístrojů pro měření náhradní teploty chromatičnosti a jejich nejistot měření, světelných zdrojů a svítidel využívaných ve veřejném osvětlení a biodynamického svítidla LED Tungsram SLBt. V praktické části práce proběhlo pět laboratorních a dvě venkovní měření zejména v souvislosti se svítidlem LED Tungsram SLBt. Součástí praktické části je i navržený výpočetní algoritmus v softwaru Matlab, ve kterém proběhlo ověření vybraných výstupních dat z měření a samostatná simulace vlivu parazitního světla na naměřenou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti.

Pro určení náhradní teploty chromatičnosti lze v současnosti použít několika relevantních metod. První z nich je měření náhradní teploty chromatičnosti spektrometrem JETI nebo Uprtek, kde se získané hodnoty T_{cp} považují pro tuto práci jako referenční. Nejistota měření T_{cp} spektrometru JETI činí přibližně 3 % a spektrometru Uprtek přibližně 5 %.

Další metody zahrnují vždy měření jasovým analyzátozem LDA-Lumidisp. Hlavní myšlenkou je určení náhradní teploty chromatičnosti v kterémkoli místě pořízeného jasového snímku, což by při splněné přesnosti měření umožnilo zjistit rozložení T_{cp} např. na povrchu vozovky za krátký časový úsek a bez jakýchkoli manipulací s měřicím přístrojem.

Při proměřování svítidla Tungsram SLBt v rovinách $C-\gamma$ na goniofotometru zabralo všech 4 256 pořízených snímků po zpracování přibližně 550 GB místa na pevném disku a měření vyžadovalo minimálně 14 hodin čistého času, kdy uživatel po každých 2 hodinách musel přenastavit parametry měření. Navíc docházelo k neočekávaným výpádkům přidavných softwarových doplňků, které dále prodlužovaly celý proces. Naproti tomu při měření rozložení náhradní teploty chromatičnosti na osvětlovaném povrchu stačilo jasový analyzátor jen umístit na stativ a pořídit několik snímků, které mohly být okamžitě zpracovány. Jasový analyzátor se tedy hodí pro malý počet měření, kdy vyjde najevo praktičnost jeho použití.

Určení náhradní teploty chromatičnosti pomocí jasových snímků může probíhat několika způsoby. Nejpresnějším z nich při měření aktivní plochy svítidla Tungsram SLBt se ukázal být výpočet aritmetickým průměrem hodnot náhradní teploty chromatičnosti pixelů snímku s jasnem vyšším než 1000 cd.m^{-2} při tzv. maskování snímku. Maximální relativní odchylka od referenční hodnoty v tomto případě činí 5,6 %. Zpočátku vypadala nejslibněji metoda určení T_{cp} váhovaním pixelů podle jasů bez maskování, která zde v konečném důsledku dosáhla maximální relativní odchylky 16,7 %.

Při měření uniformity náhradní teploty chromatičnosti na povrchu pod svítidlem v laboratoři se využilo vzorků ve formě hliníkových disků s bílým difúzním povrchem. Jasový analyzátor zde opět použil metodu určení T_{cp} váhovaním pixelů podle jasů. Relativní odchylka od referenční hodnoty T_{cp} se na discích pohybovala v řádek jednotek procent, přičemž při měření spektrometrem JETI měla maximální hodnotu 5 % a při měření jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP hodnotu 8,7 %. Měření uniformity T_{cp} na povrchu disků u venkovního měření vyústilo v maximální velikost relativní odchylky jasového analyzátoru 8,6 %. Ideálním řešením pro měření rozložení T_{cp} na osvětlovaném povrchu by tak mohlo být měření jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP v kombinaci se spektrometrem JETI, který by naměřil hodnotu T_{cp} na povrchu jednoho ze vzorků, podle níž by se poté provedla korekce pro všechny hodnoty T_{cp} určené jasovým analyzátozem.

Dále se zjistilo, že při měření uniformity náhradní teploty chromatičnosti na povrchu vozovky je nutno používat pomocné vzorky s bílým difúzním povrchem. Simulace v Matlabu potvrdila, že velikost relativní odchylky T_{cp} v nejhorším možném případě činí 2 %. Velikosti relativních odchylek při měření na asfaltovém povrchu bez vzorků vyšly v rozmezí 2,2 – 22,9 %. Měření bez vzorků by bylo možno realizovat tehdy, pokud by se do výpočtu výsledné T_{cp} zavedl koeficient k_A , který koriguje naměřené hodnoty T_{cp} a má vždy jinou hodnotu pro různé světelné zdroje.

Náhradní teplota chromatičnosti se v prostoru kolem svítidla jeví uniformní. Tento výrok potvrdilo měření spektrometrem Uprtek, který měřil teplotu chromatičnosti ve výšce přibližně 1,5 m nad povrchem ve třech bodech: přímo pod svítidlem, ve vzdálenosti 2 m od svítidla a ve vzdálenosti 4 m od svítidla. Tímto způsobem došlo k proměření prostoru pod 6 různými svítidly. Absolutní odchylka náhradní teploty chromatičnosti dvou měřených bodů prostoru se pohybuje v řádech desítek kelvinů s maximální hodnotou 93 K. Stejně měření pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP vedlo k maximální absolutní odchylce 302 K, kdy výpočet T_{cp} probíhal opět váhování pixelů podle jasu.

Algoritmus pro výpočet náhradní teploty chromatičnosti ze snímků jasového analyzátoru tak pro všechny případy měření prozatím nevykazuje požadovanou přesnost, nicméně stále je ve fázi vývoje a do budoucna se zvýšení jeho přesnosti očekává. Podnětem k dalším činnostem by tak mohla být práce na modifikaci algoritmu, zjednodušování úpravy snímků z hlediska úspory času a místa na disku v počítači a automatizace měření s jasovým analyzátozem při pořizování vyššího počtu snímků.

V poslední části práce se zkoumal vliv parazitního světla vysokotlaké sodíkové výbojky na naměřenou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti pod svítidlem Tungsram SLBt. Analýza dat proběhla na základě simulace v Matlabu, kde došlo k napodobení nastavení režimů svícení svítidla SLBt skrz noc ve veřejném osvětlení. Parazitní světlo simulovala 50 W a 100 W výbojka, která se umísťovala do různých horizontálních (x_s) a vertikálních (z_s) vzdáleností od svítidla SLBt.

Potvrdilo se, že vliv parazitního zdroje světla při měření není zanedbatelný. Velikosti relativní odchylky pod 30 % lze v nejhorším možném případě simulace dosáhnout až u vzdáleností větších nebo rovno 4 m ve vertikálním i horizontálním směru. Velikosti odchylky menší než 10 % lze docílit až od pozice $[x_s; z_s] = [6 \text{ m}; 14 \text{ m}]$. Nejmenší velikost odchylky v krajní poloze prostoru $[16 \text{ m}; 16 \text{ m}]$ vychází 4,8 %. Nutno ovšem podotknout, že výsledky simulace jsou pouze orientační kvůli značnému zjednodušení u křivek svítivosti svítidel. Velikosti relativních odchylek by tak ve skutečnosti vycházely nižší.

Použitá literatura

- [1] LED veřejné (pouliční) osvětlení. *LED Solution* [online]. Liberec: LED Solution s.r.o. [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: <https://eshop.ledsolution.cz/led-verejne-osvetleni/>
- [2] LED 1000 W. *LED Light Expert* [online]. San Diego [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.ledlightexpert.com/High-Voltage-277-480VAC--140000-Lumen-LED-Sport-and-Area-Lights-Icon-Pro-III-Series-1000-Watt-LED-Sport-and-Area-Light--5000K--10KV-Surge--90-and-40-degree-included-_p_2158.html
- [3] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [4] SOKANSKÝ, Karel a kol. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [5] 5 000 W Metal Halide Lamps. *IQLighting: Home and Business Lighting* [online]. Manassas [cit. 2021-10-16]. Dostupné z: <https://www.iqlighting.com/5000w-metal-halide-lamps.asp>
- [6] Sylvania Lighting 15 W Metal Halide Lamp. *ADLSupply.com* [online]. Miami [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: <https://www.adlsupply.com/hid-lamps/ceramic-metal-halide/sylvania-69043-mc15tf-u-gu6-5-830/>
- [7] Sodíková výbojka HPS-T 1000 W. *NBB Bohemia* [online]. Benešov nad Ploučnicí: NBB Bohemia s.r.o., 1997 [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://eshop.nbb.cz/hps-t-1000w-e40-nbb-standard~746318000.htm?gclid=CjwKCAjwq9mLBhB2EiwAuYdMtfMNUa4aBy-nxqGgu755LvHyUhrfwrBuEcgrudlQ0WvCi-biJiL4xoCWwoQAvD_BwE
- [8] LED svítidlo 10 W. *LEDsviti.cz: LED osvětlení* [online]. Česká Lípa [cit. 2021-10-18]. Dostupné z: <https://www.ledsviti.cz/stribrne-led-verejne-osvetleni-10w-na-vyloznik-teplabila/>
- [9] RŮŽIČKA, Josef. *Porovnání světelných zdrojů z ekonomického hlediska*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127272>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jaroslav Štěpánek.
- [10] DILaura L. David, Kevin W. Houser, Richard G. Mistrick a Gary R. Steffy. *The Lighting Handbook: Reference and Application*. 10th edition. New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2011. ISBN 978-087995-241-9
- [11] Katalog svítidel veřejného osvětlení. *SIKOV Lighting* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: SIKOV ROŽNOV s.r.o., [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: https://sikov.cz/application/views/publikace/27888/cy78uz/uploaded_files/Katalog%20m%C4%9Bstsk%C3%A9%20osv%C4%Btlen%C3%AD%20SIKOV%20lighting.pdf

- [12] *Tungsrām Outdoor Fixtures Product Catalogue*. Boston: General Electric Company, 2021.
- [13] *Ligman Outdoor Catalogue*. Hillsboro: Ligman Lighting USA, Inc., 2020.
- [14] A New Color Fidelity Index for LED and Light Measurement- TM-30-15. In: *Stellarnet* [online]. Tampa: StellarNet, Inc., 20. 6. 2018 [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <https://www.stellarnet.us/a-new-color-fidelity-index-for-led-and-light-measurement-tm-30-15>
- [15] Rozpětí teploty chromatičnosti In: *TechniLED: LED osvětlení pro domácnost i průmysl* [online]. Brno: Omko Digital a. s., 2019 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: <http://www.techniled.cz/20-barevna-teplota>
- [16] HABEL, Jiří. *Základy nauky o barvě: Výukové skriptum FEL ČVUT* [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/A5M15ES1-04-Barva.pdf>
- [17] OHNO, Yoshi. Practical Use and Calculation of CCT and Duv. *Leukos: The journal of the Illuminating Engineering Society of North America*. Abingdon-on-Thames: Taylor & Francis, 2014. ISSN 1550-2724.
- [18] *Základy světla* [online]. Coimbra: Institute of Systems and Robotics, University of Coimbra, 2017 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/14325944/>
- [19] WYSZECKI, Günter a W. S. STILES. *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae*. Wiley classics library ed. New York: John Wiley, 2000. ISBN 978-0471399186.
- [20] Robertson's CCT computation method. *Wikipedia: The Free Encyclopedia* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2008 [cit. 2021-10-30]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Robertson%27s_CCT_computation_method.svg
- [21] VLČEK, Pavel. Analýza schopnosti jasového analyzátoru LDA - LumiDISP měřit náhradní teplotu chromatičnosti. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/134924>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.
- [22] OHNO, Yoshi. *Calculation of CCT and Duv and Practical Conversion Formulae* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, 2011 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: https://cormusa.org/wp-content/uploads/2018/04/CORM_2011_Calculation_of_CCT_and_Duv_and_Practical_Conversion_Formulae.pdf
- [23] KRBAL, Michal a Petr BAXANT. Statistické hodnocení vlastností světelných zdrojů. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2011/1. Praha: FCC Public. ISSN 1212-0812.

- [24] Color Analyzer CA-310. *Konica Minolta Measuring Instruments* [online]. Tokio: Konica Minolta, Inc., [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.asia/product/color-analyzer-ca-310/>
- [25] Datasheet: Chroma Meter CR-400/410. *Konica Minolta: Measuring Instruments* [online]. Tokio: Konica Minolta, Inc. [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: https://www.anamet.cz/sites/default/files/documents/konica-cr400_e11.pdf
- [26] Cenové srovnání kolorimetrů. *Heureka* [online]. Liberec: Heureka Group a.s. [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: [https://www.heureka.cz/?h\[fraze\]=kolorimetr&o=4](https://www.heureka.cz/?h[fraze]=kolorimetr&o=4)
- [27] MOTYČKA, Martin. 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.
- [28] Cenové srovnání spektrometrů. *eBay* [online]. San José: eBay Inc. [cit. 2021-11-04]. Dostupné z: https://www.ebay.com/sch/i.html?_from=R40&_nkw=spektrometr&_sacat=0&LH_TitleDesc=0&_sop=16
- [29] Miniature Spectrometer Based Radiometry. *JETI* [online]. Jena: JETI Technische Instrumente [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: <https://www.JETI.com/files/content/support/downloads/papers/svetlo2004.pdf>
- [30] Spektrometr Konica Minolta CS-1000A. *Laboratoř světelné techniky: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: http://www.svetelnalaborator.cz/?section=equipments_CS-1000A
- [31] MOTYČKA, Martin. Hodnocení nejistot měření ve fotometrii. Brno, 2020. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.
- [32] LMK 6 Color: Luminance Measuring Video Photometer. *TechnoTeam* [online]. Ilmenau: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH [cit. 2021-11-05]. Dostupné z: https://www.technoteam.de/product_overview/photometer_colorimeter/products/lmk_6_color/index_eng.html
- [33] Vidéo-colorimètre LMK 6 Color. *ScienTec* [online]. Les Ulis: ScienTech [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: <https://www.scientec.fr/produit/video-colorimetre-lmk-6-color/>
- [34] Luminous Measurement Graphic Representation. *EPP: Electrical Engineering Portal* [online]. Nova Pazova: Electrical Engineering Portal PR [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://electrical-engineering-portal.com/luminous-measurement-graphic-representation>
- [35] Goniometr. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Praha: Wikimedia Česká republika [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Goniometr>
- [36] Large-format Goniophotometer RiGO801-L. *Direct Industry* [online]. Marseille: VirtualExpo Group [cit. 2021-11-08]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/technoteam-bildverarbeitung-gmbh/product-63849-417114.html>

- [37] Goniophotometer products. *TechnoTeam* [online]. Ilmenava: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.technoteam.de/product_overview/goniophotometer/products/index_eng.html
- [38] Near-field Goniophotometer RiGO801. *TechnoTeam* [online]. Ilmenava: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.technoteam.de/product_overview/goniophotometer/index_eng.html
- [39] *Goniophotometer RiGO 801: General Specification*. Ilmenava: TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, 2018.
- [40] HID Lights for Beginners: High Intensity Discharge Lamps Explained. *LED watcher* [online]. [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.ledwatcher.com/high-intensity-discharge-lamps-explained/>
- [41] Ceramic Metal Halide Lamp 3 000 K. *Joom* [online]. Riga: Joom SIA [cit. 2021-11-10]. Dostupné z: <https://www.joom.com/en/products/5ec24b31160cf001066dfd7c>
- [42] Double Ended Ceramic Metal Halide Lamp 4 000 K. *LBC Lighting Pro* [online]. South El Monte: LBC Lighting Pro [cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.lbclightingpro.com/products/315w-double-ended-open-rated-full-spectrum-ceramic-metal-halide-bulb>
- [43] iPower 6 000 K Metal Halide Lamp. *Walmart* [online]. Sacramento: Walmart Inc.[cit. 2021-11-11]. Dostupné z: <https://www.walmart.com/ip/iPower-1000-Watt-Metal-Halide-Lamp-MH-Grow-Light-Bulb-2-Pack-Glass/561943701>
- [44] DigiLamp 10 000 K Metal Halide Lamp. *All State Garden Supply* [online]. Chino: Allstate Garden Supply, Inc. [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://allstategardensupply.com/product/digilamp-600-watt-pulse-start-metal-halide-10k-lamp/>
- [45] DVOŘÁČEK, Vladimír a S LAMP s.r.o. Světelné zdroje – vysokotlaké sodíkové výbojky. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2009/3. Praha: FCC Public. ISSN 1212-0812.
- [46] Amalgámy. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. Praha: Wikimedia Česká republika [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Amalg%C3%A1my>
- [47] SIMMONS, Jason. *What Grow Lights Should I Use?* [online]. Davis: Agris Farms [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://indicainfo.com/2020/02/29/what-grow-lights-should-i-use/>
- [48] LENDA Series: LED Roadway & Street Light. *BBE: Build Better Earth* [online]. Šen-čen: Shenzhen Bang-Bell Electronics Co., Ltd. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <http://www.bbeled.com/products/led-street-lights/lenda/>
- [49] GABRIAN TEAM. *Which Aluminum Alloys are Best for Extruded Heat Sinks?* [online]. Dover: Gabrian International (H.K.) Ltd. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.gabrian.com/which-aluminum-alloys-are-best-for-extruded-heat-sinks>

- [50] Veřejné osvětlení *K&V ELEKTRO – E-shop s elektromateriálem* [online]. Praha: K&V ELEKTRO a.s. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.kvelektro.cz/verejne-osvetleni-242?sortBy=priceAsc>
- [51] LED VO pouliční veřejná svítidla. *TopLux – Osvětlení Praha* [online]. Praha: TopLux [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.toplux.cz/svitidla/?order=pricehttps://www.idealed.cz/produkty/led-verejne-osvetleni>
- [52] LED veřejné osvětlení. *Idea LED* [online]. Praha: Fedatex plus s.r.o. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.idealed.cz/produkty/led-verejne-osvetleni>
- [53] LED veřejné osvětlení. *LEDAKCE – LED pro domácnost a profesionály* [online]. Bratislava: LEDart s.r.o. [cit. 2021-11-14]. Dostupné z: <https://www.ledakce.cz/led-verejne-osvetleni/>
- [54] Street light LED 6 500 K. *Addloes Lighting & Hydroponics* [online]. Bournemouth: Addloes Lighting & Hydroponics [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://addloes.com/product/street-light-led/>
- [55] LED Grow Light Tube 4 000 K. *Waveform Lighting* [online]. Vancouver: Waveform Lighting, LLC. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://store.waveformlighting.com/products/photontube-t8-led-grow-light-tube-for-horticulture>
- [56] LED Spot 2 700 K. *greenandco.de* [online]. Mnichov: greenandco.de, GmbH [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.greenandco.de/en/greenandco-cri-90-mr16-gu5-3-led-spot-3w-replaces-20w-200lm-2700k-warm-white-38-beam-angle-12v-ac-dc-glass-body-with-protective-glass/a-100066>
- [57] Atop LED Grow Light with Seoul Sunlike Spectrum LEDs. *atop Lighting* [online]. Šen-čen: AGC lighting, atop Lighting [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.atophort.com/news/atop-led-grow-light-with-seoul-sunlike-spectrum-leds.html>
- [58] LEDRISE LED PROFESSIONAL. Innovative SunLike natural, full spectrum LEDs by Seoul Semiconductor. *LedRise* [online]. Hongkong: Ledrise Ltd., 12.04.2021 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.ledrise.eu/blog/innovative-sunlike-natural-spectrum-leds-by-seoul-semiconductor/>
- [59] Linear Toshiba-SSC SunLike LED strip. *LedRise* [online]. Hongkong: Ledrise Ltd. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.ledrise.eu/led-strips-modules/led-strips/multibar-nichia-led-strips/banda-profesionala-linearz-52-zhaga-sunlike-alb-rece-solar-cri97-6500k-1460lm-350ma-375v-52-led-uri-toshiba-modul-56cm-5215lm-m-si-25w-m.html>
- [60] LUMBIO, s.r.o. Polovina veřejného osvětlení bude muset v ČR do roku 2025 projít celkovou obnovou. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2018/5. Praha: FCC Public. ISSN 1212-0812.
- [61] C-Line LED Gen4. *Carandini* [online]. Rozdrojovice: EPK elektro s.r.o [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.carandini.cz/cz/svitidla/parkova-svitidla/c-line-led-gen4/>

- [62] MAIXNEROVÁ, Tereza. Rokycany mají jako první v ČR veřejné osvětlení s LED technologií PC Amber. *Rokycany – oficiální web města* [online]. Rokycany, 2019 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://www.rokycany.cz/rokycany-maji-jako-prvni-v-cr-verejne-osvetleni-s-led-technologie-pc-amber/d-894003>
- [63] ROBERTSON, Katharine, David BOOTH a Colin LIMPUS. (2016). An assessment of 'turtle-friendly' lights on the sea-finding behaviour of loggerhead turtle hatchlings (*Caretta caretta*). *Wildlife Research*. 43. 10.1071/WR15138.
- [64] SOLA. *Ecologically Responsible LED Lighting Options* [online]. Washington DC: SOLA – Smart Outdoor Lighting Alliance [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://volt.org/ecologically-responsible-led-lighting-options/>
- [65] Heze PC Amber LED 40 W. *Access Fixtures: High-Performance Lighting Solutions* [online]. Worcester: Access Fixtures LLC [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.accessfixtures.com/p/heze-40w-led-pc-amber-medium-full-cutoff-wall-pack-120-277v/>
- [66] ACCES FIXTURES. *What is Amber LED, and What is it Used for?* [online]. Worcester: Access Fixtures LLC [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.accessfixtures.com/amber-led-fixtures-fwc-pc-amber-590nm-amber-and-2200k/>
- [67] PAVELKA, Tomáš, Jan ŠKODA a Petr BAXANT. Historie světelných diod LED. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. 2016/2. Praha: FCC Public. ISSN 1212-0812.
- [68] ŽÁK, Petr. Barva světla ve veřejném osvětlení: Část 1 Současný stav a terénní výzkumy. *Světlo: Časopis pro světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2015. ISSN 1212-0812.
- [69] Datasheet: LED Biodynamic lamp Lumbio. *Doc player* [online]. Praha: LUMBIO s.r.o. [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/216012620-Datasheet-led-biodynamic-lamp-lumbio-aplikace-public-biodynamicke-verejne-osvetleni-lumbio-je-originalni-ceske-reseni-z-kategorie-technologie.html>
- [70] *Datový list SLBt Biodynamic*. Boston: General Electric Company, 2019. Dostupné také z: https://www.ekosvetlo.cz/data_4/soubory/34.pdf
- [71] *Datový list SLBt Biodynamic – rozšířený*. Boston: General Electric Company, 2019. Dostupné také z: https://www.ekosvetlo.cz/data_4/soubory/2.pdf
- [72] HEROLD, Martin a Dar ROBERTS. *Spectral characteristics of asphalt road aging and deterioration: implications for remote-sensing applications*. Maryland: Optical Society of America, 2005.
- [73] Katalog svítidel MODUS. *MODUS – český výrobce svítidel* [online]. Jinočany: MODUS, spol. s.r.o. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <http://www.ceha-kdc.cz/eshop/cat/19/19-06-123-04000.pdf>
- [74] Philips Master Son-T Pia Plus 50 W E27. *Esvit.cz* [online]. Praha: E-SVIT.CZ [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.esvit.cz/philips-masterx-son-t-pia-plus-50w-e27#variants>

- [75] Vialox Nav-T 100 W Super 4Y. *Technický list výrobku* [online]. Praha: LEDVANCE s.r.o., 2021 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.svitime.eu/wp-content/plugins/order-synchronization/data/product-import/txt/nav-t%20100w.pdf>
- [76] Stožáry veřejného osvětlení. *Kooperativa v.o.d.* [online]. Uhlířské Janovice: Kooperativa, výrobně obchodní družstvo [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <http://www.kooperativa-vod.cz/ocelove-stozary/>

Seznam symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
a, b, C	Koeficienty rovnice paraboly	–
A	Osvětlovaná plocha	m^2
d_i	Vzdálenost bodu od i -té izotermy v diagramu chromatičnosti	–
d_m	Vzdálenost zkoumaného bodu od bodů na křivce teplotních zářičů	–
D_{uv}	Parametr v diagramu chromatičnosti určující vzdálenost	–
i	Číselné pořadí	–
k	Koeficient rozšíření	–
k_A	Koeficient korekce naměřené náhradní teploty chromatičnosti	–
l	Délka základny trojúhelníku	–
L	Jas	$cd.m^{-2}$
m_e	Poměrné spektrální vyzařování	–
M_z	Měrný výkon	$lm.W^{-1}$
p	Tlak	Pa
P	Elektrický výkon (příkon)	W
R_a	Index podání barev	–
S	Zářivá plocha světelného zdroje	m^2
t_z	Střední doba života	h
$t_T(u_t, v_t)$	Směrnice izotermy v diagramu chromatičnosti	–
$t_{Ti}(u_t, v_t)$	Směrnice i -té izotermy v diagramu chromatičnosti	–
T_c	Teplota chromatičnosti	K
T_{cp}	Náhradní teplota chromatičnosti	K
T_{cpm}	Naměřená náhradní teplota chromatičnosti	K
T_{cpm_P}	Vážený průměr hodnot náhr. tep. chromatičnosti vybraných pixelů	K
T_{cpm_V}	Náhradní teplota chromatičnosti vypočtena váhováním podle jasu vybraných pixelů	K
T_{cpT}	Náhradní teplota chromatičnosti izotermy	K
T_{cpV}	Náhradní teplota chromatičnosti váhovaná podle jasu	K
T_{cp_D}	Náhradní teplota chromatičnosti na povrchu disku	K
T_{cp_J}	Náhradní teplota chromatičnosti změřená spektrometrem JETI	K
$T_{cp_{Jp}}$	Průměrná náhr. tep. chromatičnosti změřená spektrometrem JETI	K
T_{cp_L}	Náhr. tep. chromatičnosti změřená analyzátozem LDA-LumiDISP	K
$T_{cp_{Lp}}$	Průměrná náhr. tep. chromatičnosti změřená anal. LDA-LumiDISP	K

T_{cp_R}	Referenční náhradní teplota chromatičnosti	K
T_i	Náhradní teplota chromatičnosti i-té izotermy	K
T_m	Náhradní teplota chromatičnosti bodu na křivce tepl. zářičů	K
T_x	Náhradní teplota chromatičnosti zkoumaného bodu	K
u, v, w	Trichromatické souřadnice soustavy UVW	–
u_m, v_m	Chromatické souřadnice bodu na křivce teplotních zářičů	–
u_t, v_t	Chromatické souřadnice izotermy	–
u_{ti}, v_{ti}	Chromatické souřadnice i-té izotermy	–
u_T, v_T	Chromatické souřadnice zkoumaného bodu č. 1	–
u_x, v_x	Chromatické souřadnice zkoumaného bodu č. 2	–
U	Rozšířená standardní nejistota měření	%
x	Vzdálenost zkoumaného a sousedního bodu na křivce tep. zářičů	–
x, y, z	Trichromatické souřadnice soustavy XYZ	–
X, Y, Z	Trichromatické složky soustavy XYZ	–
ΔP	Tepelné ztráty zdroje v předřadných obvodech	W
ΔT_{cp_max}	Maximální absolutní odchylka náhradní teploty chromatičnosti	K
ΔT_x	Absolutní odchylka náhradní teploty chromatičnosti	K
δ	Relativní odchylka	%
δ_A	Průměrná relativní odchylka	%
δ_D	Relativní odchylka měření na difúzním povrchu disků	%
δ_{LDA}	Relativní odchylka měření jasového analyzátoru LDA-LumiDISP vůči spektroradiometru JETI	%
δ_P	Relativní odchylka maskování při výpočtu pomocí váženého průměru	%
δ_V	Rel. odchylka maskování při výpočtu váhováním podle jasu	%
ϑ	Provozní teplota okolí	°C
θ_1, θ_2	Rozteč mezi hledanou a sousední izotermou	rad
λ	Vlnová délka	nm
λ_c	Vlnová délka spektrálního světla č. 1	nm
λ_d	Vlnová délka spektrálního světla č. 2	nm
ρ_s	Spektrální odraznost	%
Φ	Světelný tok	lm
Φ_v	Vyzařovaný světelný tok	lm
$\Phi_e(\lambda)$	Spektrální zářivý tok	W.nm ⁻¹

Zkratka	Význam
Ar	Argon
B	Brom
Cl	Chlor
ČR	Česká republika
Cs	Cesium
Dy	Dyprosium
F	Fluor
I	Jód
In	Indium
LED	Světelná dioda
Li	Lithium
Na	Sodík
Ne	Neon
Sn	Cín
Tl	Thalium
VO	Veřejné osvětlení
VT	Vysokotlaká
UV	Ultrafialové záření