



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

ANALÝZA SCHOPNOSTI JASOVÉHO ANALYZÁTORU LDA - LUMIDISP MĚŘIT NÁHRADNÍ TEPLITU CHROMATIČNOSTI

ANALYSIS OF LUMINANCE ANALYSER LDA - LUMIDISP APPLICATION FOR CORRELATED
COLOR TEMPERATURE MEASUREMENT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Vlček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Pavel Vlček

ID: 195461

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Analýza schopnosti jasového analyzátoru LDA - LumiDISP měřit náhradní teplotu chromatičnosti

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Jasový analyzátor LDA – LumiDISP je primárně určen pro měření jasů v dané scéně. Nicméně lze tento přístroj využít i pro orientační měření náhradní teploty chromatičnosti. Tato práce je zaměřena na rešerši komerčně dostupných jasových analyzátorů a kamer, které umožňují měření náhradní teploty chromatičnosti. Praktickou částí práce bude rozsáhlé testování jasového analyzátoru LDA z hlediska měření náhradní teploty chromatičnosti v laboratorních a terénních podmínkách. Výsledkem práce bude výpočet chyb měření pro určité světelné zdroje a optimalizace měřicího algoritmu pro jejich snížení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Martin Motyčka

doc. 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 rešerší komerčně dostupných jasových analyzátorů a kamer, které umožňují měření náhradní teploty chromatičnosti. Dále se zabývá výpočty náhradní teploty chromatičnosti dle různých dostupných metod. Jasový analyzátor LDA-LumiDISP vychází ze zrcadlového fotoaparátu. Je zde rozebrán princip jeho činnosti a možné chyby při pořizování snímků. Dále se práce zabývá rozsáhlým testováním jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, který je určen primárně pro měření jasů v dané scéně, ale lze ho využít i pro měření náhradní teploty chromatičnosti. Přístroj je testován z hlediska měření teploty chromatičnosti v laboratorních a terénních podmínkách. Cílem diplomové práce je výpočet chyb měření pro určité světelné zdroje a optimalizace měřícího algoritmu pro jejich snížení.

KLÍČOVÁ SLOVA:

jasový analyzátor, náhradní teplota chromatičnosti, zrcadlový fotoaparát, nejistota měření, světelný zdroj, jasová kamera

ABSTRACT

This master's thesis deals with the search of commercially available luminance analysers and cameras that use the measurement of correlated colour temperature. It also deals with calculations of correlated colour temperature according to various available methods. The luminance analyser LDA-LumiDISP is based on a DSLR camera. The principle of its operation and possible errors in capturing pictures are discussed here. The work deals with extensive testing of the LDA-LumiDISP luminance analyser, which is primarily intended for measuring luminance in the set scene, but can also be used to measure the correlated colour temperature. The device is being tested in terms of measuring the correlated colour temperature in laboratory and field conditions. The result of the master's thesis is the calculation of measurements uncertainty for certain light sources and the optimization of the measuring algorithm to reduce them.

KEY WORDS:

luminance analyser, correlated colour temperature, DSLR Camera, measurements uncertainty, light source, luminance camera

Bibliografická citace práce:

VLČEK, Pavel. *Analýza schopnosti jasového analyzátoru LDA - LumiDISP měřit náhradní teplotu chromatičnosti*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134924>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Martin Motyčka.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Pavel Vlček
VUT ID studenta:	195461
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Analýza schopnosti jasového analyzátoru LDA-LumiDISP měřit náhradní teplotu chromatčnosti

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho 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: 24.5.2021

podpis autora

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Motyčkovi, Ph.D. za odborné vedení, pedagogický přístup a cenné rady při zpracování této práce. Poděkování patří také konzultantům, kteří mi pomáhali se zpracováním a tvorbou diplomové práce.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK.....	13
ÚVOD.....	15
1 MĚŘENÍ JASU	16
1.1 ROZDĚLENÍ MĚŘENÍ JASU	17
1.2 JASOMĚŘ.....	18
1.3 SPEKTRÁLNÍ CHYBA.....	19
1.3.1 Porovnání spektrální citlivosti přístrojů:	19
2 VÝPOČETNÍ METODY NÁHRADNÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI A PARAMETRU DUV	20
2.1 PARAMETR DUV	21
2.2 ROBERTSONOVA METODA.....	22
2.3 VÝPOČET POMOCÍ MCCAMYHO POLYNOMU	23
2.4 TROJÚHELNÍKOVÁ A PARABOLICKÁ METODA	23
2.4.1 Trojúhelníková metoda	23
2.4.2 Parabolická metoda	24
2.4.3 Kombinace metod	24
2.5 VÝPOČET PARAMETRU DUV.....	25
3 MĚŘENÍ NÁHRADNÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI	26
3.1 ANALYZÁTOR BAREV	27
3.2 KOLORIMETR.....	27
3.3 SPEKTRORADIOMETR	28
3.3.1 Konstrukce a funkce	28
3.3.2 Výběr mřížky	29
4 JASOVÁ KAMERA	30
4.1 SNÍMACÍ ČIPY	30
4.1.1 CMOS technologie.....	30
4.1.2 CCD technologie	32
4.2 INSTRUMENT SYSTEMS.....	33
4.2.1 Funkce a princip	33
4.2.2 Specifikace	34
4.2.3 Zobrazovací kolorimetr LumiTop.....	35
4.3 TECHNOTEAM.....	36
4.3.1 Specifikace	36
4.3.2 Konstrukce a princip.....	37
4.3.3 Možnosti jasové kamery LMK 6	37
4.3.4 Jasová DSLR kamera	38
4.4 RADIANT	40
4.4.1 Parametry přístroje	40
4.4.2 Aplikace přístroje	40
4.5 GL OPTIC	41
4.5.1 Venkovní měření s kamerou	41
4.6 OPSIRA	42
4.7 HYBEC	42
4.8 SROVNÁNÍ VÝROBCŮ JASOVÝ KAMER	43
4.9 SIMULACE SPEKTRÁLNÍ CHYBY F_1' NA ZMĚNĚ HODNOTY T_{CP}	44

4.10 JASOVÝ ANALYZÁTOR LDA-LUMIDISP	45
4.10.1 Digitální zrcadlový fotoaparát	45
4.10.2 Efekty při focení	49
5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ	51
5.1 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO BOXU NA OPTICKÉ LAVICI	51
5.1.1 Schéma a průběh měření	52
5.1.2 Změřená spektra světelných zdrojů ve světelném boxu	53
5.1.3 Změřené hodnoty	54
5.1.4 UPRtek v porovnání s přístrojem JETI	56
5.1.5 Příklad výpočtu:	57
5.1.6 Konica Minolta CS-1000A v porovnání s přístrojem JETI	58
5.1.7 Konica Minolta CL-200 v porovnání s přístrojem JETI	59
5.1.8 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI	60
5.1.9 Měřený světelný zdroj a použité přístroje	61
5.2 MĚŘENÍ MALÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ S PATICÍ E27 NA OPTICKÉM STOLE	62
5.2.1 Schéma a průběh měření	62
5.2.2 Změřená spektra světelných zdrojů	63
5.2.3 Změřené hodnoty	65
5.2.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI	65
5.2.5 Měřené světelné zdroje a použité přístroje	66
5.3 MĚŘENÍ PLANCKOVA (TEPLOTNÍHO) ZÁŘIČE NA OPTICKÉM STOLE	67
5.3.1 Schéma a průběh měření	67
5.3.2 Změřené spektrum Planckova (teplotního) zářiče	68
5.3.3 Změřené hodnoty	69
5.3.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI	69
5.3.5 Měřený světelný zdroj a použité přístroje	70
5.4 MĚŘENÍ GENEROVANÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	71
5.4.1 Schéma a průběh měření	71
5.4.2 Změřené spektra generované programovatelným zdrojem	71
5.4.3 Změřené hodnoty	73
5.4.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI	73
5.4.5 Měřený světelný zdroj a použité přístroje	74
5.5 NAVRHNUTÍ KOREKČNÍCH KOEFICIENTŮ	75
5.5.1 Sodíková výbojka	75
5.5.2 Příklad výpočtu	76
5.5.3 Kompaktní zářivka	77
5.5.4 LED světelný zdroj	78
5.5.5 Navržené korekční koeficienty	79
5.6 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VYBUZENÍ MODRÉHO KANÁLU NA ZMĚNĚ T_{cp}	80
5.6.1 Průběh měření a změřené hodnoty	80
5.6.2 Příklad výpočtu	82
5.6.3 Měřený světelný zdroj a použité přístroje	82
5.6.4 Shrnutí měření závislosti vybuzení modrého kanálu	82
6 TERÉNNÍ MĚŘENÍ	83
6.1 ÚVOD K MĚŘENÍ	83
6.1.1 Metodika měření	84
6.1.2 Změřená spektra z terénního měření	88
6.1.3 Seznam měřených svítidel a použitých přístrojů	88
6.2 ZMĚŘENÉ HODNOTY PODLE TYPU SVĚTELNÉHO ZDROJE VE SVÍTIDLE	89
6.2.1 Biodynamické LED svítidlo	89
6.2.2 LED svítidla	90

6.2.3 Sodíkové výbojky	91
6.2.4 Halogenidové výbojky	92
6.3 ZHODNOCENÍ KOREKCE	93
6.4 ODCHYLKY PODLE JEDNOTLIVÝCH POHLEDŮ NA SVÍTIDLO	94
6.4.1 Boční pohled.....	94
6.4.2 Spodní pohled.....	95
6.4.3 Pohled z odrazu.....	96
6.4.4 Srovnání odchylek	97
7 ZÁVĚR	99
POUŽITÁ LITERATURA	102
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	106

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i>	<i>Definice jasu [3]</i>	16
<i>Obr. 2</i>	<i>Závislost polohy pozorovatele [2, upraveno]</i>	16
<i>Obr. 3</i>	<i>Analýza jasu [5]</i>	17
<i>Obr. 4</i>	<i>Jasoměr LS100 [2]</i>	18
<i>Obr. 5</i>	<i>Princip funkce objektivního jasoměru [10]</i>	18
<i>Obr. 6</i>	<i>Porovnání spektrální citlivosti přístrojů T10 a CL500A [31, 32, 33, upraveno]</i>	19
<i>Obr. 7</i>	<i>Rozdílná teplota chromatičnosti v místnosti [49]</i>	20
<i>Obr. 8</i>	<i>Diagram chromatičnosti CIE (x, y) s vyznačenou křivkou teplotního zářiče [18]</i>	20
<i>Obr. 9</i>	<i>Diagram chromatičnosti CIE (u', v') s naznačením křivkou teplotního zářiče [48]</i>	21
<i>Obr. 10</i>	<i>Křivka teplotního zářiče v diagramu CIE 1960 (u, v) s vyznačeným Duv [47]</i>	21
<i>Obr. 11</i>	<i>Interpolační metoda k nalezení náhradní teploty chromatičnosti [17, upraveno]</i>	22
<i>Obr. 12</i>	<i>Trojúhelníková metoda [15, upraveno]</i>	23
<i>Obr. 13</i>	<i>Teplota chromatičnosti [4, upraveno]</i>	26
<i>Obr. 14</i>	<i>Analyzátor barev CA-210 [46]</i>	27
<i>Obr. 15</i>	<i>Kolorimetr CL-200 [45]</i>	27
<i>Obr. 16</i>	<i>Složení spektrometru [19, upraveno]</i>	28
<i>Obr. 17</i>	<i>Spektrometr Konica Minolta CS-1000A [16]</i>	29
<i>Obr. 18</i>	<i>Měření s jasovou kamerou [21]</i>	30
<i>Obr. 19</i>	<i>CMOS technologie [12]</i>	30
<i>Obr. 20</i>	<i>CMOS a BSI CMOS technologie [20]</i>	31
<i>Obr. 21</i>	<i>Princip čtení zaznamenaného světla pro CCD senzor v DSLR kameře [11]</i>	32
<i>Obr. 22</i>	<i>Typy jasových kamer LumiCam společnosti Instrument Systems [21]</i>	33
<i>Obr. 23</i>	<i>Konstrukce jasové kamery Instrument systems [21, upraveno]</i>	33
<i>Obr. 24</i>	<i>Měřicí sada k LumiCam [21]</i>	34
<i>Obr. 25</i>	<i>Zobrazovací kolorimetr LumiTop se spektrometrem CAS [51]</i>	35
<i>Obr. 26</i>	<i>Typy jasových kamer LMK [5]</i>	36
<i>Obr. 27</i>	<i>Konstrukce jasové kamery LMK 6-12 Color [5, upraveno]</i>	37
<i>Obr. 28</i>	<i>Manipulace pomocí robotické ruky [5]</i>	38
<i>Obr. 29</i>	<i>Jasová DSLR kamera LMK mobile air [5]</i>	38
<i>Obr. 30</i>	<i>Spektrální přizpůsobení citlivosti jasové DSLR kamery s $V(\lambda)$ [5, upraveno]</i>	39
<i>Obr. 31</i>	<i>Jasová kamera ProMetric I [23]</i>	40
<i>Obr. 32</i>	<i>Použití přístroje Radiant v automobilové technice [50]</i>	40

Obr. 33 Jasové kamera GL Opticom 3.0 TEC 4K [24].....	41
Obr. 34 Měření s jasovou kamerou GL Opticom 3.0 v terénu [24].....	41
Obr. 35 Jasová kamera Luca Color [22].....	42
Obr. 36 Jasová kamera ColorLive 300 [34].....	42
Obr. 37 Deformace 1 - $f_1' = 4\%$	44
Obr. 38 Deformace 2 - $f_1' = 4\%$	44
Obr. 39 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP [35].....	45
Obr. 40 Princip zrcadlového fotoaparátu [37].....	46
Obr. 41 Funkce spojky a rozptylky [38].....	47
Obr. 42 Změna ohniskové vzdálenosti se zorným úhlem [39].....	47
Obr. 43 Funkce clony [40].....	48
Obr. 44 Vlevo snímek s vinětací a vpravo bez ní [42].....	49
Obr. 45 Snímek s bokeh efektem [43].....	49
Obr. 46 Pohybová neostrost [44].....	50
Obr. 47 Měření na optické lavici s jasovým analyzátozem LDA.....	51
Obr. 48 Schéma měření světelného boxu na optické lavici.....	52
Obr. 49 Ukázka snímku měření na světelném boxu v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	52
Obr. 50 Změřené spektra světelných zdrojů na světelném boxu.....	53
Obr. 51 Změřené hodnoty T_{cp} na světelném boxu.....	54
Obr. 52 Změřené hodnoty parametru D_{uv} na světelném boxu.....	55
Obr. 53 Relativní odchyšky přístroje UPRtek s referenčním přístrojem JETI.....	56
Obr. 54 Relativní odchyšky přístroje KM CS-1000A s referenčním přístrojem JETI.....	58
Obr. 55 Relativní odchyšky přístroje KM CL-200 s referenčním přístrojem JETI.....	59
Obr. 56 Relativní odchyšky jasového analyzátoru LDA s přístrojem JETI, světelný box.....	60
Obr. 57 Světelný box.....	61
Obr. 58 Jasový analyzátor LDA.....	61
Obr. 59 Spektroradiometr a) JETI, b) UPRtek.....	61
Obr. 60 Měření malých světelných zdrojů s patičí E27 na optickém stole.....	62
Obr. 61 Schéma měření malých světelných zdrojů s patičí E27.....	62
Obr. 62 Zpracovaný snímek při měření malých zdrojů v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	63
Obr. 63 Změřené spektra při měření malých světelných zdrojů s patičí E27.....	64
Obr. 64 Změřené hodnoty malých světelných zdrojů na optickém stole.....	65
Obr. 65 Relativní odchyšky jasového analyzátoru LDA s přístrojem JETI, malé zdroje.....	65

Obr. 66 Schéma měření Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole	67
Obr. 67 Snímek při měření 1800 K z před vývojové verze programu LumiDISP	67
Obr. 68 Změřená spektra Planckova (teplotního) zářiče	68
Obr. 69 Rozdíl změřených spekter Planckova (teplotního) zářiče	68
Obr. 70 Změřené hodnoty Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole	69
Obr. 71 Relativní odchylky jasového analyzátoru s přístrojem JETI, Planckův zářič.....	69
Obr. 72 Schéma měření programovatelného zdroje na optickém stole	71
Obr. 73 Měření programovatelného světelného zdroje.....	71
Obr. 74 Změřená spektra na programovatelném zdroji.....	72
Obr. 75 Změřené hodnoty programovatelného zdroje na optickém stole	73
Obr. 76 Relativní odchylky jasového analyzátoru s přístrojem JETI, programovatelný zdroj.....	73
Obr. 77 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro sodíkovou výbojku	75
Obr. 78 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro kompaktní zářivku	77
Obr. 79 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro LED	78
Obr. 80 Měření závislosti vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp}	80
Obr. 81 Snímek z měření vybuzení modrého kanálu, při měření LED Vitae 1600 K, snímek je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	80
Obr. 82 Závislost vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp}	82
Obr. 83 Ukázka z terénního měření.....	83
Obr. 84 Snímek z měření písmena C v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	84
Obr. 85 Snímek z měření nápisu Red Hat v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	84
Obr. 86 Pohled z boku na biodynamické LED svítidlo v před vývojové verzi programu LumiDISP	84
Obr. 87 Snímek zespodu z měření Biodynamického LED svítidla a) teplý, b) neutrální, snímek zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP.....	85
Obr. 88 Měření odrazu z bílé plochy pod svítidlem, snímek je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP	85
Obr. 89 Funkce HDR [53]	86
Obr. 90 Změřená spektra studeného LED zdroje se zasažením sodíkové výbojky.....	87
Obr. 91 Vliv parazitního světla sodíkových výbojek na měření LED svítidla.....	87
Obr. 92 Změřená spektra při terénním měření.....	88
Obr. 93 Změřené hodnoty biodynamického LED svítidla.....	89
Obr. 94 Změřené hodnoty LED svítidla	90
Obr. 95 Změřené hodnoty sodíkové výbojky	91
Obr. 96 Změřené hodnoty halogenidové výbojky.....	92

<i>Obr. 97 Korekce v terénním měření</i>	<i>93</i>
<i>Obr. 98 Srovnání odchylek při pohledu z boku</i>	<i>94</i>
<i>Obr. 99 Srovnání odchylek při pohledu zespodu</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 100 Srovnání odchylek při pohledu z odrazu.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 101 Srovnání odchylek jednotlivých měření svítidla</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 102 Srovnání průměrných odchylek.....</i>	<i>97</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Rozdělení přesnosti měření světelně technických veličin [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2 Hodnoty pro dosazení do vztahu 1.12 [17].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 3 Koeficient k pro výpočet L_{bb} [15].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4 Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti zdrojů světla [2]</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 5 Parametry vrypů na difrakční mřížce značky Avantes [19].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 6 Parametry měřících jasových kamer LumiCam 2400 (1300) [21].....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 7 Specifikace kolorimetru LumiTop [51]</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 8 Specifikace spektrometru CAS [51].....</i>	<i>35</i>
<i>Tab. 9 Parametry kamery LMK 6 [5].....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 10 Parametry DSLR kamery LMK mobile air [5]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 11 Parametry přístroje ProMetric I [23].....</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 12 Parametry jasových kamer GL Opticam [24].....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 13 Parametry jasové kamery Luca Color [22]</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 14 Parametry jasové kamery ColorLive 300 [34]</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 15 Srovnání jasových kamer různých výrobců [5, 21, 22, 23, 24, 34].....</i>	<i>43</i>
<i>Tab. 16 Měření T_{cp} na světelném boxu</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 17 Měření Duv na světelném boxu</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 18 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a UPRtek</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 19 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a KM CS-1000A</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 20 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} přístroje JETI a Konica Minolta CL-200.....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 21 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} přístroje JETI s jasového analyzátoru LDA, světelný box</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 22 změřené a zpracované hodnoty T_{cp} z měření malých zdrojů</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 23 Změřené a zpracované hodnoty T_{cp} z měření Planckova (teplotního) zářiče.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 24 Změřené hodnoty T_{cp} z měření světelných zdrojů generovaných progr. zdrojem</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 25 Odchyly od přístroje JETI pro sodíkovou výbojku s korekcí T_{cp}.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 26 Porovnání odchylek měřících přístrojů pro sodíkovou výbojku s korekcí T_{cp}</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 27 Odchyly od přístroje JETI pro kompaktní zářivku s korekcí T_{cp}.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 28 Odchyly od přístroje JETI pro LED s korekcí T_{cp}.....</i>	<i>78</i>
<i>Tab. 29 Navrhnuté korekce k přístroji JETI.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 30 Změřené a korigované hodnoty</i>	<i>81</i>
<i>Tab. 31 Změřené hodnoty biodynamického LED svítidla</i>	<i>89</i>
<i>Tab. 32 Změřené hodnoty LED svítidla.....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 33 Změřené hodnoty sodíkové výbojky.....</i>	<i>91</i>

<i>Tab. 34</i>	<i>Změřené hodnoty halogenidové výbojky</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 35</i>	<i>Srovnání hodnot s korekcí</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 36</i>	<i>odchylky při pohledu z boku</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 37</i>	<i>Odchylky při pohledu zespodu</i>	<i>95</i>
<i>Tab. 38</i>	<i>Odchylky při pohledu z odrazu</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 39</i>	<i>Srovnání odchylek</i>	<i>98</i>

ÚVOD

V poslední době roste důležitost měření náhradní teploty chromatičnosti v terénních podmínkách. Je to způsobeno rozvojem biodynamických LED svítidel a instalování svítidel s náhradní teplotou chromatičnosti pod 3000 kelvinů. Konvenční přístroje a jasové kamery mohou mít v terénu problém s měřením hodnotu náhradní teploty chromatičnosti. Z tohoto důvodu vznikla tato diplomová práce, která je zaměřena na měření náhradní teploty chromatičnosti pomocí jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, který je primárně určen pro měření jasů v dané scéně. Práce se zaměřuje nejprve na základní světelně technické veličiny, se kterými budeme dále pracovat. Jedná se o veličiny jas, náhradní teplota chromatičnosti a její výpočet pomocí různých metod a srovnání jejich výhod a nevýhod. Dále se práce zabývá srovnáním komerčně dostupných jasových kamer, které umožňují měření náhradní teploty chromatičnosti. Z důvodu, že jasový analyzátor LDA-LumiDISP vychází ze zrcadlového fotoaparátu je zde popsán princip jeho činnosti a možné chyby při pořizování snímku. Práce spočívá v rozsáhlém testování jasového analyzátoru LDA z hlediska měření náhradní teploty chromatičnosti v laboratorních a terénních podmínkách. Výsledkem práce by měla být analýza schopnosti měření náhradní teploty chromatičnosti jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP, výpočet chyb při měření pro určité světelné zdroje a optimalizace měřícího algoritmu pro jejich snížení.

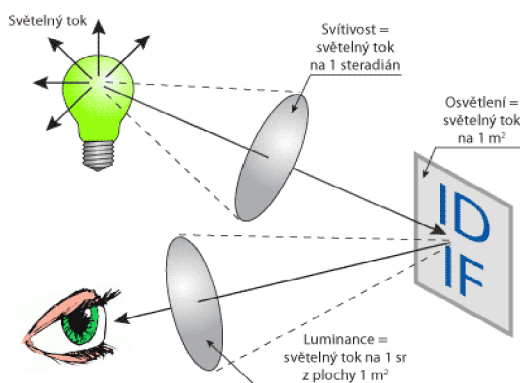
1 MĚŘENÍ JASU

Ve světelné technice se nacházejí energetické veličiny jako je třeba zářivý tok a zářivost, ale častěji se pracuje s fotometrickými veličinami, které respektují různou citlivost oka pozorovatele na záření o různých vlnových délkách. Ve výpočtech se počítá se spektrální citlivostí oka normálního fotometrického pozorovatele, je to z důvodu zajištění jednotnosti světelně technických výpočtů. Mezi fotometrické veličiny patří světelný tok ϕ s jednotkou lumen (lm), osvětlenost E s jednotkou lux (lx), prostorový úhel Ω s jednotkou steradián (sr), svítivost I s jednotkou kandela (cd), Jas L s jednotkou kandela na metr čtvereční ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$) a další veličina, kterou může být náhradní teplota chromatičnosti T_{cp} s jednotkou kelvin (K) [1].

Jas je fotometrická veličina, která se definuje jako měrná svítivost, někdy též luminance. Značí se L a udává se v jednotkách kandela na metr čtvereční ($\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$). Lidské oko reaguje na jas a přizpůsobuje se jeho kontrastu. Veličina je popsána prostorovou a plošnou hustotou světelného toku přenášeného paprsky, vždy záleží na poloze pozorovatele, na směru jeho pohledu [1].

$$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lm}, \text{sr}, \text{m}^2) \quad (1.1)$$

Pomocí vztahu 1.1 lze vypočítat jas L ve směru osy svazku světelných paprsků, kde $d\Omega$ je prostorový úhel, kterým se šíří paprsky, dA_n je plocha, na kterou paprsky dopadají a zároveň je kolmá k ose svazku světelného toku ϕ [2].



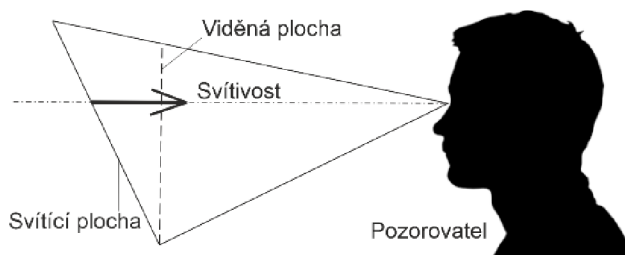
Obr. 1 Definice jasu [3]

Na obr. 1 je zobrazena svázanost jasu s dalšími světelně technickými veličinami. Záleží na úhlu dopadajícího světelného toku, i na úhlu odraženého toku, tedy na poloze pozorovatele.

Při zjištění hodnot jasu dopadajících z různých směrů do okolí daného bodu prostoru, a směru od uvažovaného počátečního bodu jako radiusvektory, lze zjistit fotometrickou plochu s rozložením jasu. Při provedení řezů procházející vztázným bodem dostaneme vztah 1.2 [1].

$$L_\gamma = L_o \cdot f(\lambda) \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{cd}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1.2)$$

Na obr. 2 je zobrazen vliv, který má poloha svítící plochy na vnímání pozorovatele [2].



Obr. 2 Závislost polohy pozorovatele [2, upraveno]

1.1 Rozdělení měření jasu

K měření jasu se používají fotometrické měřicí přístroje, obvykle se jedná o jasové kamery nebo jasoměry, ale může se jednat o jasovou DSLR kameru, nebo jasový analyzátor. Základním prvkem může být fotoelektrický článek, optický detektor, fotodioda CCD nebo CMOS snímač.

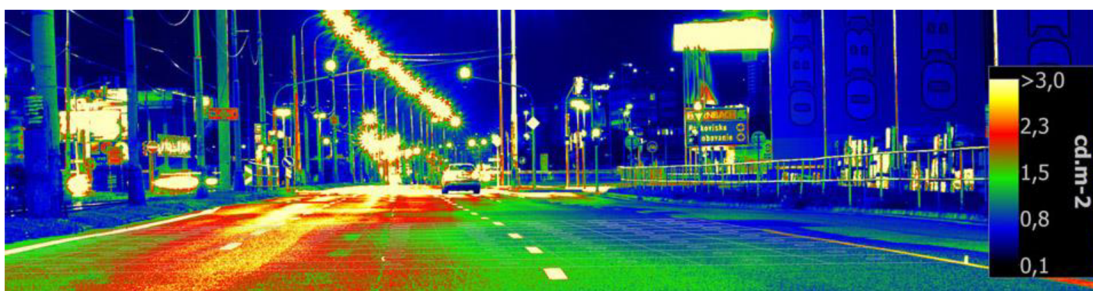
Dle požadavků na přesnost, lze měření rozdělit dle Tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení přesnosti měření světelně technických veličin [1]

Typ měření	Odhad rozšířené nejistoty U (%)	Přípustná chyba jasoměru (%)	Příklady
Přesné	$U \leq 8$	7,5	Kalibrace přístrojů, tvorba etalonů, laboratorní měření
Provozní	$8 < U \leq 14$	10	Ověřování parametrů zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav
Orientační	$14 < U \leq 20$	15	Kontrola funkce osvětlovacího zařízení

Metody měření se dále rozdělují na vizuální neboli subjektivní, při jejichž měření se používá zrak a na fyzikální neboli objektivní, při kterých se měří pomocí fyzikálních čidel. Využívají se obvykle poměrně přesné přístroje vybavené fotoelektrickými články. Tato práce se zabývá objektivní metodou za použití fyzikálních čidel. Za základní čidlo se dá považovat fotoelektrický článek nebo fotodioda, které mohou být základem pro složitější přístroj, jako je třeba jasoměr [1].

Analýza světelné scény se stává stále více důležitou v hodnocení osvětlených ploch. Složitá analýza různých scén vyžaduje znalost rozložení jasu nejlépe v celém zorném poli, nebo alespoň ve více vybraných částech. Jako řešení se nabízí měření bod po bodu, ale to zabere mnoho času a je to možné jen s rastrovou mřížkou. Proto se rozšiřuje vývoj jasových kamera jiných přístrojů měřící jas. Tyto přístroje umožňují analyzovat celé světelné scény a aplikují se, když je potřeba měřit úroveň jasu světelného znečištění, pocit oslnění, náhradní teplotu chromatičnosti, distribuci světla, paprsková data (ldt soubory) nebo nevizuální efekty jako jsou nebezpečné modré složky světla, které souvisí s potlačením spánkového hormonu melatonin [5], příklad jasové analýzy v nočním prostředí ulice je zobrazen na Obr. 3.



Obr. 3 Analýza jasu [5]

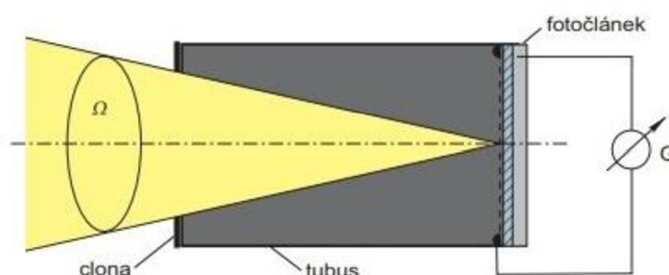
1.2 Jasoměr

Využívá optiku, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo fotočlánku v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém integruje snímaný jas. Měří jasy reálných i fiktivních povrchů, které mohou vytvářet nebo odrážet světlo. Je třeba dbát na to, aby měřená plocha zahrnovala pouze povrch, jehož jas se hodnotí. U běžných objektivních jasoměrů to není problém, jelikož se okolí měřené plochy pozoruje v okuláru a měřená oblast je v zorném poli vyznačena například tmavým kroužkem. Na Obr. 4 je zobrazen jasoměr LS100 [2]. Tento přístroj zvládne měřit jas a kontrast dále poskytuje měřicí úhel 1° a umožňuje měření v rozsahu jasu $0,001$ až $49900 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ s přesností pro normované světlo typu A s měřením hodnot $0,001$ až $0,999 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ s přesností 2% [29].



Obr. 4 Jasoměr LS100 [2]

Princip funkce objektivního jasoměru je patrný na Obr. 5. Jasoměr se skládá z přijímače galvanometru, na kterém je nasazený tubus. Tubus je trubka, která je uvnitř černá a má vepředu clonu s kruhovým otvorem, pomocí kterého je vymezen prostorový úhel Ω . Na kruhový otvor dopadají světelné paprsky, které následně zaznamenává přijímač neboli fotočlánek [2].



Obr. 5 Princip funkce objektivního jasoměru [10]

Obvykle se změří normálová osvětlenost E_N , kterou přijme plocha čidla a následně se vypočítá střední jas:

$$L = \frac{E_N}{\Omega} \quad (\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}; \text{lx}, \text{sr}) \quad (1.3)$$

Ze vztahu 1.3 vyplývá, že jasoměr udává střední hodnotu jasu měřené plochy, kterou vymezuje optika přístroje v závislosti na vzdálenosti jasoměru od měřeného povrchu [2].

1.3 Spektrální chyba

Jedná se o odchylku relativní spektrální citlivosti od $V(\lambda)$ funkce. Značí se symbolem f'_1 a může se udávat bez jednotky, nebo v procentech %.

Spektrální chybu lze vyjádřit následujícím vztahem 1.4:

$$f'_1 = \frac{\sum_i^n |s^*(\lambda_i)_{rel} - V(\lambda_i)| \Delta\lambda}{\sum_i^n V(\lambda_i) \Delta\lambda} \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

Kde $s^*(\lambda_i)_{rel}$ je korigovaná relativní spektrální citlivost fotometru na typ světla A.

$$s^*(\lambda_i)_{rel} = \frac{\sum S_A(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)}{\sum S_A(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}} \cdot s(\lambda_i)_{rel} \quad (1.5)$$

Vztah 1.5 odpovídá korigované hodnotě normalizované spektrální citlivosti $s^*(\lambda_i)_{rel}$, s touto hodnotou se počítá ve vztahu 1.4. Její hodnotu stanovuje příslušná instituce. Spektrální citlivost se s časem mění, proto je nutné fotometrické přístroje pravidelně kalibrovat [30].

V případě, že je potřeba měřit světelné zdroje s odlišným spektrem než typu A, pro které je přístroj kalibrován. Vznikne chyba, která se značí $f'_1(Z)$. Přičemž Z je spektrum měřeného světla.

$$f'_1(Z) = a(Z) - 1 \quad (1.6)$$

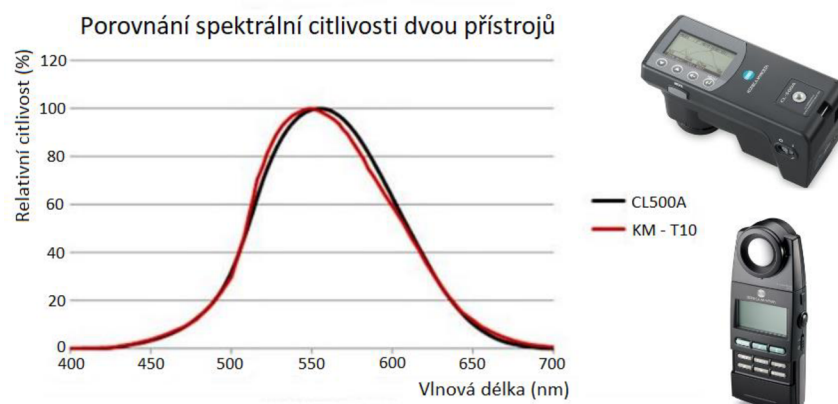
Hodnota $a(Z)$ je korekční koeficient pro světlo Z a je dán vztahem 1.7:

$$a(Z) = \frac{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}}{\sum S_Z(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)} \cdot \frac{\sum S_A(\lambda_i) \cdot V(\lambda_i)}{\sum S_A(\lambda_i) \cdot s(\lambda_i)_{rel}} \quad (1.7)$$

Hodnota symbolu $S_Z(\lambda_i)$ udává vyzařované spektrum měřeného světelného zdroje Z a hodnota symbolu $S_A(\lambda_i)$ udává vyzařované spektrum normalizovaného zdroje A.

1.3.1 Porovnání spektrální citlivosti přístrojů:

Na Obr. 6 je patrný rozdíl spektrální citlivosti dvou přístrojů Kolorimetru Konica Minolta T10 a spektrometru Konica Minolta CL500A. Oba přístroje jsou zobrazeny na Obr. 6, přičemž horní přístroj je spektrometr CL500A a spodní přístroj je kolorimetr T10.

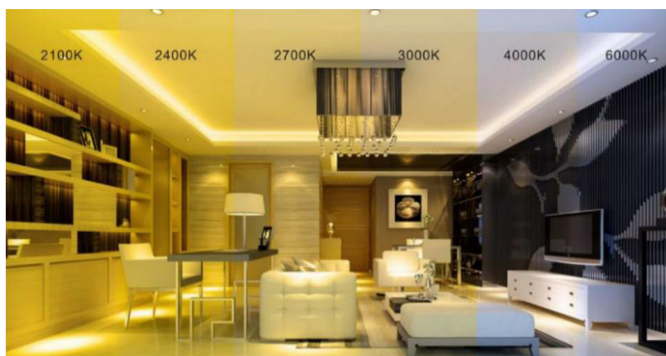


Obr. 6 Porovnání spektrální citlivosti přístrojů T10 a CL500A [31, 32, 33, upraveno]

Kolorimetr T10 využívá sadu skleněných filtrů a spektrometr CL500A využívá přesné softwarové úpravy spektrální citlivosti. Spektrální chyba laboratorních luxmetrů činí přibližně 2 %, u jasoměřů jsou to 3 % [30].

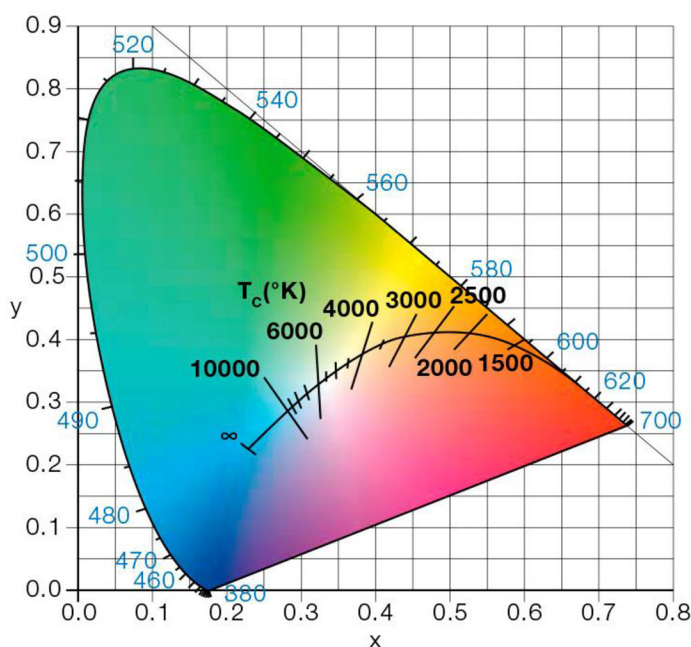
2 VÝPOČETNÍ METODY NÁHRADNÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI A PARAMETRU DUV

Teplota chromatičnosti T_{cp} odpovídá teplotě černého zářiče, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření. Udává se v kelvinech (K). Chromatičnost je jedním ze způsobů, kterým lze charakterizovat barvu světla. Na Obr. 7 je patrný rozdíl v osvětlení v závislosti na změně teploty chromatičnosti. Chromatičnost zachytí barevný tón neboli odstín a sytost barvy světla, ale nedokáže zachytit třetí dimenzi lidského vidění, kterou je jasnost, která není vlastností světelných zdrojů, ale předmětů. Jako chromatičnost se dá zjednodušeně označit spektrální rozložení výkonu, které se zaměřuje na modely lidského vidění.



Obr. 7 Rozdílná teplota chromatičnosti v místnosti [49]

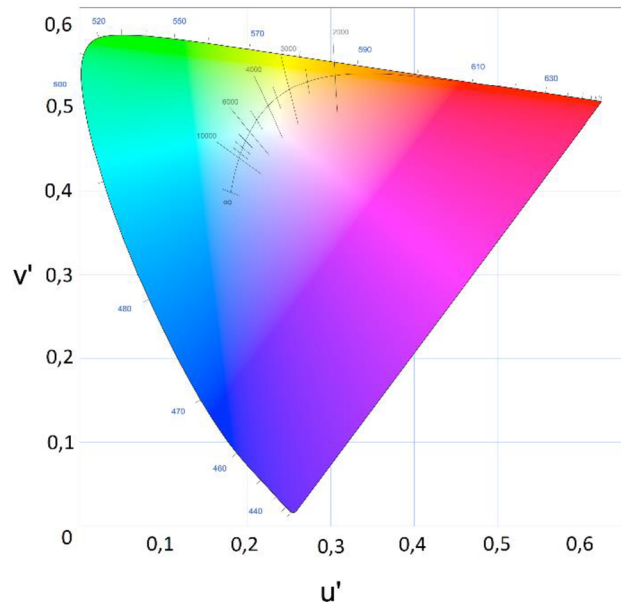
Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) vytvořila různé standardizované diagramy chromatičnosti (CIE). Jedná se o diagram chromatičnosti CIE 1931 (x, y), který se stále velmi často používá. Diagram je zobrazen na Obr. 8 s vyznačenou křivkou teplotního zářiče.



Obr. 8 Diagram chromatičnosti CIE (x, y) s vyznačenou křivkou teplotního zářiče [18]

Diagram CIE 1931 (x, y) je jedním z prvních definovaných barevných prostorů a používá se k vyjádření barvy světla. Vybarvené pozadí je určeno jen pro vizuální referenci, protože diagram chromatičnosti nezohledňuje jas jednotlivých barev, který je zohledněn souřadnicí Y v barevném prostoru xyY . Čísla okolo vnějšího okraje diagramu značí vlnovou délku monochromatického světla na souřadnici x a udávají ji v nanometrech. Barvy mimo vyznačenou oblast nejsou pro lidi viditelné [47].

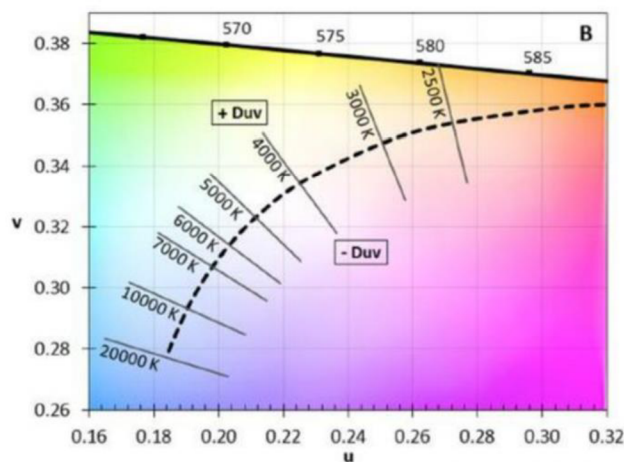
Novější diagram chromatičnosti CIE 1976 (u' , v') je rovnoměrnější, a proto je vhodnější pro určení barevných rozdílů, nebo změn. Diagram je zobrazen na následujícím obrázku Obr. 9, kde je naznačená i křivka teplotního zářiče. V diagramu se pro zjednodušení definuje rozsah chromatičnosti s označením jedné řadové hodnoty. Rozeznáváme tyto řadové hodnoty 2200, 2500, 2700, 3000, 3500, 4000, 5000 a 6500 K.



Obr. 9 Diagram chromatičnosti CIE (u' , v') s naznačením křivkou teplotního zářiče [48]

2.1 Parametr Duv

Parametr Duv určuje vzdálenost mezi chromatičností daného světelného zdroje a teplotního zářiče se stejnou teplotou chromatičnosti. Na následujícím obrázku Obr. 10 je zobrazena křivka teplotního zářiče s vyznačeným parametrem Duv v diagramu chromatičnosti CIE 1960 (u , v). Na obrázku jsou patrné linie konstantní teploty chromatičnosti kolmé na křivku teplotního zářiče.

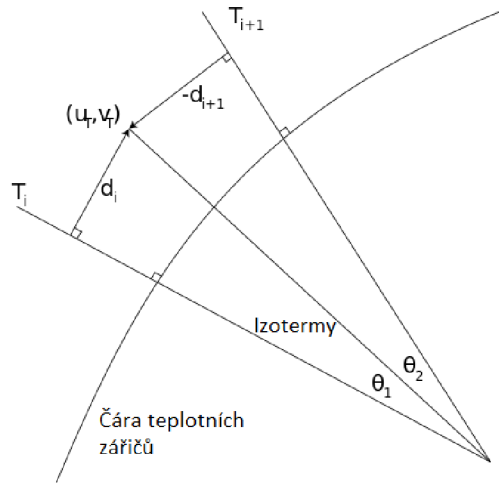


Obr. 10 Křivka teplotního zářiče v diagramu CIE 1960 (u , v) s vyznačeným Duv [47]

Pokud parametr Duv nabývá záporných hodnot znamená to, že se zdroj nachází pod čarou teplotního zářiče a barva má fialový nádech. Pokud má parametr Duv kladné hodnoty znamená to, že se zdroj nachází nad čarou teplotního zářiče a barva má nádech zelené. Hodnota náhradní teploty chromatičnosti a parametru Duv dávají dohromady konkrétní dvojici chromatických souřadnic. Tyto dvě čísla CCT a Duv dávají lepší informaci o barvě světla než barevné souřadnice x a y [47,15].

2.2 Robertsonova metoda

Než byla výpočetní technika, bylo běžné odhadovat teplotu chromatičnosti z tabulek a grafů. Nejznámější z těchto metod je právě Robertsonova metoda, která využívá relativně rovnoměrného rozestupu stupnice pomocí lineární interpolace blízkých hodnot.



Obr. 11 Interpolační metoda k nalezení náhradní teploty chromatičnosti [17, upraveno]

Hodnoty použity při interpolaci blízkých hodnot jsou zobrazeny na obrázku Obr. 11. K výpočtu se použije následující vztah 2.1.

$$\frac{1}{T_C} = \frac{1}{T_i} + \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2} \cdot \left(\frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (2.1)$$

Ve vztahu jsou symboly T_i a T_{i+1} , které představují teploty chromatičnosti zvolených izoterm, jež jsou zvoleny kolem hledané teploty chromatičnosti $T_i < T_C < T_{i+1}$. Hledaná teplota chromatičnosti leží mezi dvěma známými hodnotami, jejichž vzdálenosti jsou $d_i/d_{i+1} < 0$. Pokud jsou izotermy dostatečně blízko sebe, lze předpokládat následující vztah 2.2.

$$\frac{1}{T_C} = \frac{1}{T_i} + \frac{d_1}{d_1 - d_2} \cdot \left(\frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (2.2)$$

Přičemž vzdálenost hledaného bodu je od i -té izotermy vzdálena dle vztahu 2.3.

$$d_i = \frac{(v_T - v_i) - m_i \cdot (u_T - u_i)}{\sqrt{1 + m_i^2}} \quad (2.3)$$

Ve vztahu jsou symboly u_i a v_i , které představují barevné souřadnice i -té izotermy na čáře teplotních zářičů a značí sklon izotermy. Zatímco u_T a v_T jsou hledané barevné souřadnice. Jelikož je izoterma kolmá k čáře teplotních zářičů platí, že $m_i = -1/l_i$, kde l_i je sklon křivky teplotního zářiče v místě souřadnic u_i a v_i . Výpočet náhradní teploty chromatičnosti pro barevné souřadnice má smysl v případě, že světelné zdroje odpovídají vyzařování černého tělesa [17].

2.3 Výpočet pomocí Mccamyho polynomu

Pokud je uvažován úzký rozsah teploty chromatičnosti. Lze pomocí aproximace křivky teplotního zářiče vypočítat náhradní teplota chromatičnosti. Mccamyho polynom ze vztahu 2.4.

$$CCT(x, y) = 449 \cdot n^3 + 3525 \cdot n^2 + 6823,3 \cdot n + 5520,33 \quad (2.4)$$

Ve vztahu je $n = (x - x_e)/(y - y_e)$, což odpovídá inverzní přímce sklonu, přičemž za x_e a y_e se dosadí $x_e = 0,3320$ a $y_e = 0,1858$ pro určení teploty chromatičnosti od 2856 K do 6504 K s chybou pod 2 kelviny [17].

Novější návrh, který využívá exponenciální výrazy, značně rozšiřuje použitelný rozsah přidáním hodnoty t pro určení vysokých teplot barev.

$$CCT(x, y) = A_0 + A_1 \cdot \exp(-n/t_1) + A_2 \cdot \exp(-n/t_2) + A_3 \cdot \exp(-n/t_3) \quad (2.5)$$

Hodnota n se vyjádří stejně $n = (x - x_e)/(y - y_e)$. Jednotlivé hodnoty pro dosazení jsou vázané velikostí teploty chromatičnosti, která se bude počítat. Hodnoty jsou napsány v Tab. 2 [17].

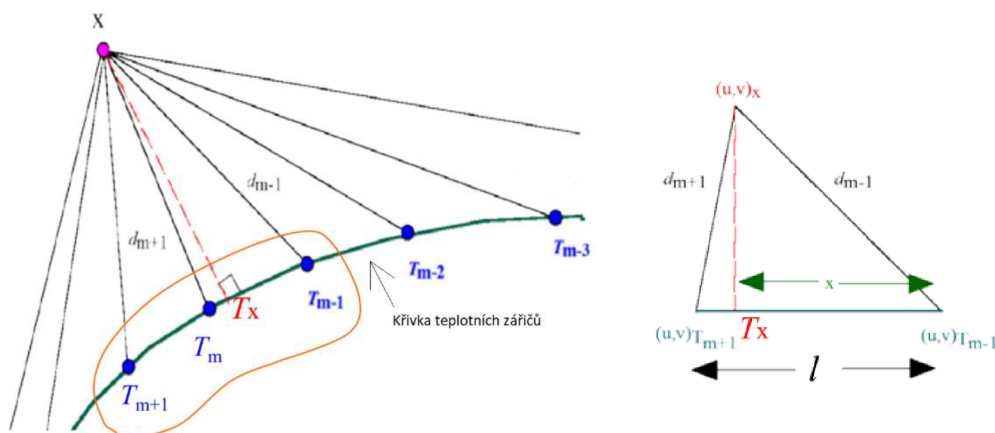
Tab. 2 Hodnoty pro dosazení do vztahu 1.12 [17]

T_{cp} (kK)	x_e	y_e	A_0	A_1	t_1	A_2	t_2	A_3	t_3
30-50	0,3366	0,1735	-949,86315	6253,80338	0,92159	28,70599	0,20039	$4 \cdot 10^{-5}$	0,07125
50-800	0,3356	0,1691	36284,48953	0,00228	0,07861	$5,4535 \cdot 10^{36}$	0,01543	0	0

2.4 Trojúhelníková a parabolická metoda

2.4.1 Trojúhelníková metoda

Nejprve se vytvoří tabulka s jednotlivými náhradními teplotami chromatičnosti (CCT) a jejich odpovídajícími vzdálenostmi d_i na křivce teplotních zářičů s odpovídajícími souřadnicemi u a v , poté se najde nejbližší bod v tabulce a výpočet se provede pomocí trojúhelníků pro dva nejbližší body. Dle následujícího postupu je pro názornost uveden obrázek Obr. 12 a odpovídající postup výpočtu je uveden ve vztazích 2.6-2.8 [15].



Obr. 12 Trojúhelníková metoda [15, upraveno]

Vztah pro výpočet vzdálenost x :

$$x = \frac{d_{m-1}^2 - d_{m+1}^2 + l^2}{2 \cdot l} \quad (2.6)$$

Vztah pro výpočet hledané teploty chromatičnosti:

$$T_x = T_{m-1} + (T_{m+1} - T_{m-1}) \cdot \frac{x}{l} \quad (2.7)$$

Vztah pro výpočet parametru Duv:

$$D_{uv} = \pm(d_{m-1}^2 - x^2)^{1/2} \quad (2.8)$$

Tato metoda je velmi přesná na křivce teplotních zářičů i v jejím blízkém okolí, ovšem nevýhoda metody je, že při vzdalování od dané křivky teplotního zářiče přesnost velmi klesá, jinými slovy přesnost metody klesá se zvyšujícím se Duv a to až k chybě 10 kelvinů [15].

2.4.2 Parabolická metoda

Postup výpočtu začíná podobně jako u trojúhelníkové metody s tím rozdílem, že se nebude počítat trojúhelník, ale parabola se třemi nejbližšími body v tabulce. Postup výpočtu je uveden ve vztazích 2.9-2.12 níže.

Postup výpočtu:

$$d(T) = aT^2 + bT + C \quad (2.9)$$

Derivace:

$$d(T)' = 2aT + b = 0 \quad (2.10)$$

Hledaná teplota chromatičnosti:

$$T_x = \frac{-b}{2a} \quad (2.11)$$

Parametr Duv:

$$D_{uv} = \pm(aT_x^2 + bT_x + C) \quad (2.12)$$

Metoda je přesnější než předchozí trojúhelníková metoda, zvláště v okolí křivky teplotního zářiče, ale nevýhoda této metody je její menší přesnost na křivce teplotního zářiče, kde za trojúhelníkovou metodou zaostává s možnou chybou až 6 kelvinů [15].

2.4.3 Kombinace metod

Nabízí se tedy možnost kombinace parabolické a trojúhelníkové metody, kde bude základ tvořit parabolická metoda s tím, že pro Duv menší než 0,002 se bude počítat s výsledky trojúhelníkové metody. Tím lze získat velmi přesné výsledky hodnoty náhradní teploty chromatičnosti s přesností až 1 kelvin [15].

2.5 Výpočet parametru Duv

Výpočet parametru Duv lze provést s výpočtem náhradní teploty chromatičnosti, jak je znázorněno u trojúhelníkové a parabolické metody. Parametr Duv lze ovšem zjistit rovnou výpočtem a následnou aproximací ze souřadnic x , y nebo u' , v' . Nejprve je třeba převést souřadnice x , y nebo u' , v' na u , v , dle následujících vztahů.

Z x a y se získají pomocí vztahu:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (2.13)$$

Z u' a v' se získají pomocí vztahu:

$$u = u'; v = \frac{2v'}{3} \quad (2.14)$$

Duv se získá ze vztahu:

$$D_{uv} = L_{FP} - L_B \quad (2.15)$$

Kde L_{FP} se vypočítá pomocí vztahu:

$$L_{FP} = \sqrt{(u - 0,292)^2 + (v - 0,24)^2} \quad (2.16)$$

L_{BB} se vypočítá pomocí vztahu:

$$L_{BB} = k_6 a^6 + k_5 a^5 + k_4 a^4 + k_3 a^3 + k_2 a^2 + k_1 a^1 + k_0 a^0 \quad (2.17)$$

Kde a se vypočítá ze vztahu:

$$a = \arccos\left(\frac{u - 0,292}{L_{FP}}\right) \quad (2.18)$$

Koeficient k se zjistí z následující tabulky Tab. 3:

Tab. 3 Koeficient k pro výpočet L_{bb} [15]

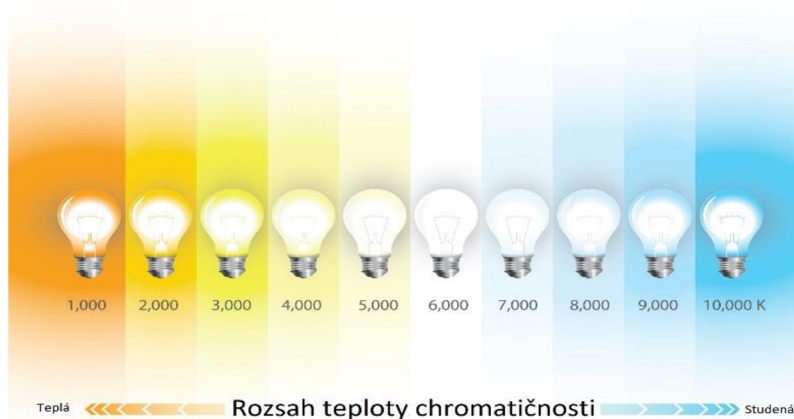
k6	-0,00616793
k5	0,0893944
k4	-0,5179722
k3	1,5317403
k2	-2,4243787
k1	1,925865
k0	-0,471106

Tento výpočet odpovídá výpočtu s přesností 0,00001 pro CCT v rozsahu 2600 K až 20 000 K. Pokud se rozsah rozšíří na hodnoty od 2160 K do 20 000 K přesnost výpočtu Duv klesne o jeden řád na hodnotu 0,0001 [15].

3 MĚŘENÍ NÁHRADNÍ TEPLoty CHROMATIČNOSTI

Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti neboli barevná teplota se značí T s jednotkou kelvin (K). Barvy se dělí na teplé a studené v závislosti na velikosti teploty chromatičnosti, což je zobrazeno na obr. 13. Teplé a studené barvy mají odlišný vliv na psychiku člověka. Teplota chromatičnosti je dána absolutně černým tělesem, které když se zahřeje na určitou teplotu, začne vydávat záření v určité barvě [2].



Obr. 13 Teplota chromatičnosti [4, upraveno]

Náhradní teplota chromatičnosti

Jelikož všechna záření nevychází z absolutně černého tělesa, je zaveden pojem takzvané náhradní teploty chromatičnosti, která se také značí T_{cp} s jednotkou kelvin (K). Náhradní teplota chromatičnosti odpovídá ekvivalentnímu teplotnímu zdroji s podobným spektrálním složením, jako má výbojový nebo LED světelný zdroj. V Tab. 4 jsou zobrazeny světelné zdroje a k nim odpovídající teplota chromatičnosti [2].

Tab. 4 Teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti zdrojů světla [2]

Druh Světelného zdroje	T_{cp} (K)
Jasná obloha	6 500
Slunce v létě v poledne	5 500
Zářivka nebo LED studená	6 500
Zářivka nebo LED neutrální	4 000
Zářivka nebo LED teplá	3 000
Slunce při západu	3 500 - 4 000
Žárovka, žárovka teple bílá	2 700
Plamen svíčky	1 800

Obvykle se u světelných zdrojů rozlišují až tři základní kategorie barvy světla, v závislosti na teplotě chromatičnosti. Do první kategorie se řadí teplá bílá, která má méně než 3 300 K, druhou kategorií je bílá od 3 300 K do 5 000 K a třetí kategorií je denní, která má více než 5 000 K. Světelné zdroje, které mají stejnou teplotu chromatičnosti nemusí mít stejný index podání barev R_a , protože jsou závislé na spektrálním složení světla [2].

Měření teploty chromatičnosti a barevných souřadnic

K měření teploty chromatičnosti se používají přístroje jako jsou kolorimetr, spektrometr nebo analyzátor barev.

3.1 Analyzátor barev

Jedná se o přístroj určený k měření barevných vlastností především zobrazovacích zařízení jako jsou monitory a obrazovky. Analyzátor barev od výrobce Konica Minolta s označením CA-210 je zobrazen na Obr. 14.

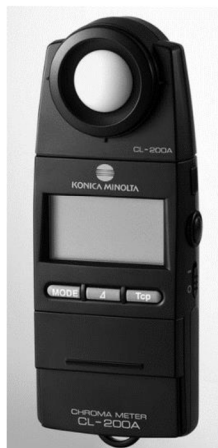


Obr. 14 Analyzátor barev CA-210 [46]

Jedná se o přístroj, který nachází své uplatnění při srovnávání bělosti a barevnosti zobrazovacích zařízení jako například LCD monitorů. Přístroj měří gamma funkce zobrazovacího zařízení a tím se přizpůsobí obnovovací frekvenci monitoru. Přístroj měří barevné souřadnice s přesností $\pm 0,005$, v závislosti na jasu může být přesnost i lepší. Přístroj dokáže dále měřit jas a teplotu chromatičnosti [46].

3.2 Kolorimetr

Jedná se o zařízení sloužící k měření barevných vlastností zdrojů světla. Je to pasivní přístroj, jehož funkcí je snímat fotony skrze fotočlánky, které bývají opatřeny filtry, pro odlišení jednotlivých spekter světla. Jedná se o nejlevnější způsob, jak změřit barevné vlastnosti objektu. Samotný kolorimetr nemá vlastní zdroj světla, a proto se používají pouze pro měření zdrojů světla.



Obr. 15 Kolorimetr CL-200 [45]

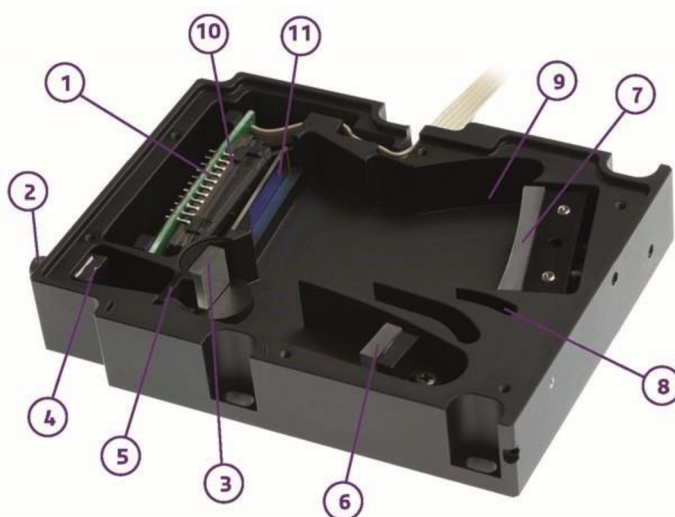
Přístroj na obrázku Obr. 15 je od společnosti Konica Minolta a jedná se o kolorimetr CL-200, který dokáže měřit integrální barevné charakteristiky světla, teplotu chromatičnosti, barevné souřadnice x, y a osvětlení. Přístroj dokáže měřit barevné souřadnice s nejistotou $\pm 0,002$ pro světelný zdroj typu A [45].

3.3 Spektroradiometr

Jedná se o přístroj, který umožňuje měřit spektrum optického záření. Přístroj měří spektrální složení dopadajícího záření, jas, osvětlenost, trichromatické souřadnice x , y , u , v , náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev, kolorimetrickou čistotu [2]. Jeho uplatnění je tedy poměrně široké a používá se třeba při měření barev, stanovování koncentrace chemických složek nebo analýza elektromagnetického záření. Díky vývoji mikroelektroniky v oblasti vícečlánkových optických detektorů, jako jsou CCD nebo fotodiody se umožnila výroba levných snímačů, kamer, fotoaparátů, ale uplatnění mají i ve spektroradiometrech, kde umožňují rychlé skenování spektra bez nutnosti pohybující se mřížky [19].

3.3.1 Konstrukce a funkce

Spektroradiometr se skládá ze vstupní štěrbinu, kolimátoru, disperzního prvku (hranol nebo mřížka), zaostřovací optiky a detektoru. Jedná se o monochromatický systém, který obsahuje výstupní štěrbinu, kde se promítá na jednopohledový detektor pouze jedna úzká část spektra. U monochromatických přístrojů jsou vstupní a výstupní štěrbinu v pevné poloze. Lze je měnit jen v šířce. Otáčením mřížek se skenuje spektrum. Příklad vnitřní konstrukce spektroradiometru je zobrazen na Obr. 16.



Avaspec-ULS Složení optické lavice: Symetrické uspořádání

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| 1. Detektor | 7. Zaostřovací zrcátko |
| 2. SMA Konektor | 8. Zachytávač světla CPC |
| 3. Mřížka | 9. Zachytávač světla CPC |
| 4. Vstup do štěrbinu | 10. Převodník UV/VIS |
| 5. Výstup ze štěrbinu | 11. OSC Filter |
| 6. Kolimační zrcátko | |

Obr. 16 Složení spektroradiometru [19, upraveno]

Základem většiny spektroradiometrů s optickými vlákny je optická lavice s ohniskovou vzdáleností, která může být 37,5; 45; 50 nebo 75 mm. Nejprve světlo vstoupí na optickou lavici prostřednictvím standardního konektoru SMA-905, kde je následně kolimováno sférickým zrcadlem. Jednoduchá mřížka odráží kolimované světlo. Druhé sférické zrcátko zaostří výsledné difrakční světlo. Obraz spektra se promítne do jednorozměrného detektorového pole [19].

3.3.2 Výběr mřížky

Je třeba oddělit dopadající polychromatické záření na základní vlnové délky. K tomu slouží optický prvek zvaný difrakční mřížka. Skládá se ze série rovnoměrně rozložených rovnoběžných vrypů vytvořených v odrazném povlaku uloženém na vhodném substrátu.

Tab. 5 Parametry vrypů na difrakční mřížce značky Avantes [19]

Použití	Použitelný rozsah (nm)	Hustota vrypů (g/mm)
UV/VIS/NIR	200-1100	300
UV/VIS	200-850	600
UV	200-750	1200
UV	200-650	1800
UV	200-580	2400
UV	220-400	3600

Vrypů na difrakční mřížce mohou být tvořeny způsobem řízeným nebo holografickým. Řízené mřížky jsou vytvořeny na reflexním povrchu s diamanty. Holografické mřížky jsou vytvořeny z laserových interferenčních vztahů a fotolitografického procesu. Mřížka je instalována trvale, a je dána pro konkrétní rozsah vlnových délek. Pokud je třeba větší rozsah, musí se zvolit dvojitý nebo vícekanálový spektrometr. Každý kanál může mít různé mřížky pokrývající odlišný spektrální rozsah. Vícekanálový spektrometr nabízí také vyšší rozlišení pro každý kanál. V Tab. 5 je přehled použitelných rozsahů se kterými se mění hustota vrypů [19].



Obr. 17 Spektrometr Konica Minolta CS-1000A [16]

Na Obr. 17 je zobrazen profesionální měřicí přístroj pro měření hustoty optického záření ve viditelném spektru od 380 do 780 nm. Přístroj z naměřeného spektra vyhodnocuje fotometrické veličiny jako jsou jas, barevné souřadnice světla, teplotu chromatičnosti. Pomocí propojení s počítačem lze přístroj plně softwarově ovládat a provádět řadu dalších měření a výpočtů. Přístroj má rozlišení 0,9 nm/pixel, se šířkou pásma 5 nm a přijímacím úhlem 1°. Přesnost měření pro nejistotu A jsou 2 % při měření jasů, nebo se udává 1 digit. Přesnost měření pro barevné souřadnice se udává pro x: 0,0015 a pro y: 0,001. Rozsah jasů, který dokáže změřit se standardní čočkou je od 1 do 8 000 cd/m². S opakovaným měřením se přístroj dostává na nejistotu 0,1 % při měření jasů, nebo se udává 1 digit. S opakovaným měřením je přesnost měření pro barevné souřadnice pro x: 0,0002 a pro y: 0,0002 [16].

4 JASOVÁ KAMERA

Základ jasové kamery tvoří CCD nebo CMOS snímač, jeden nebo více optických filtrů pro spektrální shodu, vyměnitelné čočky a případné neutrální filtry hustoty. Cílem jasové kamery je změřit 2D projekci jasu a případně teplotu chromatičnosti s geometrickou kalibrací nebo bez ní [21]. Na obrázku Obr. 18 je zobrazeno měření přístrojové desky automobilu pomocí jasové kamery. V této kapitole je uveden přehled nabízených jasových kamer od různých výrobců na trhu.



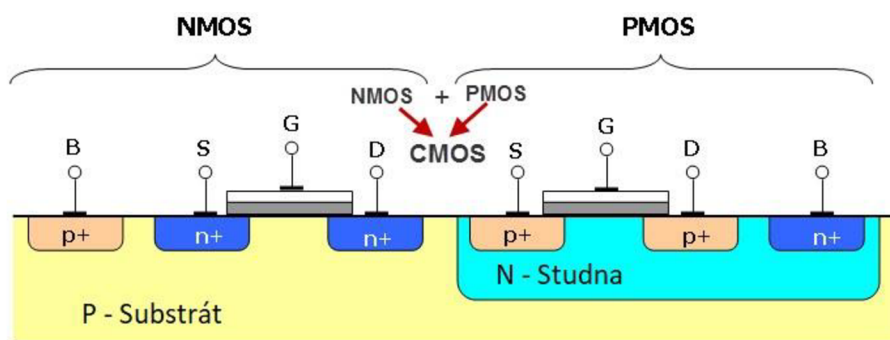
Obr. 18 Měření s jasovou kamerou [21]

4.1 Snímací čipy

Existují dvě základní technologie snímacích čipů. Technologie CMOS, která je používána od roku 1963, ale nejprve se používala k výrobě různých polovodičů. Využití ve snímací technice na sebe nechalo čekat o něco déle. První digitální snímač vyvinutý v roce 1969 byl čip CCD. Počátkem 90. let 20. století začal vývoj CMOS čipů ve světelné technice.

4.1.1 CMOS technologie

Jedná se o zkratku Complementary Metal-Oxide Semiconductor, což v překladu znamená doplňující se kov-oxid a polovodič. Kov slouží jako řídicí elektroda na izolantu z oxidu, který je na polovodivém materiálu. Tato technologie je používána na převážnou většinu integrovaných obvodů [13]. Používá se na výrobu čipů, jako jsou mikroprocesory, procesory a paměti. Výraz complementary se vztahuje k symetricky se doplňujícím tranzistorům MOSFET typu N a P, které se obvykle používají pro logické funkce v této technologii. V jednom čipu jsou miliardy MOSFET tranzistorů [12]. Z Obr. 19 je patrné, že CMOS technologie spojuje technologie tranzistoru NMOS a PMOS.



Obr. 19 CMOS technologie [12]

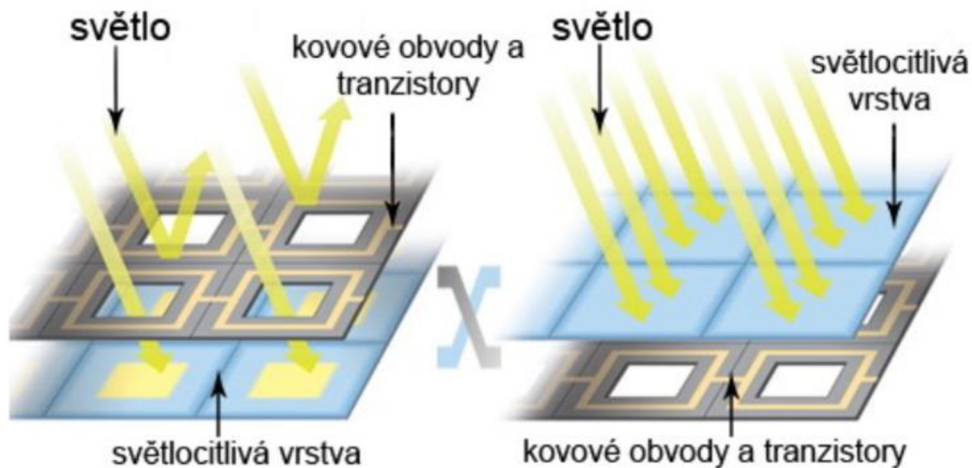
Důležitými vlastnostmi CMOS jsou vysoká odolnost proti šumu a s tím spojená spolehlivost nebo také nízká spotřeba ve statickém stavu. Více energie se spotřebovává pouze na přepínání mezi zapnutým a vypnutým stavem tranzistoru. Výhoda je také, že umožňuje vyšší hustoty prvků na jednom čipu a tím i nižší náklady.

Obvody CMOS se skládají z kombinačních logických hradel s jedním nebo více vstupy a jedním výstupem. Jedná se třeba o logické obvody funkcí invertoru, NAND nebo NOR [11].

Využití ve snímací technice

CMOS čipy ve snímací technice se dělí na pasivní a aktivní. U pasivních čipů se nemusí nic složitějšího řešit, je tvořen pouze fotodiodami. Aktivní čipy jsou dnes velmi používané a mají u každé buňky zesilovač a obvod odstraňující šum. Mají tedy méně šumu než pasivní čipy, ale na druhou stranu každý zesilovač může jinak zesilovat, tím pádem dosahují většího šumu než CCD čipy.

Výhody v porovnání s CCD čipy, menší rozměry, nižší spotřeba, nižší výrobní náklady a s tím související vyšší rychlost výroby. Z důvodu těchto výhod, které CMOS čipy nabízí si nachází uplatnění zejména u fotomobilů, díky nízké spotřebě, menší ceně a menším rozměrům [14].



Obr. 20 CMOS a BSI CMOS technologie [20]

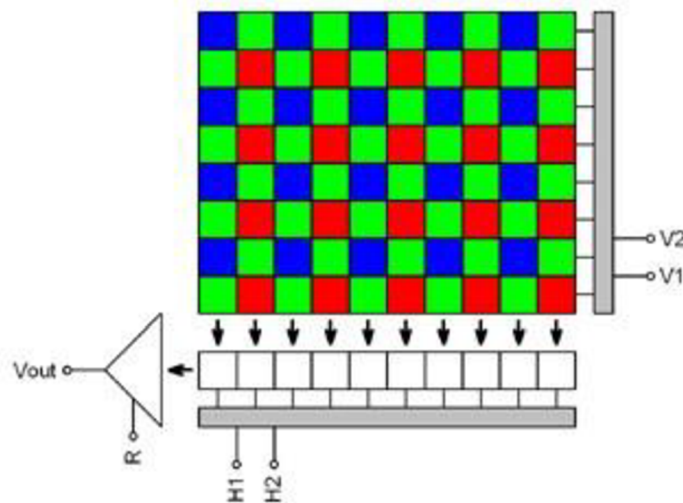
S příchodem Back-illuminated CMOS čipů neboli snímače CMOS se zpětným osvětlením nachází CMOS technologie většího využití [14]. Technologie BSI CMOS spočívá v přesunutí vrstvy s kovovými obvody a tranzistory na opačnou stranu křemíkového substrátu, tedy pod světlocitlivou vrstvu. Hlavní výhodou, která je zobrazena vpravo na Obr. 20, je zvýšení množství světla dopadajícího na světlocitlivou vrstvu, pomocí čehož je dosaženo vyšší citlivosti snímače [20].

4.1.2 CCD technologie

Zkratka CCD pochází z anglického Charge-Coupled Device, což znamená zařízení s vázanými náboji. Toto zařízení se používá pro snímání obrazové informace a nachází se ve fotoaparátech, videokamerách, čtečkách čárových kódů nebo i v dalekohledech.

Princip a složení

Senzor je citlivý na elektrický náboj a jeho funkcí je přeměna energie dopadajícího světla na energii elektrického signálu. Skládá se ze světločivého křemíkového plátku uloženého nad kovovou elektrodou, která se izoluje vrstvou křemene. Fungování je založeno na dvou základních krocích. V prvním kroku dopadnou fotony na atomy křemíku uvnitř CCD, odkud se díky fotoefektu uvolní záporně nabitá elektrony. Pod každým pixelem je umístěna kladně nabitá elektroda. Tato elektroda je také oddělena od křemíku vrstvou křemene, který slouží jako izolační vrstva a zachycuje uvolněné elektrony. Množství světla, které dopadne na CCD senzor ovlivňuje, jak jasný bude pořízený obraz. Jasně oblasti odpovídají pixelům, na kterých se uvolnilo více elektronů.



Obr. 21 Princip čtení zaznamenaného světla pro CCD senzor v DSLR kameře [11]

Druhým krokem je čtení takto zaznamenaného obrazu pixel po pixelu, což je názorně zobrazeno na Obr. 21. Čtení probíhá tak, že se kladný náboj vlnivě posouvá podél elektrod, přičemž v každém sloupci pixelů stahuje elektrony z jednoho pixelu na druhý. Elektrony v nejnižším čidle sloupce se přenesou do CCD senzoru uspořádané v řadě za sebou. Každá řada má svou sadu elektrod, které tlačí skupinu elektronů jednu po druhé, až k terminálu na konci zařízení. CCD čipy využívají takzvané Bayerovy masky, která kryje jednotlivé pixely různými filtry ve tvaru šachovnice, což je zobrazeno na Obr. 21. Samotná snímací plocha čipu může být až 100 % [14].

Výhodou CCD snímače jsou dobrá kvalita obrazu, nízký šum a větší dynamický rozsah v porovnání s CMOS čipy. Z těchto důvodů se CCD čipy využívají více v měřicích přístrojích, zrcadlových a digitálních fotoaparátech [14].

4.2 Instrument Systems

Jasové kamery LumiCam od společnosti Instrument Systems zvládnou během několika sekund změřit jas nebo barevné rozložení obrazovek nebo displejů s vysokou přesností. Nová řada s označením LumiCam 2400, vychází z osvědčeného předchůdce LumiCam 1300. Nový typ jasové kamery jsou optimalizovány pro nové požadavky měření například v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Obecně se tyto jasové kamery staly předním přístrojem pro zajištění kvality přístrojových desek a zobrazovacích panelů.

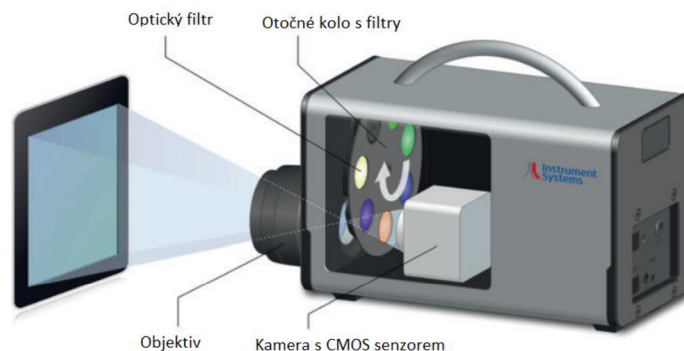


Obr. 22 Typy jasových kamer LumiCam společnosti Instrument Systems [21]

Jasové kamery LumiCam 2400 umožňují měření jasů a rozložení barev. Jasová kamera je dostupná ve třech variantách, které jsou zobrazeny na Obr. 22. Zleva se jedná o jasovou kameru LumiCam 2400 Mono, což je kompaktní zařízení pro spolehlivé a přesné měření jasů. Ovšem neumožňuje měření barev. Dále je zde LumiCam 2400 Color. Kamera má 4 filtry pro měření barevných hodnot a je vhodná zejména pro širokopásmové zdroje. Třetí kamera je LumiCam 2400 Advanced, která má 6 barevných filtrů a patentovaný algoritmus pro optimalizaci matice. Používá se k získání optimálních výsledků měření LED a OLED zdrojů. Pro každý ze 3 typů jasových kamer je na výběr ze třech objektivů s ohniskovou vzdáleností 28 mm, 50 mm a 100 mm [21].

4.2.1 Funkce a princip

Jasová kamera LumiCam 2400 nabízí vysoké rozlišení pro měření jasů a optické filtry pro měření barev. Jasová kamera se skládá z optického filtru na otočném kole, vyměnitelného objektivu a CMOS senzoru. Konstrukce jasové kamery je zobrazena na Obr. 23.



Obr. 23 Konstrukce jasové kamery Instrument systems [21, upraveno]

Přístroj disponuje vyměnitelnými objektivy, dále je zde optický filtr, který je v závislosti na variantě jeden na pevně usazen, nebo na otočném kole s více druhy filtrů a poslední část je CMOS snímač, který zaznamenává obraz. Pro každý pixel snímače kamery je přiřazen kalibrovaný jas a teplota chromatičnosti. Změřená data jsou přes USB poslána do počítače, kde je software LumiCam následně zpracuje [21].

4.2.2 Specifikace

LumiCam 2400 dokáže pořídit snímky s rozlišením 5 megapixelů. Díky čemuž je možné prostorové vyhodnocení jasu a barevných souřadnic. Kamera používá CMOS snímač s rozlišením 2428 x 2028 pixelů, její předchůdce používal snímač CCD s rozlišením 1370 x 1020 pixelů. V Tab. 6 jsou patrné specifické hodnoty kamery udávané výrobcem, v závorce jsou hodnoty předchozí generace 1300.

Tab. 6 Parametry měřících jasových kamer LumiCam 2400 (1300) [21]

LumiCam 2400 (1300)	Mono	Color	Advanced
Velikost pixelu	3.45 μm x 3.45 μm (6.45 μm x 6.45 μm)	3.45 μm x 3.45 μm (6.45 μm x 6.45 μm)	3.45 μm x 3.45 μm (6.45 μm x 6.45 μm)
Rozlišení	2428 x 2028 pixelů (1370 x 1020 pixelů)	2428 x 2028 pixelů (1370 x 1020 pixelů)	2428 x 2028 pixelů (1370 x 1020 pixelů)
Kvalitativní ukazatel f_1'	3 % (4 %)	3 % (4 %)	3 % (4 %)
Nejistota jasu pro jednobarevné LED	-	-	2 %
Nejistota barevných souřadnic x,y pro světlo typu A	-	0,003	0,003
Nejistota barevných souřadnic x,y pro barevné světlo	-	0,010	0,010
Nejistota barevných souřadnic x,y pro jednobarevné LED (-)	-	-	0,005

Možnost měření s příslušenstvím

Příslušenství LumiCam umožňuje měřit rozložení světelného toku, nebo rozptyl světla. Měřící sada, která je zobrazena na Obr. 24 je vhodná k měření křivek svítivosti, homogenity barevných souřadnic nebo náhradní teplotu chromatičnosti.



Obr. 24 Měřící sada k LumiCam [21]

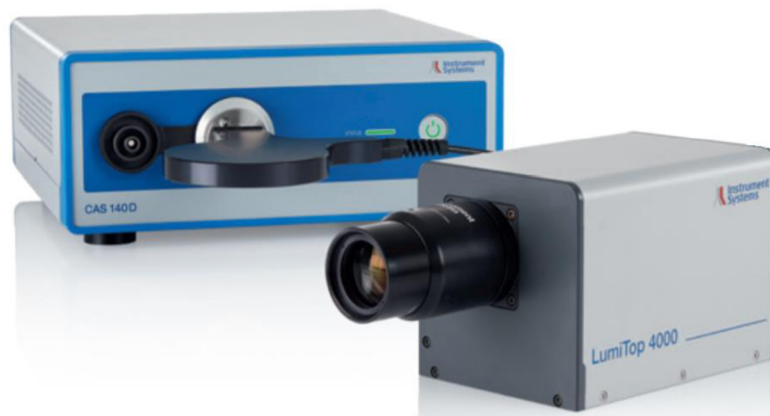
Používá se pro měření malých až středně velkých LED zdrojů. Měřící sada se skládá z optické lavice, světlo propustné obrazovky, držáku pro LumiCam a světelného zdroje. Kamera detekuje rozložení jasu vznikající na obrazovce až do úhlu 65 °. Pro toto prostorové záření vypočítá také barevné souřadnice. Typická doba měření je kratší než jedna minuta [21].

Software k jasové kameře LumiCam

Všechny modely LumiCam jsou vybaveny výkonným softwarem, který slouží k vypočítání všech důležitých hodnot jako je jas, barevné souřadnice x a y, teplota chromatičnosti, homogenita barev nebo dominantní vlnová délka. Software je vybaven i analytickými nástroji, které slouží ke komplexní analýze změřených hodnot. Software též nabízí možnost prezentace snímku falešnými barvami pro působivější vizualizaci získaných dat [21].

4.2.3 Zobrazovací kolorimetr LumiTop

Řada kamer LumiTop je kombinací přesných spektrometrů řady CAS a zobrazovacího kolorimetru. Použitím přesných spektrálních informací o měření ze spektrometru CAS jako referenčního přístroje, zaručuje spektrometrickou přesnost v celém zaznamenaném obraze. Zobrazovací kolorimetr LumiTop 4000 v kombinaci se spektrometrem CAS 140D je zobrazen na následujícím obrázku Obr. 25.



Obr. 25 Zobrazovací kolorimetr LumiTop se spektrometrem CAS [51]

V následující tabulce Tab. 7 jsou uvedeny parametry dvou typů zobrazovacího kolorimetru LumiTop s označením 2700 a 4000. Výrobce udává přesnost kolorimetru závisí na použitém spektrometru CAS, od kterého se jeho přesnost odvíjí [51].

Tab. 7 Specifikace kolorimetru LumiTop [51]

Model	LumiTop 2700		LumiTop 4000	
Rozlišení	2750x2200 pixelů (6,1 MP, CCD)		4096x3000 pixelů (12 MP, CMOS)	
Velikost pixelu	4,54 μm x 4,54 μm		3,45 μm x 3,45 μm	
Volba objektivu	29 mm standartní/ 100 mm širokoúhlý		29 mm standartní / 100 mm makro	
Přesnost přístroje vztahena k CAS	Jas	Barevné souřadnice	Jas	Barevné souřadnice
	0,4 %	0,0015	0,4 %	0,002

V následující tabulce Tab. 8 jsou uvedeny specifikace spektrometru CAS.

Tab. 8 Specifikace spektrometru CAS [51]

CAS specifikace	Měřící rozsah jasu	Přesnost spektrometru CAS	
		Jas	Barevné souřadnice
CAS 140D	0,003 cd/m^2 - $4 \cdot 10^7 \text{ cd}/\text{m}^2$	3 %	0,0015
CAS 140CT	0,015 cd/m^2 - $6 \cdot 10^7 \text{ cd}/\text{m}^2$	3,5 %	0,0015
CAS 120	0,1 cd/m^2 - $1,5 \cdot 10^8 \text{ cd}/\text{m}^2$	4 %	0,002

4.3 TechnoTeam

Firma TechnoTeam nabízí dva druhy jasových kamer. Jasové kamery jsou zobrazeny na Obr. 26. Jedná se o menší LMK 6 a větší LMK 6 color. Jak již název napovídá kamery se liší tím, zda umí měřit barevné souřadnice. O zachytávání obrazu se stará snímač CMOS značky sony, který je vybaven barevným skleněným filtrem.



Obr. 26 Typy jasových kamer LMK [5]

Jasová kamera LMK 6 je středem výrobní řady produktů LMK. Každá kamera má vyrobené jedinečné filtrační sklo, které zajišťuje přizpůsobení křivce $V(\lambda)$. Kamera má kompaktní rozměry a lze ji použít pro širokou škálu měření. Ve spojení s dodávaným softwarem ji lze použít v oblastech, kde je požadováno vyhodnocení jasové scény. Kamera nabízí výběr z mnoha objektivů.

4.3.1 Specifikace

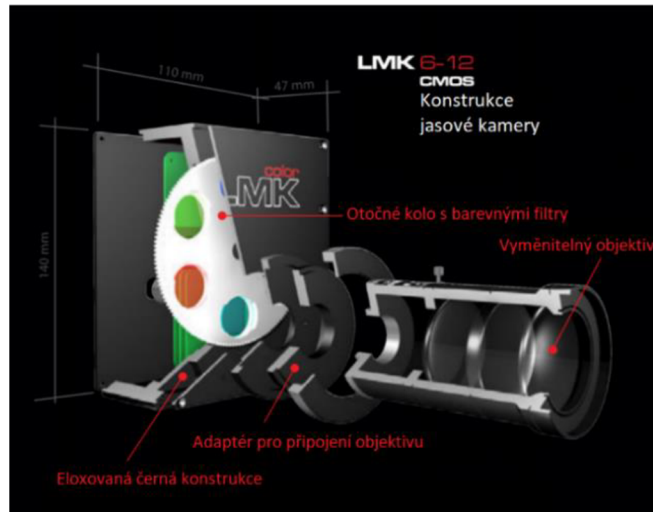
Jasová kamera LMK 6 Color se nabízí ve verzi s rozlišením 5 megapixelů s označením LMK 6-5 a s rozlišením 12 Megapixelů s označením LMK 6-12, která má větší rozměry 140x110x47 mm a váží 1 300 gramů. Kamera LMK 6-5 má rozměry 117x90x47 mm s váhou 800 gramů. Kamera LMK 6 Mono má kompaktní rozměry 80x80x47 mm s váhou 600 gramů. Rozměry jsou udávány jako výška x šířka x délka. Integrovaný čas měření je 100 μ s - 15 s [5]. Parametry jsou zobrazeny v následující tabulce Tab. 9.

Tab. 9 Parametry kamery LMK 6 [5]

LMK 6	LMK 6 Mono	LMK 6-5 Color	LMK 6-12 Color
Rozlišení	2464 x 2056 pixelů	2464 x 2056 pixelů	4112 x 3008 pixelů
Kvalitativní ukazatel f'_1	4 %	4 %	4 %
Nejistota s filtrem $X(\lambda)$	4 %	4 %	4 %
Nejistota s filtry $Z(\lambda)$, $C(\lambda)$, $V'(\lambda)$	6 %	6 %	6 %
Nejistota měření jasů, světlo typu A	3 %	3 %	3 %
Dynamický rozsah	1: 10 000 000	1: 10 000 000	1: 10 000 000

4.3.2 Konstrukce a princip

Jasová kamera LMK 6 Color používá otočné kolo s barevnými filtry, pro měření barevných souřadnic. Každá kamera je dodávána s jedinečným otočným kolem s barevnými filtry, které zajišťují vysokou kvalitu a přizpůsobení ke snímacímu čipu CMOS. Jasová kamera je vhodná pro měření jasové scény, měření barev a teplot chromatičnosti. Měřicí systém může být vybaven skleněnými filtry. K výběru je například filtr pro skotopické vidění $V(\lambda)$, cirkadiální rytmy $C(\lambda)$ nebo další. Ve spojení s dodávaným softwarem lze LMK 6 Color použít v oblastech kde je vyžadováno stanovení jasů celého obrazu a rozložení barev. K dispozici je velký výběr výměnných objektivů [5].



Obr. 27 Konstrukce jasové kamery LMK 6-12 Color [5, upraveno]

Jasová kamera LMK 6-12 Color se skládá z vyměnitelného objektivu, který je možný vybrat z široké nabídky. Jsou k dispozici objektivy s ohniskovou vzdáleností od 6,5 do 150 mm, s makro čočkami nebo další širokou škálou možností. Dále je zde CMOS senzor značky Sony, který složí k zachycení obrazu a mezi ním a objektivem se nachází otočné kolo s barevnými filtry pro zaznamenání barevných souřadnic [5]. Celá tato konstrukce je zobrazena na Obr. 27.

4.3.3 Možnosti jasové kamery LMK 6

Detekce modulace

S modulací neboli blikáním je možné se setkat například u monitorů. S funkcí modulačního měření je možné minimalizovat vliv na výsledek měření. Kamera nemusí snímek rovnou ukládat, díky tomu umožňuje číst obrazová data (pixely). S pomocí této technologie je možné rychlé zachycení obrazu a při detekci blikání může nepřetržitě zaznamenávat 4 obrazové řádky s celkovou expoziční dobou 21 μ s. Řádky se zapisují do jednoho měřeného obrazu, což umožňuje zobrazit periodicitu vstupního signálu na časové ose. Pomocí čehož lze určit frekvenci a hloubku modulace výstupního signálu.

Spouštěcí funkce

Přístroj nabízí interní i externí spouštění komunikace s operačním prostředím. Je zde možnost zvolit si integrační čas s ohledem na externí signál. Pořizování snímku je možno ovládat pomocí externího spouštěče, nebo samotným přístrojem. V obou případech je možné časové zpoždění po i před integrací obrazu. Díky tomu není potřeba přídavné napájené spouštěcího zařízení [5].

Příslušenství

Firma TechnoTeam nabízí široké spektrum příslušenství. K dispozici jsou optické lavice, displeje pro různé měření nebo ovládání pomocí robota pro snazší a rychlejší měření, viz Obr. 28.



Obr. 28 Manipulace pomocí robotické ruky [5]

4.3.4 Jasová DSLR kamera

Na Obr. 29 je zobrazena Jasová DSLR kamera LMK mobile air. Jedná se o digitální zrcadlovou kameru k analýze jasu. Spojuje vysoce kvalitní digitální fotoaparát a systém LMK. V této kombinaci je možné snadné a rychlé zachycení jasové mapy. Přístrojem je možné vyhodnotit také oslnění. Hodí se tedy pro měření umělého venkovní osvětlení, osvětlení silnic, vjezdu do tunelu, sportovišť nebo venkovních reklam, čímž umožňuje snadné ověření norem. Přístroj neměří náhradní teplotu chromatičnosti.



Obr. 29 Jasová DSLR kamera LMK mobile air [5]

Přístroj LMK mobile air disponuje možností automatického nebo manuálního ostření. Ohnisková vzdálenost se standartním objektivem lze plynule měnit od 17 mm po 50 mm. K fotoaparátu je k dispozici příslušenství v podobě vyměnitelných optických filtrů, objektivů s ohniskovou vzdáleností 70–200 mm, nebo s možností rybiho oka. V balení je také paměťová karta, trojnožka a dálkové ovládání. Pro spojení s počítačem je zde USB port, ale přístroj dokáže spojit i s telefonem nebo tabletem pomocí aplikace LMK [5].

Základ jasové kamery tvoří zrcadlový fotoaparát, jehož princip je probrán v kapitole 4.4.1.1. Fotoaparát je vybaven CMOS snímačem s rozlišením 5566 x 3706 pixelů (21 megapixelů), ze kterých se k vytvoření jasové mapy používá rozlišení 2748 x 1834 pixelů (5 megapixelů). Výsledkem je 14bitová RAW struktura. V Tab. 10 jsou patrné jednotlivé parametry jasové kamery.

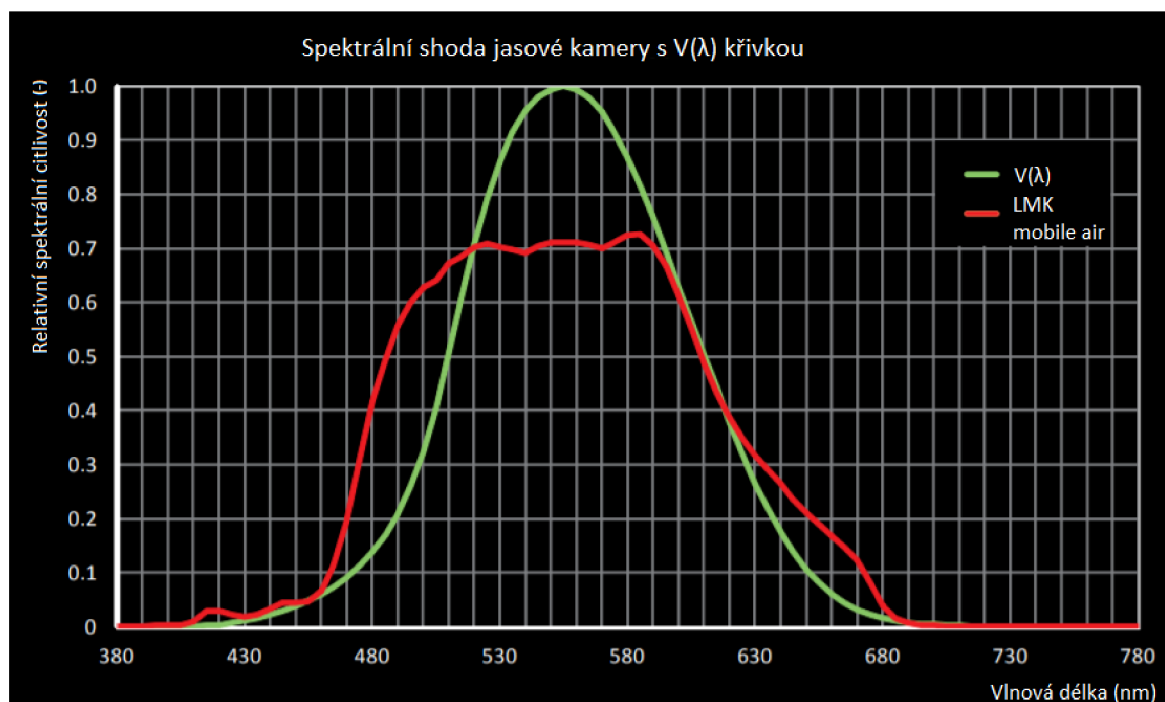
Tab. 10 Parametry DSLR kamery LMK mobile air [5]

LMK mobile air	
Rozlišení čipu	5566 x 3706 pixelů
Rozlišení jasové mapy	2748 x 1834 pixelů
Nejistota měření jasu	-
Dynamický rozsah	1: 4 000 (HDR 1: 30 000)
Integrační čas	100 ms - 30 s

Přístroj LMK mobile air disponuje možností automatického nebo manuálního ostření. Ohnisková vzdálenost se standartním objektivem lze plynule měnit od 17 mm po 50 mm. K fotoaparátu je příslušenství v podobě vyměnitelných optických filtrů, objektivů s ohniskovou vzdáleností 70–200 mm, nebo s možností rybího oka. V balení je také paměťová karta, trojnožka a dálkové ovládání. Pro spojení s počítačem je zde USB port, ale přístroj dokáže spojit i s telefonem nebo tabletem pomocí aplikace LMK [5].

Spektrální přizpůsobení

Na Obr. 30 je zobrazen rozdíl mezi křivkou $V(\lambda)$ a jasovou DSLR kamerou LMK Mobile air. Z obrázku lze posoudit, že spektrální křivka přístroje je velmi odlišná od křivky $V(\lambda)$, což vede ke spektrální chybě měření světelných zdrojů. Spektrální chyby udávané výrobcem jsou u halogenové výbojky až 9 %, vysokotlaké sodíkové výbojky až 13 %, zářivky až 10 % a LED zdroje až 12 % [5].



Obr. 30 Spektrální přizpůsobení citlivosti jasové DSLR kamery s $V(\lambda)$ [5, upraveno]

4.4 Radiant

Firma Radiant nabízí jasovou kameru jménem ProMetric I, která je zobrazena na Obr. 31. Základ kamery tvoří CCD snímač s rozlišením od 2 do 29 megapixelů a novinkou je kamera s CMOS snímačem a rozlišením 61 megapixelů. Přístroje je možné využít na měření jasů LCD obrazovek, LED zdrojů a dalších. Také dokáže zaznamenat barevné souřadnice, náhradní teplotu chromatičnosti nebo dominantní vlnovou délku.



Obr. 31 Jasová kamera ProMetric I [23]

4.4.1 Parametry přístroje

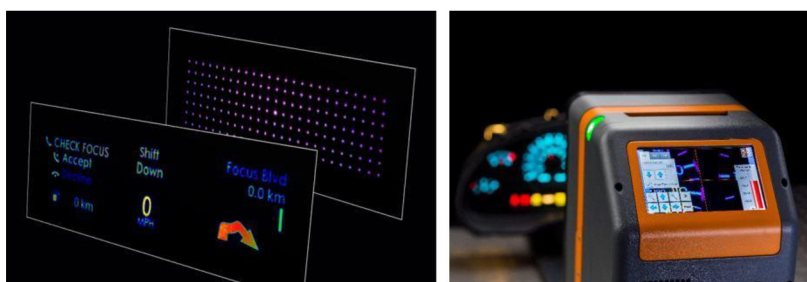
Přístroj je vybaven elektronicky řízeným ostřením a clonou. Ohnisko je možné volit krokově od 24 mm do 200 mm. Minimální čas potřebný k měření je v závislosti na velikosti rozlišení od 1.1 sekundy do 2.4 sekund u barevného záznamu. U fotopického záznamu se čas pohybuje od 0,3 sekundy do 0,9 sekundy. Komunikace s počítačem je možná přes USB nebo ethernet [23]. Další parametry jsou uvedeny v Tab. 11.

Tab. 11 Parametry přístroje ProMetric I [23]

Radiant	ProMetric I2	ProMetric I8	ProMetric I16	ProMetric I29	ProMetric I61
Rozlišení (v pixelech)	1600 x 1200 (2 Mpx)	3296 x 2472 (8 Mpx)	4896 x 3264 (16 Mpx)	6576 x 4384 (29 Mpx)	9568 x 6380 (61 Mpx)
Nejistota měření jasů	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %
Nejistota barevných souřadnic x, y	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Dynamický rozsah	1: 1 000 000	1: 1 000 000	1: 1 000 000	1: 1 000 000	-----

4.4.2 Aplikace přístroje

Přístroj Radiant nachází uplatnění v mnoha odvětvích, kde je potřeba rychlé měření barev a jasů. Přístroj je přizpůsoben především pro měření LED zdrojů, a proto se využívá při testování displejů, automobilové technice, jak je zobrazeno na Obr. 32, kde se přístrojem může měřit head-up displej, nebo palubní ukazatele [50].



Obr. 32 Použití přístroje Radiant v automobilové technice [50]

4.5 GL Optic

Firma GL Optic nabízí jasové kamery GL Opticam ve verzích od nejmenší 1.0, 2.0 TEC 4K a 3.0 TEC 4K. Nejlepší model 3.0 je zobrazen na Obr. 33. Přístroje slouží pro kontrolu kvality produktů, kontrolu vnitřního a venkovního osvětlení. Kamery jsou vybaveny snímačem CMOS. Kamera také obsahuje korekční filtr křivky $V(\lambda)$ a objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm [24]. K propojení s počítačem je přítomný USB port.



Obr. 33 Jasové kamera GL Opticam 3.0 TEC 4K [24]

Přístroje neumožňují měřit barevné souřadnice, a proto se doporučuje k měření barev pořídit přídavné příslušenství GL Spectis 1.0 touch. Parametry jednotlivých typů jasových kamer firmy GL Optic jsou zobrazeny v Tab. 12.

Tab. 12 Parametry jasových kamer GL Opticam [24]

GL Opticam	1.0	2.0 TEC 4K	3.0 TEC 4K
Rozlišení (pixelů)	1920 x 1200 (2,3 Mpix)	4096 x 2168 (9 Mpix)	4096 x 2168 (9 Mpix)
Kvalitativní ukazatel f'_1	3 %	3 %	3 %
Dynamický rozsah	1: 20 000 000	1: 20 000 000	1: 20 000 000
Integrační čas	50 μ s - 30 s	50 μ s - 10 s	50 μ s - 10 s
Rozlišení jasu	0,01 cd/m ²	0,01 cd/m ²	0,01 cd/m ²
Váha	0.57 Kg	5 Kg	5,7 Kg

4.5.1 Venkovní měření s kamerou

S jasovou kamerou lze měřit v terénu i v laboratoři. Výsledky měření se zobrazují v připojeném počítači s programem GL Opticam soft, který umožňuje okamžitou analýzu výsledků [24]. Měření silničního osvětlení s přístrojem GL Opticam 3.0 je zobrazeno na Obr. 34.



Obr. 34 Měření s jasovou kamerou GL Opticam 3.0 v terénu [24]

4.6 Opsira

Firma Opsira nabízí jasovou kameru s názvem Luca Color, která je zobrazena na Obr. 35. Jedná se o jasovou kameru založenou na snímači CCD. Kamera umožňuje až 10 různých funkcí měření. Přístroj může změřit jas, udělat jasovou analýzu 2-D objektu nebo změřit barevné souřadnice.



Obr. 35 Jasová kamera Luca Color [22]

V následující tabulce Tab. 13, jsou zobrazeny parametry jasové kamery značky Opsira[22].

Tab. 13 Parametry jasové kamery Luca Color [22]

Luca Color	
Rozlišení	1392 x 1040 pixelů
Nejistota měření jasu	4 %
Nejistota barevných souřadnice x, y	0,004
Integrační čas	0,1 ms - 60 s

4.7 Hybec

Jedná se malou jasovou kameru, která zvládne změřit rozložení jasu a případně i náhradní teplotu chromatičnosti. K zachytávání obrazu slouží snímač CMOS značky Sony. Objektiv má ohniskovou vzdálenost 12,5 mm. Jasová kamera ColorLive 300 od firmy americké firmy Hybec je zobrazena na Obr. 36 [34].



Obr. 36 Jasová kamera ColorLive 300 [34]

Jednotlivé parametry přístroje ColorLive 300 jsou zobrazeny v Tab. 14.

Tab. 14 Parametry jasové kamery ColorLive 300 [34]

Hybec ColorLive 300	
Rozlišení (pixelů)	1936 x 1216 (2,3 Mpix)
Nejistota měření jasu	3 %
Nejistota barevných souřadnice x, y	0,005
Integrační čas	0,1 ms - 60 s

4.8 Srovnání výrobců jasových kamer

Tab. 15 Srovnání jasových kamer různých výrobců [5, 21, 22, 23, 24, 34]

Výrobce	Jasová kamera		Rozlišení (pixelů)	Spektrální chyba f'_1	Nejistota měření jasu	Nejistota barevných souřadnic
Instrument Systems	LumiCam 1300	Mono	1370 x 1020	4 %	-	X
		Color	1370 x 1020	4 %	-	-
		Advanced	1370 x 1020	4 %	-	-
	LumiCam 2400	Mono	2428 x 2028	3 %	-	X
		Color	2428 x 2028	3 %	-	0,010 (barevné) 0,003 (Typ A)
		Advanced	2428 x 2028	3 %	-	0,010 (barevné) 0,003 (Typ A)
	LumiTop 2700 s CAS140D		2750x2200	-	0,4% 3%	0,0015 0,0015
LumiTop 4000 s CAS140D		4096x3000	-	0,4% 3%	0,002 0,0015	
Technoteam LMK	6 Mono		2464 x 2056	4 %	3 %	X
	6-5 Color		2464 x 2056	4 %	3 %	-
	6-12 Color		4112 x 3008	4 %	3 %	-
	DSLR		2748 x 1834	-	-	X
Radiant ProMetric	I2		1600 x 1200	-	3 %	0,003
	I8		3296 x 2472	-	3 %	0,003
	I16		4896 x 3264	-	3 %	0,003
	I29		6576 x 4384	-	3 %	0,003
	I61		9568 x 6380	-	3 %	0,003
GL Optic	GL Opticam	1.0	1920 x 1200	3 %	-	X
		2.0 TEC 4K	4096 x 2168	3 %	-	X
		3.0 TEC 4K	4096 x 2168	3 %	-	X
Opsira Luca Color			1932 x 1040	-	4 %	0,004
Hybec ColorLive 300			1936 x 1216	-	3 %	0,005

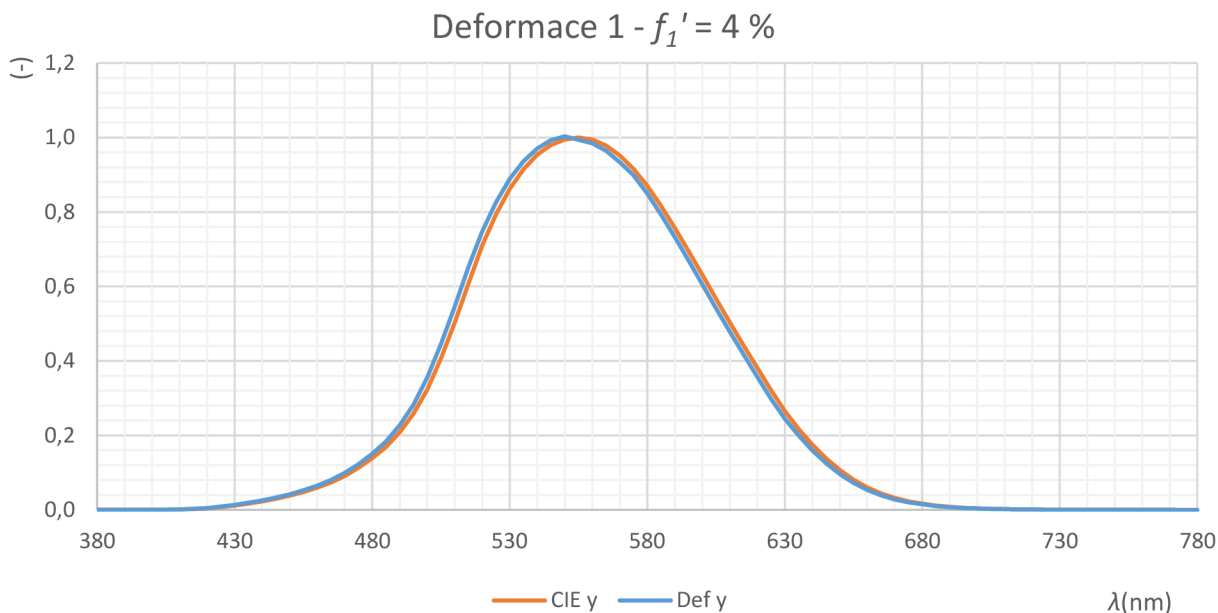
Shrnutí udávaných parametrů

V tabulce Tab. 15 je zobrazeno srovnání jasových kamer různých výrobců. Tabulka je zde uvedena pro celkovou představu o nabídce dostupných jasových kamer. Jasové kamery jsou rozděleny z hlediska jejich rozlišení, nejistot měření jasu, barevných souřadnic a kvalitativního ukazatele f'_1 , který může nabývat jen kladných hodnot na základě vztahu 1.4. Výrobci neuvádí obvykle všechny kvalitativní hodnoty, které jsou uvedeny v tabulce. Z tohoto důvodu jsou zde uvedeny pomlčky. Pokud jasová kamera neměří barevné souřadnice je v tabulce uvedeno X. V měření barevných souřadnic si vede společnost Instrument Systems, která nejistotu barevných souřadnic rozděluje podle měřeného světla. V roce 2021 představila společnost nový kolorimetr LumiTop, který je uveden v tabulce. LumiTop je navrhnut pro práci v kombinaci se spektrometrem CAS, od kterého se odvíjí nejistota celého měření. Nejmenší nejistotu měření barevných souřadnic dokáže dle udávaných parametrů nabídnout firma Instrument Systems. Z hlediska ostatních kvalitativních ukazatelů nabízí výrobci podobné hodnoty. Nejmenší spektrální chyby f'_1 se dopouští jasové kamery LumiCam2400 a GL Opticams hodnotou 3 %. Nejmenší nejistoty měření jasu se dopouští přístroje LumiTop, LMK 6, ProMetric I nebo ColorLive 300 s hodnotou 3 %.

4.9 Simulace spektrální chyby f_1' na změně hodnoty T_{cp}

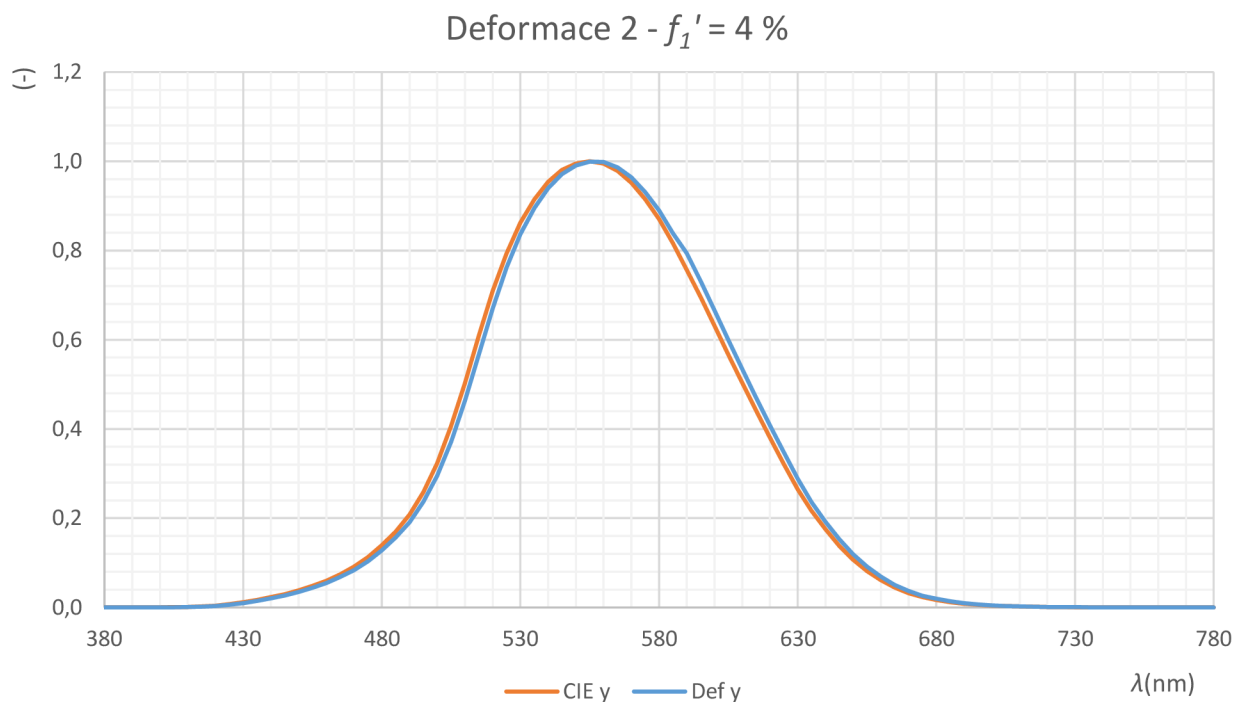
Je důležité podotknout, že spektrální chyba závisí na tvaru křivky. Pro některé tvary bude chyba malá a pro jiné tvary bude chyba velká. Pro demonstraci jsou zde ukázány dva grafy.

V grafu na Obr. 37 je zobrazena deformace spektra se spektrální chybou $f_1' = 4\%$, která má za následek odchylku hodnoty T_{cp} až o velikosti 4,4 % u sodíkové výbojky a 1,52 % u halogenové žárovky, nebo 0,10 % u LED zdroje s T_{cp} 3000 kelvinů.



Obr. 37 Deformace 1 - $f_1' = 4\%$

V grafu na Obr. 38 je zobrazena 2. deformace spektra se spektrální chybou $f_1' = 4\%$, která má za následek odchylku hodnoty T_{cp} až o velikosti 7,4 % u sodíkové výbojky a 5,22 % u halogenové žárovky, nebo 5,69 % u LED zdroje s T_{cp} 3000 kelvinů.



Obr. 38 Deformace 2 - $f_1' = 4\%$

4.10 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP

Jedná se o měřicí přístroj, který umožňuje plošnou analýzu rozložení jasu na osvětlovaných plochách, či světelných zdrojích. Přístroj umožňuje měřit také hodnoty oslnění. Jasový analyzátor je zobrazen s jeho příslušenstvím v balení na Obr. 39. Jasový analyzátor se skládá se z digitálního fotoaparátu, jehož spektrální citlivost je přizpůsobena citlivosti normálního fotometrického pozorovatele tedy křivce $V(\lambda)$. K přístroji jsou objektivy s ohniskovou vzdáleností 50 a 130 mm. Přístroj spojuje funkce záznamu a zpracování, které probíhají v počítači v softwaru navrženém přímo pro tento jasový analyzátor. Obvyklým výsledkem je následně jasová mapa, která znázorňuje plošné rozložení hodnot jasu pomocí barevné škály. Jasová mapa je vhodná pro snadné odečítání hodnot jasu jednotlivých bodů. Jeden snímek jasové mapy je obvykle tvořen maticí bodů, kterých je více než milion. Jasový analyzátor LDA-LumiDISP dokáže vytvořit mapu s velikostí až 21 miliónů bodů, což odpovídá rozlišení 21 megapixelů.



Obr. 39 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP [35]

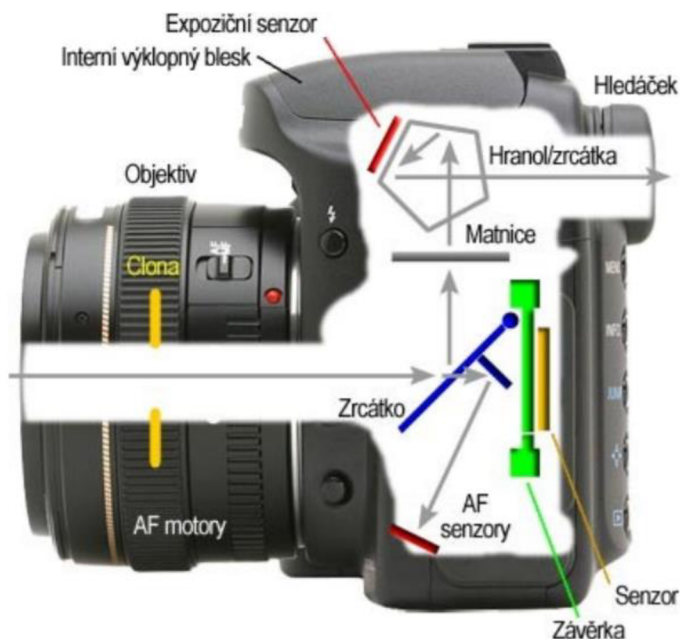
K zachycení světla slouží obvykle snímač CMOS, který vytváří obraz snímané scény. Citlivost zařízení se nastavuje pomocí clonového čísla, expoziční doby a citlivosti ISO. Tyto hodnoty jsou vstupními údaji k výpočtu výsledného jasu, k jejich převodu se používá speciálních kalibračních funkcí, které převádějí získané hodnoty z digitálního obrazu na jas a zároveň korigují známé chyby přístroje [35].

4.10.1 Digitální zrcadlový fotoaparát

Digitální zrcadlové fotoaparáty vychází z analogových zrcadlovek se zkratkou SLR (Single Lens Reflex), což v češtině znamená jednooká zrcadlovka. S těmito zrcadlovkami se fotilo na film. Digitální zrcadlové fotoaparáty mají zkratku DSLR (Digital Single Lens Reflex), což v českém překladu vyjadřuje digitální jednookou zrcadlovku. Tyto zrcadlovky již zaznamenávají obraz pomocí snímače CCD nebo CMOS a ukládají snímek do paměti. Tato kapitola je zde zařazena z důvodu lepšího pochopení funkce jasové DSLR kamery a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, Přístroje byly popisovány v předchozích kapitolách [36, 52].

Princip a funkce

Základní stav vnitřního uspořádání fotoaparátu je znázorněn na Obr. 40. Je zde zobrazen klidový stav, při kterém se neexponuje a teprve probíhá příprava k expozici, například díváním do hledáčku. Světlo zachycené fotoaparátem prochází nejprve objektivem, který se skládá z mnoha optických prvků (spojek a rozptylek). Optické prvky jsou zde pro co nejostřejší obraz, pomocí objektivu měníme také ohnisko. Ve středu objektivu je umístěna clona, která je v klidovém stavu otevřena na maximum pro, co největší průchod světla do hledáčku a dalších senzorů fotoaparátu. Clona slouží regulaci množství světla pronikajícího do fotoaparátu.

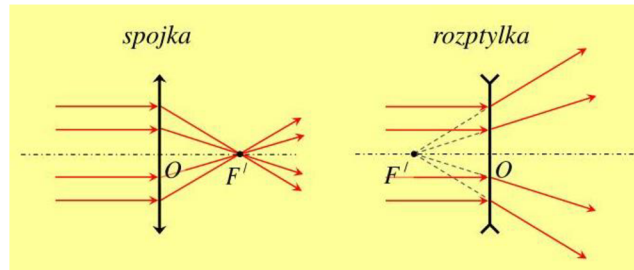


Obr. 40 Princip zrcadlového fotoaparátu [37]

Světlo dopadne na zrcátko, kde se odrazí na matnici, která slouží k promítnutí obrazu a následnému sledování v hledáčku. K tomu, aby nebyl obraz převrácený slouží hranol, který jej převrátí správně. Exponiční senzor, který je na obrázku zobrazen slouží k měření osvětlení k automatickému zaškrcení clony a nastavení expoziční doby. To, co lze vidět v hledáčku je tedy velmi přesný obraz toho co vyfotíme. Senzor AF (Auto Focus) slouží k automatickému ostření. Zrcátko ve fotoaparátu je polopropustné a tím umožňuje část světla propustit přes druhé menší zrcadlo na AF senzor, který vyhodnotí hloubku ostrosti. V okamžiku, kdy chceme fotografovat a zmáčkne spoušť na fotoaparátu se klidový stav změní v dynamický, čímž se obě zrcátka se sklopí nahoru, clona se uzavře na nastavenou hodnotu, otevře se závěrka, která reguluje expoziční čas a světlo procházejícím fotoaparátem dopadne na snímač. Na snímač začne dopadat světlo a tím se začne vytvářet snímek, po nastavené době expozice se závěrka opět zavře, clona otevře a zrcátko sklopí dolů, čímž skončí expozice snímku [36, 52].

Optika v objektivu

Objektiv fotoaparátu se skládá ze soustavy optických prvků, které zajišťují co nejlepší obraz. V objektivu lze najít například čočky, které mohou světlo rozptylovat, nebo spojovat a podle toho se tyto čočky jmenují spojky a rozptylky. Příklad jejich funkce je zobrazen na Obr. 41.



Obr. 41 Funkce spojky a rozptylky [38]

Podle ohniska existují objektivy s pevným ohniskem, který má přednosti ve vysoké světelnosti a ostrosti snímků, ale neumožňuje snadnou změnu kompozice. Dále existují objektivy se schopností zoom, tedy s možnou změnou ohniska. Takové objektivy se skládají až z 18 čoček. U těchto objektivů lze měnit kompozici, ale s cenou snížené ostrosti a světelnosti, neboť čočky pohltí část světla přicházejícího do fotoaparátu [36].

Ohnisková vzdálenost a zorný úhel

Ohnisko je bod, ve kterém dojde k protnutí rovnoběžných paprsků. Značí se F a udává se v mm. Vzdálenost ohniska od středu čočky se jmenuje ohnisková vzdálenost, což je jeden ze základních parametrů objektivu. S ohniskovou vzdáleností souvisí pojem zorný úhel, který ovlivňuje ohnisková vzdálenost. Ovlivňují se nepřímou úměrou, čím větší je ohnisková vzdálenost, tím menší je zorný úhel. To je zobrazeno na obrázku Obr. 42 [36].



Obr. 42 Změna ohniskové vzdálenosti se zorným úhlem [39]

Objektivy mohou být s dlouhými ohnisky, které mají ohniskovou vzdálenost více než 50 mm. Objektivy s ohniskovou vzdáleností 100–300 mm se nazývají teleobjektivy. Kratší ohniska pod 50 mm se nazývají širokouhlé. Mají velký zorný úhel, a proto se hodí pro focení krajiny. Jsou také objektivy s extrémně krátkou ohniskovou vzdáleností 8–12 mm, které se nazývají rybí oka. Pod 8 mm ohniskovou vzdáleností již fotoaparát vidí i za sebe. Objektivy s pohyblivou ohniskovou vzdáleností jsou tedy velmi praktické, jelikož pro změnu ohniska není třeba měnit celý objektiv, ale jen použít zoom [36, 52].

Expozice

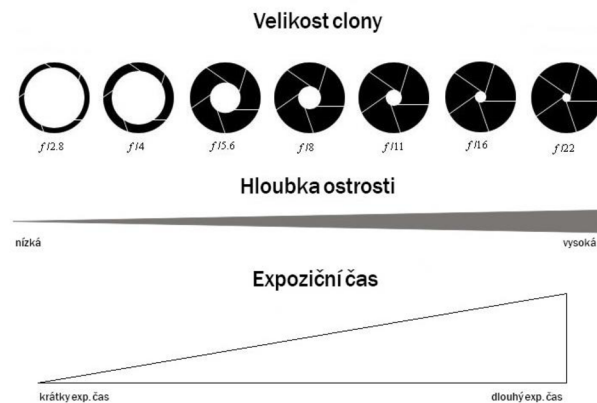
Jedná se o čas expozice CMOS nebo CCD snímače. Je udáván v sekundách, obvykle ve zlomcích. Rozsah expozice může být od 1/4000 s až 30 s. Ostrost objektů je dána jednak správným zaostřením, ale také expozicí, trvá-li osvit snímače dlouho, pohyblivé objekty se mohou rozmazat.

ISO

Hodnota ISO udává citlivost obrazového snímače, v číselné stupnici definované mezinárodní organizací pro standardizaci. Čím je hodnota ISO vyšší, tím méně světla je potřeba na pořízení snímku, což je možno použít ve zhoršených světelných podmínkách. Běžné hodnoty ISO se udávají 100, 200, 400, 800, 1600. Při hodnotách vyšších než 400 začíná na snímku vznikat šum, který bývá patrný zejména na tmavých částech snímku.

Clona

Clona slouží k regulaci šířky světelného svazku procházejícího objektivem. Otevřenost, či zavřenost clony se popisuje clonovým číslem. Clonové číslo je poměr ohniskové vzdálenosti optické soustavy a průměru vstupní čočky [36]. Fungování clony je patrné z Obr. 43.



Obr. 43 Funkce clony [40]

Běžné hodnoty clonového čísla jsou 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22, každé další číslo v této řadě vyjadřuje poloviční světelný tok, než má předchozí číslo. Z clonového čísla vychází světelnost objektivu, což je jeden z důležitých parametrů fotoaparátu, představuje nejnižší clonové číslo objektivu a udává kolik světla je objektiv schopen propustit na snímač. Čím nižší je číslo světelnosti, tím lepší je objektiv. Například se světelností $f/1,4$ se jedná o kvalitní objektiv pro pořízení dobrých snímků, zatímco světelnost $f/5,6$ znamená nízkou světelnost a s objektivem se nebudou dít pořídít dobré snímky ve zhoršených podmínkách.

Hloubka ostrosti

Vymezuje část prostoru, která je zobrazena ostře. Hloubku ostrosti ovlivňujeme ohniskovou vzdáleností, přičemž menší ohnisková vzdálenost umožňuje velkou hloubku ostrosti a větší ohnisková vzdálenost umožňuje malou hloubku ostrosti. Hloubku ostrosti ovlivňuje také clonové číslo. Menší clonové číslo umožňuje malou hloubku ostrosti a větší clonové číslo umožňuje velkou hloubku ostrosti. Kombinací ohniskové vzdálenosti a clonového čísla lze dosáhnout libovolné hloubky ostrosti.

Teplota barev a vyvážení bílé

Barva předmětu je závislá na spektrálním složení dopadajícího světla. Například list může být na denním světle bílý a ve světle žárovky nažloutlý. Podle toho je třeba správně nastavit vyvážení bílé, buď nastavením modelové situace nebo automatickým vyvážením bílé [36, 52].

4.10.2 Efekty při focení

Vinětace

Vinětace může být považována za vadu objektivu, projevuje se nižším jasnem na okrajích snímku. Vinětace bývá způsobena omezením chodu paprsků přírubami čoček a tubusem objektivu. Ve spojení s působením clony, nastane deformace svazku paprsků, který nebude kruhový, ale eliptický [41]. Ukázka vinětace je zobrazena vlevo na obrázku Obr. 44, kde si lze povšimnout tmavších míst na okrajích snímku, narozdíl od snímku bez vinětace, který je na pravé straně.



Obr. 44 Vlevo snímek s vinětací a vpravo bez ní [42]

Ovlivnění měření působením vinětace

Vinětace zanáší do měření chybu, která se zvětšuje se zmenšováním ohniskové vzdálenosti. Objektivy s delší ohniskovou vzdáleností mají chybu vinětace většinou menší. Největší chyba vinětace je obecně u nejmenších clonových čísel, například u clonového čísla $f/1.8$. Pokud se provede jasová analýza snímku s vinětací bude se jas zmenšovat směrem k okrajům, což způsobí chybu měření na okrajích snímku, z tohoto důvodu se musí vinětace korigovat.

Snížení jasu v okrajích snímku má za následek menší vybudění modrého kanálu, což může způsobit chybu měření T_{cp} .

Bokeh efekt

Bokeh efekt způsobuje rozostřené pozadí, vlivem objektivu. Bokeho efektu se dosáhne při fotografování s malým clonovým číslem a se správným objektivem. Na Obr. 45 je zobrazen snímek s bokeh efektem, tedy s rozostřeným pozadím [43].



Obr. 45 Snímek s bokeh efektem [43]

Ovlivnění měření působením efektu Bokeh

Při měření způsobuje rozostřené pozadí chybu, kdy se do zaostřeného popředí promíchá světlo z rozmazaného pozadí snímku. Tento jev může mít velký vliv na vybuzení modrého kanálu, a s tím i na chybu měření T_{cp} .

Pohybová neostrost

Pohybovou neostrost má za vinu delší expoziční čas. Delší čas expozice trvá déle než polovinu sekundy. Na snímcích s takto dlouhým časem se projeví pohybová neostrost, která je patrná na Obr. 44. Tato pohybová neostrost se projeví při pohybu během exponovaného času a na snímcích je možno poté pozorovat takzvané duchy, kdy projde před fotoaparátem, nějaká osoba. Další možnost je zobrazena na již zmíněném obrázku Obr. 46, jehož expoziční čas je nastaven na 15 vteřin. Na obrázku se během expozice pohybovaly auta po cestě a jejich světlomety zanechaly čáry viditelné na snímku. Na snímku je možné si povšimnout, že podle barvy světelných čar je možné poznat, zda se jedná o přední nebo zadní světla. Přední světla bývají chladnější, zatímco zadní světla mají teplejší barvy [44].



Obr. 46 Pohybová neostrost [44]

Ovlivnění měření působením pohybové neostrosti

V případě, že při měření s delším expozičním časem dojde k efektu znázorněnému na Obr. 44 je nutné tento jev korigovat, protože zavádí chybu do měření [52].

Krátký expoziční čas a jeho možnost ovlivnění měření

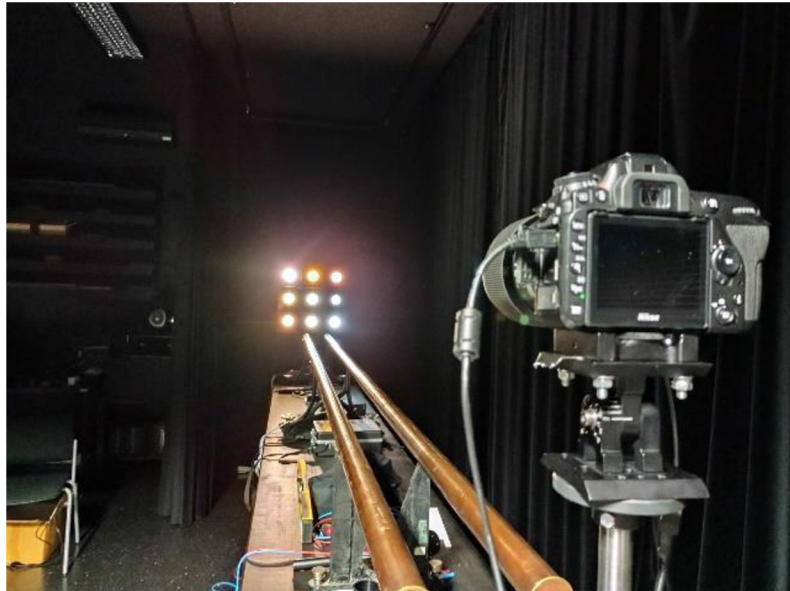
V případě, že expoziční čas bude příliš krátký, může dojít k chybě měření. Tato chyba může nastat v případě, kdy se měří světelný zdroj, jehož světelný tok je modulován v čase. K chybě může dojít především u naměřených hodnot jasu. Na měření náhradní teploty chromatičnosti by to nemělo mít vliv za předpokladu, že se v čase nemění samotný průběh spektra měřeného zdroje.

5 LABORATORNÍ MĚŘENÍ

Zadáním je změřit náhradní teplotu chromatičnosti různých světelných zdrojů v laboratorních podmínkách pomocí přístrojů, které ji umožňují měřit. Dále se naměřené hodnoty porovnají s naměřenými hodnotami jasového analyzátoru LDA-LumiDISP. Přístroje pro porovnání změřené náhradní teploty chromatičnosti jsou spektrometry JETI SpecBos 1211 UV (dále jen JETI), Konica Minolta CS-1000A, UPRtek MK350S a kolorimetr Konica Minolta CL-200, na jejichž základě, bude prováděno porovnávací měření s jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP.

5.1 Měření světelného boxu na optické lavici

Jedná se o porovnávací měření, které probíhalo v laboratoři na optické lavici, kde se měřil světelný box s devíti různými světelnými zdroji. Na druhém konci optické lavice je měřicí přístroj, viz Obr. 47. Při tomto měření jsou použity následující měřicí přístroje spektrometr JETI, UPRtek MK350S, Konica Minolta CS-1000A a kolorimetr Konica Minolta CL-200, přičemž změřené hodnoty těchto přístrojů složí, k porovnání naměřených hodnot jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP, který je zobrazen se světelným boxem na optické lavici, viz Obr. 47.



Obr. 47 Měření na optické lavici s jasovým analyzátozem LDA

Na Obr. 47 uvedeném výše je zobrazen v popředí na stativu jasový analyzátoz, ze kterého po levé straně vede datový kabel, který je připojen k počítači. V takovém režimu zapojení se jasový analyzátoz ovládá přes připojený počítač v programu LumiDISP. V tomto programu se pořídí snímek, který se dále v programu dle potřeby může zpracovat. Dále je na obrázku vidět 5 metrů dlouhá optická lavice na jejíž konci je umístěn světelný box s devíti rozdílnými světelnými zdroji. Světelné zdroje jsou umístěny uvnitř černého světelného boxu, ze kterého prochází rovnoměrně z devíti kruhových otvorů vyplněných plexisklem propouštějícím světlo. Zpracovaný snímek pořízený z jasového analyzátozu je zobrazen na Obr. 49.

5.1.1 Schéma a průběh měření

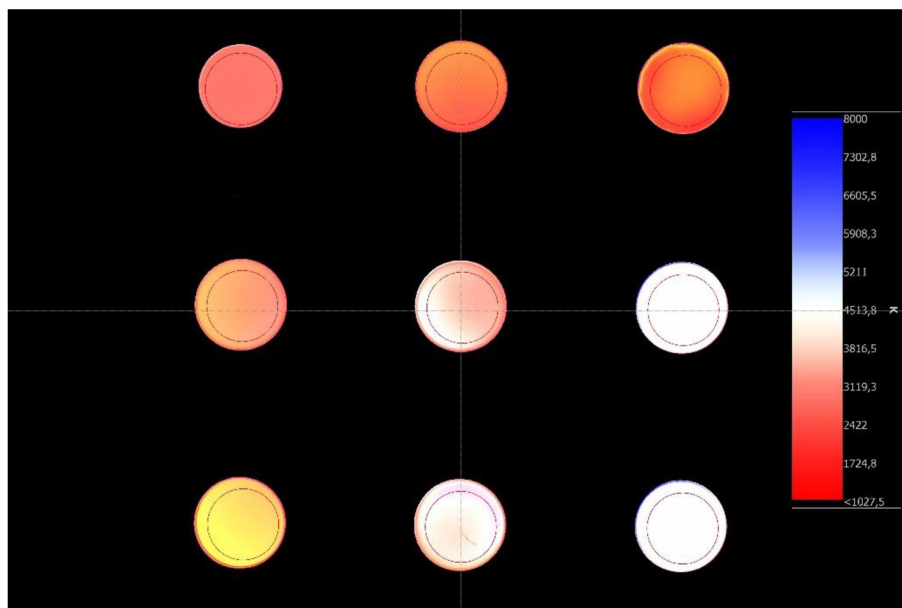
Na následujícím obrázku Obr. 48 je zobrazeno schématické zapojení pro měření na optické lavici. Na optické lavici je měřen světelný box, který obsahuje devět různých světelných zdrojů. Jedná se o tyto světelné zdroje: halogenidová výbojka, vysokotlaká sodíková výbojka (dále jen sodíková výbojka), halogenová žárovka, kompaktní zářivka se 3000, 4000 a 5500 kelviny, LED se 2500, 3500 a 5500 kelviny.



Obr. 48 Schéma měření světelného boxu na optické lavici

- SB – Světelný box, ve kterém je umístěno 9 rozdílných světelných zdrojů.
- MP – Měřicí přístroj, který je umístěn na polohovatelném stativu a připojen k počítači.

Schéma měření odpovídá zapojení pro spektrometr Konica Minolta CS-1000A, JETI a jasovému analyzátoru LDA-LumiDISP. Měřicí přístroje byly směřovány na daný světelný zdroj pomocí polohovatelného stativu, výjimkou byl jasový analyzátor, který se namíří na měřicí box, vyfotí snímek, který se následně zpracuje v počítači. Dále jsou světelné zdroje měřeny pomocí spektrometru UPRtek MK350S a Kolorimetru Konica Minolta CL-200. Měření těmito přístroji probíhá přiložením světelného čidla přístroje ke světelnému zdroji.

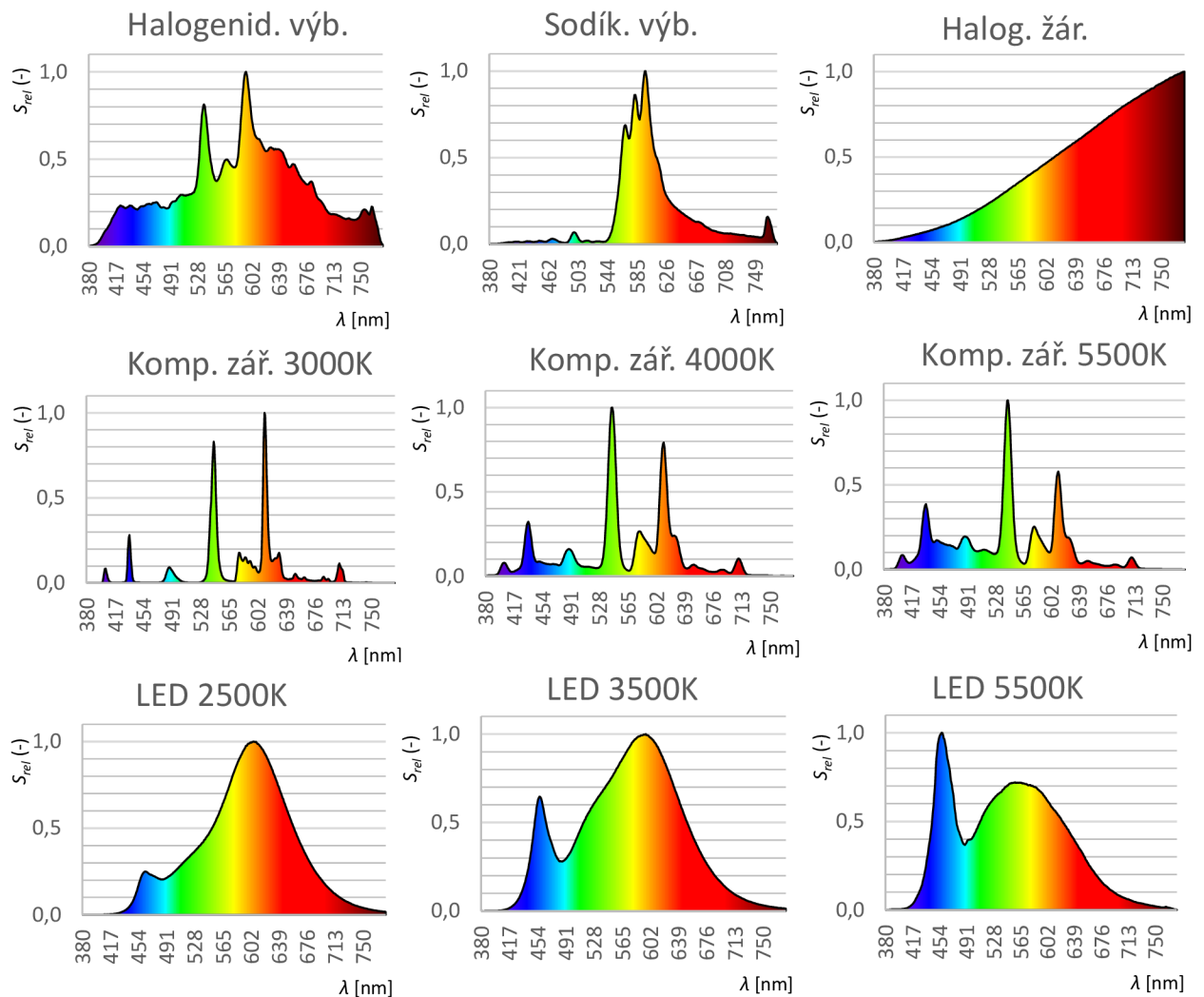


Obr. 49 Ukázka snímku měření na světelném boxu v před vývojové verzi programu LumiDISP

Na výše uvedeném obrázku Obr. 49 je ukázka snímku vyfoceného jasovým analyzátozem a zpracovávaného v před vývojové verzi programu LumiDISP. Je zde zobrazen snímek z jasového analyzátoru při měření světelného boxu na optické lavici. Uvnitř kruhových otvorů jsou umístěny jednotlivé světelné zdroje. K určení, z jakého místa snímku má být odečtena náhradní teplota chromatičnosti, slouží na snímku kružnice, uvnitř jednotlivých kruhů. Uvnitř těchto kružnic včetně kružnice samotné je vypočítána náhradní teplota chromatičnosti. Na snímku je možno si všimnout také použité barevné palety s odpovídajícími kelviny.

5.1.2 Změřená spektra světelných zdrojů ve světelném boxu

V následujících grafech na Obr. 50 jsou změřená spektra jednotlivých světelných zdrojů, které byly změřeny světelným boxu pomocí přístroje JETI, který dokáže změřit spektrum měřeného světla.

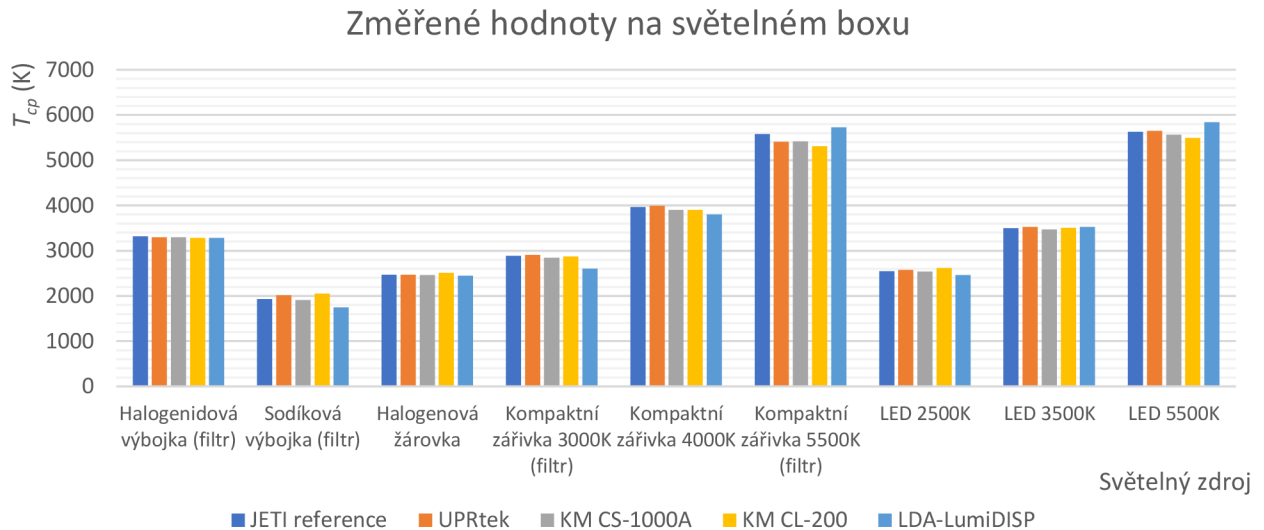


Obr. 50 Změřená spektra světelných zdrojů na světelném boxu

Při měření na světelném boxu byly měřeny světelné zdroje, které mají své spektra zobrazeny na Obr. 50. Je zde například spektrum halogenidové výbojky, která vyzařuje v celém viditelném spektru s dvěma výraznějšími vrcholy v zelené a oranžové. Dále je zde sodíková výbojka s výrazným vrcholem kolem vlnové délky 590 nm, díky čemuž má sodíková výbojka nízký index podání barev. Další je zde spektrum halogenové žárovky, které je také zastoupeno v celém viditelném spektru s rostoucí vyzářenou energií od modrých do červených vlnových délek. Dále jsou zde tři spektra kompaktních zářivek s náhradní teplotou chromatičnosti 3000 K, 4000 K a 5500 K. Platí, že zářivky se vyznačují úzkými vrcholy napříč spektru, přičemž u studenějších barev je vidět nárůst záření v modré oblasti spektra. Posledním měřeným světelným zdrojem byly LED světelné zdroje s náhradní teplotou chromatičnosti 2500 K, 3500 K a 5500 K. Na grafech LED si lze všimnout, že se zvyšující se náhradní teplotou chromatičnosti se zvětšuje první vrchol v modré barvě a naopak se zmenšuje vrchol v teplejších barvách.

5.1.3 Změřené hodnoty

Na obrázku Obr. 51 jsou graficky znázorněny změřené hodnoty T_{cp} z tabulky Tab. 16. Jedná se o změřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti jednotlivých světelných zdrojů, které byly změřeny pomocí použitých přístrojů, se kterými bylo prováděno měření na světelném boxu.



Obr. 51 Změřené hodnoty T_{cp} na světelném boxu

V tabulce Tab. 16 jsou zobrazeny změřené hodnoty T_{cp} na světelném boxu pomocí jednotlivých měřících přístrojů. Přístroje Konica Minolta nedokážou vyhodnotit nízkou hodnotu změřené náhradní teploty chromatičnosti, ale barevné souřadnice x , y dokážou přístroje ukázat a je možné na základě známých barevných souřadnic dopočítat náhradní teplotu chromatičnosti. Některé světelné zdroje byly opatřeny neutrálním filtrem z důvodu vysokého jasu, který nedokázaly některé přístroje změřit. Jako referenční přístroj je použit přístroj JETI, se kterým budeme porovnávat změřené hodnoty ostatních přístrojů.

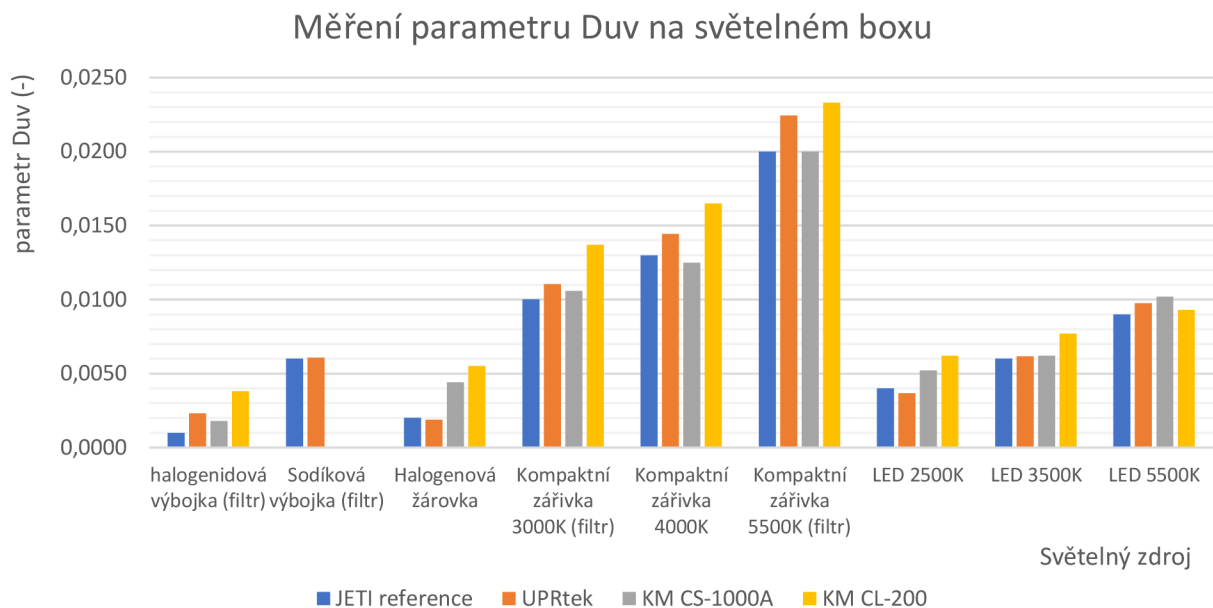
Tab. 16 Měření T_{cp} na světelném boxu

Měření na světelném boxu					
Světelný zdroj	JETI reference	UPRtek	KM CS-1000A	KM CL-200	LDA-LumiDISP
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)
halogenidová výbojka (filtr)	3315	3293	3296	3283	3278
Sodíková výbojka (filtr)	1931	2012	1911*	2050*	1745
Halogenová žárovka	2469	2468	2457	2507	2446
Kompaktní zářivka 3000K (filtr)	2882	2907	2845	2873	2600
Kompaktní zářivka 4000K	3969	3995	3899	3905	3805
Kompaktní zářivka 5500K (filtr)	5580	5410	5417	5307	5724
LED 2500K	2547	2576	2541	2618	2457
LED 3500K	3502	3529	3470	3509	3530
LED 5500K	5627	5646	5568	5492	5843

(filtr) – Světelný zdroj byl, kvůli vysokému jasu, opatřen neutrálním filtrem.

* – Hodnoty byly dopočítány Robertsonovou metodou na základě změřených x a y (kap. 2.1.).

Na obrázku Obr. 52 jsou graficky znázorněny hodnoty parametru Duv z tabulky Tab. 17. Jedná se o změřené hodnoty parametru Duv jednotlivých světelných zdrojů, který byl změřen pomocí použitých přístrojů z měření na světelném boxu.



Obr. 52 Změřené hodnoty parametru Duv na světelném boxu

V tabulce Tab. 17 jsou uvedené změřené hodnoty Duv jednotlivých měřících přístrojů, přičemž jasový analyzátor LDA-LumiDISP parametr Duv neměří. Budeme se tedy nadále zabývat jen měřením náhradní teploty chromatičnosti a porovnáváním hodnot T_{cp} přístroje JETI s ostatními měřícími přístroji. Příklad referenční hodnoty budeme brát z přístroje JETI, se kterým budeme porovnávat ostatní měřící přístroje.

Tab. 17 Měření Duv na světelném boxu

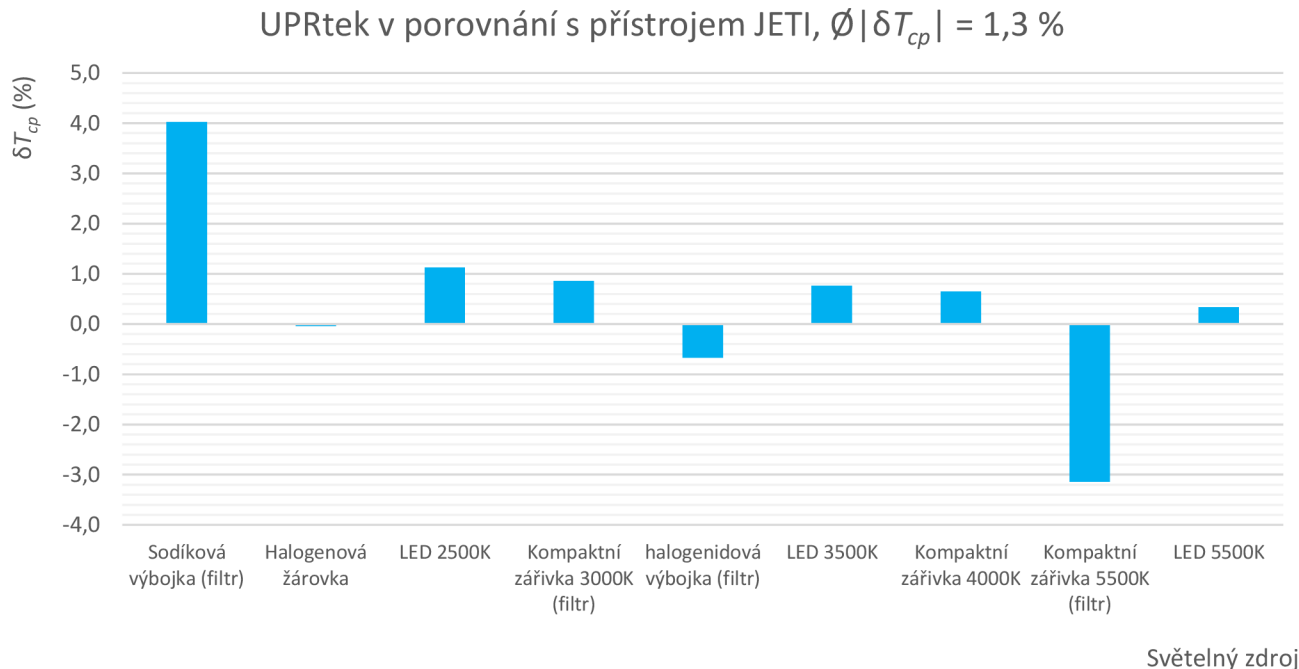
Světelný zdroj	JETI reference	UPRtek	KM CS-1000A	KM CL-200	LDA-LumiDISP
	Duv (-)	Duv (-)	Duv (-)	Duv (-)	Duv (-)
halogenidová výbojka (filtr)	0,0010	0,0023	0,0018	0,0038	-----
Sodíková výbojka (filtr)	0,0060	0,0061	-----	-----	-----
Halogenová žárovka	0,0020	0,0019	0,0044	0,0055	-----
Kompaktní zářivka 3000 K (filtr)	0,0100	0,0110	0,0106	0,0137	-----
Kompaktní zářivka 4000 K	0,0130	0,0144	0,0125	0,0165	-----
Kompaktní zářivka 5500 K (filtr)	0,0200	0,0224	0,02	0,0233	-----
LED 2500 K	0,0040	0,0037	0,0052	0,0062	-----
LED 3500 K	0,0060	0,0062	0,0062	0,0077	-----
LED 5500 K	0,0090	0,0098	0,0102	0,0093	-----

(filtr) – Světelný zdroj byl, kvůli vysokému jasů, opatřen neutrálním filtrem.

----- – Přístroj nezměřil hodnotu Duv

5.1.4 UPRTek v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 53 jsou graficky znázorněny relativní odchylky přístroje UPRTek v porovnání k referenčnímu přístroji JETI. Vypočtená průměrná odchylka vychází $\bar{\delta T_{cp}} = 1,3 \%$. Odchylku navyšuje zejména sodíková výbojka s kladnou odchylkou $\delta T_{cp} = 4,0 \%$ a kompaktní zářivka 5500 K se zápornou odchylkou s velikostí $\delta T_{cp} = -3,1 \%$.



Obr. 53 Relativní odchylky přístroje UPRTek s referenčním přístrojem JETI

V tabulce Tab. 18 jsou zobrazeny rozdíly změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného přístroje UPRTek. Dále jsou v tabulce zobrazeny relativní odchylky, které jsou vneseny do grafu na Obr. 53. Některé světelné zdroje byly opatřeny neutrálním filtrem z důvodu vysokého jasu, který nedokázaly některé přístroje změřit.

Tab. 18 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a UPRTek

Světelný zdroj	JETI reference	UPRTek	$\Delta T_{cp} (K)$	$\delta T_{cp} (\%)$
	$T_{cp} (K)$	$T_{cp} (K)$		
Sodíková výbojka (filtr)	1931	2012	81	4,0
Halogenová žárovka	2469	2468	-1	-0,0
LED 2500K	2547	2576	29	1,1
Kompaktní zářivka 3000K (filtr)	2882	2907	25	0,9
halogenidová výbojka (filtr)	3315	3293	-22	-0,7
LED 3500K	3502	3529	27	0,8
Kompaktní zářivka 4000K	3969	3995	26	0,7
Kompaktní zářivka 5500K (filtr)	5580	5410	-170	-3,1
LED 5500K	5627	5646	19	0,3
$\bar{\delta T_{cp}}$ a $\bar{\delta T_{cp}}$			44	1,3

(filtr) – Světelný zdroj byl, kvůli vysokému jasu, opatřen neutrálním filtrem.

5.1.5 Příklad výpočtu:

K tabulce Tab. 18 je zde uveden příklad potřebných výpočtů k získání potřebných hodnot ΔT_{cp} , δT_{cp} a průměrem těchto hodnot $\emptyset |\Delta T_{cp}|$, $\emptyset |\delta T_{cp}|$.

Odchylky jsou počítány na základě rozdílu změřených hodnot. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce Tab. 18.

$$\Delta T_{cp} = T_{cpUPRtek} - T_{cpJETI} = 2012 - 1931 = 81 \text{ K} \quad (5.1)$$

Relativní odchylka je počítána dle následujícího vztahu. Příklad výpočtu pro první řádek v tabulce Tab. 18.

$$\delta T_{cp} = \frac{\Delta T_{cp}}{T_{cpUPRtek}} \cdot 100 = \frac{81}{2012} \cdot 100 = 4,0 \% \quad (5.2)$$

Průměr odchylek rozdílu absolutních hodnot je počítán jako suma jednotlivých odchylek vydělená počtem změřených světelných zdrojů. Příklad výpočtu pro $\emptyset |\Delta T_{cp}|$ z tabulky Tab. 18.

$$\emptyset |\Delta T_{cp}| = \frac{\sum |\Delta T_{cp}|}{n_{\text{počet zdrojů}}} \quad (5.3)$$

$$\emptyset |\Delta T_{cp}| = \frac{81 + 1 + 29 + 25 + 22 + 27 + 26 + 170 + 19}{9} = 44 \text{ K}$$

Průměr odchylek relativních odchylek je počítán jako suma jednotlivých odchylek vydělená počtem změřených světelných zdrojů. Příklad výpočtu pro $\emptyset |\delta T_{cp}|$ z tabulky Tab. 18.

$$\emptyset |\delta T_{cp}| = \frac{\sum |\delta T_{cp}|}{n_{\text{počet zdrojů}}} \quad (5.4)$$

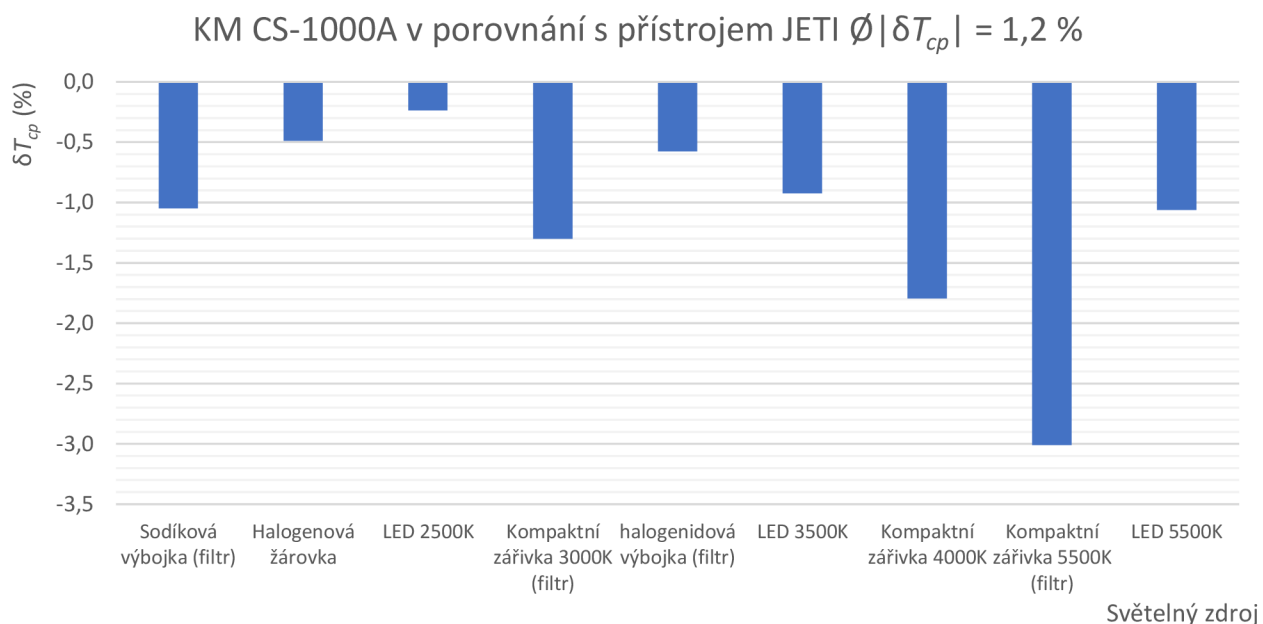
$$\emptyset |\delta T_{cp}| = \frac{4,0 + 0,0 + 1,1 + 0,9 + 0,7 + 0,8 + 0,7 + 3,1 + 0,3}{9} = 1,3 \%$$

Z vypočtených hodnot je zjištěn rozdíl hodnot naměřených pomocí přístroje UPRtek a referenčního přístroje JETI. Pro tento rozdíl je vypočtena relativní odchylka. Pomocí relativní odchylky je možné si lépe představit rozdíl změřených hodnot. Z těchto vypočtených odchylek je dále vypočtena průměrná hodnota absolutní a relativní odchylky pro měřené světelné zdroje.

Příklad výpočtů k tabulce Tab. 18 je shodný i pro tabulky Tab. 18 až Tab. 24, proto pro tyto tabulky nebude uváděn příklad výpočtu.

5.1.6 Konica Minolta CS-1000A v porovnání s přístrojem JETI

V grafu na Obr. 54 jsou znázorněny relativní odchylky přístroje Konica Minolta CS-1000A v porovnání k referenčnímu přístroji JETI. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{\delta T_{cp}} = 1,2 \%$. Odchylku navyšuje nejvíce kompaktní zářivka 5500 K se zápornou velikostí $\delta T_{cp} = -3,0 \%$.



Obr. 54 Relativní odchylky přístroje KM CS-1000A s referenčním přístrojem JETI

V tabulce Tab. 19 je zobrazen rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného přístroje Konica Minolta CS-1000A. Dále jsou v tabulce zobrazeny relativní odchylky, které jsou vneseny do grafu na Obr. 54. Některé světelné zdroje byly opatřeny neutrálním filtrem z důvodu vysokého jasu, který nedokázaly některé přístroje změřit.

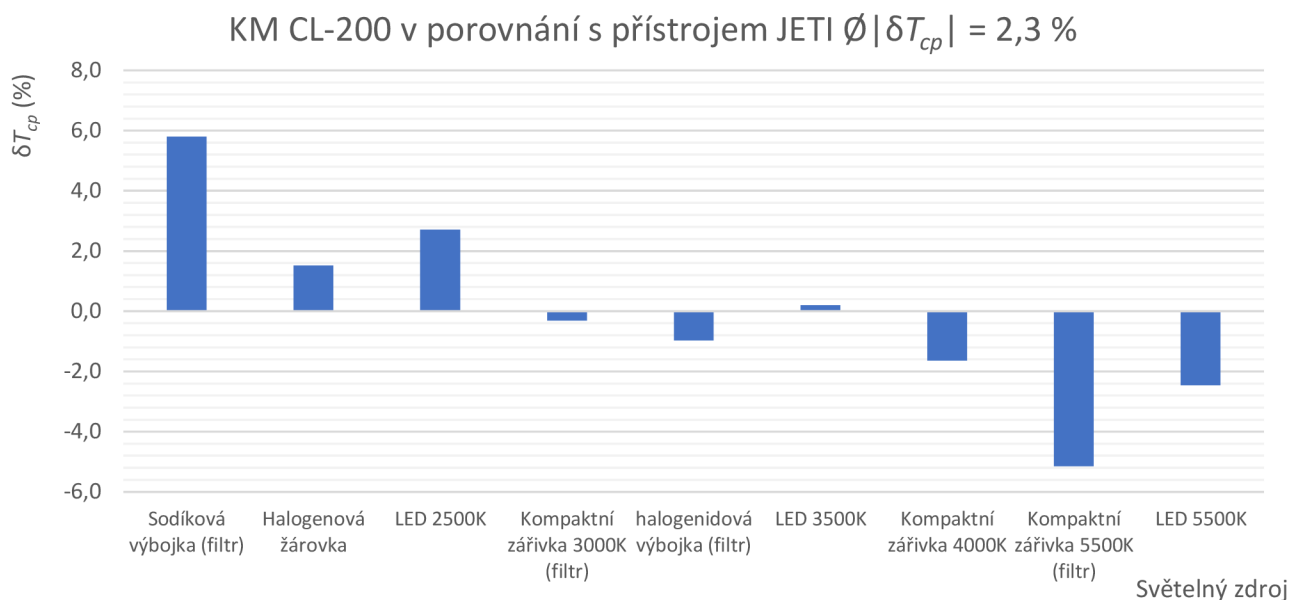
Tab. 19 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a KM CS-1000A

Světelný zdroj	JETI reference	KM CS-1000A	$\Delta T_{cp} (K)$	$\delta T_{cp} (\%)$
	$T_{cp} (K)$	$T_{cp} (K)$		
Sodíková výbojka (filtr)	1931	1911	-20	-1,1
Halogenová žárovka	2469	2457	-12	-0,5
LED 2500K	2547	2541	-6	-0,2
Kompaktní zářivka 3000K (filtr)	2882	2845	-37	-1,3
halogenidová výbojka (filtr)	3315	3296	-19	-0,6
LED 3500K	3502	3470	-32	-0,9
Kompaktní zářivka 4000K	3969	3899	-70	-1,8
Kompaktní zářivka 5500K (filtr)	5580	5417	-163	-3,0
LED 5500K	5627	5568	-59	-1,1
$\bar{\delta T_{cp}}$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			46	1,2

(filtr) – Světelný zdroj, byl kvůli vysokému jasu, opatřen neutrálním filtrem.

5.1.7 Konica Minolta CL-200 v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 55 jsou graficky znázorněny relativní odchylky přístroje Konica Minolta CL-200 v porovnání k referenčnímu přístroji JETI. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{|\delta T_{cp}|} = 2,3 \%$. Odchylku navyšuje zejména sodíková výbojka s kladnou odchylkou o velikosti $\delta T_{cp} = 5,8 \%$ a kompaktní zářivka 5500 K se zápornou odchylkou s odchylkou o velikosti $\delta T_{cp} = -5,1 \%$.



Obr. 55 Relativní odchylky přístroje KM CL-200 s referenčním přístrojem JETI

V tabulce Tab. 20 je zobrazen rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného přístroje Konica Minolta CL-200. Dále jsou v tabulce zobrazeny relativní odchylky, které jsou vneseny do grafu na Obr. 55. Některé světelné zdroje byly opatřeny neutrálním filtrem z důvodu vysokého jasu, který nedokázaly některé přístroje změřit.

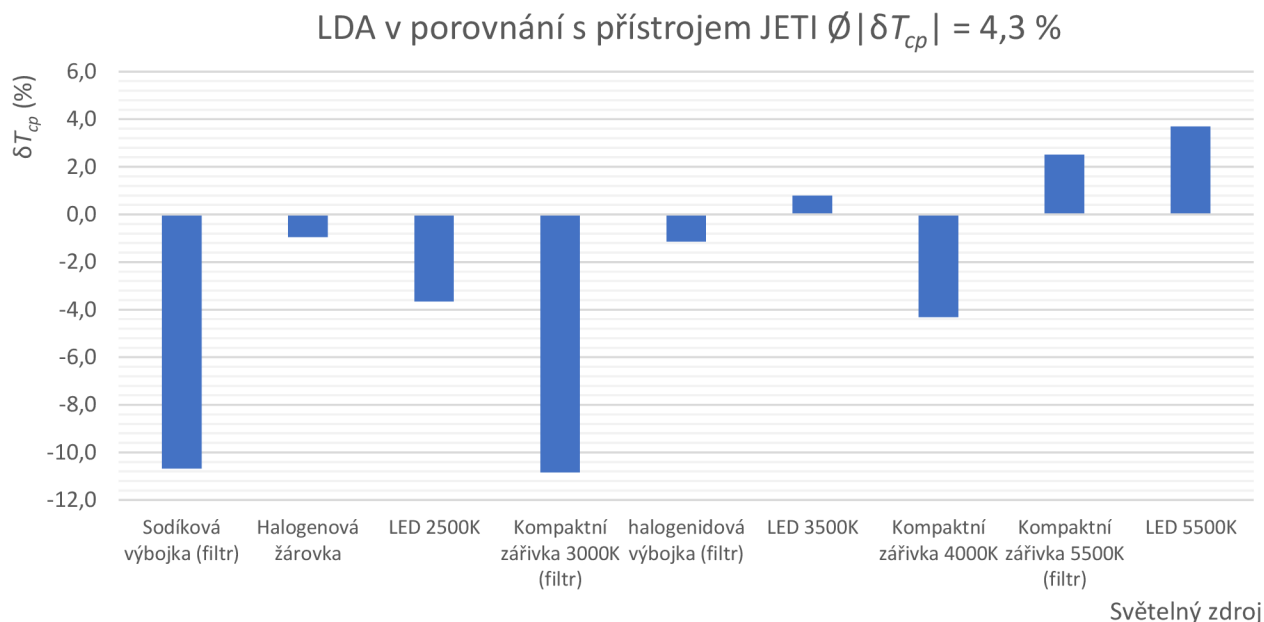
Tab. 20 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} přístroje JETI a Konica Minolta CL-200

Světelný zdroj	JETI reference	KM CL-200	$\Delta T_{cp} (K)$	$\delta T_{cp} (\%)$
	$T_{cp} (K)$	$T_{cp} (K)$		
Sodíková výbojka (filtr)	1931	2050	119	5,8
Halogenová žárovka	2469	2507	38	1,5
LED 2500K	2547	2618	71	2,7
Kompaktní zářivka 3000K (filtr)	2882	2873	-9	-0,3
halogenidová výbojka (filtr)	3315	3283	-32	-1,0
LED 3500K	3502	3509	7	0,2
Kompaktní zářivka 4000K	3969	3905	-64	-1,6
Kompaktní zářivka 5500K (filtr)	5580	5307	-273	-5,1
LED 5500K	5627	5492	-135	-2,5
$\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			83	2,3

(filtr) – Světelný zdroj, byl kvůli vysokému jasu, opatřen neutrálním filtrem.

5.1.8 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 56 jsou graficky znázorněny relativní odchylky jasového analyzátoru LDA-LumiDISP v porovnání k referenčnímu přístroji JETI. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{|\delta T_{cp}|} = 4,3 \%$. Odchylku navyšuje sodíková výbojka se zápornou odchylkou $\delta T_{cp} = -10,7 \%$, nebo kompaktní zářivka 3000 K se zápornou odchylkou $\delta T_{cp} = -10,8 \%$.



Obr. 56 Relativní odchylky jasového analyzátoru LDA s přístrojem JETI, světelný box

V tabulce Tab. 21 je zobrazen rozdíl změřených hodnot T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, Dále jsou v tabulce zobrazeny relativní odchylky, které jsou vneseny do grafu na Obr. 56. Některé světelné zdroje byly opatřeny neutrálním filtrem z důvodu vysokého jasu, který nedokázaly některé přístroje změřit.

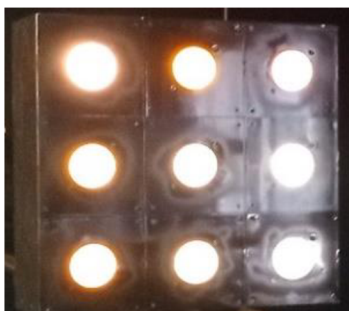
Tab. 21 Rozdíl změřených hodnot T_{cp} přístroje JETI s jasového analyzátoru LDA, světelný box

Světelný zdroj	JETI reference	LDA-LumiDISP	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)		
Sodíková výbojka (filtr)	1931	1745	-186	-10,7
Halogenová žárovka	2469	2446	-23	-1,0
LED 2500K	2547	2457	-90	-3,7
Kompaktní zářivka 3000K (filtr)	2882	2600	-282	-10,8
halogenidová výbojka (filtr)	3315	3278	-37	-1,1
LED 3500K	3502	3530	28	0,8
Kompaktní zářivka 4000K	3969	3805	-164	-4,3
Kompaktní zářivka 5500K (filtr)	5580	5724	144	2,5
LED 5500K	5627	5843	216	3,7
$\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			130	4,3

(filtr) – Světelný zdroj byl kvůli vysokému jasu opatřen neutrálním filtrem.

5.1.9 Měřený světelný zdroj a použité přístroje

- Světelný box s devíti světelnými zdroji: halogenidová a sodíková výbojka, halogenová žárovka, kompaktní zářivka s 3000, 4000 a 5500 kelviny, LED s 2500, 3500 a 5500 kelviny. K vidění na Obr. 57.



Obr. 57 Světelný box

- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4. K vidění na Obr. 58.



Obr. 58 Jasový analyzátor LDA

- Spektroradiometr JETI Specbos 1211UV s platnou kalibrací do 1. září 2021 S/N: 2015926, (Obr. 59 a)).
- Spektroradiometr UPRtek MK350S. K vidění na Obr. 59 b).

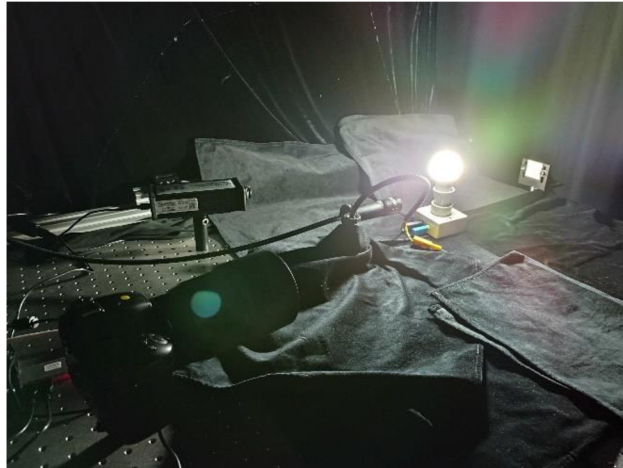


Obr. 59 Spektroradiometr a) JETI, b) UPRtek

- Kolorimetr Konica Minolta CL-200, vyr. číslo: 76631127. K vidění na Obr. 15.
- Spektroradiometr Konica Minolta CS-1000A, vyr. číslo: 1501513, k vidění na Obr. 17.
- Optická lavice 5 metrů.
- Polohovatelný stojan pro měřicí přístroj.
- Počítač pro zpracování informací z měřících přístrojů.

5.2 Měření malých světelných zdrojů s patičí E27 na optickém stole

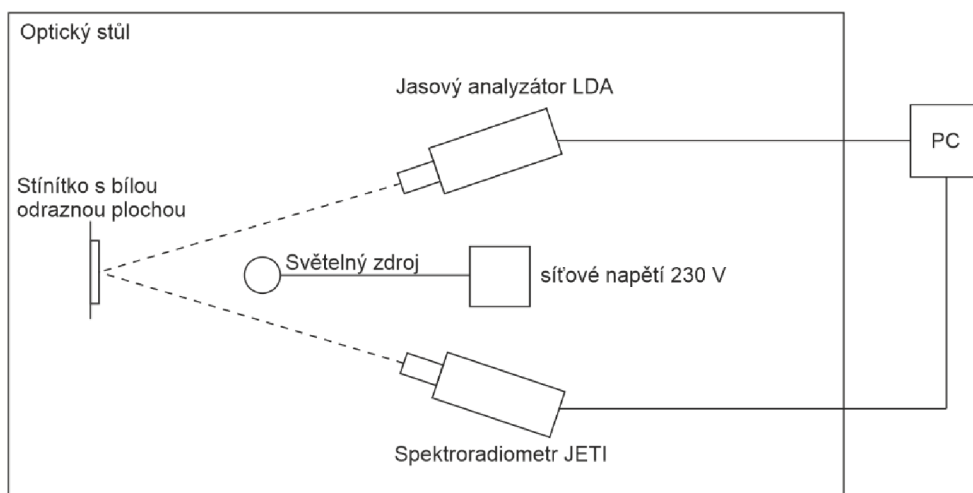
Jedná se o porovnávací měření vybraných světelných zdrojů s patičí E27 na optickém stole pomocí spektrometru JETI a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP. Na Obr. 60 je zobrazeno měření s LED světelným zdrojem, který vyvolá na bílé destičce odraz, který je měřen pomocí dvou přístrojů jasového analyzátoru LDA a spektrometru JETI.



Obr. 60 Měření malých světelných zdrojů s patičí E27 na optickém stole

5.2.1 Schéma a průběh měření

Schématické zapojení měření světelných zdrojů s patičí E27 je zobrazeno na Obr. 61. Jedná se o porovnávací měření dvou měřících přístrojů spektrometru JETI se známou nejistotou měření a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP s neznámou nejistotou měření.

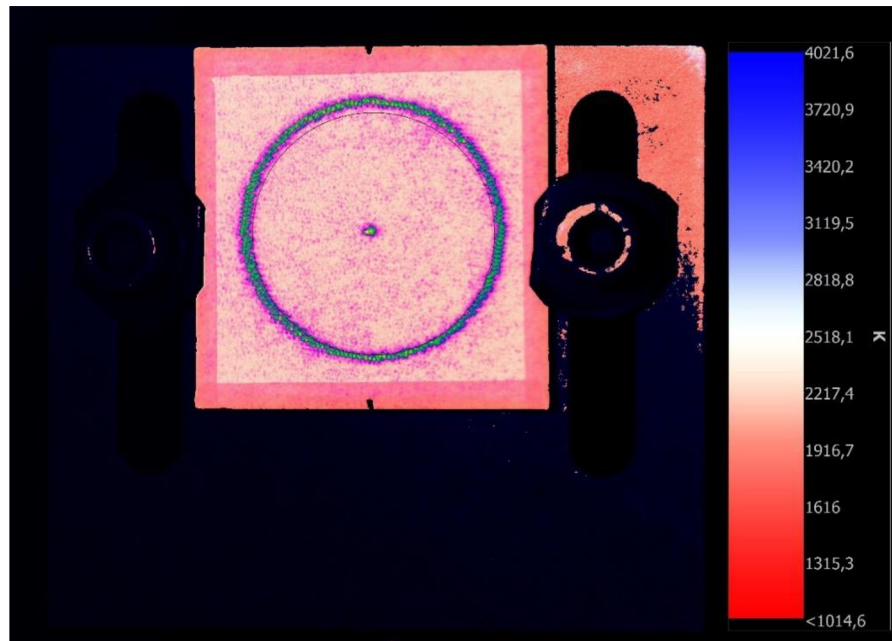


Obr. 61 Schéma měření malých světelných zdrojů s patičí E27

Měřící přístroje byly nasměrovány na stínítko s bílou odraznou plochou, kde byla zaznamenána náhradní teplota chromatičnosti právě měřeného světelného zdroje. Vždy byl změřen odraz na stínítku právě měřeného světelného zdroje, který byl vyšroubován z patice E27 a byl našroubován další světelný zdroj. Byly změřeny vybrané světelné zdroje LED, žárovky a žárovky s patičí E27, které byly napájeny síťovým napětím. Zde je třeba říct, že kolísání síťového napětí neovlivňuje T_{cp} Žárovek ani LED světelných zdrojů. Měření obou přístrojů bylo spouštěno ve stejnou dobu, kvůli měření světelných zdrojů, které by kolísání napětí mohlo ovlivnit. Soupis použitých světelných zdrojů je možné najít v kapitole 5.2.5, kde se nachází seznam použitých přístrojů a pomůcek.

Ukázka snímku vyfoceného jasovým analyzátořem LDA

Na následující obrázku Obr. 62 je snímek změřený jasovým analyzátořem LDA. Snímek je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP. Na obrázku se nachází stínítko s bílou odraznou plochou, na které je měřena náhradní teplota chromatičnosti. Na stínítku se nachází červený terč s tečkou uprostřed. Z plochy uvnitř tohoto terče je vyhodnocena T_{cp} přístrojem JETI. Terč je při měření vypnut, aby nedošlo k nepřesnému měření. Na stínítku se nachází ještě kružnice. Z kružnice a jejího vnitřku se vyhodnocuje T_{cp} jasovým analyzátořem. Kružnice slouží jako detektor v programu LumiDISP. Pomocí tohoto detektoru se v programu označí místo, které se analyzuje.

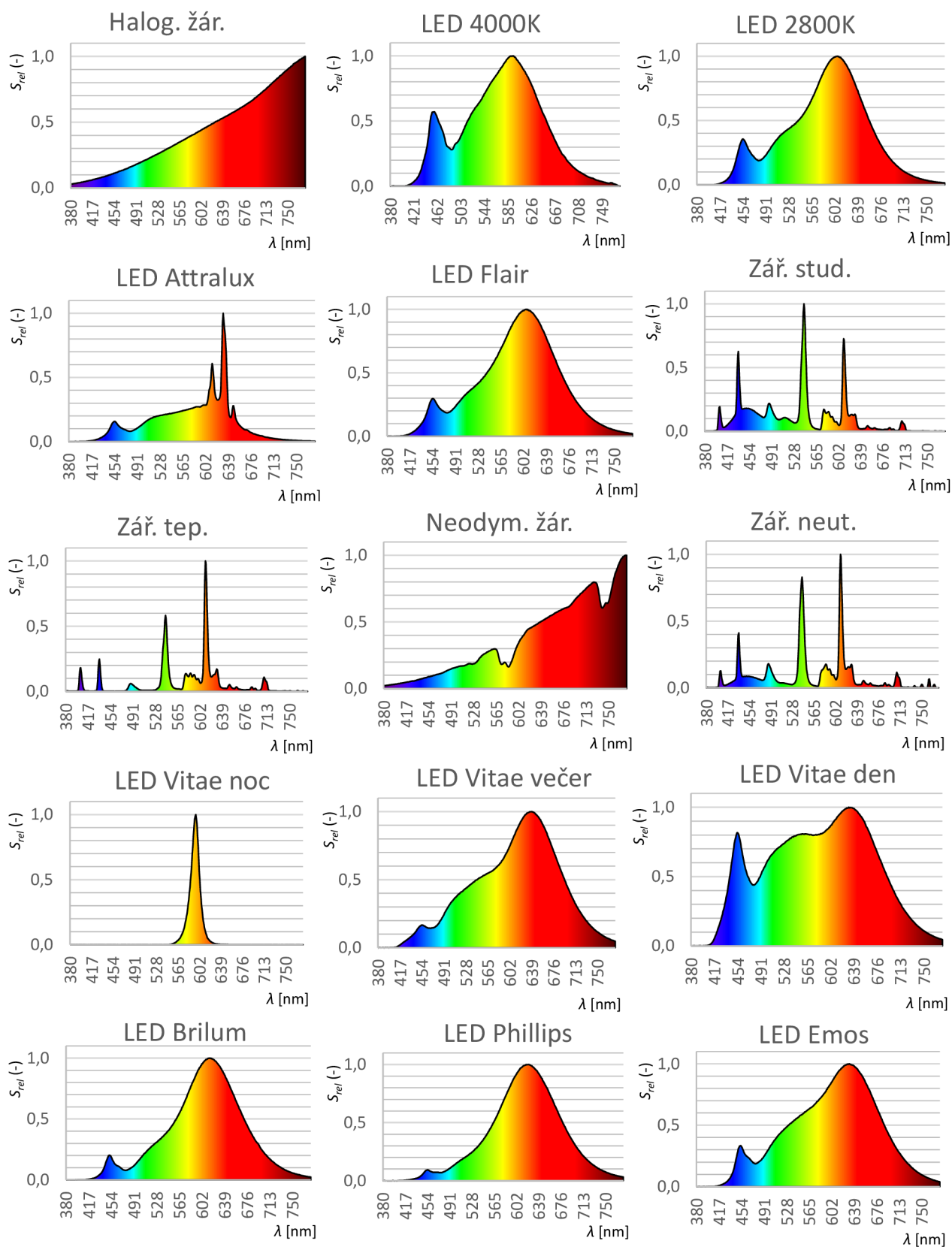


Obr. 62 Zpracovaný snímek při měření malých zdrojů v před vývojové verzi programu LumiDISP

5.2.2 Změřená spektra světelných zdrojů

Na následující stránce na obrázku Obr. 63 jsou znázorněny grafy jednotlivých světelných zdrojů, které byly změřeny při měření malých světelných s patič E27. Na obrázku je zobrazeno spektrum halogenové žárovky, neutrálního a teplého LED zdroje, které rozeznáme velikostí modrého vrcholu. Za povšimnutí stojí netradiční spektrum LED světelného zdroje Attralux, tento světelný zdroj si pomocí vrcholu v červené barvě zlepšuje index podání barev a spektrem může připomínat spektrum klasické žárovky, ke které se dle výrobce snaží přiblížit. Dále stojí za povšimnutí spektrum neodymové žárovky, která má ve spektru poklesy vyzářené energie ve žluté a červené barvě, čímž se liší od klasického spektra žárovky. Dále si lze všimnout LED zdroje Vitae, který je vhodný pro celodenní použití, díky třem možným nastavením na den, večer a noc, přičemž se z denního svícení na večerní zredukuje zejména část spektra s modrými vlnovými délkami a při přechodu na noc zůstane jen vrchol oranžové barvě. Nakonec jsou zde spektra třech teplých LED. Přičemž LED zdroj Emos se chlubí velmi dobrým indexem podání barev $CRI > 96$.

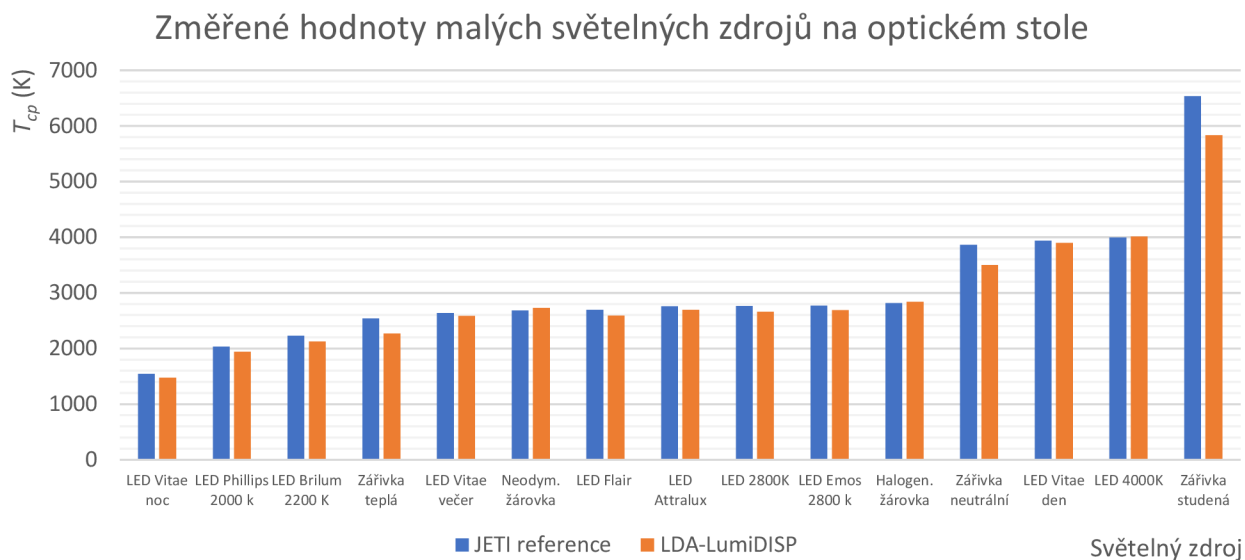
Při měření malých zdrojů s patičkou E27 byly změřeny světelné zdroje se spektry zobrazenými níže Obr. 63, kde se nachází přehled změřených spekter malých světelných zdrojů s patičkou E27.



Obr. 63 Změřená spektra při měření malých světelných zdrojů s patičkou E27

5.2.3 Změřené hodnoty

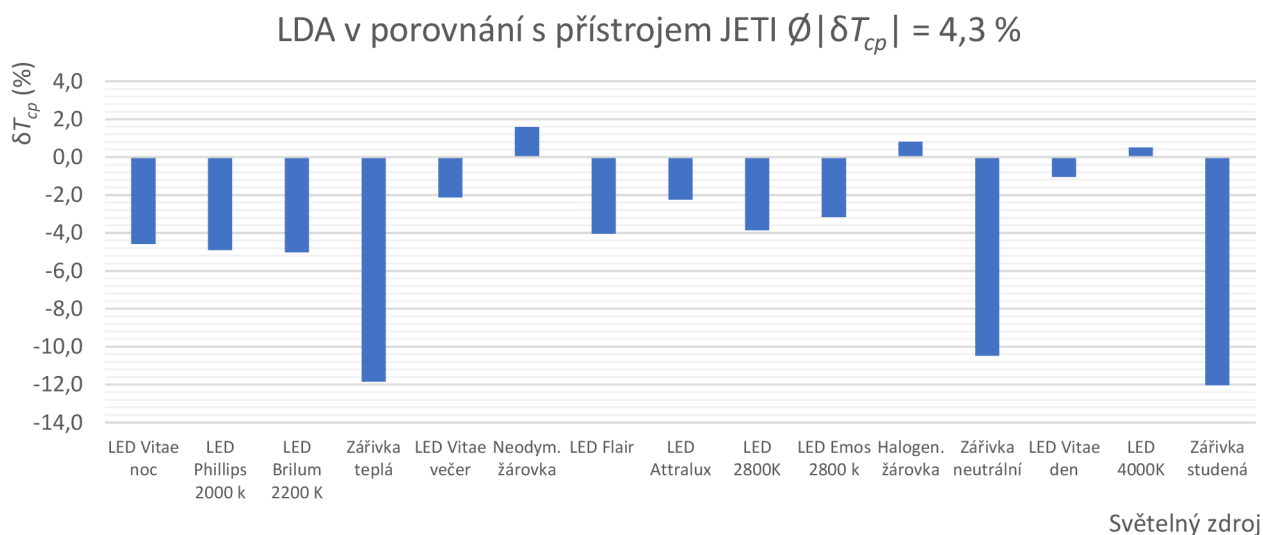
Na obrázku Obr. 64 jsou graficky znázorněny změřené hodnoty T_{cp} z tabulky Tab. 22. Jedná se o změřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti jednotlivých světelných zdrojů, které byly změřeny pomocí přístroje JETI a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP.



Obr. 64 Změřené hodnoty malých světelných zdrojů na optickém stole

5.2.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 65 jsou graficky znázorněny relativní odchylky z tabulky Tab. 22. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{|\delta T_{cp}|} = 4,3 \%$. Odchylku navyšují kompaktní zářivky, kdy studená zářivka nabývá odchylky $\delta T_{cp} = -12,0 \%$, teplá nabývá odchylky $\delta T_{cp} = -11,9 \%$ a neutrální nabývá odchylky o velikosti $\delta T_{cp} = -10,5 \%$.



Obr. 65 Relativní odchylky jasového analyzátoru LDA s přístrojem JETI, malé zdroje

V tabulce Tab. 22 jsou zobrazeny změřené hodnoty T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného přístroje LDA. Dále je v tabulce parametr D_{uv} změřený přístrojem JETI, rozdíl změřených hodnot T_{cp} , relativní odchylka. Na konci tabulky se nachází průměrné hodnoty odchylek.

Tab. 22 změřené a zpracované hodnoty T_{cp} z měření malých zdrojů

Světelný zdroj	JETI reference	LDA- LumiDISP	JETI Parametr D_{uv}	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)			
LED Vitae noc	1543	1475	0,000	-68	-4,6
LED Phillips 2000 k	2035	1940	0,005	-95	-4,9
LED Brilum 2200 K	2230	2123	0,001	-107	-5,0
Zářivka teplá	2537	2268	-0,001	-269	-11,9
LED Vitae večer	2639	2584	0,002	-55	-2,1
Neodym. žárovka	2683	2726	0,009	43	1,6
LED Flair	2695	2590	0,004	-105	-4,1
LED Attralux	2756	2696	-0,003	-60	-2,2
LED 2800K	2763	2660	-0,001	-103	-3,9
LED Emos 2800 k	2771	2686	0,008	-85	-3,2
Halogen. žárovka	2816	2839	0,004	23	0,8
Zářivka neutrální	3864	3498	0,000	-366	-10,5
LED Vitae den	3936	3895	0,000	-41	-1,0
LED 4000K	3993	4013	0,002	20	0,5
Zářivka studená	6538	5836	0,002	-702	-12,0
$\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $				134	4,3

5.2.5 Měřené světelné zdroje a použité přístroje

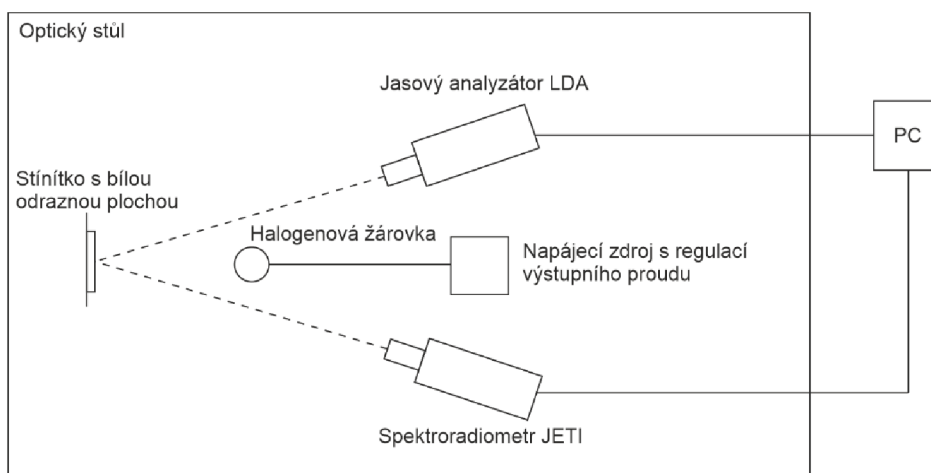
- Halogenová žárovka Emos Eco se světelným tokem 840 lm, $P = 53$ W, $T_{cp} = 2700$ K.
- LED Megaman classic se světelným tokem 1055 lm, $P = 11$ W, $T_{cp} = 4000$ K.
- LED Megaman classic se světelným tokem 1055 lm, $P = 11$ W, $T_{cp} = 2800$ K.
- LED Filamentová Attralux se světelným tokem 1521 lm, $P = 10$ W, $T_{cp} = 2700$ K.
- LED Filamentová Flair se světelným tokem 470 lm, $P = 4$ W, $T_{cp} = 2700$ K.
- Kompaktní zářivka Osram se světelným tokem 650 lm, $P = 12$ W, $T_{cp} = 6500$ K.
- Kompaktní zářivka Osram se světelným tokem 1940 lm, $P = 30$ W, $T_{cp} = 2500$ K.
- Neodymová žárovka Helios s $P = 60$ W.
- Kompaktní zářivka Megaman se světelným tokem 800 lm, $P = 15$ W, $T_{cp} = 4000$ K.
- LED Vitae se třemi režimy pro noc (oranžová, $P = 2$ W), večer ($T_{cp} = 2700$ K, $P = 6$ W) a den ($T_{cp} = 4000$ K, $P = 7$ W).
- LED Brilum filament se světelným tokem 900 lm, $P = 10$ W, patice E27, $T_{cp} = 2200$ K.
- LED Phillips se světelným tokem 570 lm, $P = 8,5$ W, patice E27, $T_{cp} = 2000$ K.
- LED Emos se světelným tokem 1060 lm, $P = 12,5$ W, patice E27, $T_{cp} = 2700$ K.
- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4, (Obr. 58).
- Spektroradiometr JETI Specbos 1211UV s platnou kalibrací do 1. září 2021 S/N: 2015926, (Obr. 59 a)).
- Optický stůl a stínítko s bílou odraznou plochou.
- Počítač pro zpracování informací z měřicích přístrojů.

5.3 Měření Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole

Následně bylo na optickém stole změřeno generované spektrum Planckova (teplotního) zářiče. Toto spektrum bylo generováno za pomoci halogenové žárovky napájené z laboratorního zdroje, kde se pomocí regulace napájecího proudu zvyšovala náhradní teplota chromatičnosti od 1800 kelvinů do 3000 kelvinů s krokem 100 kelvinů. Porovnávací měření bylo prováděno pomocí referenčního spektrometru JETI a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP.

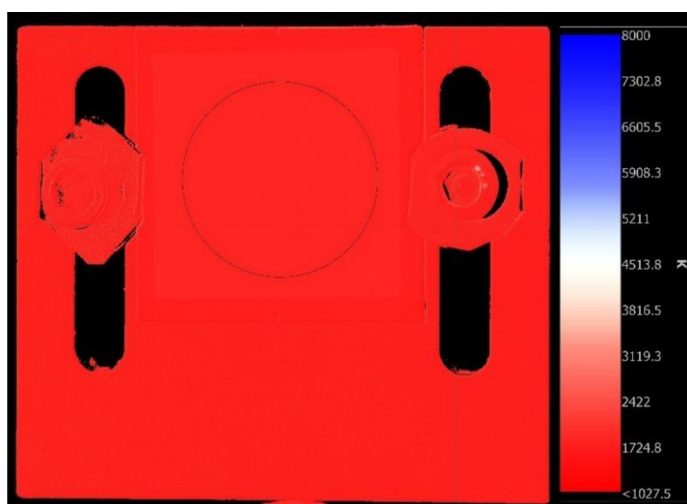
5.3.1 Schéma a průběh měření

Na následujícím obrázku Obr. 66 je znázorněno schématické zapojení měření Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole.



Obr. 66 Schéma měření Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole

Jedná se o porovnávací měření dvou měřících přístrojů referenčního přístroje JETI a jasového analyzátoru LDA-LumiDISP. Měřící přístroje byly nasměřovány na stínítko s bílou odraznou plochou, kde byla zaznamenána náhradní teplota chromatičnosti halogenové žárovky. Postupně se v laboratorním zdroji zvyšoval proud, díky čemuž se zvětšovala náhradní teplota chromatičnosti s teplotou od 1800 kelvinů do teploty 3000 kelvinů.

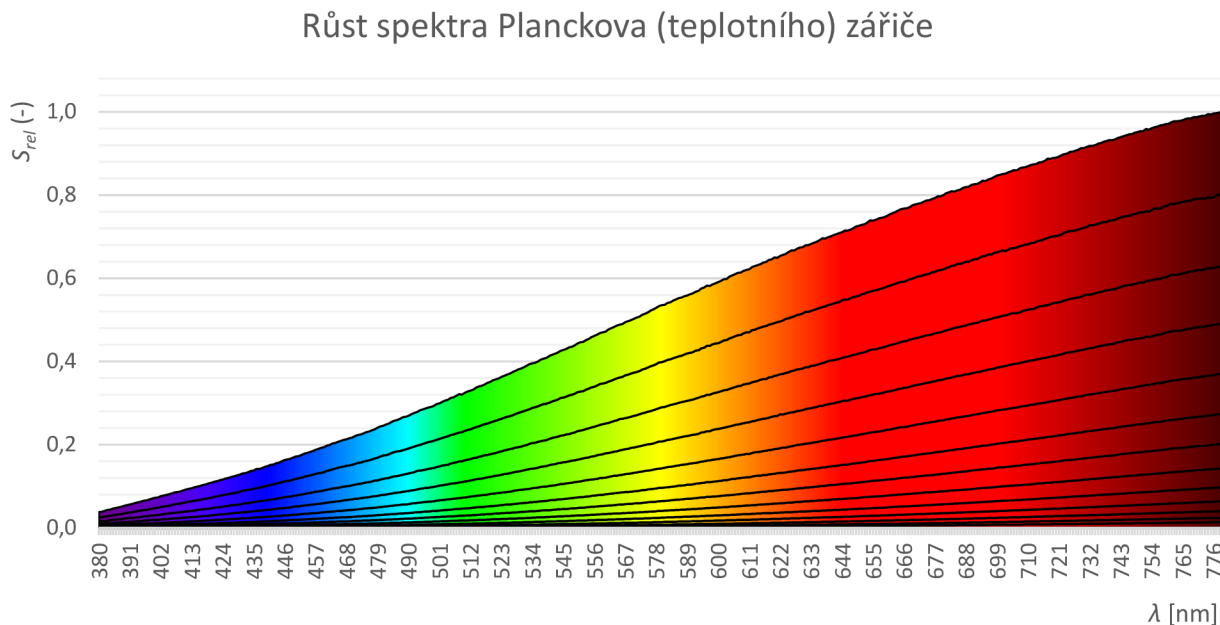


Obr. 67 Snímek při měření 1800 K z před vývojové verze programu LumiDISP

Na obrázku Obr. 67 je zobrazen snímek z programu LumiDISP, při měření Planckova (teplotního) zářiče. Snímek je zachycen z měření $T_{cp} = 1800$ kelvinů. Kružnice na obrázku detekuje místo, z kterého je odečítána výsledná náhradní teplota chromatičnosti.

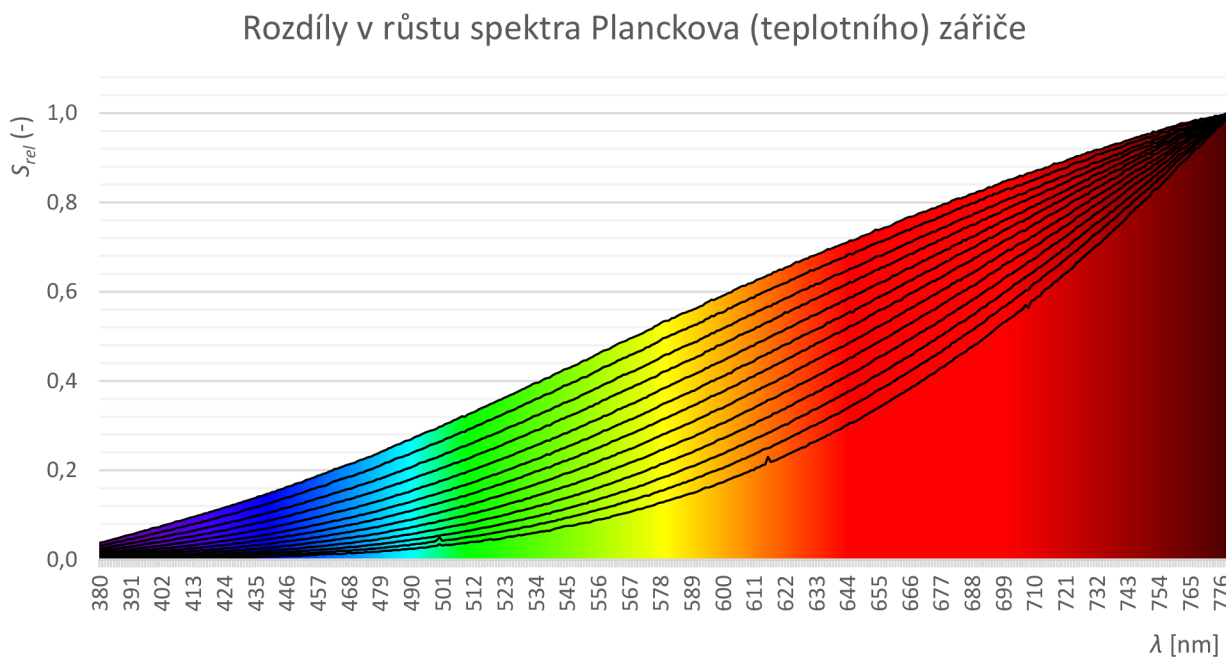
5.3.2 Změřené spektrum Planckova (teplotního) zářiče

V následujícím grafu na Obr. 68 je zobrazeno, jak se generovalo spektrum Planckova (teplotního) zářiče s T_{cp} od 1800 kelvinů s krokem po 100 kelvinech do 3000 kelvinů. S rostoucí náhradní teplotou chromatičnosti, roste také množství vyzářené energie, což lze dobře vidět na Obr. 68.



Obr. 68 Změřená spektra Planckova (teplotního) zářiče

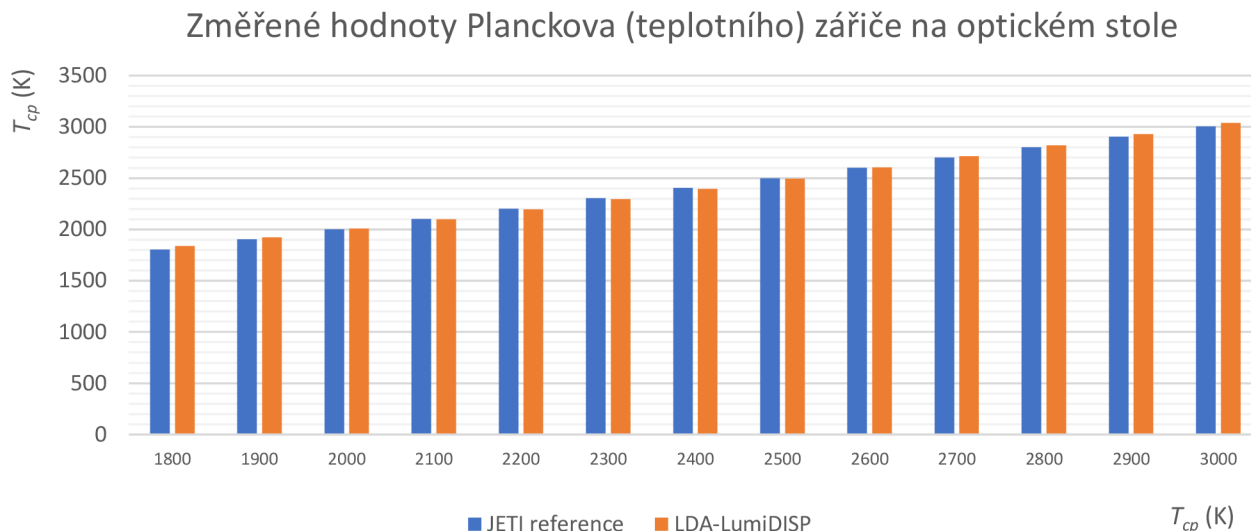
Na následujícím grafu Obr. 69 jsou zobrazena generovaná spektra Planckova (teplotního) zářiče s tím, že jsou všechna spektra normována k hodnotě 1, díky čemuž lze vidět jednotlivé přírůstky vyzářené energie ve spektru v závislosti na zvyšování náhradní teploty chromatičnosti.



Obr. 69 Rozdíl změřených spekter Planckova (teplotního) zářiče

5.3.3 Změřené hodnoty

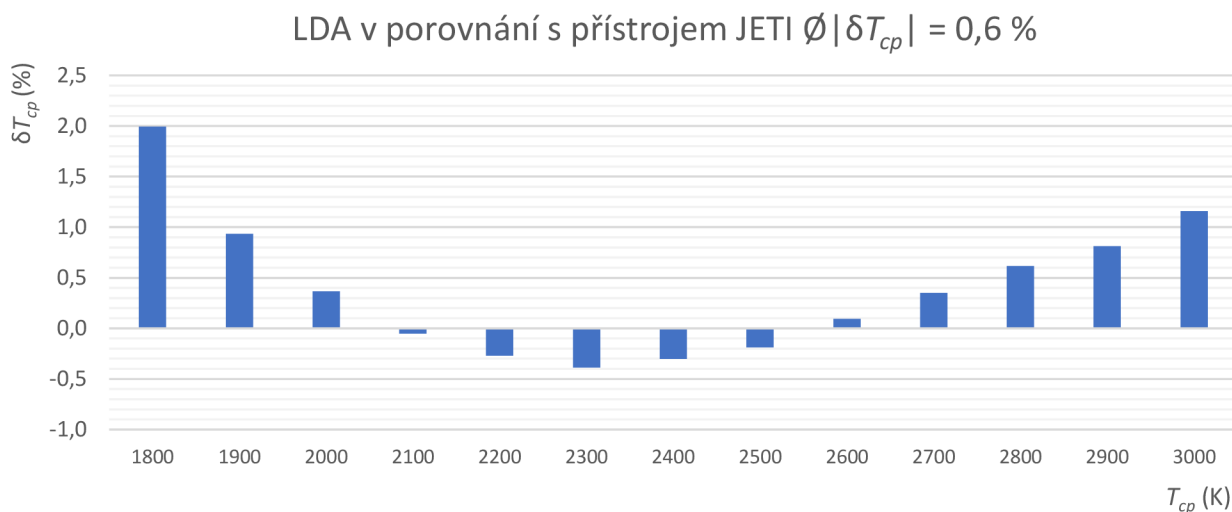
Na obrázku Obr. 70 jsou graficky znázorněny změřené hodnoty T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného jasového analyzátoru LDA z tabulky Tab. 23. Jako Planckův (teplotní) zářič byla použita halogenová žárovka.



Obr. 70 Změřené hodnoty Planckova (teplotního) zářiče na optickém stole

5.3.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 71 jsou graficky znázorněny relativní odchylky jasového analyzátoru LDA v porovnání k referenčnímu přístroji JETI. Odchylky v grafu se nachází v tabulce Tab. 23. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{\delta T_{cp}} = 0,6 \%$. Odchylku navyšuje $T_{cp} = 1800$ K s kladnou odchylkou $\delta T_{cp} = 2,0 \%$.



Obr. 71 Relativní odchylky jasového analyzátoru s přístrojem JETI, Planckův zářič

V tabulce Tab. 23 jsou zobrazeny změřené hodnoty T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, v tabulce je zobrazen také parametr D_{uv} , který byl změřen přístrojem JETI. V dalších sloupcích je v tabulce rozdíl změřených hodnot a relativní odchylka hodnot. Na spodu tabulky je vypočten průměr jednotlivých odchylek.

Tab. 23 Změřené a zpracované hodnoty T_{cp} z měření Planckova (teplotního) zářiče

Světelný zdroj	JETI reference	LDA-LumiDISP	JETI Parametr D_{uv}	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)			
1800	1802	1839	0,000	37	2,0
1900	1903	1921	0,000	18	0,9
2000	2000	2007	0,000	7	0,4
2100	2101	2100	0,000	-1	-0,1
2200	2202	2196	0,000	-6	-0,3
2300	2305	2296	0,000	-9	-0,4
2400	2404	2397	0,000	-7	-0,3
2500	2500	2495	0,000	-5	-0,2
2600	2601	2603	0,000	2	0,1
2700	2703	2712	0,000	9	0,4
2800	2802	2819	0,000	17	0,6
2900	2905	2929	0,000	24	0,8
3000	3004	3039	0,001	35	1,2
$\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $				14	0,6

5.3.5 Měřený světelný zdroj a použité přístroje

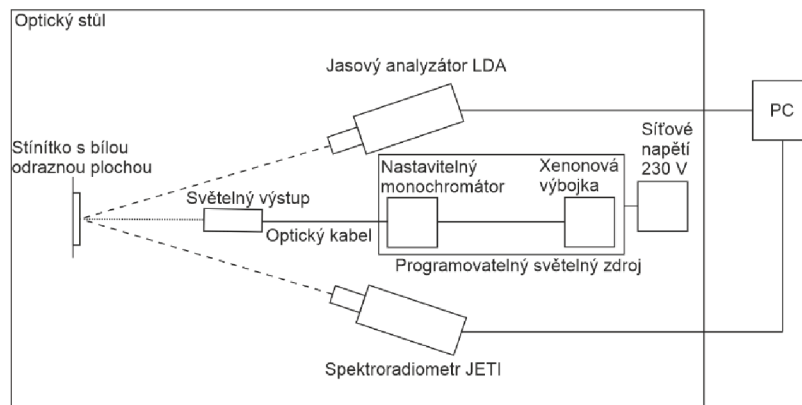
- Laboratorní zdroj Keithley 2602A, výrobní číslo: 1309086.
- Halogenová žárovka Osram se světelným tokem 205 lm a příkonem 20 W.
- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4, (Obr. 58).
- Spektroradiometr JETI Specbos 1211UV s platnou kalibrací do 1. září 2021 S/N: 2015926, (Obr. 59 a)).
- Optický stůl a stínítko s bílou odraznou plochou.
- Počítač pro zpracování informací z měřících přístrojů s programy k měřícím přístrojům.

5.4 Měření generovaných světelných zdrojů

Při tomto měření bylo měřeno přístrojově generovaných světelných zdrojů. Bylo prováděno porovnávací měření pomocí referenčního spektrometru JETI a jasového analyzátoru LDA.

5.4.1 Schéma a průběh měření

Na následujícím obrázku Obr. 72 je znázorněno schématické zapojení měření programovatelného světelného zdroje, který dokáže generovat spektra různých světelných zdrojů. Programovatelný světelný zdroj obsahuje xenonovou výbojku, jejíž spektrum se upravuje pomocí nastavitelného monochromátoru, který propustí určené vlnové délky.



Obr. 72 Schéma měření programovatelného zdroje na optickém stole

Měřicí přístroje byly nasměrovány na stínítko s bílou odraznou plochou, kde byla zaznamenána náhradní teplota chromatičnosti světelného výstupu z programovatelného světelného zdroje. Na obrázku Obr. 73 je zobrazeno měření programovatelného zdroje na optickém stole.

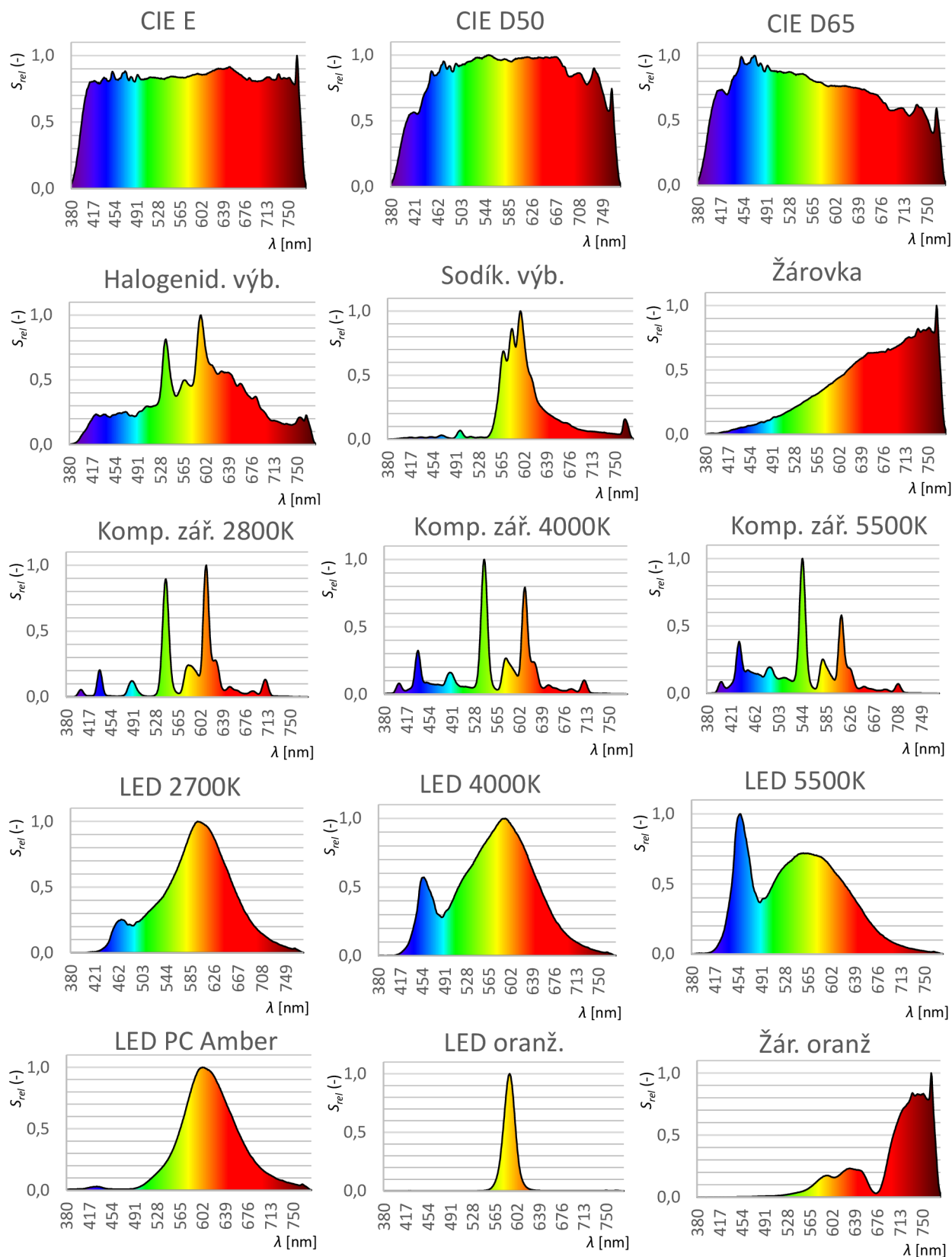


Obr. 73 Měření programovatelného světelného zdroje

5.4.2 Změřené spektra generované programovatelným zdrojem

Na následujícím obrázku Obr. 74 jsou zobrazeny změřená spektra, které byly generovány programovatelným zdrojem. První graf znázorňuje nereálný izotropní světelný zdroj definován CIE, mělo by se jednat o záření se stejnou intenzitou v celém viditelném spektru. Dále jsou zde dvě spektra, které jsou také definovány CIE, tyto dvě spektra s označením D50 a D65 mají znázorňovat světelné spektrum venku za slunečného dne na volné ploše s T_{cp} 5003 a 6504 kelvinů. Dále stojí za povšimnutí světelný zdroj LED PC Amber s velmi nízkým podílem modré složky, z tohoto důvodu je tento světelný zdroj vhodný pro noční osvětlování. Spíše pro zajímavost je zde uveden LED a žárovkový světelný zdroj, který vytváří oranžovou barvu, která se používá na semaforu. Z grafu LED světelného zdroje je zřejmé, že se oranžová barva vytváří vrcholem v oranžové barvě, zatímco u žárovkového zdroje je oranžová tvořena kombinací oranžové, zelené a červené barvy.

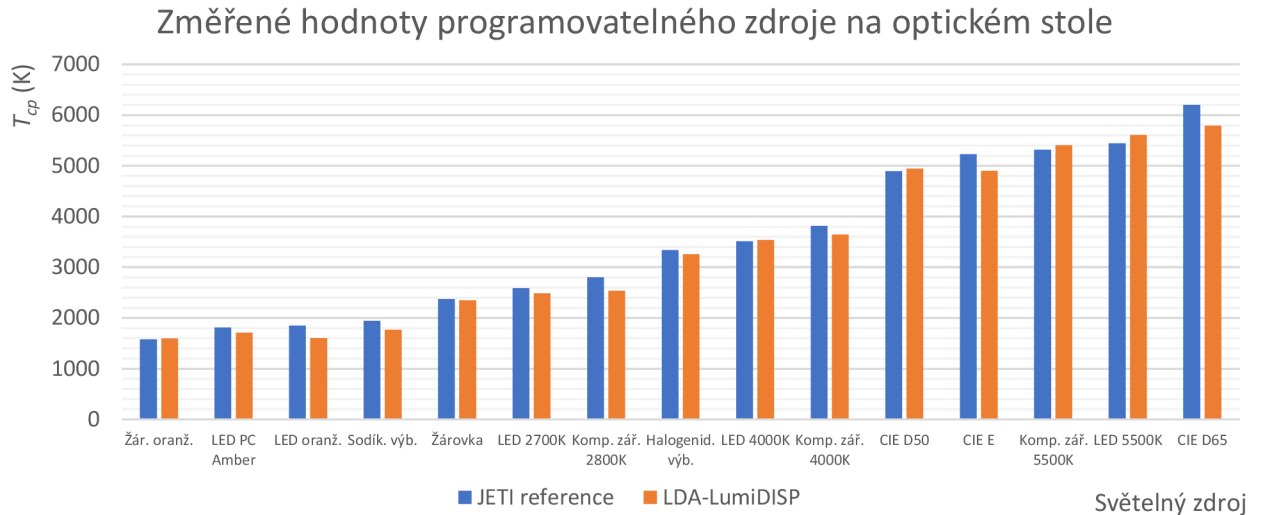
Při měření spekter generovaných programovatelným zdrojem byly změřeny spektra pomocí přístroje JETI, které jsou zobrazeny v grafech na obrázku Obr. 74, kde je přehled změřených spekter.



Obr. 74 Změřená spektra na programovatelném zdroji

5.4.3 Změřené hodnoty

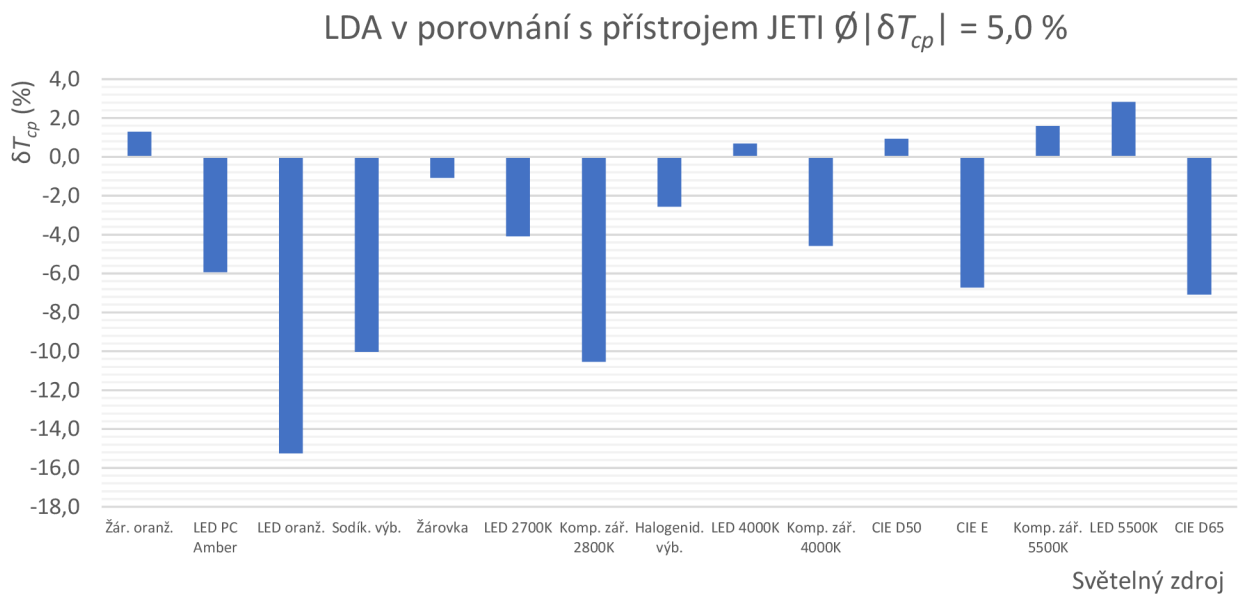
Na obrázku Obr. 75 jsou graficky znázorněny změřené hodnoty T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného jasového analyzátoru LDA. Změřené hodnoty se nachází v tabulce Tab. 24. Jedná se o změřené hodnoty náhradní teploty chromatičnosti programovatelného zdroje.



Obr. 75 Změřené hodnoty programovatelného zdroje na optickém stole

5.4.4 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP v porovnání s přístrojem JETI

Na obrázku Obr. 76 jsou graficky znázorněny relativní odchylky jasového analyzátoru LDA-LumiDISP od referenčního přístroje JETI. Odchylky v tabulce se nachází v tabulce Tab. 24. Vypočtená průměrná odchylka je $\bar{\delta T}_{cp} = 5,0 \%$. Odchylku navyšuje nejvíce LED oranžové barvy se zápornou odchylkou velikosti $\delta T_{cp} = -15,3 \%$, dále odchylku navyšuje sodík se zápornou odchylkou $\delta T_{cp} = -10,0 \%$, nebo kompaktní zářivka se zápornou odchylkou $\delta T_{cp} = -10,5 \%$.



Obr. 76 Relativní odchylky jasového analyzátoru s přístrojem JETI, programovatelný zdroj

V tabulce Tab. 24 jsou zobrazeny změřené hodnoty T_{cp} referenčního přístroje JETI a porovnávaného jasového analyzátoru LDA-LumiDISP, v tabulce je zobrazen také parametr D_{uv} , který byl změřen přístrojem JETI. V dalších sloupcích tabulky se nachází rozdíly změřených hodnot a jejich relativní odchylky. Na spodu tabulky je vypočtený průměr jednotlivých hodnot.

Tab. 24 Změřené hodnoty T_{cp} z měření světelných zdrojů generovaných progr. zdrojem

Světelný zdroj	JETI reference	LDA-LumiDISP	JETI Parametr D_{uv}	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)			
Žár. oranž.	1575	1596	-0,006	21	1,3
LED PC Amber	1813	1711	0,003	-102	-5,9
LED oranž.	1847	1603	0,001	-244	-15,3
Sodík. výb.	1946	1769	0,002	-177	-10,0
Žárovka	2375	2350	0,006	-25	-1,1
LED 2700K	2586	2485	0,001	-101	-4,1
Kompakt. 2800K	2800	2533	0,010	-267	-10,5
Halogenid.	3339	3256	0,010	-83	-2,6
LED 4000K	3513	3537	0,017	24	0,7
Kompakt. 4000K	3814	3647	0,004	-167	-4,6
CIE D50	4898	4944	0,006	46	0,9
CIE E	5230	4901	0,008	-329	-6,7
Kompakt. 5500K	5319	5405	0,005	86	1,6
LED 5500K	5447	5606	0,008	159	2,8
CIE D65	6198	5788	0,005	-410	-7,1
$\bar{\Delta T}_{cp}$ a $\bar{\delta T}_{cp}$				149	5,0

5.4.5 Měřený světelný zdroj a použité přístroje

- Světelný zdroj programovatelný Gooch and Housego OL 490 S/N 11002044.
- Xenonová výbojka S/N 11003050.
- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4, (Obr. 58).
- Spektroradiometr JETI Specbos 1211UV s platnou kalibrací do 1. září 2021 S/N: 2015926, (Obr. 59 a)).
- Optický stůl a stínítko s bílou odraznou plochou.
- Počítač pro zpracování informací z měřících přístrojů s programy k měřícím přístrojům.

5.5 Navrhnutí korekčních koeficientů

Korekční koeficienty byly navrženy na základě relativních odchylek od referenčního přístroje JETI. Měření náhradní teploty chromatičnosti je ovlivněno spektry jednotlivých světelných zdrojů. Na základě tohoto faktu byly korekční koeficienty jednotlivých přístrojů rozděleny podle světelných zdrojů. Korekční koeficienty jsou navrženy jen pro světelné zdroje, kde nabývala odchylka od přístroje JETI hodnoty větší než 3 %. Světelné zdroje se změřenou průměrnou odchylkou menší než 3 % není třeba korigovat. Z tohoto důvodu bude korigováno měření sodíkové výbojky, kompaktní zářivky a LED světelného zdroje. Ostatní světelné zdroje mají průměrnou relativní odchylku menší než 3 % a není je třeba korigovat.

5.5.1 Sodíková výbojka

V následujícím grafu na Obr. 77 jsou zobrazeny odchylky jasového analyzátoru LDA v porovnání s referenčním přístrojem JETI pro sodíkovou výbojku. Odchylky v grafu vycházejí z hodnot v tabulce Tab. 25. V grafu jsou znázorněny také odchylky po započítání korekčních koeficientů.



Obr. 77 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro sodíkovou výbojku

V následující tabulce Tab. 25 jsou zobrazeny změřené hodnoty jasového analyzátoru LDA a referenčního přístroje JETI. Dále jsou v tabulce odchylky hodnot jasového analyzátoru LDA a korekce T_{cp} .

Tab. 25 Odchylky od přístroje JETI pro sodíkovou výbojku s korekcí T_{cp}

Měřicí přístroj	T_{cp} (K)	JETI T_{cp} (K)	Změřeno		Po korekci		Korekce T_{cp}
			ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	
LDA	1745	1931	-186	-10,7	-6	-0,3	1,10
LDA	1769	1946	-177	-10,0	6	0,3	
$\bar{\Delta T_{cp}}$ a $ \delta T_{cp} $			182	10,4	6	0,3	-----

V tabulce Tab. 25 je navržena korekce na základě průměru relativních odchylek k referenčnímu přístroji JETI. Korekce pro jasový analyzátor při měření sodíkové výbojky vychází 1,10. Při měření sodíkové výbojky lze korigování změřených hodnot doporučit, jelikož průměrná odchylka je větší než 3 %. Korekce je zaokrouhlena na dvě desetinná místa.

V tabulce Tab. 26 jsou uvedeny korekce měřících přístrojů použitých při měření v terénu. Korekce jsou navrženy na základě průměrných odchylek k referenčnímu přístroji JETI. Přístroj UPRtek má navrženou korekci 0,96 a přístroj KMCL-200 má navrženou korekci 0,94. Korekce jsou zaokrouhleny na dvě desetinná místa.

Tab. 26 Porovnání odchylek měřících přístrojů pro sodikovou výbojku s korekcí T_{cp}

Měřící přístroj	T_{cp} (K)	Jeti T_{cp} (K)	Změřeno		Korekce k přístroji Jeti
			ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	
LDA	1745	1931	-186	-10,7	1,104
Uprtek	2012	1931	81	4,0	0,960
Konica CS-1000 A	1911	1931	-20	-1,0	1,010
Konica CL-200	2050	1931	119	5,8	0,942

5.5.2 Příklad výpočtu

Korekce T_{cp} je počítána stejným způsobem pro všechny měřící přístroje. Pro tabulky Tab. 25 až Tab. 28 platí uvedené příklady výpočtů. Z tohoto důvodu již u dalších tabulek nebude uváděn příklad výpočtu. Příklady výpočtu jsou uvedeny pro tabulku Tab. 25.

Vztah pro výpočet průměrného rozdílu hodnot ve vztahu 5.5.

$$\bar{\Delta T}_{cp} = \frac{\sum_i^n \Delta T_{cp i}}{n_{hodnot}} = \frac{-186 - 177}{2} = -182 \text{ K} \quad (5.5)$$

Vztah pro výpočet průměrné odchylky ve vztahu 5.6.

$$\bar{\delta T}_{cp} = \frac{\sum_i^n \delta T_{cp i}}{n_{hodnot}} = \frac{-10,7 - 10,0}{2} = -10,4 \% \quad (5.6)$$

Vztah pro výpočet průměrného rozdílu s absolutními hodnotami ve vztahu 5.7.

$$|\bar{\Delta T}_{cp}| = \frac{\sum_i^n |\Delta T_{cp i}|}{n_{hodnot}} = \frac{186 + 177}{2} = 182 \text{ K} \quad (5.7)$$

Vztah pro výpočet průměrné odchylky s absolutními hodnotami ve vztahu 5.8.

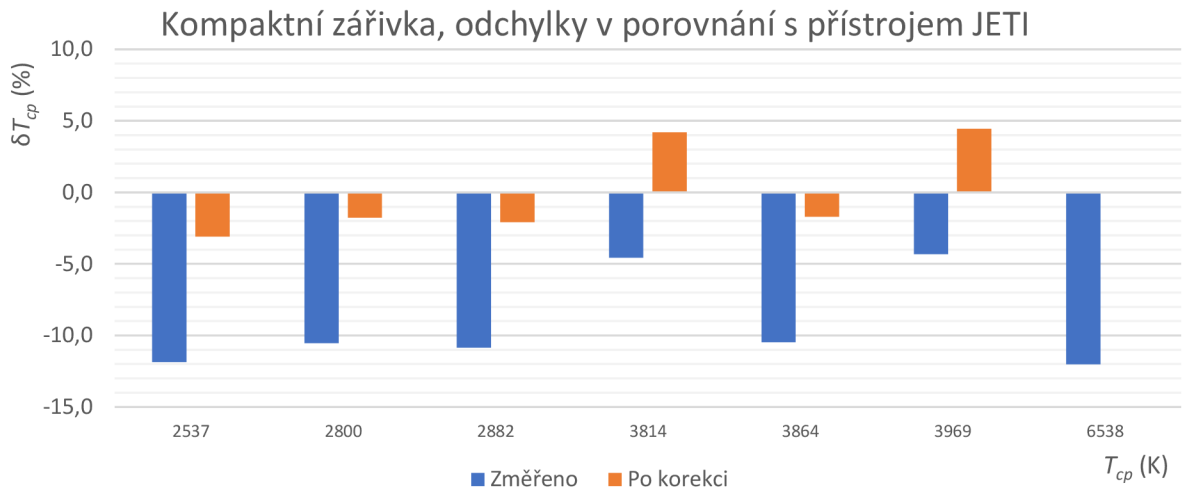
$$|\bar{\delta T}_{cp}| = \frac{\sum_i^n |\delta T_{cp i}|}{n_{hodnot}} = \frac{10,7 + 10,0}{2} = 10,4 \% \quad (5.8)$$

Výpočet Korekce T_{cp} LDA ve vztahu 5.9.

$$korekce = 1 - \frac{\bar{\delta T}_{cp}}{100} = 1 - \frac{-10,4}{100} = 1,104 (-) \quad (5.9)$$

5.5.3 Kompaktní zářivka

V následujícím grafu na Obr. 78 jsou zobrazeny odchylky jasového analyzátoru LDA v porovnání s referenčním přístrojem JETI pro kompaktní zářivku. Odchylky v grafu vycházejí z hodnot v tabulce Tab. 27. V grafu jsou znázorněny také odchylky po započítání korekčních koeficientů.



Obr. 78 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro kompaktní zářivku

V následující tabulce Tab. 27 jsou zobrazeny změřené hodnoty jasového analyzátoru LDA a referenčního přístroje JETI pro kompaktní zářivku. Dále jsou v tabulce odchylky hodnot jasového analyzátoru LDA a Korekce T_{cp} .

Tab. 27 Odchylky od přístroje JETI pro kompaktní zářivku s korekcí T_{cp}

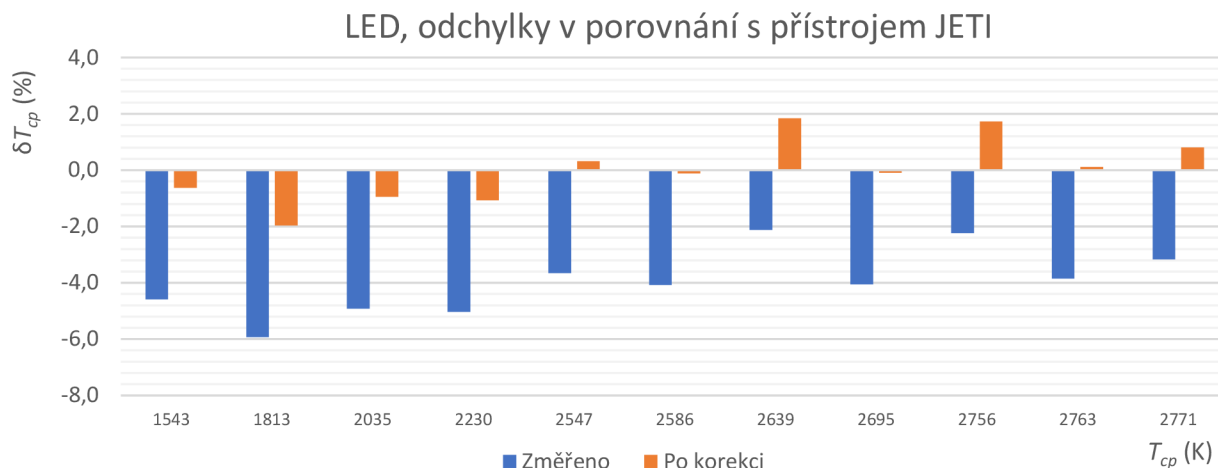
Měřící přístroj	T_{cp} (K)	JETI T_{cp} (K)	Změřeno		Po korekci		Korekce T_{cp}
			ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	
LDA	2268	2537	-269	-11,8	-70	-3,1	1,09
	2533	2800	-267	-10,5	-45	-1,8	
	2600	2882	-282	-10,8	-54	-2,1	
	3647	3814	-167	-4,6	153	4,2	
	3498	3864	-366	-10,5	-60	-1,7	
	3805	3969	-164	-4,3	169	4,4	
Ø Do 3999 K			-253	-8,8	16	0,0	
LDA	5836	6538	-702	-12,0	0	0,0	1,12
Ø Od 5800 K			-702	-12,0	0	0,0	
Ø LDA $ \Delta T_{cp} $ a $ \delta T_{cp} $			317	9,2	79	2,5	-----

V tabulce Tab. 27 jsou navrženy korekce na základě průměru relativních odchylek k referenčnímu přístroji JETI. Korekce při měření kompaktní zářivky pro jasový analyzátor je rozdělena pro T_{cp} do 3999 kelvinů s navrženou korekcí 1,09, pro T_{cp} větší než 5800 kelvinů je navržena korekce 1,12. Pro hodnoty od 4000 do 5799 kelvinů není třeba korekce.

Přístroj Konica Minolta CL-200 při měření světelného zdroje s T_{cp} v rozmezí od 4000 do 5000 kelvinů má odchylku, větší než 3 % a navržený korekční koeficient je 1,05.

5.5.4 LED světelný zdroj

V následujícím grafu na Obr. 79 jsou zobrazeny odchylky jasového analyzátoru LDA v porovnání s referenčním přístrojem JETI pro LED světelný zdroj. Odchylky v grafu vycházejí z hodnot v tabulce Tab. 28. V grafu jsou znázorněny také odchylky po započítání korekčních koeficientů.



Obr. 79 Odchylky v porovnání s přístrojem JETI pro LED

V následující tabulce Tab. 28 jsou zobrazeny změřené hodnoty jasového analyzátoru LDA a referenčního přístroje JETI pro LED světelný zdroj. Dále jsou v tabulce odchylky hodnot jasového analyzátoru LDA a Korekce T_{cp} .

Tab. 28 Odchylky od přístroje JETI pro LED s korekcí T_{cp}

Měřicí přístroj	T_{cp} (K)	JETI T_{cp} (K)	Změřeno		Po korekci		Korekce T_{cp}
			ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	
LDA	1475	1543	-68	-4,6	-9	-0,6	1,04
	1711	1813	-102	-5,9	-34	-2,0	
	1940	2035	-95	-4,9	-18	-0,9	
	2123	2230	-107	-5,0	-23	-1,1	
	2457	2547	-90	-3,7	8	0,3	
	2485	2586	-101	-4,1	-3	-0,1	
	2584	2639	-55	-2,1	48	1,8	
	2590	2695	-105	-4,1	-2	-0,1	
	2696	2756	-60	-2,2	47	1,7	
	2660	2763	-103	-3,9	3	0,1	
2686	2771	-85	-3,2	22	0,8		
Ø Do 2999 K			-88	-4,0	3	0,0	
Ø LDA $ \Delta T_{cp} $ a $ \delta T_{cp} $			88	4,0	20	0,9	-----

V tabulce Tab. 28 jsou navrženy korekce na základě průměru relativních odchylek k referenčnímu přístroji JETI. Korekce při měření LED světelného zdroje pro jasový analyzátor je rozdělena pro T_{cp} do 2999 kelvinů s navrženou korekcí 1,04, pro T_{cp} větší než 3000 kelvinů není třeba korekce, jelikož je odchylka menší než 3 %. Ostatní měřicí přístroje měřily s odchylkou pod 3 % a není potřeba jejich změřené hodnoty korigovat.

5.5.5 Navržené korekční koeficienty

V tabulce Tab. 29 jsou shrnuty jednotlivé korekce k daným přístrojům, při měření určitých světelných zdrojů. Korekce jsou navrženy na základě odchylek proti referenčnímu přístroji JETI. Shrnutí navržených korekcí je v následující tabulce Tab. 29.

Tab. 29 Navržené korekce k přístroji JETI

Měřicí přístroj	Sodík.	Zářivka		LED	
	Korekce	T_{cp}	Korekce T_{cp}	T_{cp}	Korekce T_{cp}
LDA	1,10	Do 3999 K	1,09	Do 2999 K	1,04
		Od 5800 K	1,12		
KM CL-200	0,94	Od 4000 K	1,05	-----	
UPRtek	0,96	-----			

Ve výše uvedené tabulce jsou zobrazeny navržené korekce pro přístroje, jejichž odchylka od referenčního přístroje JETI byla větší než 3 %. Korekce pro přístroj UPRtek a KM CL-200 jsou navrženy z důvodu případného srovnání se změřenými hodnotami pomocí těchto přístrojů v terénu.

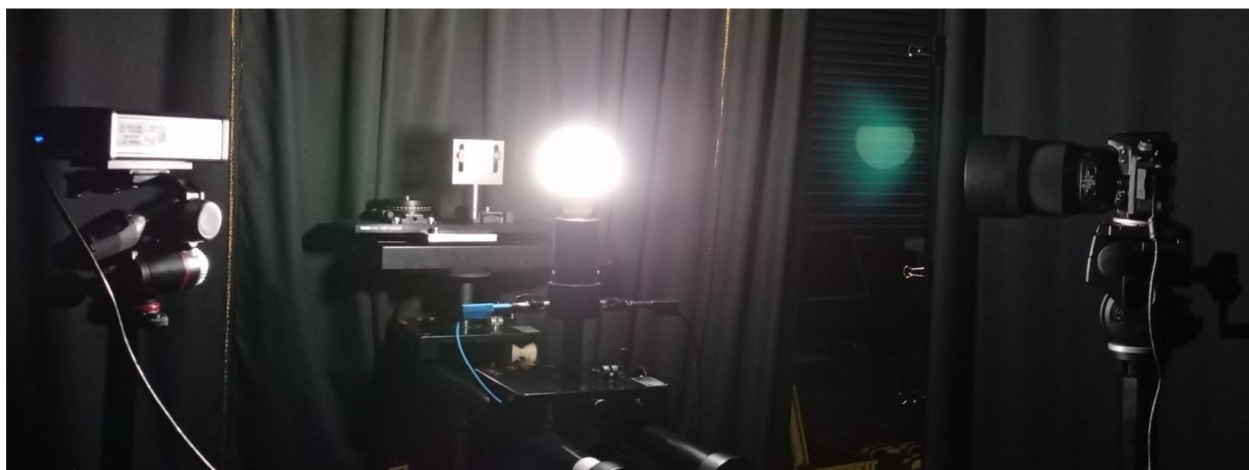
Pomocí laboratorního měření byly navrženy korekční koeficienty pro jasový analyzátor LDA při měření náhradní teploty chromatičnosti. Z výsledků laboratorního měření lze navrhnout korekce v případě, že známe měření světelný zdroj. V případě, že světelný zdroj neznáme lze výsledná nejistota měření náhradní teploty chromatičnosti očekávat do velikosti 12 %, při měření s T_{cp} od 1600 kelvinů do 6500 kelvinů, při uvažování obvyklých světelných zdrojů.

V případě, že světelný zdroj známe lze změřená hodnota korigovat vynásobením pomocí korekčního koeficientu pro daný světelný zdroj, čímž se výsledná nejistota měření náhradní teploty chromatičnosti zmenší pod 5 %. Korigovat změřené hodnoty je doporučeno hlavně v případě, že je měřena sodíková výbojka nebo kompaktní zářivka, tyto dva světelné zdroje byly změřeny s největšími odchylkami od referenčního přístroje JETI přesahujícími 10 %. Doporučit lze i korekce v případě měření LED světelného zdroje do teploty 2999 kelvinů korekčním koeficientem 1,04.

Na základě změřených hodnot v laboratorním měření lze tvrdit, že průměrná odchylka se u sodíkové výbojky zmenší z 10,4 % na 0,3 %, u kompaktní zářivky z 9,2 % na 2,5 % a u LED světelného zdroje s T_{cp} do 2999 kelvinů ze 4,0 % a 0,9 %. V ostatních případech je změřená náhradní teplota chromatičnosti menší než 3 % a není třeba navrhovat korekce.

5.6 Měření závislosti vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp}

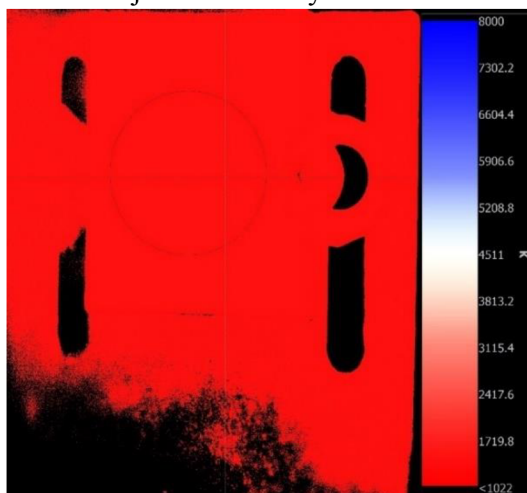
Z důvodu možného ovlivnění měření v důsledku nízkého vybuzení modrého kanálu, bylo provedeno následující měření, kdy byl použit referenční přístroj JETI pro zjištění měřené náhradní teploty chromatičnosti a jasový analyzátor pro zjištění změny náhradní teploty chromatičnosti při změně vybuzení modrého kanálu. Na následujícím obrázku Obr. 80 zobrazeno měřící stanoviště, kde je na optické lavici umístěn světelný zdroj LED Vitae se třemi světelnými režimy pro den, večer a noc. Za světelným zdrojem je na optické lavici umístěno stínítko s bílou odraznou plochou, ze které je zaznamenávána náhradní teplota chromatičnosti pomocí dvou měřících přístrojů, které lze vidět v popředí snímku. Vlevo se nachází spektrometrietr JETI a vpravo se nachází jasový analyzátor LDA. Oba měřící přístroje jsou upevněny na stativěch.



Obr. 80 Měření závislosti vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp}

5.6.1 Průběh měření a změřené hodnoty

K ověření závislosti vlivu vybuzení modrého kanálu na změně náhradní teploty chromatičnosti, byl světelný zdroj posouván dále od stínítka, což vedlo k dopadu méně světla na stínítko a tím pádem menšímu vybuzení modrého kanálu u jasového analyzátoru.



Obr. 81 Snímek z měření vybuzení modrého kanálu, při měření LED Vitae 1600 K, snímek je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP

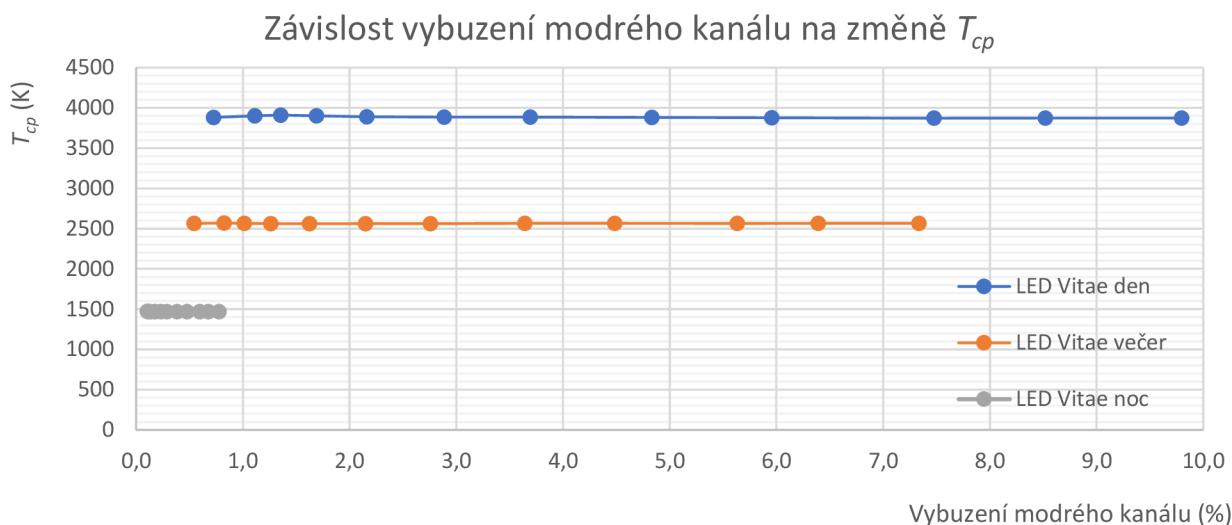
Na Obr. 81 je zobrazen snímek z před vývojové verze programu LumiDISP vyfocený jasovým analyzátozem při měření LED světelného zdroje Vitae v režimu noc, kdy má světelný zdroj přibližně 1600 kelvinů. Změřené spektra jsou zobrazena na Obr. 81 u měření malých světelných zdrojů s patičí E27.

V následující tabulce Tab. 30 jsou zobrazeny změřené a korigované hodnoty jasového analyzátoru LDA. Byla použita navržená korekce z laboratorního měření a LED světelné zdroje s T_{cp} do 2999 kelvinů byly násobeny korekčním koeficientem 1,04, čímž bylo dosaženo snížení průměrné odchylky z 2,4 % na 1,0 %. Mimo to jsou v tabulce změřené hodnoty počtu vybuzených modrých pixelů a jejich procentuální počet vztažený k jejich maximální hodnotě 2^{14} , tedy 16384. Měrné jednotky vybuzení modrého kanálu jsou počítány od nastaveného offsetu 400 mj.

Tab. 30 Změřené a korigované hodnoty

Světelný zdroj	Jeti T_{cp} (K)	LDA před korekcí					LDA po korekci		
		Vybuzení modrého kanálu		T_{cp} (K)	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)	T_{cp} (K)	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
		(mj)	(%)						
LED Vitae noc 1600 K	1527	127	0,8	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	111	0,7	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	98	0,6	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	78	0,5	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	63	0,4	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	47	0,3	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	38	0,2	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	29	0,2	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	22	0,1	1469	-58	-3,9	1528	1	0,1
	1527	19	0,1	1470	-57	-3,8	1529	2	0,2
	1527	17	0,1	1472	-55	-3,7	1531	4	0,3
LED Vitae večer 2600 K	2623	1202	7,3	2565	-58	-2,3	2667	44	1,7
	2623	1047	6,4	2565	-58	-2,3	2667	44	1,7
	2623	923	5,6	2565	-58	-2,3	2667	44	1,7
	2623	735	4,5	2565	-58	-2,3	2668	45	1,7
	2623	597	3,6	2564	-59	-2,3	2667	44	1,7
	2623	452	2,8	2563	-60	-2,3	2665	42	1,7
	2623	352	2,1	2562	-61	-2,4	2665	42	1,6
	2623	266	1,6	2561	-62	-2,4	2664	41	1,6
	2623	207	1,3	2561	-62	-2,4	2664	41	1,6
	2623	166	1,0	2564	-59	-2,3	2667	44	1,7
	2623	135	0,8	2569	-54	-2,1	2671	48	1,9
	2623	89	0,5	2565	-58	-2,3	2667	44	1,7
LED Vitae den 4000 k	3934	1605	9,8	3875	-59	-1,5	-----	-59	-1,5
	3934	1396	8,5	3872	-62	-1,6	-----	-62	-1,6
	3934	1225	7,5	3872	-62	-1,6	-----	-62	-1,6
	3934	976	6,0	3877	-57	-1,5	-----	-57	-1,5
	3934	792	4,8	3881	-53	-1,4	-----	-53	-1,4
	3934	605	3,7	3884	-50	-1,3	-----	-50	-1,3
	3934	473	2,9	3886	-48	-1,2	-----	-48	-1,2
	3934	354	2,2	3887	-47	-1,2	-----	-47	-1,2
	3934	277	1,7	3900	-34	-0,9	-----	-34	-0,9
	3934	222	1,4	3910	-24	-0,6	-----	-24	-0,6
	3934	182	1,1	3900	-34	-0,9	-----	-34	-0,9
	3934	119	0,7	3882	-52	-1,3	-----	-52	-1,3
\emptyset $ \Delta T_{cp} $ a $ \delta T_{cp} $					55	2,44	-----	32	1,04

Hodnoty z předchozí tabulky Tab. 30 jsou zobrazeny v následujícím grafu na Obr. 82. V grafu lze vidět lineární závislost změřené náhradní teploty chromatičnosti s rostoucím vybuzením modrého kanálu. Lineární průběh je změřen pro všechny režimy LED světelného zdroje Vitae.



Obr. 82 Závislost vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp}

5.6.2 Příklad výpočtu

Hodnoty ΔT_{cp} , δT_{cp} , $\bar{\Delta T}_{cp}$ a $\bar{\delta T}_{cp}$ jsou počítány stejně jako v předchozích příkladech výpočtů.

Příklad výpočtu je uveden pro tabulku Tab. 30, první řádek. Ve vztahu 5.10 je vypočítána procentuální hodnota vybuzení modrého kanálu vztažená k maximální hodnotě vybuzení.

$$\text{Modrý kanál (\%)} = \frac{\text{Modrý kanál (mj)}}{2^{14}} \cdot 100 = \frac{127}{16384} \cdot 100 = 0,8 \%$$
 (5.10)

Pro výpočet LDA s korekcí byl použit korekční koeficient = 1,04, pro LED do 2999 kelvinů. Ve vztah 5.11 je zobrazen výpočet LDA s korekcí.

$$\text{LDA s korekcí} = T_{cp} \cdot \text{Korekce } T_{cp} = 1469 \cdot 1,04 = 1528 \text{ K}$$
 (5.11)

5.6.3 Měřený světelný zdroj a použité přístroje

- LED Vitae se třemi režimy pro noc (oranžová, $P = 2 \text{ W}$), večer ($T_{cp} = 2700 \text{ K}$, $P = 6 \text{ W}$) a den ($T_{cp} = 4000 \text{ K}$, $P = 7 \text{ W}$).
- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4, (Obr. 58).
- Spektrometr JETI Specbos 1211UV s platnou kalibrací do 1. září 2021 S/N: 2015926, (Obr. 59 a)).
- Optická lavice a stínítko s bílou odraznou plochou.
- Stativ pro uchycení přístrojů JETI a Jasového analyzátoru LDA.
- Počítač pro zpracování informací z měřicích přístrojů s programy k měřicím přístrojům.

5.6.4 Shrnutí měření závislosti vybuzení modrého kanálu

Měřením LED světelného zdroje Vitae nebyla prokázána změna T_{cp} při změně vybuzení modrého kanálu jasového analyzátoru. V grafu na Obr. 82 lze vidět, že se hodnota T_{cp} se změnou vybuzení modrého kanálu nemění. Byla provedena korekce na základě navržených korekčních koeficientů a díky této korekci se zmenšila průměrná odchylka z 2,4 % na 1,0 %.

6 TERÉNNÍ MĚŘENÍ

Terénní měření bylo realizováno z velké části v Technologickém parku v areálu, nebo blízkém okolí Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií Vysokého učení technického v Brně. V této oblasti je realizováno pouliční osvětlení převážně pomocí sodíkových a halogenidových výbojek. Mezi bloky T10 a T12 je pouliční osvětlení realizováno pomocí biodynamického LED osvětlení, které mění náhradní teplotu chromatičnosti s postupným stmíváním přirozeného slunečního světla. Náhradní teplota chromatičnosti se mění od neutrální po teplou barvu. Pro získání studeného LED svítidla bylo třeba zajet v Brně do městské části Líšeň, kde studená LED svítidla osvětlují přechody pro chodce na hlavní silnici.

6.1 Úvod k měření

K měření jsou využity tyto měřicí přístroje jasový analyzátor LDA-LumiDISP, kolorimetr Konica Minolta CL-200 a spektrometr UPRtek MK350S. Úkolem měření je změřit náhradní teplotu chromatičnosti různých svítidel, které slouží k pouličnímu osvětlení a porovnat změřené výsledky jasového analyzátoru, kolorimetru a spektrometru, případně použít navržené korekce z laboratorního měření a porovnat výsledky. Měřené pouliční osvětlení zastupují svítidla typu biodynamické LED, LED, sodíkové a halogenidové výbojky.



Obr. 83 Ukázka z terénního měření

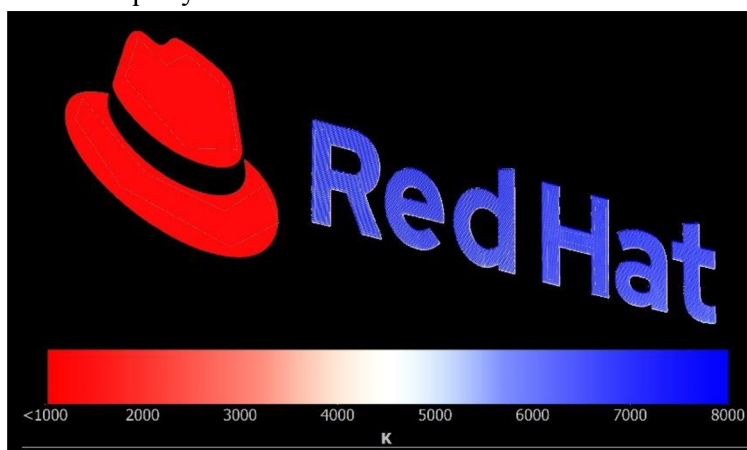
Na Obr. 83 je zachycena ukázka měření v terénu s jasovým analyzátozem LDA-LumiDISP. Jasový analyzátor je připevněn na polohovatelný stativ a nasměrován na analyzovanou scénu. V případě obrázku Obr. 83 se jedná o nasvícené písmeno C, které je zobrazeno na notebooku. V notebooku s programem LumiDISP je možné jasový analyzátor ovládat na dálku přes použitý USB kabel a následně změřený snímek zpracovat a uložit. K porovnání změřených výsledků je měřena náhradní teplota chromatičnosti ještě kolorimetrem a spektrometrem, jejichž výsledky slouží k porovnání s jasovým analyzátozem. Spektrometr JETI i kolorimetr KM CL-200 jsou mobilní měřicí přístroje, které se přiloží světelným čidlem na měřený objekt, případně se světelné čidlo namíří na objekt, který chceme měřit.

Na následujícím obrázku Obr. 84 je zobrazen snímek zachycený jasovým analyzátozem LDA a zpracovaný v před vývojové verzi programu LumiDISP. Na snímku je zobrazeno písmeno C, které je natřeno bílou fasádou a nasvíceno zespodu halogenidovou výbojkou.



Obr. 84 Snímek z měření písmena C v před vývojové verzi programu LumiDISP

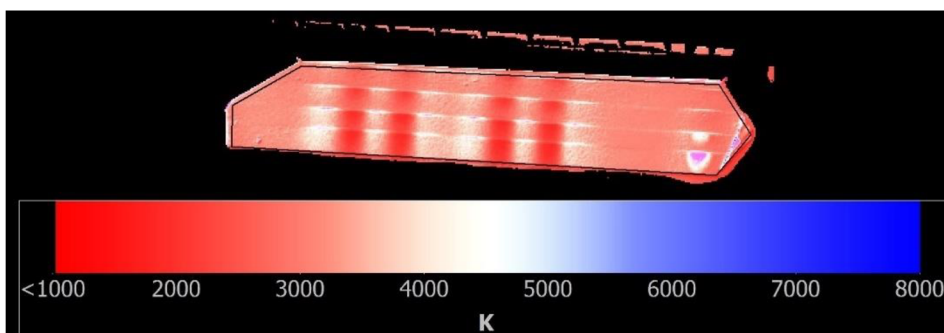
Na následujícím obrázku Obr. 85 je zachycen snímek z jasového analyzátozu LDA, který je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP. Na snímku je zobrazen nápis společnosti Red Hat s paletou změřené teploty chromatičnosti.



Obr. 85 Snímek z měření nápisu Red Hat v před vývojové verzi programu LumiDISP

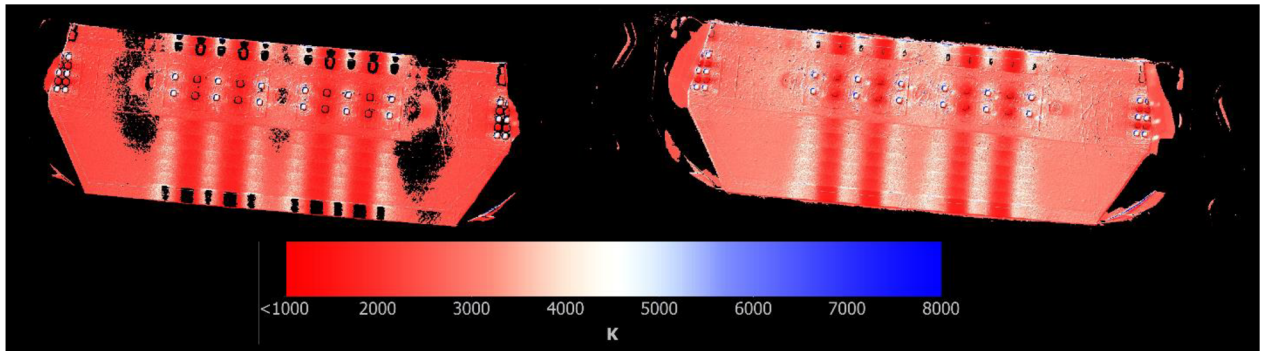
6.1.1 Metodika měření

V této kapitole budou jsou rozebrány jednotlivé metodiky terénního měření. Měřeny byly svítidla typu výbojek a LED. Z hlediska LED svítidel byly měřeny klasické LED a biodynamické LED. Z hlediska výbojek byly měřeny sodíkové a halogenidové výbojky.



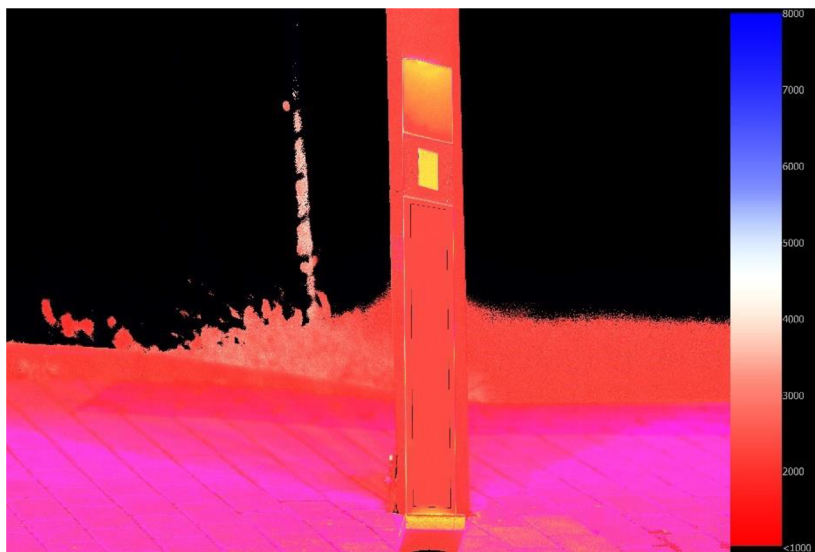
Obr. 86 Pohled z boku na biodynamické LED svítidlo v před vývojové verzi programu LumiDISP

Biodynamické LED světelné zdroje se instalují do moderního pouličního osvětlení. Biodynamický LED světelný zdroj se vyznačuje změnou náhradní teploty chromatičnosti v průběhu večerních hodin, ukázka z před vývojové verze programu LumiDISP při měření biodynamického LED svítidla se nachází na předchozí straně na Obr. 86, kde je zobrazen pohled měření svítidla z boční strany. Při pohledu z boční strany lze vidět, jak se světlo rozptyluje pomocí reflektorů, aby nedocházelo k oslnění.



Obr. 87 Snímek zespu z měření Biodynamického LED svítidla a) teplý, b) neutrální, snímek zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP

Na obrázku Obr. 87 je zobrazeno biodynamické LED svítidlo při měření zespu. Na obrázku vlevo je vidět svítidlo v režimu teplé T_{cp} a na obrázku vpravo je v režimu neutrální T_{cp} . Na obrázku si lze všimnout, že se svítidlo skládá z dvou různých LED čipů, přičemž má každý odlišnou náhradní teplotu chromatičnosti, jedny LED čipy se jeví červené a druhé bílé.



Obr. 88 Měření odrazu z bílé plochy pod svítidlem, snímek je zpracován v před vývojové verzi programu LumiDISP

Svítidlo bylo nejprve změřeno s neutrální barvou. Jakmile se barva změnila na teplou, bylo provedeno druhé měření. Měření jednotlivých svítidel bylo prováděno ze spodní nebo boční strany svítidla. Vždy byl použit stejný úhel při měření jednotlivými měřicími přístroji. Při měření teplé barvy LED byl měřen i odraz od bílé plochy pod svítidlem. Ukázka z měření bílé odrazné plochy je znázorněna na obrázku Obr. 88. Na obrázku lze vidět směrový sloupek, který je opřen o stožár svítidla a tím pádem je nakloněn, aby na jeho bílou odraznou plochu dopadalo světlo z měřeného svítidla. Důležité je podotknout, že když byl podobným způsobem měřen odraz od bílé odrazné plochy měřeného svítidla, tak to bylo jen v případě, že v blízkém okolí nebylo jiné svítidlo, které by ovlivňovalo měření.

Při venkovním měření je třeba, aby byl měřený objekt ve snímku dobře vybuzen, k tomu slouží přítomná funkce HDR, která je integrovaná přímo v programu LumiDISP. Funkce HDR umožňuje zpracování více snímků, přičemž výsledný obrázek je tvořen pixely, které jsou nejlépe vybuzené v jednotlivých snímcích. Tato funkce je důležitá k dobrému vybuzení jednotlivých částí měřeného objektu. Na následujícím obrázku Obr. 89 je vlevo ukázka snímku, kde je ve stanu jasný zdroj světla, který je přebuzený a zbytek obrázku je podbuzený, tento problém dokáže vyřešit právě funkce HDR, kdy se z více snímků, které jsou jinak vybuzené, udělá jeden výsledný snímek, který bude vybuzený na základě nejlépe vybuzených pixelů jednotlivých snímků. Stejný postup je uplatněn při měření jasovým analyzátozem pro dobré vybuzení měřeného svítidla.



Obr. 89 Funkce HDR [53]

Snímek HDR je v terénu velmi důležitý, protože při měření svítidla s jasnými body se obvykle vybudí jednotlivé části svítidla odlišně. Tento problém nastává zejména při měření zespolu svítidla, zatímco při měření z odrazu z bílé plochy stačil ke správnému vybuzení jeden snímek. Před vývojová verze programu LumiDISP umí složit HDR snímek ze 4 fotografií, do budoucna je zde zlepšení pro vytvoření HDR snímku z více fotografií.

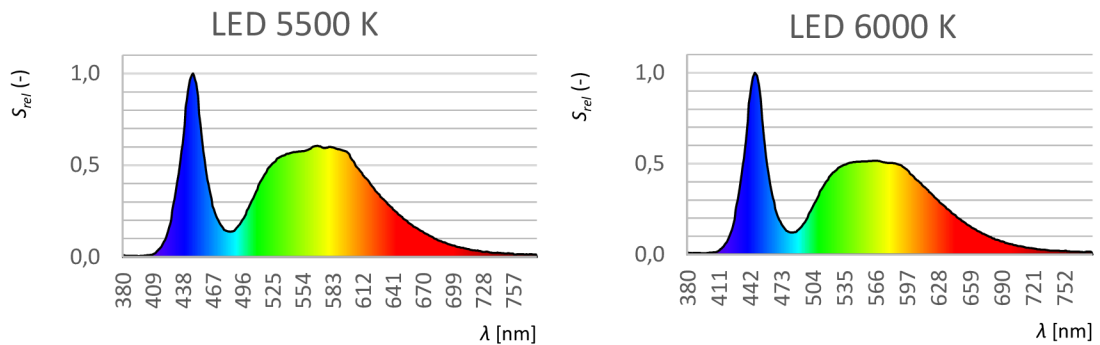
Provede se výpočet hodnot T_{cp} a jasu pro jednotlivé pixely ve snímku, přičemž se ve snímku zvolí měřený objekt, což je v našem případě měřené svítidlo. Průměrem vypočtených hodnot ve zvolené oblasti se získá aritmetický průměr hodnot T_{cp} a případně i jasu ve zvolené oblasti snímku.

Při použití funkce HDR se může provést výpočet hodnoty T_{cp} , buď pomocí aritmetického průměru ze změřených hodnot T_{cp} v určené oblasti snímku, nebo lepší varianta je provedení váženého průměru změřených hodnot T_{cp} . Vážený průměr T_{cp} je počítán podle vypočtených hodnot jasu, které jsou v určené oblasti ve snímku. Výpočet váženého průměru T_{cp} podle jasu se provede pomocí sumy v určené oblasti, ve které se budou násobit jednotlivé pixely s hodnotami T_{cp} s odpovídajícími hodnotami jasu L . Tato suma se vydělí sumou pixelů odpovídajících hodnotám jasu L , platí jen pro hodnoty v určené oblasti v měřeném snímku. Náhradní teplota chromatičnosti T_{cp} při použití HDR snímku s vážením hodnot podle jasu se vypočítá ze vztahu 6.1.

$$T_{cp} = \frac{\sum_i^n (T_{cp_i} \cdot L_i)}{\sum_i^n L_i} \quad (6.1)$$

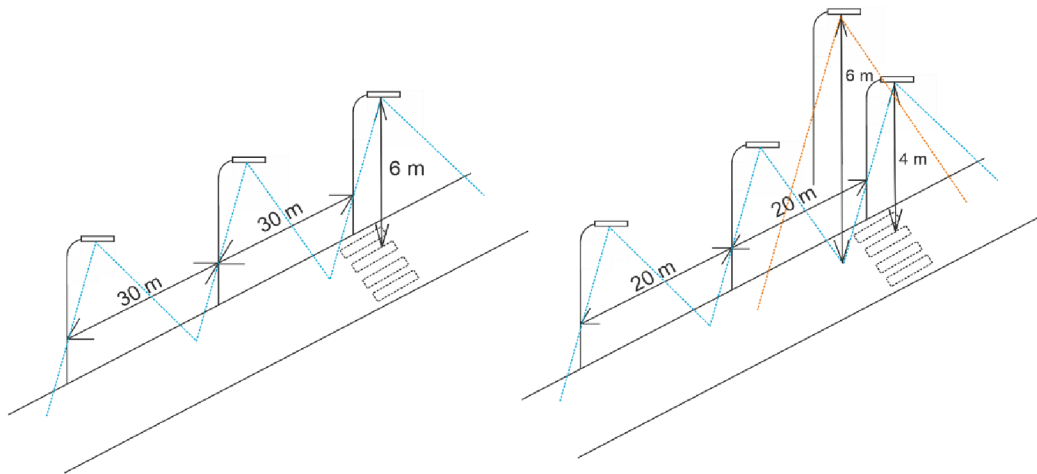
Při terénním měření byly snímky vytvořené pomocí funkce HDR. Výpočet hodnoty T_{cp} byl proveden z váženého průměru podle jasu, jelikož svítidla obvykle nemají rovnoměrně rozložený jas. Při měření odrazu byla hodnota T_{cp} počítána aritmetickým průměrem, jelikož byl měřený odraz s rovnoměrně rozloženým jasnem. Dále v textu ve změřených hodnotách budou používány pojmy LDA HDR (arit. průměr) a LDA HDR (váž. průměr). Ve změřených hodnotách budou uvedeny obě varianty a dále se bude počítat s hodnotou T_{cp} LDA HDR (váž. průměr), která bude značena jako LDA, případně LDA s korekcí.

Na následujícím obrázku Obr. 90 jsou zobrazena dvě spektra studeného LED svítidla v městské části Brno-Líšeň, která změřil spektrometr UPRtek. LED svítidla jsou zde použita k osvětlování přechodu v nočních hodinách, přičemž zbytek ulice je osvětlen sodíkovými výbojkami. Jedná se o spektra stejného LED svítidla s rozdílem, že na spektru LED 5500 kelvinů je patrný zásah sodíku ve spektru v oblasti oranžové barvy, což snižuje měřenou náhradní teplotu chromatičnosti. Spektrum LED 6000 kelvinů je bez zásahu světla ze sodíkové výbojky.



Obr. 90 Změřená spektra studeného LED zdroje se zasažením sodíkové výbojky

Měření pomocí mobilních přístrojů v terénu může být ovlivněno chybou, která je způsobena sbíráním světla z celého poloprostoru, poté může být změřena náhradní teplota chromatičnosti, která neodpovídá skutečné hodnotě. Z tohoto hlediska má jasový analyzátor LDA výhodu, díky vysoké rozlišovací schopnosti.

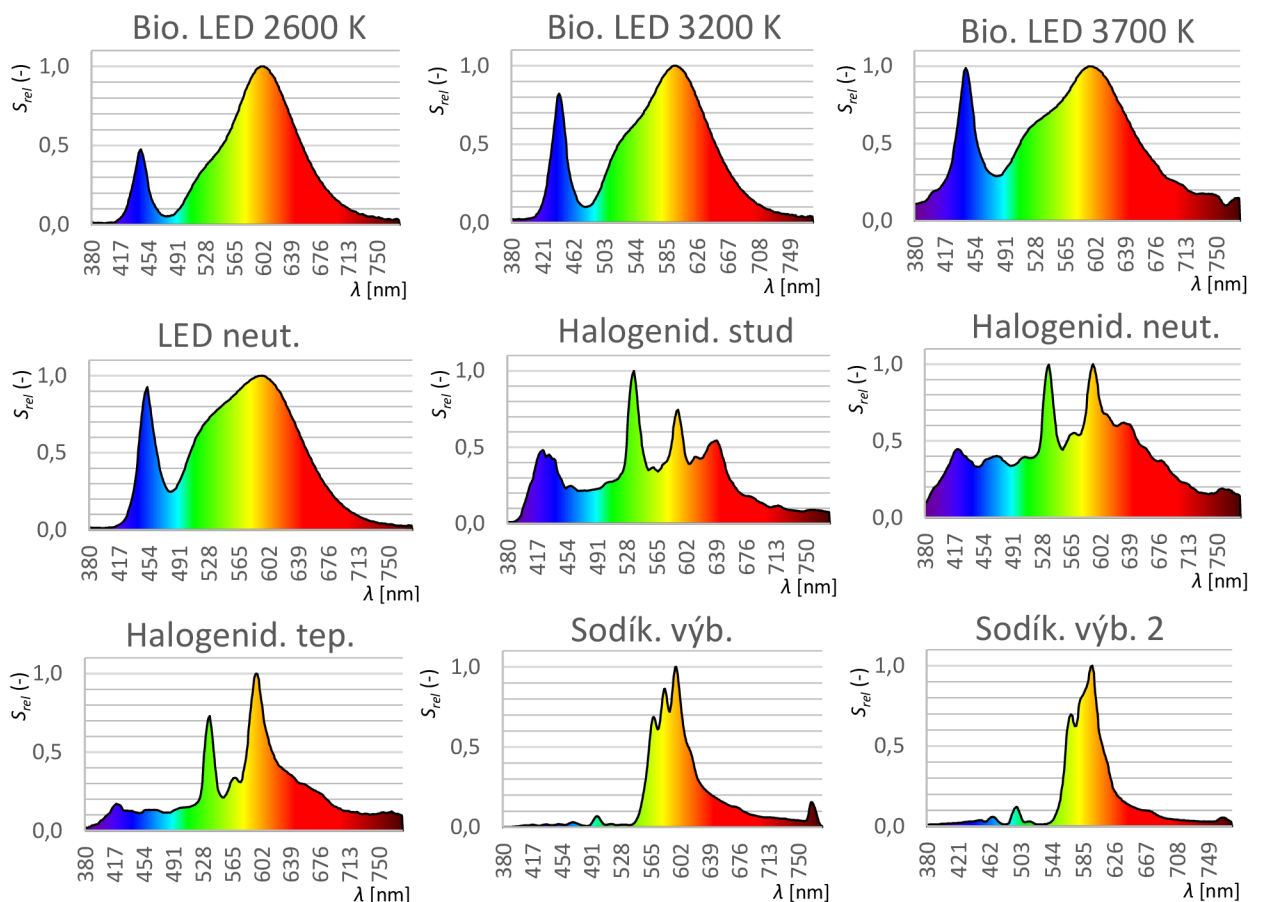


Obr. 91 Vliv parazitního světla sodíkových výbojek na měření LED svítidla

Na obrázku Obr. 91 jsou znázorněny dvě situace, kdy na levé straně obrázku je znázorněno pouliční osvětlení, které je od sebe vzdáleno 30 metrů se svítidly ve výšce 6 metrů. V takovém případě bude vliv měřeného svítidla, vůči ostatním zanedbatelný. Na rozdíl od toho je vpravo na obrázku znázorněna situace, kdy je pouliční osvětlení od sebe vzdáleno 20 metrů se svítidly ve výšce 4 metry nad cestou, ovšem v tomto případě je v blízkosti jiné svítidlo, které bude výš, než ve 4 metrech, v tomto případě bude ve výšce 6 metrů. Například se může stát, že je prováděno měření LED svítidla, které je ve výšce 4 metry a někde poblíž ve výšce 6 metrů je sodíková výbojka, v takovém případě bude sodíková výbojka ovlivňovat měření a může být chybně změřena náhradní teplota chromatičnosti, vlivem zásahu sodíkové výbojky do spektra LED svítidla, což můžeme vidět na Obr. 90. Mobilní měřicími přístroje budou ovlivněny chybou, která je způsobena zásahem druhého pouličního svítidla do měření, ovšem v případě jasového analyzátoru je tato chyba minimální, jelikož zpracovává jen oblast, která je určena pro zpracování.

6.1.2 Změřená spektra z terénního měření

Na následujícím obrázku Obr. 92 jsou zobrazena spektra změřená při terénním měření. První tři spektra patří biodynamickému LED svítidlu. Biodynamické LED svítidlo s postupem večera mění T_{cp} od 4000 kelvinů až k 1800 kelvinům. Při měření biodynamického LED svítidla, bylo zachyceno svítidlo na 3700 kelvinech, 3200 kelvinech a 2600 kelvinech. V grafu s biodynamickým LED svítidlem s T_{cp} 3700 K, je vidět vyzařovaná energie na začátku a konci viditelného spektra, což může být z důvodu zahřátí přístroje UPRtek, nebo jeho špatnou kalibrací na tmou před použitím. Správně by na krajích viditelného spektra nemělo svítidlo LED vyzařovat energii. Dále je na obrázku spektrum neutrální LED, přičemž měřeny byly i studené LED svítidla, jejichž spektra jsou zobrazena na obrázku Obr. 90. Dále jsou zde zobrazena spektra halogenidových výbojek, studené, neutrální a teplé a spektra dvou sodíkových výbojek.



Obr. 92 Změřená spektra při terénním měření

6.1.3 Seznam měřených svítidel a použitých přístrojů

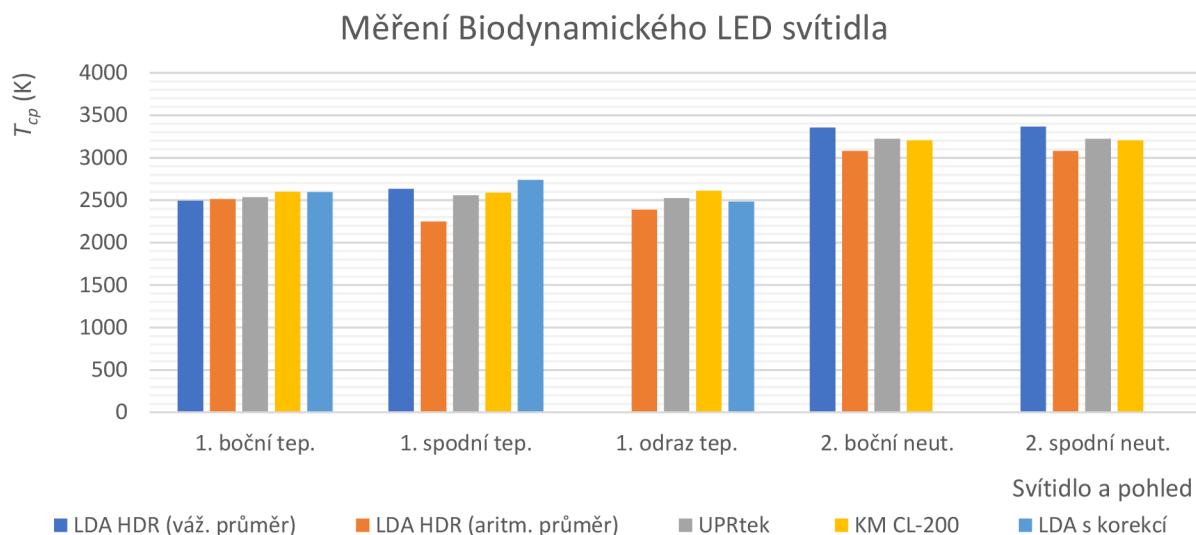
- Jasový analyzátor LDA-LumiDISP D7500 výrobní číslo: 18320-LDA-2019-4, (Obr. 58).
- Spektrometr UPRtek MK350S, (Obr. 59 b)).
- Kolorimetr Konica Minolta CL-200, vyr. číslo: 76631127, (Obr. 15).
- Polohovatelný stojan pro měřicí přístroj.
- Počítač pro zpracování informací z měřících přístrojů.
- Biodynamické LED svítidlo (1. a 2.), mezi bloky T10 a T12 v areálu VUT FEKT.
- LED neutrální (1.) za budovou T12, při vstupu do areálu CESA.
- LED studené (4.) a neutrální (2. a 3.), v městské části Brno-Líšeň, u přechodu pro chodce.
- Halogenidové výbojky neutrální (1.) a teplá (3.) před budovou CEITEC.
- Halogenidová výbojka studená (2.) a sodíkové výbojky (1. a 2.), za budovou T12.

6.2 Změřené hodnoty podle typu světelného zdroje ve svítidle

V této kapitole jsou změřené svítidla v terénu rozdělena podle jejich světelných zdrojů.

6.2.1 Biodynamické LED svítidlo

V následujícím grafu na obrázku Obr. 93 jsou zobrazeny změřené hodnoty jednotlivých měřících přístrojů při měření biodynamického LED svítidla.



Obr. 93 Změřené hodnoty biodynamického LED svítidla

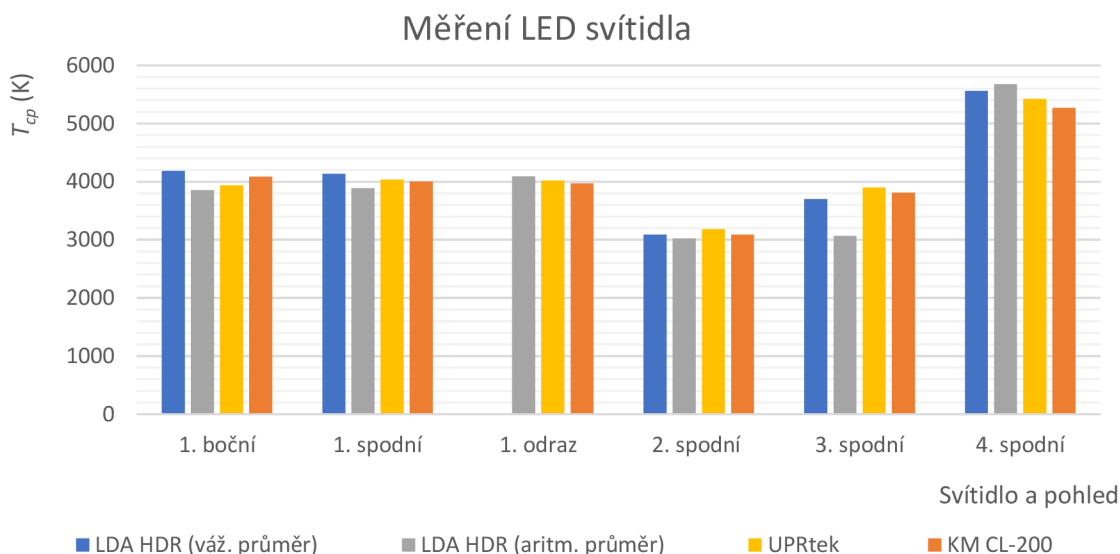
V následující tabulce Tab. 31 jsou uvedeny změřené hodnoty biodynamického LED svítidla pomocí jasového analyzátoru LDA, přístrojů UPRtek a Konica Minolta CI-200. Bylo měřeno biodynamické LED svítidlo, které mění náhradní teplotu chromatičnosti v průběhu večera. Svítidlo bylo změřeno s neutrální a teplá barvou. Biodynamické LED svítidlo obsahuje dvě sady LED čipů. Jedna sada je teplejší a druhá je chladnější, což lze vidět na Obr. 87. V tabulce Tab. 31 jsou uvedeny dvě hodnoty LDA HDR. První hodnota T_{cp} je vypočtena z váženého průměru podle jasů, dle vztahu 6.1 a druhá hodnota LDA HDR je vypočítána z aritmetického průměru jednotlivých hodnot T_{cp} z měřené oblasti na snímku. Dále se bude počítat s hodnotami získanými váženým průměrem. V posledním sloupci jsou změřené hodnoty T_{cp} jasového analyzátoru LDA HDR (váž. průměr) se započítaným korekčním koeficientem 1,04, který je navržen na základě laboratorního měření pro LED do T_{cp} 2999 kelvinů.

Tab. 31 Změřené hodnoty biodynamického LED svítidla

Číslo svítidla a Pohled měřícího přístroje	LDA HDR (váž. průměr)	LDA HDR (aritm. průměr)	UPRtek	KM CL-200	LDA s korekcí
	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}
	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
1. boční tep.	2494	2514	2533	2599	2594
1. spodní tep.	2634	2247	2556	2587	2739
1. odraz tep.	-----	2387	2522	2611	2482
2. boční neut.	3357	3083	3223	3204	-----
2. spodní neut.	3366	3080	3223	3204	-----

6.2.2 LED svítidla

V následujícím grafu na obrázku Obr. 94 jsou zobrazeny změřené hodnoty jednotlivými přístroji při měření LED svítidla.



Obr. 94 Změřené hodnoty LED svítidla

V následující tabulce Tab. 32 jsou uvedeny změřené hodnoty LED svítidla pomocí jasového analyzátoru LDA, přístrojů UPRtek a Konica Minolta CL-200. Byly měřeny čtyři LED svítidla, přičemž svítidla jsou od sebe odlišena pomocí čísel.

Tab. 32 Změřené hodnoty LED svítidla

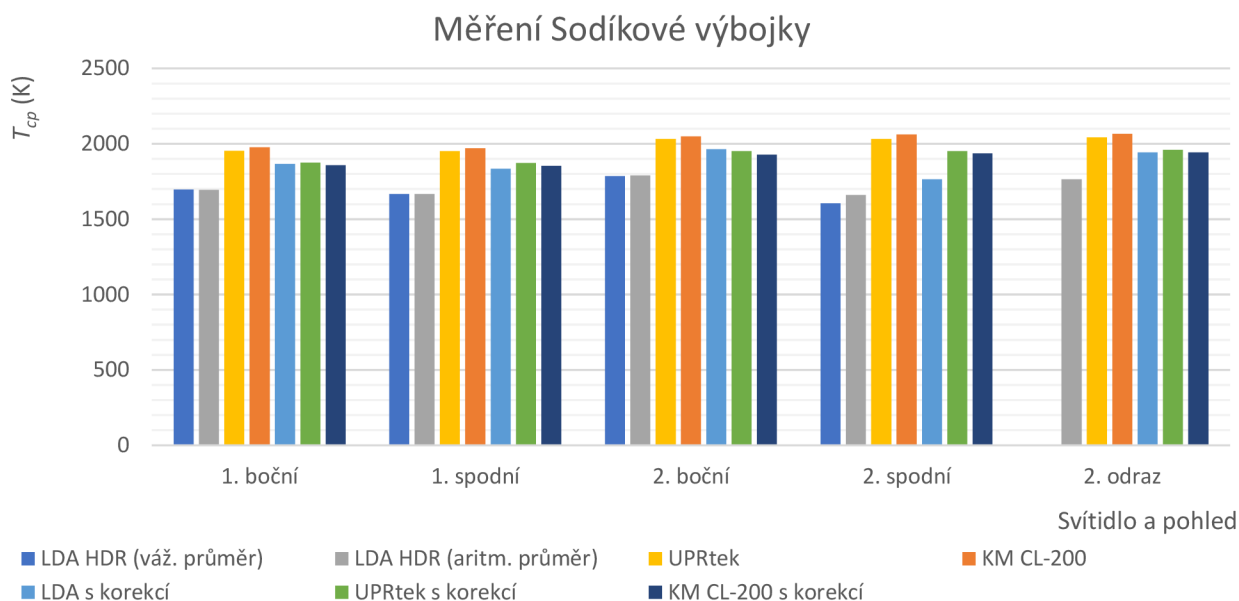
Číslo svítidla a Pohled měřícího přístroje	LDA HDR (váž. průměr)	LDA HDR (arit. průměr)	UPRtek	KM CL-200
	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}
	(K)	(K)	(K)	(K)
1. boční	4189	3856	3940	4088
1. spodní	4136	3889	4039	4003
1. odraz	-----	4095	4019	3969
2. spodní	3091	3027	3182	3093
3. spodní	3699	3069	3901	3812
4. spodní	5560	5678	5427	5268

Svítidlo 4. LED se spodním pohledem je ovlivněno zásahem sodíku, což je popsáno u Obr. 90, z tohoto důvodu je možné ovlivnění mobilních přístrojů UPRtek a KM CL-200.

Počítání T_{cp} na základě váženého průměru podle jasů je důležité v případě, že je měřeno svítidlo zespodu a jsou vidět jasné body vytvořené LED čipy, nebo výbojem. Vznikne situace, kdy není rovnoměrně rozložen jas a je třeba vážení hodnot T_{cp} podle váženého průměru. Pokud má svítidlo dobrý difuzor, kdy nejsou vidět jednotlivé jasné body, tak není třeba počítat hodnoty pomocí váženého průměru. U měření z odrazu je jas na bílé ploše rovnoměrně rozložen a není tedy potřeba počítat vážený průměr podle jasů.

6.2.3 Sodíkové výbojky

V následujícím grafu na Obr. 95 jsou zobrazeny změřené hodnoty při měření sodíkové výbojky.



Obr. 95 Změřené hodnoty sodíkové výbojky

Zde lze vidět, že většina změřených hodnot jasovým analyzátozem je podměřená a je tedy potřebná korekce T_{cp} navržená v laboratorním měření.

V následující tabulce Tab. 33 jsou uvedeny změřené hodnoty sodíkové výbojky pomocí jasového analyzátoru LDA, přístrojů UPRtek a Konica Minolta Cl-200. Byly měřeny dvě sodíkové výbojky, přičemž jsou od sebe odlišeny čísly. V posledních sloupcích jsou změřené hodnoty s navrženými korekcemi na základě laboratorního měření. Přičemž korekce hodnoty T_{cp} jasového analyzátoru LDA HDR (váž. průměr) je 1,1, přístroje UPRtek je 0,96 a KM CL-200 je 0,94. Korekční koeficient je násoben se změřenou hodnotou jednotlivého přístroje.

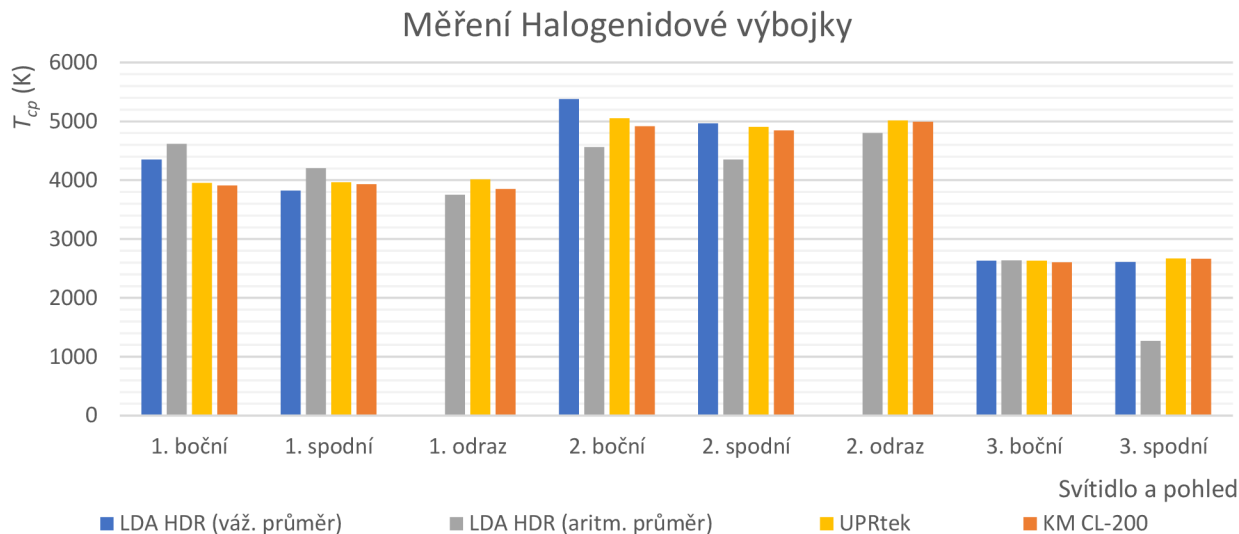
Tab. 33 Změřené hodnoty sodíkové výbojky

Číslo svítidla a Pohled měřícího přístroje	LDA HDR (váž. průměr)	LDA HDR (arit. průměr)	UPRtek	KM CL-200	LDA s korekcí	UPRtek s korekcí	KM CL-200 s korekcí
	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}
	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)
1. boční	1697	1695	1953	1976	1867	1875	1857
1. spodní	1668	1667	1951	1971	1835	1873	1853
2. boční	1785	1790	2032	2050	1964	1951	1927
2. spodní	1605	1660	2032	2061	1766	1951	1937
2. odraz	-----	1765	2042	2066	1942	1960	1942

Spodní hodnoty T_{cp} u sodíkových výbojek jsou určeny přímo z výboje a jeho blízkého okolí, u měření sodíkových výbojek zespodu nastal problém, že ve snímku na svítidle vznikaly místa s nulovou T_{cp} a přitom zde byl naměřen relativně velký jas a z tohoto důvodu byla brána hodnota T_{cp} z výboje a jeho blízkého okolí. Zde je možnost pro zlepšení a vylepšení vztahu 6.1, kdy by byly při výpočtu vynechány hodnoty jasu při nulové hodnotě T_{cp} , čímž by se zlepšilo průměrování.

6.2.4 Halogenidové výbojky

V grafu na Obr. 96 jsou zobrazeny změřené hodnoty při měření halogenidové výbojky.



Obr. 96 Změřené hodnoty halogenidové výbojky

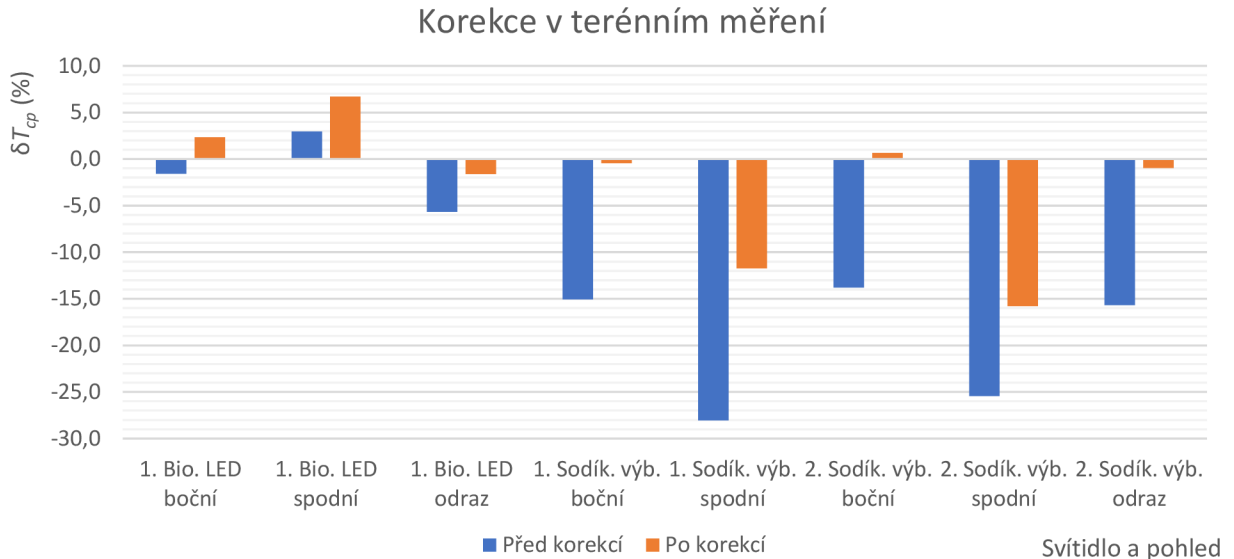
V následující tabulce Tab. 34 jsou uvedeny změřené hodnoty halogenidové výbojky pomocí jasového analyzátoru LDA, přístrojů UPRtek a Konica Minolta CL-200. Byly změřeny 3 halogenidové výbojky, přičemž jsou od sebe odlišeny čísly.

Tab. 34 Změřené hodnoty halogenidové výbojky

Číslo svítidla a Pohled měřícího přístroje	LDA HDR (váž. průměr)	LDA HDR (arit. průměr)	UPRtek	KM CL-200
	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}
	(K)	(K)	(K)	(K)
1. boční	4353	4615	3956	3908
1. spodní	3822	4204	3966	3933
1. odraz	-----	3753	4013	3852
2. boční	5377	4561	5053	4918
2. spodní	4967	4353	4907	4848
2. odraz	-----	4803	5012	4994
3. boční	2634	2637	2630	2603
3. spodní	2613	1268	2670	2664

6.3 Zhodnocení korekce

Korekce je vyhodnocena s měřícím přístrojem UPRtek. Korekce byla počítána pro změřené hodnoty jasového analyzátoru LDA HDR (váž. průměr), dále jen LDA. Korigovány byly jen světelné zdroje, pro které byla korekce navržena.



Obr. 97 Korekce v terénním měření

Na obr. 97 jsou zobrazeny odchylky před a po korekci změřených hodnot. Z obrázku je patrné, že biodynamické LED svítidlo nemá smysl korigovat navrženými korekčními koeficienty z laboratorního měření pro klasický LED světelný zdroj s T_{cp} do 2999 kelvinů. Je to z důvodu, že biodynamické LED svítidlo se skládá z dvou LED čipů s různými T_{cp} . Na druhou stranu korekce sodíkové výbojky má smysl, jelikož lze vidět již z grafu zmenšení odchylky.

Tabulka Tab. 35 zobrazuje hodnoty z grafu na Obr. 97. Na základě průměrné odchylky lze tvrdit, že korekce má smysl u sodíkové výbojky, kde odchylka klesne z hodnoty 17,6 % na 2,9 %.

Tab. 35 Srovnání hodnot s korekcí

Číslo svítidla a Pohled měřícího přístroje	LDA	Uprtek	LDA s korekcí	UPRtek s korekcí	Před korekcí		Po korekcí	
	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	T_{cp}	ΔT_{cp}	δT_{cp}	ΔT_{cp}	δT_{cp}
	(K)	(K)	(K)	(K)	(K)	(%)	(K)	(%)
1. Bio. LED boční	2494	2533	2594	-----	-39	-1,6	61	2,3
1. Bio. LED spodní	2634	2556	2739	-----	78	3,0	183	6,7
1. Bio. LED odraz	2387	2522	2482	-----	-135	-5,7	-40	-1,6
Bio. LED \varnothing $ \Delta T_{cp} $ a \varnothing $ \delta T_{cp} $					84	3,4	95	3,5
1. Sodík. výb. boční	1697	1953	1867	1875	-256	-15,1	-8	-0,4
1. Sodík. výb. spodní	1668	1951	1835	1873	-283	-17,0	-197	-2,1
2. Sodík. výb. boční	1785	2032	1964	1951	-247	-13,8	13	0,7
2. Sodík. výb. spodní	1605	2032	1766	1951	-427	-26,6	-266	-10,5
2. Sodík. výb. odraz	1765	2042	1942	1960	-277	-15,7	-18	-0,9
Sodíková výbojka \varnothing $ \Delta T_{cp} $ a \varnothing $ \delta T_{cp} $					298	17,6	52	2,9

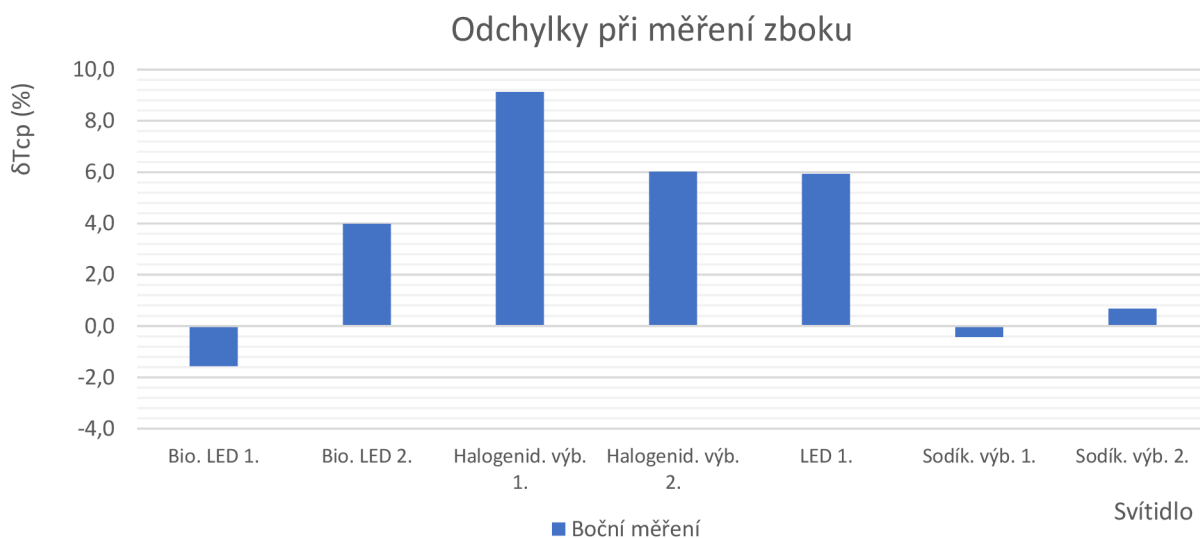
Příklad výpočtu pro tabulku Tab. 35 je stejný jako v kapitole 5.1.5.

6.4 Odchylyky podle jednotlivých pohledů na svítidlo

Na základě zhodnocení korekce budou dále uvažovány sodíkové výbojky s navrženou korekcí, hodnoty LDA vychází z hodnot LDA HDR (váž. průměr), případně hodnot LDA s korekcí u sodíkových výbojek. Srovnání bude provedeno k přístroji UPRtek, jelikož v laboratorním měření měřil UPRtek blíže k referenčnímu přístroji JETI.

6.4.1 Boční pohled

V grafu na Obr. 98 jsou zobrazeny odchylyky změřených hodnot jasového analyzátoru LDA od přístroje UPRtek při měření v terénu a pohledu z boku na svítidlo.



Obr. 98 Srovnání odchylek při pohledu z boku

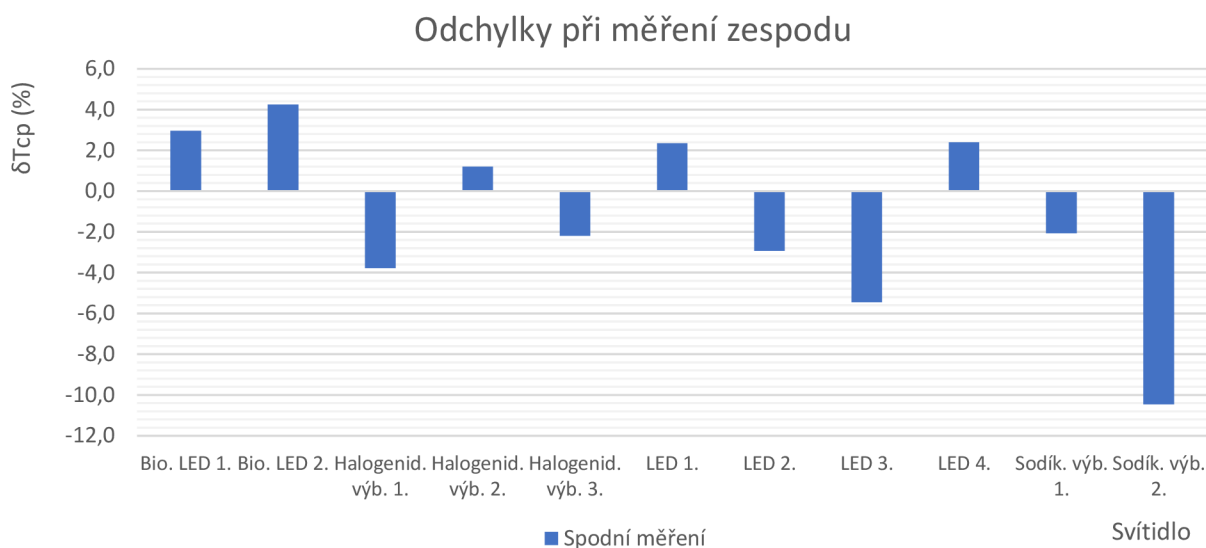
V následující tabulce Tab. 36 jsou zobrazeny hodnoty z grafu. V tabulce je vypočtena průměrná odchylka měření z boku $\emptyset |\delta T_{cp}| = 4,0 \%$, přičemž biodynamické LED svítidla mají $\emptyset |\delta T_{cp}| = 2,8 \%$, halogenidové výbojky mají $\emptyset |\delta T_{cp}| = 7,6 \%$, sodíkové výbojky mají jen $\emptyset |\delta T_{cp}| = 0,6 \%$ a LED má odchylku $\emptyset |\delta T_{cp}| = 5,9 \%$.

Tab. 36 odchylyky při pohledu z boku

Pohled měřícího přístroje a svítidlo	LDA	UPRtek	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp} (K)	T_{cp} (K)		
Bio. LED 1.	2494	2533	-39	-1,6
Bio. LED 2.	3357	3223	134	4,0
Halogenid. výb. 1.	4353	3956	397	9,1
Halogenid. výb. 2.	5377	5053	324	6,0
LED 1.	1867	1875	249	5,9
Sodík. výb. 1.	1964	1951	-8	-0,4
Sodík. výb. 2.	2494	2533	13	0,7
Měření z boku $\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $			166	4,0
Bio. LED $\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $			87	2,8
Halogenid. výb. $\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $			361	7,6
Sodík. výb. $\emptyset \Delta T_{cp} $ a $\emptyset \delta T_{cp} $			11	0,6

6.4.2 Spodní pohled

V grafu na Obr. 99 jsou zobrazeny odchylky změřených hodnot jasového analyzátoru LDA od přístroje UPRtek při měření v terénu a pohledu zespodu na svítidlo.



Obr. 99 Srovnání odchylek při pohledu zespodu

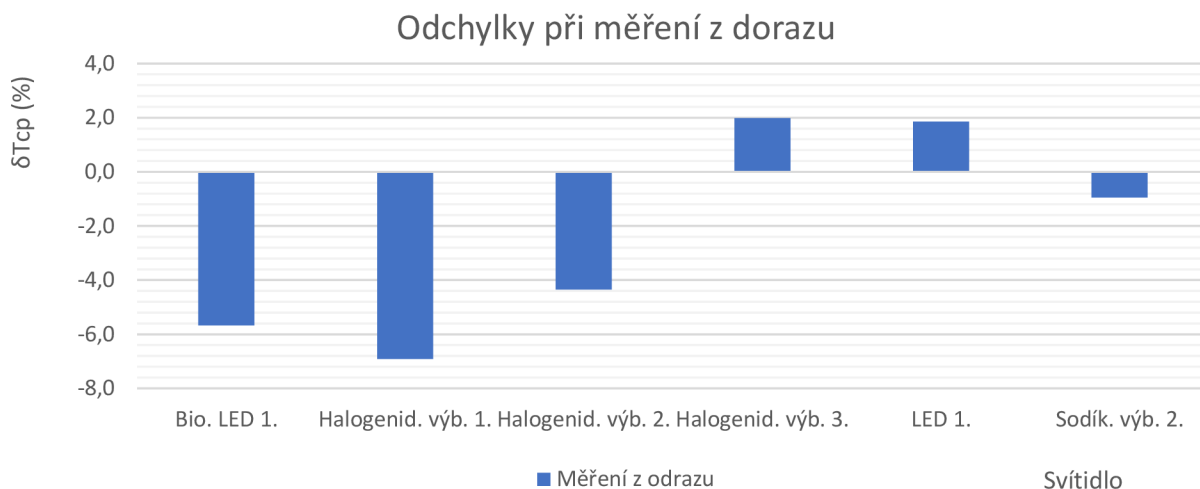
V následující tabulce Tab. 37 jsou zobrazeny hodnoty z grafu. V tabulce je vypočtena průměrná odchylka měření zespodu $\bar{|\delta T_{cp}|} = 3,6 \%$, přičemž sodíkové výbojky mají $\bar{|\delta T_{cp}|} = 6,3 \%$, dále jsou v tabulce 4 LED svítidla s odchylkou $\bar{|\delta T_{cp}|} = 3,3 \%$, biodynamické LED svítidla mají $\bar{|\delta T_{cp}|} = 3,6 \%$, halogenidové výbojky mají $\bar{|\delta T_{cp}|} = 2,4 \%$.

Tab. 37 Odchylky při pohledu zespodu

Pohled měřícího přístroje a svítidlo	LDA	UPRtek	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp}	T_{cp}		
	(K)	(K)		
Bio. LED 1.	2634	2556	78	3,0
Bio. LED 2.	3366	3223	143	4,2
Halogenid. výb. 1.	3822	3966	-144	-3,8
Halogenid. výb. 2.	4967	4907	60	1,2
Halogenid. výb. 3.	2613	2670	-57	-2,2
LED 1.	4136	4039	97	2,3
LED 2.	3091	3182	-91	-2,9
LED 3.	3699	3901	-202	-5,5
LED 4.	5560	5427	133	2,4
Sodík. výb. 1.	1835	1873	-38	-2,1
Sodík. výb. 2.	1766	1951	-185	-10,5
Měření zespodu $\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			112	3,6
Bio. LED $\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			110	3,6
Halogenid. výb. $\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			87	2,4
LED $\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			131	3,3
Sodík. výb. $\bar{ \Delta T_{cp} }$ a $\bar{ \delta T_{cp} }$			111	6,3

6.4.3 Pohled z odrazu

V grafu na Obr. 100 jsou zobrazeny odchylky změřených hodnot jasového analyzátoru LDA od přístroje UPRtek při měření v terénu a pohledu z odrazu bílé plochy.



Obr. 100 Srovnání odchylek při pohledu z odrazu

V následující tabulce Tab. 38 jsou zobrazeny hodnoty z grafu. V tabulce je vypočtena průměrná odchylka při měření z odrazu $\bar{\delta T_{cp}} = 3,6$ přičemž halogenidové výbojky mají $\bar{\delta T_{cp}} = 4,4$ %, biodynamické LED svítidla mají $\bar{\delta T_{cp}} = 5,7$ %, LED má $\bar{\delta T_{cp}} = 1,9$ % a sodíková výbojka mají $\bar{\delta T_{cp}} = 0,9$ %.

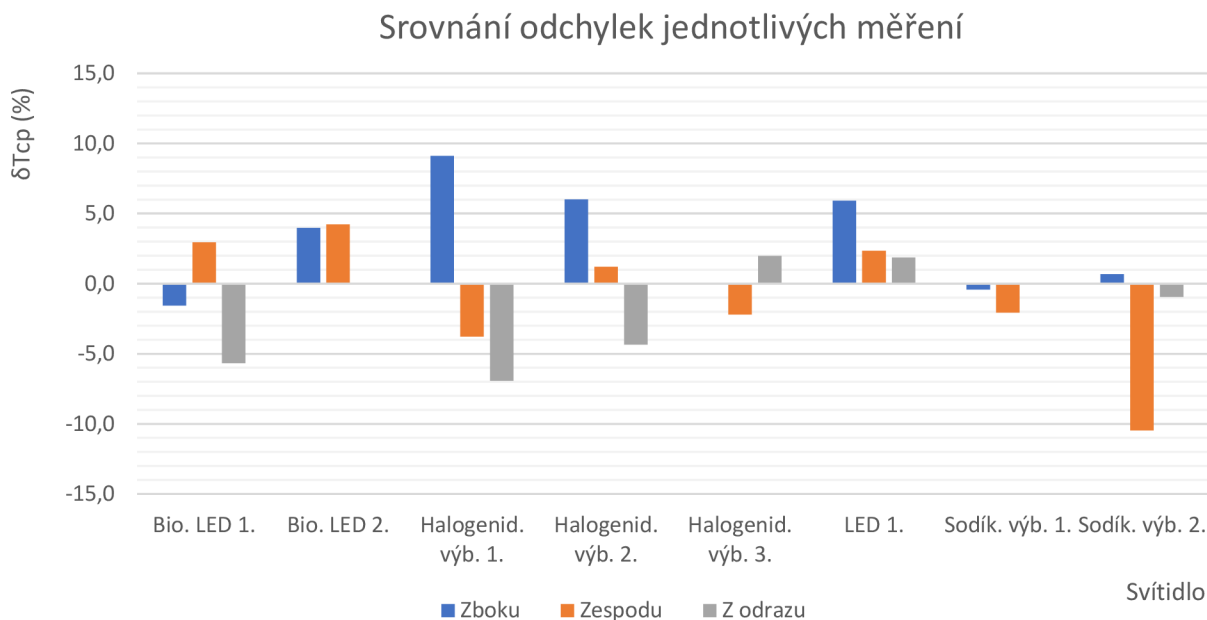
Tab. 38 Odchylky při pohledu z odrazu

Pohled měřicího přístroje a svítidlo	LDA	UPRtek	ΔT_{cp} (K)	δT_{cp} (%)
	T_{cp}	T_{cp}		
	(K)	(K)		
Bio. LED 1.	2387	2522	-135	-5,7
Halogenid. výb. 1.	3753	4013	-260	-6,9
Halogenid. výb. 2.	4803	5012	-209	-4,4
Halogenid. výb. 3.	2604	2552	52	2,0
LED 1.	4095	4019	76	1,9
Sodík. výb. 2.	1942	1960	-18	-0,9
Měření z odrazu $\bar{\delta T_{cp}}$ a $\bar{\delta T_{cp}}$			125	3,6
Halogenid. výb. $\bar{\delta T_{cp}}$ a $\bar{\delta T_{cp}}$			173	4,4

Příklad výpočtu k tabulkám Tab. 36 až 38 není uváděn, jelikož se jedná o stejný příklad výpočtu jako v kapitole 5.1.5.

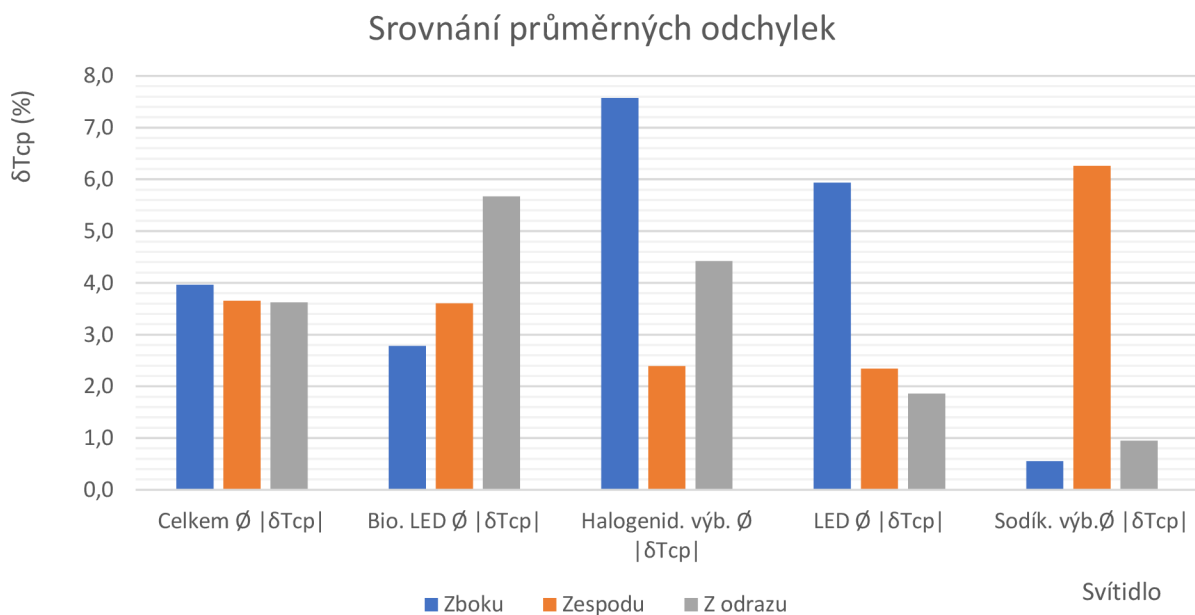
6.4.4 Srovnání odchylek

Na následujícím grafu Obr. 101 je zobrazeno srovnání odchylek měření jednotlivých svítidel. Z grafu je patrné, že měření z boku výslednou T_{cp} spíše přeměřuje a měření zespodu a z odrazu výsledné hodnoty T_{cp} spíše podměřuje.



Obr. 101 Srovnání odchylek jednotlivých měření svítidla

Na následujícím grafu na Obr. 102 je zobrazeno srovnání průměrných odchylek jednotlivých svítidel. Z grafu je patrné, že nejhůře vyšlo měření z boku při měření halogenidových výbojek. Na druhou stranu při měření sodíkových výbojek vznikla větší odchylka při měření zespodu, což je způsobeno místy s nulovou hodnotou T_{cp} , které mají relativně vysoký jas, čímž vzniká chyba při váženém průměrování podle jasu. Je zde možné navrhnout zlepšení, kdy by se hodnoty jasu, při nulové hodnotě T_{cp} v určené oblasti na snímku nezapočítávaly do váženého průměru.



Obr. 102 Srovnání průměrných odchylek

V následující tabulce Tab. 39 je zobrazeno srovnání odchylek podle jednotlivých pohledů při měření. V tabulce je patrné, že největší chyba měření je u sodíkové výbojky, při měření zesponu, kdy je odchylka $\delta T_{cp} = -10,5\%$. Je to způsobeno tím, že ve vyznačené oblasti na snímku, kterou je označeno svítidlo se nachází nulové hodnoty T_{cp} , které mají relativně velký jas. Tyto hodnoty potom způsobují chybu ve výpočtu váženého průměru. Je zde možné zlepšení, kdy by se tyto hodnoty jasu, které odpovídají nulovým hodnotám T_{cp} do výpočtu nezapočítávaly. U pohledu z boku má největší odchylku halogenidová výbojka 1., jejíž hodnota je přeměřená o $\delta T_{cp} = 9,1\%$. Lze doporučit měření sodíkových výbojek z boku, protože je průměrná odchylka $\bar{|\delta T_{cp}|} = 0,6\%$, zatímco při pohledu zesponu je průměrná odchylka $\bar{|\delta T_{cp}|} = 6,3\%$, což je ovšem způsobeno průměrováním relativně vysokých jasů, které odpovídají nulovým hodnotám T_{cp} . Při měření halogenidových výbojek a LED lze doporučit měření zesponu, kdy jsou odchylky menší.

Tab. 39 Srovnání odchylek

Svítidlo	Zboku	Zesponu	Z odrazu
	δT_{cp}	δT_{cp}	δT_{cp}
	(%)	(%)	(%)
Bio. LED 1.	-1,6	3,0	-5,7
Bio. LED 2.	4,0	4,2	-----
Halogenid. výb. 1.	9,1	-3,8	-6,9
Halogenid. výb. 2.	6,0	1,2	-4,4
Halogenid. výb. 3.	-----	-2,2	2,0
LED 1.	5,9	2,3	1,9
Sodík. výb. 1.	-0,4	-2,1	-----
Sodík. výb. 2.	0,7	-10,5	-0,9
Celkem $\bar{ \delta T_{cp} }$	4,0	3,7	3,6
Bio. LED $\bar{ \delta T_{cp} }$	2,8	3,6	5,7
Halogenid. výb. $\bar{ \delta T_{cp} }$	7,6	2,4	4,4
LED $\bar{ \delta T_{cp} }$	5,9	2,3	1,9
Sodík. výb. $\bar{ \delta T_{cp} }$	0,6	6,3	0,9

V tabulce Tab. 39 jsou zobrazeny hodnoty ke grafům na Obr. 101 a 102. Příklad výpočtu pro tabulku není uváděn z důvodu stejného výpočtu v kapitole 5.1.5.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce je rozdělena do několika kapitol, přičemž první kapitola se zabývá měřením jasu. V kapitole je definován jas a možnosti jeho měření s přístroji, kterými ho lze měřit. Je zde popsána spektrální chyba f'_1 s postupem jejího výpočtu. Ve druhé kapitole jsou rozebrány výpočetní metody náhradní teploty chromatičnosti a parametru Duv. Je zde popsán výpočet T_{cp} pomocí Robertsonovy metody, výpočtu Mccamyho polynomem, trojúhelníkovou a parabolickou metodou, případně možnou kombinací trojúhelníkové a parabolické metody, nakonec je popsán výpočet parametru Duv. Třetí kapitola je zaměřena na měření náhradní teploty chromatičnosti. V kapitole jsou nejprve definovány pojmy teplota chromatičnosti a náhradní teplota chromatičnosti a následně jsou v kapitole rozebrány možnosti měření T_{cp} , pomocí analyzátoru barev, kolorimetru, spektorradiometru.

Měření teploty chromatičnosti a náhradní teploty chromatičnosti lze měřit také pomocí jasové kamery, které se věnuje čtvrtá kapitola. Je zde rozebrán princip funkce jasové kamery a následně je provedena rešerše dostupných jasových kamer na trhu, přičemž srovnání dostupných jasových kamer je v kapitole 4.8 zobrazeno v tabulce Tab. 15. Velmi kvalitní jasové kamery nabízí firma Instrument Systems, jedná se o kamery LumiCam 2400, které mají nízkou spektrální chybu 3 %, nebo tento rok představený model LumiTop 2700 a 4000, které jsou velmi přesné v kombinaci se spektorradiometrem CAS140D, použít se dají jak pro měření jasu s nejistotou 3 %, tak pro měření barevných souřadnic s nejistotou 0,003. Pro měření jasu lze doporučit společnost Technoteam s kamerou LMK s nejistotou 3 %, ovšem výrobce neudává nejistotu měření barevných souřadnic. Společnost Radiant nabízí jasové kamery ProMetric I ve verzích s rozlišením 2, 8, 16, 29 a nově tento rok představenými 61 megapixelů. Výrobce udává nejistotu měření jasu 3 % a nejistotu měření barevných souřadnic 0,003. Dalším výrobcem jasových kamer je společnost GL Optic s kamerou GL Opticam ve verzích 1.0, 2.0 TEC 4K a 3.0 TEC 4K, výrobce udává spektrální chybu 3 %, ale kamera sama neumí měřit barevné souřadnice, ty dokáže změřit jen ve spojení se spektorradiometrem Spectis 1.0 Touch. Další menší výrobci jsou Opsira a Hybec, obě kamery měří jas i barevné souřadnice. Společnost Opsira udává u své kamery Luca Color nejistotu měření jasu 4 % a nejistotu barevných souřadnic 0,004. Společnost Hybec nabízí kameru ColorLive 300 s nejistotou měření jasu 3 % a nejistotou barevných souřadnic 0,005. Za srovnáním jasových kamer se nachází simulace spektrální chyby $f'_1 = 4$ %, přičemž ukazuje, že s touto spektrální chybou může být odchylka pro jeden světelný zdroj různá, jelikož záleží na tvaru křivky. Pro některé tvary bude chyba malá a pro jiné tvary bude chyba velká. Dále je stručně popsán jasový analyzátor, který je postaven na zrcadlovém fotoaparátu. K lepšímu porozumění je zde popsán princip a funkce zrcadlového fotoaparátu s možnými efekty při focení, které ovlivňují měření s jasovým analyzátozem. Je popsána vinětace, Bokeh efekt a pohybová neostrost, vlivem dlouhé expozice.

Pátá kapitola obsahuje laboratorní měření, které je rozděleno na jednotlivá měření. Nejprve je popsáno měření světelného boxu na optické lavici v kapitole 5.1. Pro přehled o měřených zdrojích jsou v kapitole 5.1.2 uvedeny jejich spektra na Obr. 50. Spektorradiometr JETI je zvolen jako referenční přístroj, se změřenými hodnotami T_{cp} referenčního přístroje JETI jsou porovnány hodnoty T_{cp} ostatních měřících přístrojů, kterými jsou UPRtek s $\emptyset |\delta T_{cp}| = 1,3$ %, KM CL-200 s $\emptyset |\delta T_{cp}| = 1,2$ %, KM CS-1000A s $\emptyset |\delta T_{cp}| = 2,3$ % a jasový analyzátor LDA s $\emptyset |\delta T_{cp}| = 4,3$ %. Dále byly měřeny malé světelné zdroje s patičí E27 na optickém stole, pro přehled o změřených zdrojích jsou v kapitole 5.2.2 uvedeny změřená spektra malých světelných zdrojů na Obr. 63. Při tomto měření je průměrná odchylka LDA od referenčního přístroje JETI $\emptyset |\delta T_{cp}| = 4,3$ %. Další bylo měření Planckova (teplotního) zářiče, kterým byla halogenová žárovka, které se zvyšuje T_{cp} s rostoucím napájecím proudem, změřená spektra jsou zobrazena v kapitole 5.3.2 na Obr. 68 a 69.

Průměrná odchylka jasové analyzátoru LDA od referenčního přístroje JETI je $\bar{|\delta T_{cp}|} = 0,3 \%$ při měření Planckova (teplotního) zářiče. Další měření bylo na programovatelném světelném zdroji, který generuje zvolená spektra. Přehled změřených spekter je v kapitole 5.4.2 na Obr. 74. Průměrná odchylka jasového analyzátoru LDA od referenčního přístroje JETI je $\bar{|\delta T_{cp}|} = 5,0 \%$. V kapitole 5.5 jsou navrženy korekční koeficienty na základě srovnání podle světelných zdrojů. Tabulka s navrženými korekčními koeficienty je Tab. 29. Korekční koeficienty byly navrženy pro měřicí přístroj, který změnil světelný zdroj s odchylkou větší než 3 %. V případě, že světelný zdroj neznáme může nejistota měření, zejména vlivem sodíkových výbojek a kompaktních zářivek, dosahovat hodnoty T_{cp} až 12 % při měření obvyklých světelných zdrojů s T_{cp} od 1600 kelvinů do 6500 kelvinů. V případě, že světelný zdroj známe lze výsledná nejistota měření hodnoty T_{cp} předpokládat do 5 %. Korekce hodnot je doporučena v případě měření sodíkové výbojky, kompaktní zářivky a případně LED světelného zdroje s T_{cp} do 2999 kelvinů. Navržená korekce pro sodíkovou výbojku je pro jasový analyzátor LDA 1,1, KM CL-200 0,94 a UPRtek 0,96, pro kompaktní zářivku je pro jasový analyzátor LDA do 3999 kelvinů navržena korekce 1,09 a od 5800 kelvinů navržena korekce 1,12 a pro přístroj KM CL-200 je od 4000 kelvinů navržena korekce 1,05. Pro LED světelný zdroj je pro jasový analyzátor LDA při měření do 2999 kelvinů navržena korekce 1,04.

V kapitole 5.6 bylo rozebráno měření závislosti vybuzení modrého kanálu na změně T_{cp} . Měřil se světelný zdroj LED Vitae se třemi režimy den se 4000 kelviny, večer s 2600 kelviny a noc s 1600 kelviny. Výsledkem měření je, že při změně vybuzení modrého kanálu není prokázána změna měřené hodnoty T_{cp} . Se změnou buzení modrého kanálu zůstává měřená náhradní teplota chromatičnosti stejná. Změřené hodnoty jasovým analyzátozem s T_{cp} do 2999 kelvinů byly korigovány pomocí korekčního koeficientu 1,04, čímž se průměrná odchylka od přístroje JETI zmenšila z 2,4 % na 1,0 %.

V šesté kapitole je popsáno měření v terénu. Měření proběhlo s jasovým analyzátozem LDA, spektrometrem UPRtek a kolorimetrem KM CL-200. Na Obr. 83 je znázorněno, jak vypadá měření v terénu s jasovým analyzátozem LDA a na dalších obrázcích Obr. 84 a 85 jsou zobrazeny možné výsledky v programu LumiDISP. Svítidla v terénu byla měřena třemi způsoby z boku, zespodu a z odrazu od bílé plochy, což je popsáno v kapitole 6.1.1 a zobrazeno na obrázcích Obr. 86, 87 a 88, dále je popsána funkce HDR, která je integrována v programu LumiDISP s následným váženým průměrováním hodnot T_{cp} podle jasu. Snímek pomocí HDR lze v před vývojovém programu LumiDISP vytvořit ze 4 jednotlivých fotografií, při vytvoření snímku HDR z více jednotlivých fotografií by výsledný snímek byl lépe vybuzen. Je zde také poukázáno na parazitní vliv sodíkových výbojek na měření LED svítidla, což je znázorněno na Obr. 90 a 91. Tento jev může ovlivnit změřenou hodnotu T_{cp} mobilního měřicího přístroje, ale neměl by ovlivnit měření pomocí jasového analyzátoru LDA, protože měří s vysokou rozlišovací schopností. Dále jsou pro přehled o měřených světelných zdrojích zobrazena spektra, která se měřila v terénním měření na Obr. 92.

Korekční koeficienty navržené v laboratorním měření byly aplikovány na změřené hodnoty z terénního měření, přičemž bylo zjištěno, že vlivem korekce se u sodíkové výbojky zmenší odchylka z 17,6 % na 2,9 %. Následně byly odchylky seřazeny podle jednotlivých pohledů měřícího přístroje na svítidlo, přičemž bylo zjištěno, že lze doporučit sodíkovou výbojku měřit při pohledu z boku, protože je průměrná odchylka jen $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 0,6 \%$, zatímco při měření zespodu je $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 6,3 \%$, což je způsobeno nulovými hodnotami T_{cp} , které mají relativně vysoké hodnoty jasu, ze kterých se poté počítá vážený průměr. Zde by se dalo navrhnout zlepšení, kdy by se do výpočtu váženého průměru nezahrnovaly jasy odpovídající nulovým hodnotám T_{cp} . Na druhou stranu při měření halogenidových výbojek a LED světelných zdrojů vychází lépe pohled zespodu, kdy mají halogenidové výbojky odchylku $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 2,4 \%$, místo odchylky $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 7,6 \%$, při pohledu z boku. LED zdroj má při pohledu zespodu odchylku $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 2,3 \%$, místo odchylky $\bar{\Delta}|\delta T_{cp}| = 5,9 \%$ při pohledu z boku. Je třeba brát v potaz i možné parazitní vlivy okolních svítidel, které mohou ovlivňovat měření mobilními přístroji, k redukci těchto vlivů by bylo třeba zastínit okolní svítidla.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [3] Vše o světle: Veličiny proměření světla. *Fotoroman*. online: ing. Roman Pihan., 2012, 2012 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z:
<http://www.fotoroman.cz/tech2/svetlo15photometry.htm>
- [4] Teplota chromatičnosti. *T-led*. online: T-led, 2018 [cit. 2018-11-05]. Dostupné z:
<https://www.t-led.cz/info/barva-svetla.html>
- [5] Camera photometer LMK mobile air: Based on the canon EOS70D digital reflex camera [online]. 2016. Ilmenau 98693 Germany: TechnoTeam, 2016 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z:
https://www.technoteam.de/product_overview/photometer_colorimeter/products/index_eng.html
- [6] *Video Photometer LMK: Imaging light and colour measuring systems* [online]. 2019. Ilmenau 98693 Germany: TechnoTeam, 2019 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z:
https://www.technoteam.de/product_overview/photometer_colorimeter/products/index_eng.html
- [7] Analýza jasu. In: *Světlo v praxi* [online]. Praha: Metrolux, 2017, 22.5.2017 [cit. 2020-11-06]. Dostupné z: <https://svetlovpraxi.cz/2017/05/22/vychozi-revize-na-provereni-kvality-osvetleni-nestaci/>
- [8] Výroba el. napětí/proudu: Fotodioda. *Elektřina a magnetismus*. online: Jaromír Kekule, 2004 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z:
http://elektross.gjn.cz/soucastky/jeden_prechod/fotodioda.html
- [9] Fotodioda. In: *ELUC* [online]. Olomouc: KOUTNÝ, Jaroslav a Ivo VLK, 2009 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/20848/content_fotodioda.png
- [10] *Světlo: časopis pro světelnou techniku a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1998-, 2009(3). ISSN 1212-0812.
- [11] CMOS Technology. In: *Electronics hub* [online]. Online: Electronics hub, 2019, 2019 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/cmos-technology/>
- [12] Difference Between CMOS and NMOS Technology. In: *ElProCus* [online]. Online: ElProCus, 2013, 2018 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z:
<https://www.elprocus.com/difference-between-nmos-cmos-technology/>
- [13] CMOS. In: *TechTerms* [online]. Online: Techterms, 2017, 2017 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://techterms.com/definition/cmos>
- [14] Fotomobily: snímací čipy CMOS vs. CCD. In: *DigiManie* [online]. Online: DigiManie, 2009, 209 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/fotomobily-snimaci-cipy-cmos-vs-ccd/2885>

- [15] OHNO, Yoshi. Calculation of CCT and Duv and Practical Conversion Formulae. In: *Council for Optical Radiation Measurements* [online]. Online: Cormusa, 2018, 2011 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://cormusa.org/wp-content/uploads/2018/04/CORM_2011_Calculation_of_CCT_and_Duv_and_Practical_Conversion_Formulae.pdf
- [16] Spektrometr: CS-1000A. In: *Laboratoř světelné techniky: ústav elektroenergetiky FEKT VUT Brno* [online]. Brno: UEEN, FEKT, 2006, 2010 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: http://www.svetelnalaborator.cz/?section=equipments_CS-1000A
- [17] WYSZECKI, Günther a W.S. STILES. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. 2.* Wiley-Interscience: Wiley-Interscience, 2000. ISBN 978-0471399186.
- [18] Quality and color of light. In: *Zumtobel* [online]. Online: Zumtobel, 2010, 2019 [cit. 2020-11-16]. Dostupné z: <https://zumtobel.us/learn/knowledge-of-light/quality-and-color-of-light/>
- [19] Theoretical background: Spectrometers. *Avantes: enlightening spectroscopy* [online]. Oude Apeldoornseweg 28 NL-7333 NS APELDOORN The Netherlands, Europe: Avantes BV, 1993 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/support/theoretical-background/spectrometers>
- [20] BSI CMOS snímač: popis technologie. In: *DigiManie* [online]. online: DigiManie, 1998, 2011 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/bsi-cmos-snimac-popis-technologie/3650-2>
- [21] LumiCam 1300/2400: 2D imaging colorimeter with manual objective lenses. In: *Instrument systems: Konica Minolta group* [online]. Online: Instrument systems, 2002, 2014 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/Downloads/Brochures_Datasheets/LumiCam1300_2400_EN.pdf
- [22] Luca: The image resolving luminance measurement system. In: *Opsira* [online]. Online: Opsira, 2016, 2018 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.opsira.de/en/products/optical-measurement-systems/luminance-measurement-camera-luca-luminance-measurement.html>
- [23] Radiant: ProMetric Imaging Colorimeter. In: *Radiant: Vision Systems* [online]. Online: Radiant, 2014, 2020 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: https://www.radiantvisionsystems.com/sites/default/files/library-documents/Radiant_SPEC_ProMetric-I_EN.pdf
- [24] GL Opticam Systems: Luminance under control. *GLoptik* [online]. Polsko: GLOptik, 2009, 2018 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: https://gloptic.com/wp-content/uploads/2020/10/GL-OPTIC_GL-Opticam-Systems_200x260x3_L_INTERNET.pdf
- [25] Fotocitlivé prvky. In: *Johnykovy poznámky* [online]. Online: Johnyk, 2003, 2008 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://jjohnyk.sweb.cz/elektronika/06.htm>
- [26] Fotodioda. In: *Elektrotechnika: Počítačové systémy* [online]. Online: Elektrotechnika, 2008, 2010 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: http://et-pocitacovesystemy.wz.cz/elektronicke_soucastky/fotodioda.html
- [27] Fotodioda. In: *Hidden* [online]. Online: hidden, 2008, 2011 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://hidden.j-stranky.cz/dat/pdf/ELT/Fotodioda.pdf>

- [28] PIN fotodioda Osram. In: *Půhy: e-shop s elektronikou* [online]. Online: Půhy, 2010, 2020 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <https://www.puhy.cz/pin-fotodioda-osram-components-bpx-61-to-39-vyz-uhel-55-400-1100-nm-85261.html>
- [29] Konica Minolta – Lightmeters [on-line], 2011, [cit. 2020-11-23] dostupný z [www](http://www.konicaminolta.com/instruments/download/catalog/light/):
- [30] RYBÁR, Peter. Neistota merania osvetlenia: Část 1. Světlo [online]. 2014: 1 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/neistota-meraniaosvetlenia-cast-1--882-analyza-malych-vyberu>
- [31] IVAN, Perre. Is measuring LEDs with lux metr accurate? [online]. In: . s. 52 [cit. 2020-11-23]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/theilp/pls-2014-is-measuringled-illuminance-with-a-lux-meter-accurate>
- [32] Illuminace Meter T-10A. In: *Konica Minolta: Measuring instruments* [online]. Online: Konica Minolta, 2005, 2012 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www5.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/products/light-display-measurement/illuminance-meters/t-10a/introduction.html>
- [33] Illuminance Spectrophotometer CL-500A. In: *Konica Minolta: Measuring instruments* [online]. Online: Konica Minolta, 2005, 2012 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://www5.konicaminolta.eu/en/measuring-instruments/products/light-display-measurement/illuminance-colour-meters/cl-500a/introduction.html>
- [34] CL-300. *Hybec: High technology lamp* [online]. Online: Hybec, 2015, 2017 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://www.hybecusa.com/industrial-products/color-live-cl-300>
- [35] Analyser details. *LumiDisp* [online]. Brno: LDA-LumiDISP, 2017, 2018 [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <http://www.lumidisp.eu/analyser-details/>
- [36] PIHAN, Roman. *Mistrovství práce s DSLR*. 3. Praha: IDIF - Institut digitální fotografie, 2008. ISBN 80-8715-509-2.
- [37] Digitální fotoaparát. In: *BigyZr [Ždár nad Sázavou]*. Online: bigyZr, 2000, 2007 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: http://www.bigyZr.cz/shared/clanky/2893/ICT-Pripravy/IS-3_Digitalni_fotografie.pdf
- [38] Optika. In: *Slideserve* [online]. Online: slide, 2010, 2015 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/temira/optika>
- [39] Ohnisková vzdálenost. In: *Moje Tajemno: Stránky o focení nejen pro začínající fotografy* [online]. Online: Petr Honsnejman., 2014, 2018 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://moje.tajemno.net/ohniskova-vzdalenost/>
- [40] Clona. In: *Alza* [online]. Online: Alza, 2010, 2017 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://www.alza.cz/slovník/clona-art4785.htm>
- [41] Vady zobrazení. In: *DigiManie* [online]. Online: DigiManie, 2000, 2003 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.digimanie.cz/digitalni-fotoaparát-iv-vady-zobrazení/6>
- [42] K čemu je dobrá vinětace. In: *Milujemefotografii* [online]. Online: milujeme fotografii, 2010, 2017 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/k-cemu-je-dobra-vinetace>
- [43] Co je to bokeh. In: *Tipy jak fotit* [online]. Online: Tipy jak fotit, 2012, 2020 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://tipyjakfotit.cz/bokeh-pro-zacatecniky/>

- [44] In: *Milujeme fotografii* [online]. Online: milujeme fotografii, 2010, 2011 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/kouzlo-dlouhe-expozice>
- [45] CL-200A Chroma Meter. In: *Konica Minolta* [online]. Online: Konica Minolta, 1998, 2006 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.us/us/products/cl-200a-chroma-meter/>
- [46] Analyzátor barev Konica Minolta CA-210. In: *Megalux: logismarket* [online]. Online: Megalux, 2001, 2007 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.logismarket.cz/anamet/analyzator-barev-lcd-a-crt-monitoru/1787264527-p.html>
- [47] Premium Light pro Základy pro světlo. In: *Premium light pro* [online]. Online: Univerzita v Coimbre, Portugalsko, 2017, 2017 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/14325944/>
- [48] Jak definujeme barvu? In: *BenQ* [online]. Online: BenQ, 2005, 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.benq.eu/cs-cz/knowledge-center/knowledge/define-accurate-color.html>
- [49] Barva světla. In: *Osvetlenisvitidla* [online]. Online: Osvetlenisvitidla, 2009, 2018 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.osvetlenisvitidla.cz/novinky-detail-barva-svetla.htm>
- [50] ProMetric I Imagine Colorimeters. *Radiant: Vision systems* [online]. Online: Radiant, 2014 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.radiantvisionsystems.com/products/imaging-colorimeters-photometers/prometric-i-imaging-colorimeters>
- [51] LumiTop 2700 / LumiTop 4000: Imaging photometer and colorimeter for display production. *Instrument Systems: Konica Minolta group* [online]. Online: Instrument Systems, 2014, 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.instrumentsystems.com/en/products/imaging-colorimeters/lumitop-2700-4000/>
- [52] PIHAN, Roman. *Mistrovství práce s DSLR: Vše, co jste chtěli vědět o digitální zrcadlovce a nikdo vám to neuměl vysvětlit*. 3. Praha: Institut digitální fotografie, 2008. ISBN 80-903210-8-9.
- [53] High Dynamic Range (HDR) Video. *AWS* [online]. Online: Amazon, 2014, 2021 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://aws.amazon.com/media/tech/what-high-dynamic-range-hdr-video/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Značka	Jednotka	Slovní význam
ϕ	lm	Světelný tok
ϕ_e	W	Zářivý tok
$V(\lambda)$	-	Poměrná světelná účinnost
L	cd.m ⁻²	Jas
N	-	Index lomu
f	Hz	Frekvence
λ	nm	Vlnová délka
E	lx	Osvětlenost
A	m ²	Plocha
l	m	vzdálenost
Ω	sr	Prostorový úhel
r	m	Poloměr
I	cd	Svítivost
T	K	Teplota chromatičnosti
T_{CP}	K	Náhradní teplota chromatičnosti
Ra (CRI)	-	Index podání barev
d	m	Průměr
t	s	čas
U	V	Napětí
I	A	Proud
$f1'$	-	Spektrální chyba
$s*(\lambda)_rel$	-	Korigovaná relativní citlivost fotometru
$a(Z)$	-	Korekční koeficient pro světlo Z
F	mm	Ohnisko

Zkratky

Zkratka	Český význam zkratky
CCT	Náhradní teplota chromatičnosti
UV	Ultra fialové světlo
IČ	Infra červené světlo
CCD	Zařízení s vázanými náboji
CMOS	Zařízení s doplňujícím se přechodem kov-oxid
VIS	Viditelná oblast
NIR	Blízko infračervenému světlu
CIE	Barevný model vytvořený mezinárodní komisí pro světlo
MOSFET	Polem řízený tranzistor
NMOS	Zařízení využívající tranzistory s N kanálem
PMOS	Zařízení využívající tranzistory s P kanálem
LED	Dioda, která emituje světlo
OLED	Technologie využívající organických elektroluminiscenčních diod
USB	Univerzální sériová sběrnice
DSLR	Digitální jednooká zrcadlovka
SLR	Analogová jednooká zrcadlovka
RAW	Kontrolní čtení po zápisu
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
AF	Automatický blesk
LDA	Jasový analyzátor
HDR	Vysoký dynamický rozsah
KM	Konica Minolta