



# 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

## INOVATIVNÍ METODY HODNOCENÍ PODÁNÍ BAREV LED SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

INOVATING METHODS FOR COLOR FIDELITY INDEX EVALUATION OF LED.

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Novák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Motyčka

BRNO 2019

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Filip Novák  
**Ročník:** 3

**ID:** 195681  
**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

**Inovativní metody hodnocení podání barev LED světelných zdrojů.**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Index podání barev Ra je postupně nahrazován standardem IES TM-30-15 a CIE 2017 (index věrnosti podání barev). Téma této práce je zaměřeno na porovnání těchto jednotlivých metod. Práce by se měla zabývat nastudováním jednotlivých standardů, laboratorním měřením spekter vybraných LED světelných zdrojů a jejich následným zpracováním a porovnáním.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Motyčka

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

NOVÁK, F. *Inovativní metody hodnocení podání barev LED světelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 69 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Motyčka.

### **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Inovativní metody hodnocení podání barev LED světelných zdrojů* z jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne 26.05. 2019

.....

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat za spolupráci vedoucímu této práce panu Ing. Martinu Motyčkovi za jeho celoroční vedení, trpělivost, cenné rady a také za čas věnovaný této práci.

Dále patří můj velký dík především Tereze, bez které by tato práce nejspíš ani nevznikla.

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce je zaměřena na porovnání metodiky výpočtu ukazatelů podání barev, jelikož pro moderní světelné zdroje, založené na technologii LED, je tradiční index podání barev CRI  $R_a$  nedostačující. Práce nejdříve přibližuje možné principy vzniku viditelného světla, jeho definici, a následně pokračuje popisem fotometrických jednotek a barevných prostorů CIE. Hlavní částí práce je popis spektrometrů, jakožto přístrojů používaných pro určení daných ukazatelů, a především postup výpočtu indexů podání barev, jak podle původní normy CIE 013.3-1995, tak podle novějších metodik CQS, IES TM-30-15 a CIE 224:2017. V další kapitole jsou pak tyto indexy vypočítány pro vybrané světelné zdroje a tyto výsledky následně zhodnoceny.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** barevný prostor; CRI; CQS; fotometrické veličiny; gamut; gamut index; index podání barev; index podání barev; index věrnosti barev; LED; náhradní teplota chromatičnosti;  $R_a$ ; spektrum; spektrometr; světelné zdroje;

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis is aimed to compare different methodologies of calculating color rendering indicators, because for modern light sources based on LED the traditional color rendering index  $R_a$  might be insufficient. The first part of this paper is based on explaining the basics, such as different methods of producing visible light, photometric quantities, or various CIE color spaces. The second and main part revolves around description of spectroradiometers, and calculation procedures for calculating color rendering indicators according to CIE 013.3-1995, CQS, IES TM-30-15, and CIE 224:2017. In the next chapter the mentioned indexes are then calculated for a given sample of light sources, and the results are subsequently evaluated.

**KEY WORDS:** color space; color rendering index; correlated color temperature; CRI; CQS; gamut; gamut index; fidelity index; LED; light sources; photometric quantities; spectrum; spectroradiometer;

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2 ZÁKLADY FOTOMETRIE .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 DEFINICE VIDITELNÉHO ZÁŘENÍ.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 VZNIK SVĚTLA.....</b>	<b>12</b>
<b>3 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH PARAMETRŮ .....</b>	<b>13</b>
3.1.1 MOŽNÉ PŘÍSTUPY K MĚŘENÍ VIDITELNÉHO SVĚTLA .....	13
<b>3.2 FOTOMETRICKÉ VELIČINY .....</b>	<b>14</b>
3.2.1 SVĚTELNÝ TOK .....	14
3.2.2 OSVĚTLENOST.....	15
3.2.3 SVÍTIVOST.....	15
3.2.4 JAS .....	15
3.2.5 BAREVNÉ VLASTNOSTI SVĚTLA .....	16
3.2.6 BAREVNÉ PROSTORY .....	18
<b>4 SPEKTORADIOMETRICKÁ MĚŘENÍ.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1 ZÁKLADY SPEKTORADIOMETRIE.....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 TECHNOLOGIE SPEKTORADIOMETRŮ .....</b>	<b>26</b>
4.2.1 PŘÍMO SNÍMKUJÍCÍ SPEKTORADIOMETRY .....	26
4.2.2 SPEKTORADIOMETRY S DVOJITÝM MONOCHROMÁTOREM.....	28
<b>4.3 POROVNÁNÍ DOSTUPNÝCH SPEKTORADIOMETRŮ .....</b>	<b>28</b>
<b>5 VÝPOČET UKAZATELŮ VĚRNOSTI PODÁNÍ BAREV.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1 INDEX PODÁNÍ BAREV <math>R_A</math> .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 COLOR QUALITY SCALE – CQS.....</b>	<b>35</b>
<b>5.3 INDEX PODÁNÍ BAREV IES TM-30-15 .....</b>	<b>39</b>
5.3.1 GAMUT INDEX.....	44
<b>5.4 INDEX VĚRNOSTI PODÁNÍ BAREV CIE 224:2017 (IES TM-30-18).....</b>	<b>46</b>
<b>6 PRAKTICKÉ SROVNÁNÍ .....</b>	<b>47</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>65</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>66</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Spektrum viditelného světla .....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 3-1 Škála možných teplot náhradní chromatičnosti pro bílé světlo.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 3-2 Porovnání stejného předmětu, osvětleného světlem s různým CRI a stejnou <math>T_c</math>.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3-3 Barevný prostor CIE XYZ.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-4 Barevné členitele <math>\bar{x}(\lambda)</math>, <math>\bar{y}(\lambda)</math>, <math>\bar{z}(\lambda)</math> .....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-5 Barevný prostor CIE UCS.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-6 Křivka vyzářování AČT a izotermy v prostoru CIE UCS.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-7 Barevný prostor CIE LUV. ....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-8 Barevný prostor LAB pro hodnotu <math>L = 50\%</math>.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 4-1 Nespojité spektrum rtuťové referenční výbojky .....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 4-2 Příklad naměřeného spektra pro LED s <math>T_c = 5000\text{ K}</math> a <math>\text{CRI} \sim 80</math>.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-3 Principiální schéma monochromátoru Czerny – Turner.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 4-4 Příklad uspořádání optické části přímo snímajícího spektrometru Avantes .....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-5 Zjednodušené schéma dvojitého monochromátoru .....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-1 Barevné vzorky, používané pro určení indexů <math>R_a</math>, <math>R_{9a}</math>, <math>R_{96a}</math> .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 5-2 Princip výpočtu CCT pomocí Robertsonovy metody.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 5-3: Barevné vzorky, používané pro určení indexu podání barev CQS.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-4: Barevné vzorky, používané pro určení indexu podání barev dle TM-30-15 – 38.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-5: Barevný prostor CIECAM02 s vyznačenými souřadnicemi .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 5-6: Porovnání polygonů gamutu pro dva měřené světelné zdroje .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-1: Vzájemný vztah <math>R_g</math> a <math>R_f</math> pro zkoumané světelné zdroje .....</i>	<i>62</i>



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Srovnání radiometrických a fotometrických veličin.....</i>	<i>13</i>
<i>Tab. 2 Typické hodnoty teploty náhradní chromatičnosti pro vybrané světelné zdroje.....</i>	<i>16</i>
<i>Tab. 3 Typické hodnoty CRI pro vybrané světelné zdroje.....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 4 Porovnání vybraných spektrometrů .....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5 Popis barevných vzorků pro výpočet indexů podání barev dle CIE 013.3-1995 .....</i>	<i>30</i>
<i>Tab. 6 Parametry izoterm pro výpočet CCT .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 7 Základní porovnání CIE 13.3-1995 a IES TM-30-15 .....</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 8 Vypočítané hodnoty ukazatelů podání barev pro vybrané světelné zdroje. ....</i>	<i>47-61</i>
<i>Tab. 9 Průměrné hodnoty indexů podání barev pro zkoumané světelné zdroje.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 10 Průměrné hodnoty rozdílů indexů podání barev pro zkoumané světelné zdroje. ....</i>	<i>63</i>

**SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK**

AČT	Absolutně černé těleso
CCD	Charge coupled device
CIE	Comission internationale de l'éclairage (Mezinárodní komise pro osvětlování)
IES	Illuminating engineering society (Inženýrská společnost pro osvětlování)
IR	Infračervené záření
LED	Světlo emitující dioda
SZ	Světelný zdroj
UCS	Universal color space
UV	Ultrafialové záření
$\Delta E$	Barevná diference
$\Phi$	Světelný tok
$\Phi_e$	Zářivý tok
$\lambda$	Vlnová délka
$\Omega$	Prostorový úhel
$A$	Plocha
$c$	Rychlost světla
$CCT, T_c$	Náhradní teplota chromatičnosti
$CRI, R_a, Q_a$	Index podání barev
$E$	Osvětlenost
$E_e$	Ozářenost
$I$	Svítivost
$I_e$	Zářivost
$L$	Jas
$L_e$	Záře
$R_f, Q_f$	Index věrnosti barev
$R_g, Q_g$	Index gamutu
$R_i, Q_i$	Speciální index podání barev
$Q_p$	Index barevných preferencí

# 1 ÚVOD

Aby bylo možné kvalitativně popsat vlastnosti světla, byl ve druhé polovině dvacátého století zaveden mimo jiné index podání barev  $R_a$ . Posledních několik let neustále roste podíl světelných zdrojů na bázi LED, a právě pro tyto zdroje může znamenat tento index jisté znevýhodnění, jelikož byl navržen primárně pro zářivky s halofosfátovým luminoforem, kterým připadá hodnota  $R_a$  přibližně 50.

Protože index  $R_a$  penalizuje barevné posuvy ve všech směrech stejně, může světelný zdroj s LED mít objektivně vypočítanou hodnotu  $R_a$  relativně nízkou, zatímco subjektivně je uživatelem hodnocen lépe než jiný světelný zdroj s vyšší hodnotou  $R_a$ . Tyto problémy se pokusily vyřešit metodologie výpočtu barevných ukazatelů IES TM-30-15, a na ni navazující CIE 224:2017, které naprosto přepracovaly způsob výpočtu indexu podání barev  $R_a$ . Mimo to je v této práci popsána pro porovnání i metoda hodnocení podání barev CQS.

Úkolem této práce je především tyto metody výpočtu ukazatelů podání barev porovnat, ale v menší míře i popsat teoretický základ, nutný k pochopení dané problematiky, stejně jako technické principy přístrojů, používaných k měření spekter, potřebných pro dané výpočty.

Následně je úkolem vypracování kalkulačky pro tabulkový editor MS Excel, která po vložení naměřeného spektra automaticky vypočítá všechny zmíněné ukazatele podání barev. Poté budou touto metodou určeny indexy podání barev pro vybraný vzorek naměřených spekter světelných zdrojů různých technologických principů, a výsledky budou následně tabelovány a zhodnoceny.

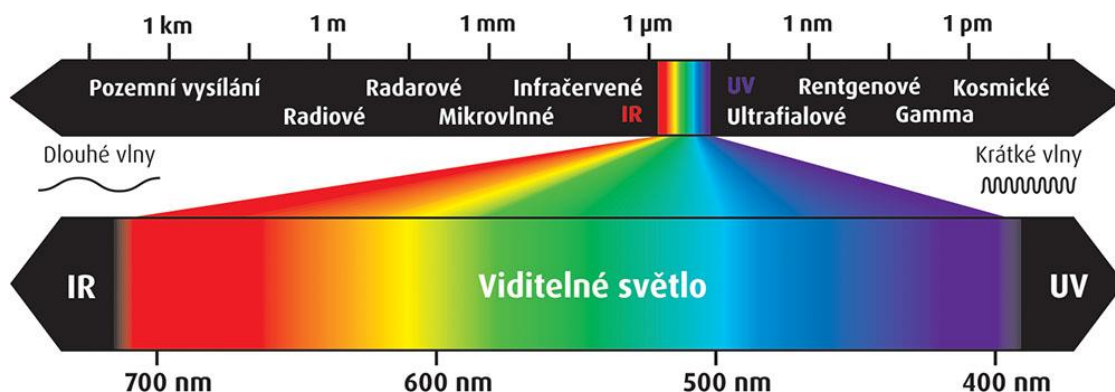
## 2 ZÁKLADY FOTOMETRIE

Fotometrie je věda, která se zabývá měřením světla, konkrétně zejména jeho intenzity nebo světelného toku. Název pochází z řeckého *photos* (světlo) a *metros* (měřit). Kromě elektrotechniky se používá také ve stavebnictví, nebo astronomii.

Základní fotometrické veličiny, jakožto i její užší vymezení, je uvedeno v kapitole 3.

### 2.1 Definice viditelného záření

Viditelné záření neboli světlo je elektromagnetické záření o vlnové délce přibližně 380–780 nm. Těmto vlnovým délkám odpovídají ve vakuu frekvence asi  $3,9 \cdot 10^{14}$ – $7,9 \cdot 10^{14}$  Hz. Kratší vlnovou délku (a vyšší frekvenci) než viditelné světlo má ultrafialové záření, delší vlnovou délku (a tím nižší frekvenci) má záření infračervené. Spektrum viditelného světla a přilehlá pásma jsou znázorněna v Obr. 2-1 níže.



Obr. 2-1: Spektrum viditelného světla [1].

Další z důležitých vlastností světla je jeho rychlost, která ve vakuu dosahuje velikosti  $299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$ , a která se značí  $c$ . V jiných optických prostředích je tato rychlost vždy nižší.

### 2.2 Vznik světla

V přírodě dochází ke vzniku světla především prostřednictvím termojaderné fúze v jádrech hvězd, nebo například hořením či atmosférickými výboji. V umělých světelných zdrojích dochází ke vzniku světla jedním ze čtyř způsobů:

- 1.) Tepelným buzením (inkandescencí) – žárovky a halogenové žárovky.
- 2.) Průchodem proudu polovodičem – LED.
- 3.) Excitací atomu v elektrickém výboji – všechny výbojky a zářivky.
- 4.) Luminiscencí pevných látek – např. luminofor u zářivek, nebo fosfor u LED [2].

Zatímco u prvních třech způsobů vzniku světla je zdrojem energie elektrický proud, u poslední kategorie je to světelné záření jiné vlnové délky – obvykle UV, nebo nearUV.

Každý z těchto mechanismů vzniku světla má svá omezení a své pro a proti – u tepelně buzených světelných zdrojů je to zejména nízká účinnost; u výbojek nespojitě spektrum a mnohdy nedostatečné barevné kvality světla, u světlo emitujících diod například relativně komplikovaná syntéza světla bílé barvy nebo problémy spojené s odvodem tepla.

I přes jejich nedostatky v jistých oblastech se v osvětlovací technice dostávají LED do popředí, zejména z důvodu jejich poměrně vysoké účinnosti, okamžitému startu, malých rozměrů, a také faktu, že neobsahují žádné toxické prvky.

## 3 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ PARAMETRY

Světlo, stejně jako každé jiné záření, lze měřit. Postupem času bylo definováno množství jednotek, popisující kvalitativní a kvantitativní vlastnosti světla, i metodologií, které se měřením světelných parametrů zabývají. Tato kapitola se zabývá popisem a definicí těchto veličin a přístupů k měření viditelného světla.

### 3.1 Měření světelných parametrů

Pro pochopení popisu parametrů viditelného světla je třeba zmínit a definovat několik důležitých veličin, které podkládají naše výsledky měření a domněnky a slouží jako formální podklad toho, že naše tvrzení jsou správná. S měřením světla se pojí množství pojmů, definic, a veličin, z nichž ty nejzákladnější jsou blíže představeny a rozebrány níže.

#### 3.1.1 Možné přístupy k měření viditelného světla

Viditelné světlo bylo již definováno výše, ovšem k jeho samotnému měření lze přistupovat několika možnými přístupy, které se odvíjejí především od účelu měření, případně od měřené veličiny.

##### 3.1.1.1 Radiometrie

Radiometrie se zabývá měřením elektromagnetického spektra obecně, není limitována na viditelné spektrum. Z tohoto důvodu používá odlišné jednotky, které jsou však přibližně ekvivalentní s jednotkami fotometrickými. Přesnější popis těchto ekvivalencí je uveden v Tab. 1. [4].

Tab.1.: Srovnání radiometrických a fotometrických veličin [7].

Radiometrická veličina	Symbol	Jednotka	Fotometrická veličina	Symbol	Jednotka
Zářivý tok	$\Phi_e$	W	Světelný tok	$\Phi$	lm
Zářivost	$I_e$	W*sr <sup>-1</sup>	Svítivost	$I$	cd
Ozářenost	$E_e$	W*m <sup>-2</sup>	Osvětlenost	$E$	lx
Záře	$L_e$	W*sr <sup>-1</sup> *m <sup>-2</sup>	Jas	$L$	cd*m <sup>-2</sup>

### 3.1.1.2 Fotometrie

Fotometrie je část optiky, která zkoumá světlo z hlediska jeho působení na lidské oko. Již z této definice vyplývá, že se jedná o odvětví, které se zabývá pouze viditelným spektrem, všechny ostatní části elektromagnetického spektra jsou pro ni nepodstatné. Mezi fotometrické veličiny patří například světelný tok, jas, osvětlenost, nebo svítivost, které jsou popsány níže [3].

### 3.1.1.3 Spektroradiometrie

Spektroradiometrie je obor, který se zabývá přesným měřením spektra viditelného světla, respektive stanovením spektrální hustoty intenzity vyzářování pro všechny příslušné vlnové délky. Z těchto měření je následně možné určit fotometrické i kolorimetrické veličiny pro daný případ světelného zdroje. Výstupem je funkce spektrální hustoty  $H_e = f(\lambda)$ .

### 3.1.1.4 Kolorimetrie

Kolorimetrie (pozn. neplést s metodou určování koncentrace rozpuštěné látky v roztoku) je vědecká disciplína, používaná ke kvantifikaci a popisu lidského barevného vnímání. Podobá se výše zmíněné spektroradiometrii ale spíše, než přesná spektrální distribuce daného záření, je zde podstatné vnímání daného světla lidským okem. Obvykle se zde využívá barevných prostorů CIE (popsaných níže), respektive hodnot barevných souřadnic v tomto prostoru.

## 3.2 Fotometrické veličiny

Popis a definice základních veličin, potřebných k fotometrickému popisu světla.

### 3.2.1 Světelný tok

Světelný tok je fotometrická veličina, popisující světelný výkon zdroje. Představuje zářivý tok zdroje, vyzářený za jednotku času, s respektováním spektrální citlivosti lidského oka.

Symbolem této veličiny je  $\Phi$  a její jednotkou je lumen, označovaný zkratkou lm. Pro monochromatické záření (záření o jediné vlnové délce) se vypočítá ze vztahu

$$\phi_\lambda = K_m * V(\lambda) * \phi_e(\lambda) \quad (1)$$

kde  $K_m$  je maximální světelná účinnost při fotopickém (denním) vidění, jež má hodnotu  $683 \text{ lmW}^{-1}$  (platí pro vlnovou délku 555 nm, na níž je lidské oko nejcitlivější),  $V(\lambda)$  je poměrná světelná účinnost viditelného záření pro danou vlnovou délku a  $\Phi_{e\lambda}$  je zářivý tok zdroje [2].

Pro světlo složené z více monochromatických záření se světelný tok určí následovně:

$$\phi = K_m * \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta\phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} \right) V(\lambda_i) \Delta\lambda_i \quad (2)$$

čili se provede sumace po všechny vlnové délky v daném světle obsažené.

Pro světlo se spojitým spektrem tento vztah přejde do integrálního tvaru:

$$\phi = K_m * \int_0^\infty \left( \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right) V(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

kde  $\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}$  je spektrální hustota zářivého toku [2].

### 3.2.2 Osvětlenost

Tato veličina, také nazývaná intenzitou osvětlení, je definovaná jako světelný tok, dopadající na jednotku plochy. Její jednotkou je lux se zkratkou lx a jejím symbolem je  $E$ . Osvětlenost je definována vztahem

$$E = \frac{d\phi}{dS} \quad (4)$$

Minimální úroveň osvětlenosti pro místnosti s pobytom osob je definována Evropskou normou pro osvětlení (ČSN EN 12464-1). Pro místnost s trvalým pobytom osob je toto minimum 200 lx [5, 2].

### 3.2.3 Svítivost

Jde o základní fotometrickou jednotku, která vyjadřuje rozdělení světelného toku do prostoru, jinými slovy udává, kolik světelného toku vyzáří světelný zdroj určitým směrem.

Jednotkou svítivosti, která je značena  $I$  je kandela se zkratkou cd, která je základní jednotkou SI, a odpovídá přibližně svítivosti plamene svíčky.

Svítivost je definována vztahem

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (5)$$

kde  $d\phi$  je světelný tok, který je vyzařovaný do prostorového úhlu  $d\Omega$  [2].

Prostorový úhel je definován jako velikost části prostoru vytvářené kuželovou plochou pomocí obsahu této plochy  $A$ , se středem ve vrcholu kuželové plochy s poloměrem  $r$ ; matematicky vyjádřeno

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (6)$$

### 3.2.4 Jas

Jas neboli luminance je fotometrická veličina, definovaná jako měrná svítivost. Je určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku. Jednotkou této veličiny se symbolem  $L$  je kandela na metr čtvereční se zkratkou  $\text{cdm}^{-2}$ . U výpočtu této veličiny závisí na poloze pozorovatele, směru a úhlu jeho pohledu, i na poloze či uspořádání světelného zdroje, nebo plochy, od níž se dané světlo odráží [2].

Přesná matematická definice jasu je poměrně komplikovaná a závisí na mnoha faktorech; principiálně lze tvrdit, že jas je určen podílem svítivosti  $dI$  elementární plošky světelného zdroje v daném směru a kolmého průmětu této plošky  $dS'$ , pozorované z tohoto směru [6].

$$L = \frac{dI}{dS'} \quad (7)$$

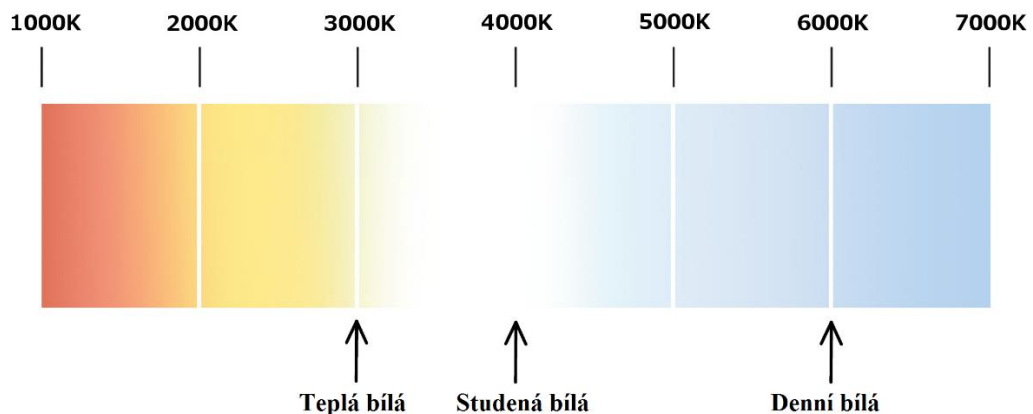
### 3.2.5 Barevné vlastnosti světla

Do této chvíle jsme se zabývali světlem a jeho měřením z hlediska kvantitativního, kde záleželo na množství světla a jeho distribuci. V osvětlovací technice je tento přístup ovšem pouze jednou částí úspěchu, jelikož záleží i na kvalitativním hledisku, kterým jsou zejména barevné vlastnosti daného světla čili jeho chromatičnost. Těmi jsou zejména index podání barev a náhradní teplota chromatičnosti.

#### 3.2.5.1 Náhradní teplota chromatičnosti

Tento parametr bílého světla označuje, jakou teplotu by mělo absolutně černé těleso, pokud by vyzařovalo stejný odstín bílého světla jako zkoumaný zdroj. Označuje se  $T_c$  a udává se v Kelvinech – zkratka K [2].

V běžné praxi se vyskytují zejména světelné zdroje, členící se do třech skupin odstínu bílé – teplá bílá ( $T_c = 2600\text{--}3300$  K), neutrální neboli denní bílá ( $T_c = 3300\text{--}4800$  K), a konečně studená bílá ( $T_c = 4800\text{--}6500$  K). Teplejší odstíny bílé jsou vhodné především pro osvětlování ložnic a obývacích pokojů, studenější například pro pracovny, chodby, nebo kuchyně [8]. Sluneční záření má přibližně 5800 K (záleží na denní době a počasí v daném místě).



Obr. 3-1: Škála možných teplot náhradní chromatičnosti pro bílé světlo [upraveno, 9].

Typické hodnoty teploty náhradní chromatičnosti jsou pro různé světelné zdroje uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2.: Typické hodnoty teploty náhradní chromatičnosti pro vybrané světelné zdroje [33,34].

Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti [K]
Plamen svíčky	1700–1800
Žárovka (< 500 W)	2500–2900
LED teplá bílá	2700
Halogenová žárovka	3200
Zářivky	2900–8000
LED neutrální bílá	4000
Slunce	5000–6800
LED studená bílá	5000–6500



### 3.2.5.2 Index podání barev

Barevný zrakový vjem, vnímaný lidským okem, je krom jiného poměrně silně ovlivňován spektrálním složením světla, osvětlující daný předmět nebo scénu. Pro určení vlivu světelného zdroje na barevné vnímání byl zaveden všeobecný index podání barev (CRI – color rendering index), který se obvykle značí zkratkou  $R_a$ . Toto číslo v rozsahu 0–100 vyjadřuje věrnost vnímání barev pod zkoumaným zdrojem a pod smluvně stanoveným referenčním zdrojem. CRI 0 odpovídá monochromatickému zdroji, v jehož světle není možné rozeznávat barvy, hodnotě 100 naopak dokonalé podání barev, shodné s referenčním zdrojem [2].

Pro světelné zdroje do teploty chromatičnosti 5000 K se jako referenční zdroj používá tepelný zdroj, odpovídající absolutně černému tělesu – tedy inkandescenční zdroj; pro světelné zdroje nad 5000 K se používá přesně definovaného denního světla, které odpovídá bílému standardu D (Dle definic CIE) [11].

K výpočtu CRI (i jiných ukazatelů podání barev) se používá standardizovaného vzorníku barev, od něhož odražené světlo se zkoumá spektrometrem. Přesný postup výpočtu CRI je uveden v kapitole 5.



Obr. 3-2: Porovnání stejného předmětu, osvětleného světlem s různým CRI a stejnou  $T_c$  [12].

Různé světelné zdroje mají pochopitelně různé hodnoty indexu podání barev. Hodnoty pro základní dostupné světelné zdroje jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3.: Typické hodnoty CRI pro vybrané světelné zdroje [35].

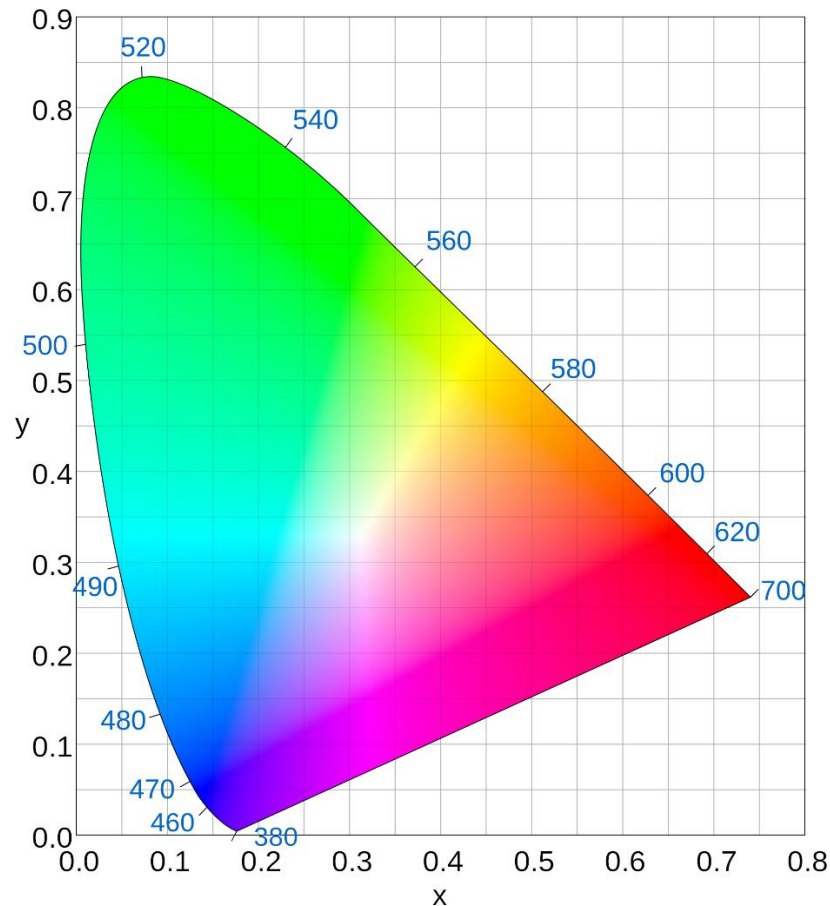
Světelný zdroj	CRI index
Nízkotlaká sodíková výbojka	0
Vysokotlaká sodíková výbojka	20
RGB LED	31
Rtuťová výbojka	43
Zářivka studená bílá	63–90
Halogenidová výbojka	64–90
LED studená bílá	70–85
LED teplá bílá (YAG)	81–85
Halogenová žárovka	100
Žárovka	100

### 3.2.6 Barevné prostory

Aby bylo možné přesně definovat množinu barev a barevných odstínů, použitelnou nejen pro účely osvětlovací techniky, byl komisí CIE v roce 1920 zaveden barevný prostor CIE RGB, který následně prošel poměrně složitým vývojem, jehož produktem bylo několik výsledných barevných prostorů, které si v této kapitole představíme.

#### 3.2.6.1 CIE XYZ / 1931

Jedná se o jeden z prvních matematicky definovaných barevných prostorů, vycházející z experimentálně stanoveného CIE RGB, který ale nebyl ještě příliš prakticky uplatnitelný. Tento barevný prostor byl ustanoven mezinárodní komisí pro osvětlování CIE v roce 1931.



Obr. 3-3: Barevný prostor CIE XYZ, modře vyznačené jsou vlnové délky příslušného monochromatického světla [13].

Pro objektivní popis barev světla byla Mezinárodní konferencí pro osvětlování CIE stanovena trichromatická soustava. Název trichromatická vyplývá z toho, že k popisu jakékoliv barvy stačí tři základní složky. Tato soustava je definována třemi barevnými členiteli, označenými  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ .

Nejdříve definujeme poměrnou spektrální hustotu jako

$$\varphi_e(\lambda) = \frac{\left(\frac{d\phi_e}{d\lambda}\right)_\lambda}{\left(\frac{d\phi_e}{d\lambda}\right)_{max}} \quad (8)$$

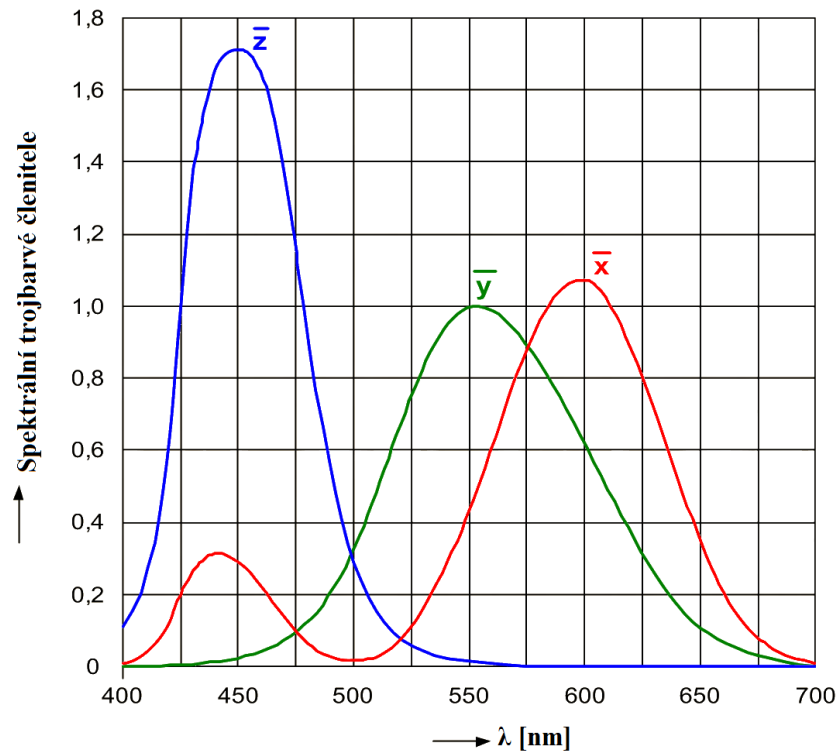
čili poměr spektrální hustoty, vztažené k maximální hodnotě spektrální hustoty zářivého toku.

Pomocí této funkce poměrné hustoty a barevných členitelů (které jsou zobrazené v Obr. 3-6) lze určit trichromatické složky X, Y, Z [2]:

$$X = \int_{380}^{780} \varphi_e(\lambda) * \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$$Y = \int_{380}^{780} \varphi_e(\lambda) * \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

$$Z = \int_{380}^{780} \varphi_e(\lambda) * \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$



Obr. 3-4: Barevné členitele  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  [10].

Pomocí těchto parametrů, kde složka Y zcela vyseparovala jas, lze určit souřadnice daného naměřeného odstínu světla [14, 15]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (12)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (13)$$

Doplňkovou hodnotu z pak určíme jako

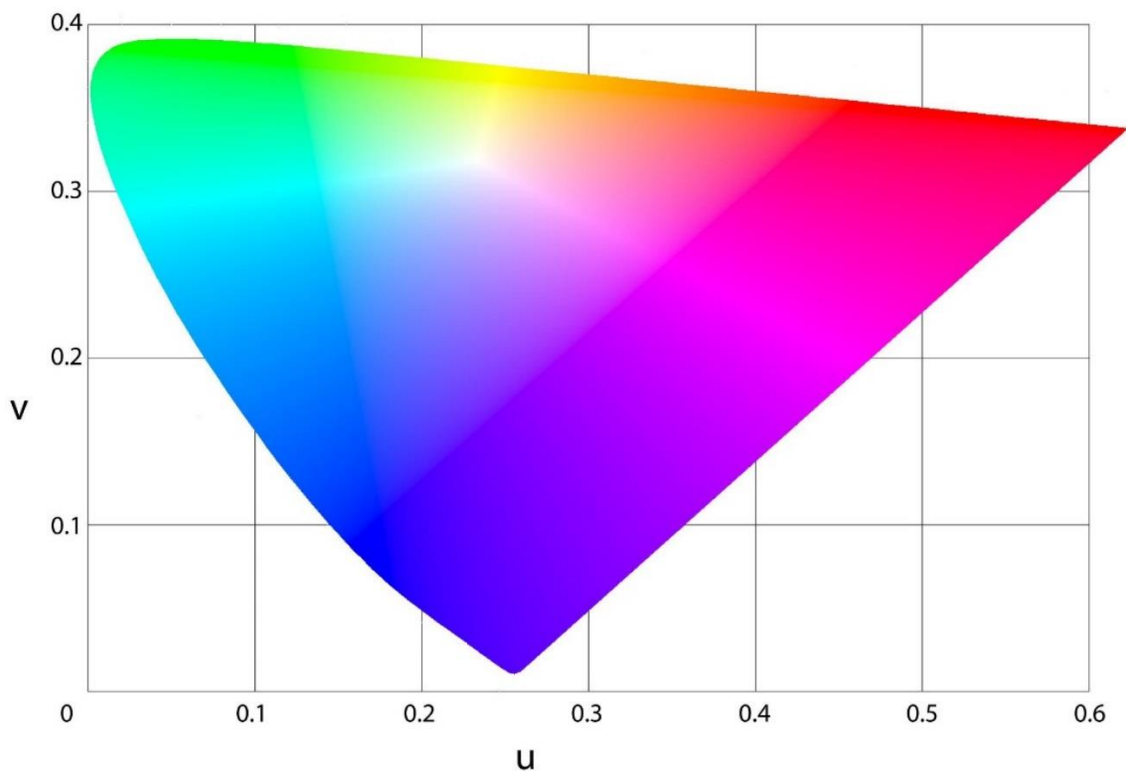
$$z = 1 - (x + y) \quad (14)$$

Barevný prostor, definovaný souřadnicemi  $x$  a  $y$  a parametrem jasu  $Y$  se nazývá CIE  $xyY$ .

Postupem času přestal barevný prostor CIE XYZ dostačovat kolorimetrickým požadavkům (zejména v zobrazování jemných barevných rozdílů a nedostatečné linearitě), a byly proto zavedeny nové barevné prostory z tohoto prostoru odvozené, které jsou popsány níže.

### 3.2.6.2 CIE UCS / 1960

Barevný prostor CIE UCS – Uniform chromacity space – byl ustanoven komisí CIE v roce 1960. Autorem tohoto návrhu byl David MacAdams [16]. Hlavním důvodem pro zavedení tohoto barevného prostoru byl fakt, že v prostoru CIE XYZ neodpovídají stejným lineárním vzdálenostem stejně subjektivně vnímané barvy [20]. V tomto barevném prostoru se nevyskytuje parametr jasu, jako v prostoru CIE XYZ. Barevný prostor UCS se používá především pro výpočet náhradní teploty chromatičnosti, jelikož v tomto prostoru jsou izotermy kolmé ke křivce vyzařování absolutně černého tělesa [17].

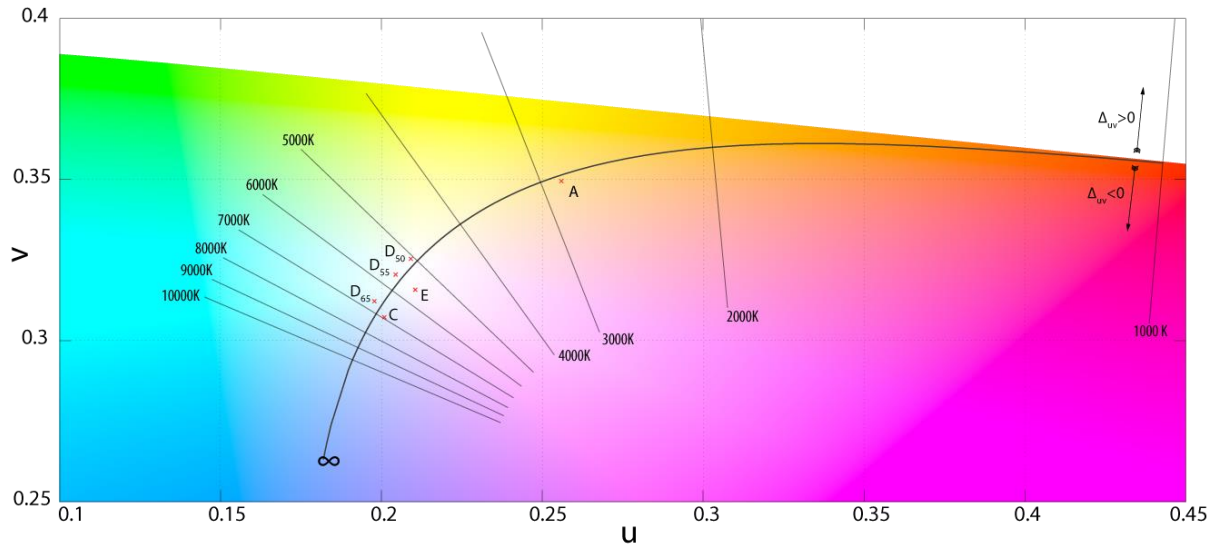


Obr. 3-5: Barevný prostor CIE UCS [18].

Pokud známe souřadnice bodu v prostoru CIE XYZ, respektive CIE xy, určíme souřadnice barevného odstínu v prostoru CIE UCS následovně:

$$u = \frac{5,5932x + 1,9116y}{12y - 1,882x + 2,9088} \quad (15)$$

$$v = \frac{7,8972y}{12y - 1,882x + 2,9088} \quad (16)$$



Obr. 3-6: Křivka vyzařování AČT a izotermy v prostoru CIE UCS [19].

### 3.2.6.3 CIE UVW / 1964

Tento barevný prostor je založen na barevném prostoru CIE UCS. Byl představen komisi CIE v roce 1964 Gunterem Wyszeckim. Hlavní výhodou tohoto barevného prostoru je možnost vypočítat barevné diference bez použití konstanty jasů – barevné rozdíly tu jsou rovny euklidovské vzdálenosti daných bodů. Souřadnice barevného tónu v tomto prostoru určíme dle následujících vztahů:

$$W^* = 25Y^{\frac{1}{3}} - 17 \quad (17)$$

$$U^* = 13W^*(u - u_0) \quad (18)$$

$$V^* = 13W^*(v - v_0) \quad (19)$$

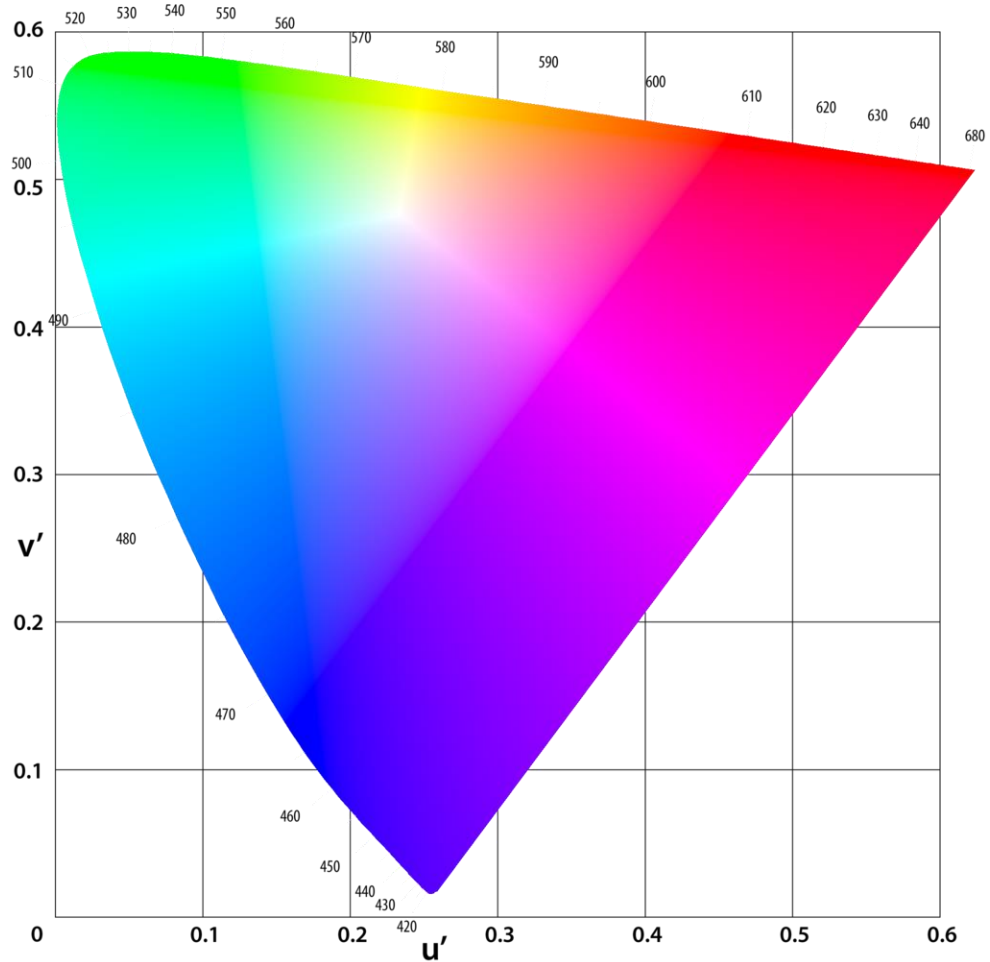
$u_0$  a  $v_0$  jsou souřadnice bílého bodu, a  $Y$  je hodnota jasů ze systému XYZ.  $U^*$  a  $V^*$  zde definují souřadnice barevného odstínu, a  $W^*$  má význam jasů.

Jak již bylo řečeno, hlavním důvodem pro zavedení tohoto barevného prostoru bylo zjednodušení výpočtu barevných odchylek, které se určí dle následujícího vztahu [21]:

$$\Delta E_{UVW} = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2} \quad (20)$$

### 3.2.6.4 CIE LUV / 1976

Tento barevný prostor, ustanovený roku 1976, je pokračováním snahy o linerizaci barevných rozdílů – tedy aby bylo dosaženo toho, že stejná vzdálenost bodů v barevném prostoru odpovídá podobné subjektivní změně vnímání daných barevných odstínů – jinými slovy se snaží dosáhnout perceptuální uniformity [22]. Tento barevný prostor vychází z barevného prostoru CIE UVW. Hlavní rozdíl spočívá v modifikované stupnici jasů, a ve vynásobení osy v konstantou 1,5.



Obr. 3-7: Barevný prostor CIE LUV [23].

Pro převod z barevného prostoru XYZ do prostoru LUV je nejprve třeba stanovit si referenční bílou o souřadnicích  $(X_r, Y_r, Z_r)$  [24]. Poté tuto bílou i barvu, jež převádíme, transformujeme do souřadnic  $u'v'$ :

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (21)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (22)$$

Pro referenční bílou platí tytéž vztahy, tedy:

$$u_r' = \frac{4X_r}{X_r + 15Y_r + 3Z_r} \quad (23)$$

$$v_r' = \frac{9Y_r}{X_r + 15Y_r + 3Z_r} \quad (24)$$

Poté si určíme parametr  $y_r$  jako

$$y_r = \frac{Y}{Y_t} \quad (25)$$

Pro hodnotu  $y_r > 0,008856$  určíme hodnotu  $L^*$  (reprezentující jas) dle vztahu

$$L^* = 116\sqrt[3]{y_r} - 16 \quad (26)$$

pro  $y_r < 0,008856$  pak jako

$$L^* = 903,3y_r \quad (27)$$

Konečně, souřadnice  $u, v$  budou

$$u = 13L^*(u' - u_r') \quad (28)$$

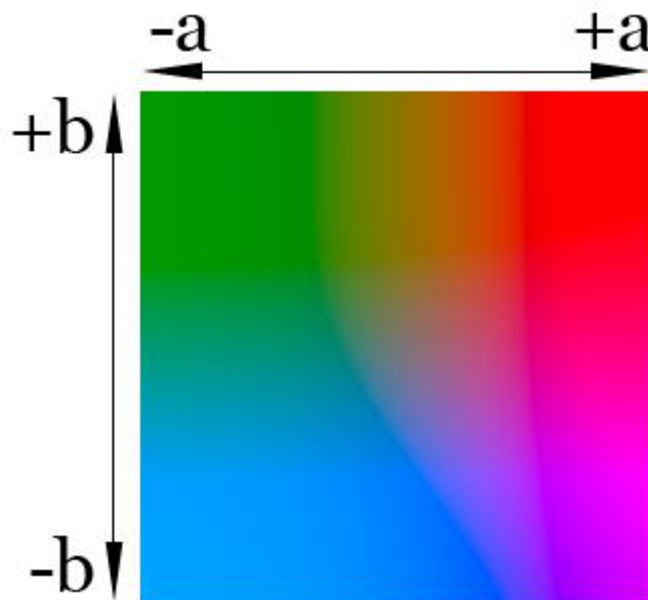
$$v = 13L^*(v' - v_r') \quad (29)$$

Typicky se hodnoty  $u$  a  $v$  nalézají v intervalu  $\langle -100; 100 \rangle$ , a hodnota  $L^*$  v rozmezí  $\langle 0; 100 \rangle$ .

### 3.2.6.5 CIE LAB

Tento barevný prostor byl definován taktéž roku 1976 (zároveň s barevným prostorem LUV, jelikož komise CIE nedošla ke shodě v názoru, který z těchto prostorů používat) [25]. Byl taktéž koncipován jako prostor zachovávající perceptuální uniformitu, a navíc měl být nezávislý na použitém zařízení.

Osa  $L$  v tomto prostoru má opět význam jasu nebo světelnosti, osy  $a$  a  $b$  pokrývají barevný odstín, kde osa  $a$  definuje barevné komponenty zelená – červená, a osa  $b$  komponenty modrá – žlutá.



Obr. 3-8: Barevný prostor LAB pro hodnotu  $L = 50 \%$  [26].

Pro vyvážení bíle na některých zařízeních se používá střední neutrální šedá, definovaná v tomto prostoru souřadnicemi  $(L, a, b) = (50, 0, 0)$ .

Pro převod barvy z prostoru XYZ do prostoru LAB opět potřebujeme referenční bílou s parametry  $(X_r, Y_r, Z_r)$  [27].

Nejdříve si určíme poměrné souřadnice jako

$$x_r = \frac{X}{X_r} \quad (30)$$

$$y_r = \frac{Y}{Y_r} \quad (31)$$

$$z_r = \frac{Z}{Z_r} \quad (32)$$

Poté si určíme parametry  $f_x, f_y, f_z$ :

$$f_x = \begin{cases} \sqrt[3]{x_r} & \text{pro } x_r > 0,008856 \\ \frac{903,3x_r + 16}{116} & \text{pro } x_r < 0,008856 \end{cases} \quad (33)$$

$$f_y = \begin{cases} \sqrt[3]{y_r} & \text{pro } y_r > 0,008856 \\ \frac{903,3y_r + 16}{116} & \text{pro } y_r < 0,008856 \end{cases} \quad (34)$$

$$f_z = \begin{cases} \sqrt[3]{z_r} & \text{pro } z_r > 0,008856 \\ \frac{903,3z_r + 16}{116} & \text{pro } z_r < 0,008856 \end{cases} \quad (35)$$

Souřadnice  $L, a, b$  poté určíme jako

$$L = 116f_y - 16 \quad (36)$$

$$a = 500(f_x - f_y) \quad (37)$$

$$b = 200(f_y - f_z) \quad (38)$$

Barevného prostoru LAB se často používá jako absolutního standardu pro všechny barevné prostory [28].



## 4 SPEKTRORADIOMETRICKÁ MĚŘENÍ

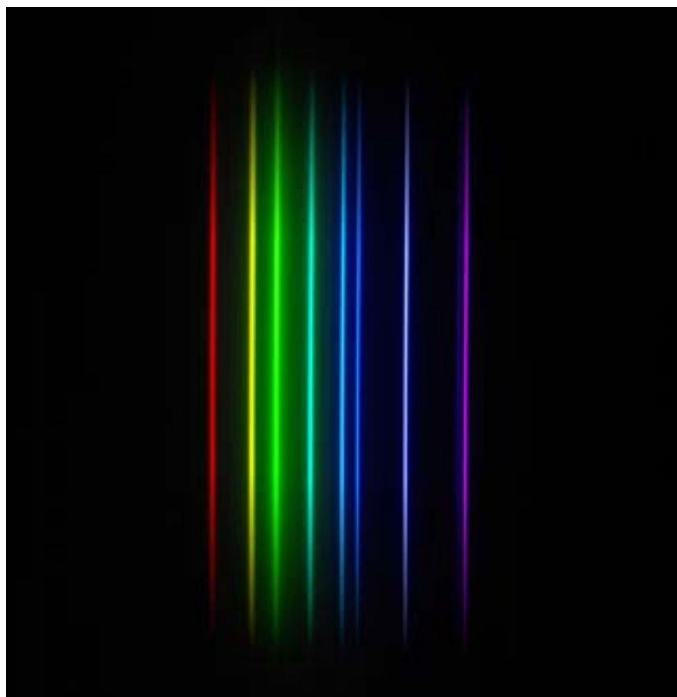
Spektroradiometrie obecně se zabývá měřením spektrální distribuce světelného výkonu. V této kapitole si přiblížíme její základy, a popíšeme základní dělení spektroradiometrů podle použité technologie, jakožto i jejich hlavní výhody a nevýhody.

### 4.1 Základy spektroradiometrie

Jak již bylo řečeno, spektroradiometrie je měření světelného výkonu, příslušného dané vlnové délce. Toto měření může být provedeno prakticky v libovolném rozsahu vlnových délek, my se ovšem budeme zabývat pouze měřením ve viditelném spektru – tedy v rozsahu 380–780 nm.

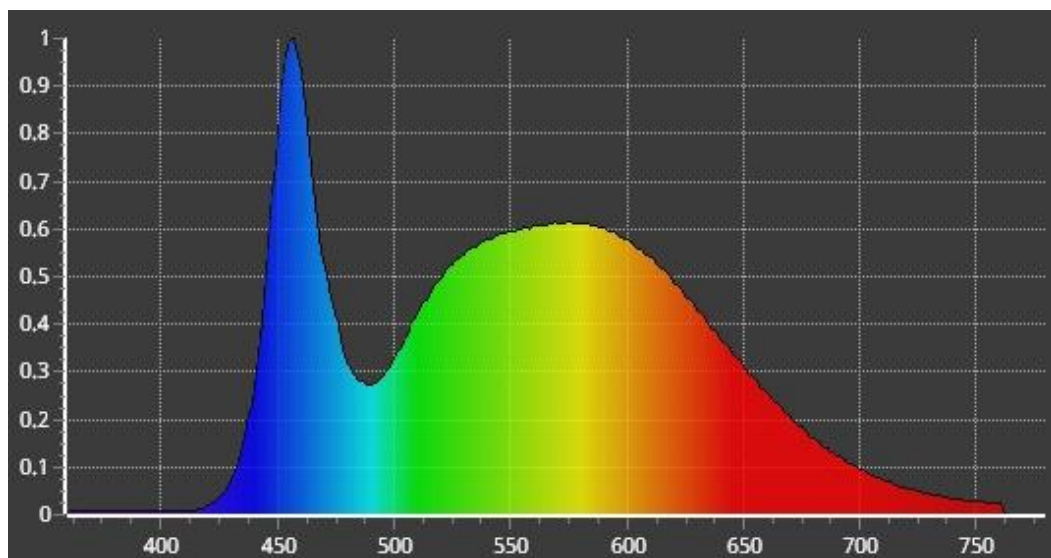
Ve spektroradiometrii mají význačnou pozici dvě jednotky – spektrální jas a spektrální osvětlenost [29]. Kromě těchto jednotek, popisujících přímo dané světlo, existují i jednotky, popisující vlastnosti materiálu, na který dané světlo dopadá – propustnost a odrazivost. I tyto jednotky mohou být vztaženy pro určité spektrum vlnových délek (integrální veličiny), nebo pro konkrétní vlnovou délku (spektrální veličiny) [30].

Základem všech spektroradiometrů je rozložení bílého světla na jednotlivé barevné složky. Toto se děje za pomoci monochromátoru. Příkladem takto rozloženého světla je Obr. 4-1.



Obr. 4-1: Nespojité spektrum rtuťové referenční výbojky [31].

Následně je toto spektrum buď vyfiltrováno tak, aby byla měřena pouze jediná vlnová délka, nebo rovnou měřeno. Jako detektor je možné použít pole fotodiod, CCD snímač, fotonásobič, nebo pro měření IR spektra tepelný detektor. Poté je takto naměřené spektrum dále zpracováváno a uchováváno, což již záleží na konkrétním přístroji, či aplikaci. Příkladem naměřeného spektra je obrázek 4-2.



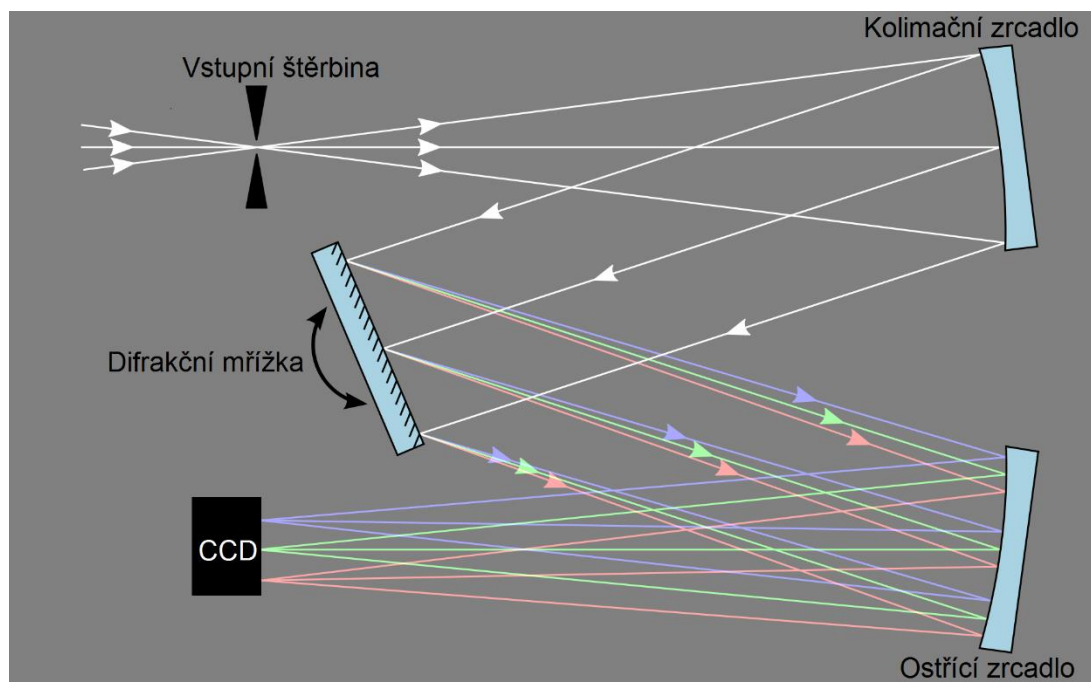
Obr. 4-2: Příklad naměřeného spektra pro LED s  $T_c = 5000\text{ K}$  a  $CRI \sim 80$ . Na ose  $X$  vlnová délka, na ose  $Y$  relativní spektrální zářivý tok [32].

## 4.2 Technologie spektroradiometrů

Různé aplikace spektroradiometrických měření vyžadují různé vlastnosti použitých přístrojů. Někdy je třeba velmi přesného měření, někdy je zase klíčová rychlost měřicího procesu. Nehledě na tyto priority se spektroradiometry liší také rozsahem vlnových délek, rozlišením, parametry difrakční mřížky, a množstvím jiných vlastností a funkcí. Z tohoto důvodu je na trhu dostupné relativně velké množství provedení spektroradiometrů, z nichž ty nejzákladnější si zde přiblížíme.

### 4.2.1 Přímě snímající spektroradiometry

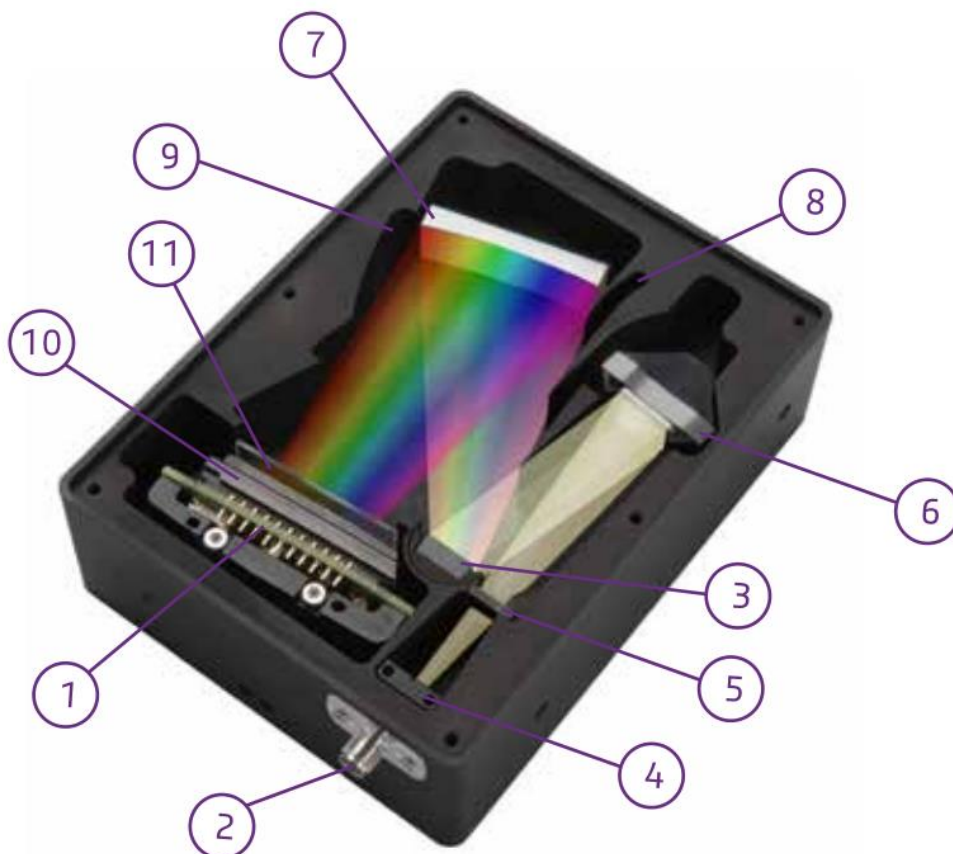
Tyto přístroje snímají celé spektrum dopadajícího světla naráz. Využívá se zde například monochromátor Czerny – Turner, popsáný na Obr. 4-3.



Obr. 4-3: Principiální schéma monochromátoru Czerny – Turner [upraveno, 37].

Tyto spektroradiometry vynikají zejména velkou rychlostí měření, jelikož ta je omezena prakticky pouze parametry CCD snímače – jedná se prakticky o desítky milisekund. Jejich další předností je také relativní jednoduchost v porovnání s jinými typy spektroradiometrů, stejně jako malé rozměry a hmotnost. Relativní nevýhodou je menší přesnost a spektrální pološířka, což ovšem pro určité aplikace nemusí být překážkou. Tyto vlastnosti je předurčují například k terénnímu měření spektrální distribuce, či orientačnímu laboratornímu měření [36].

Na Obr. 4-4 je uveden příklad spektroradiometru od firmy Avantes s přímým snímkováním celého spektra, využívající monochromátoru C-T.



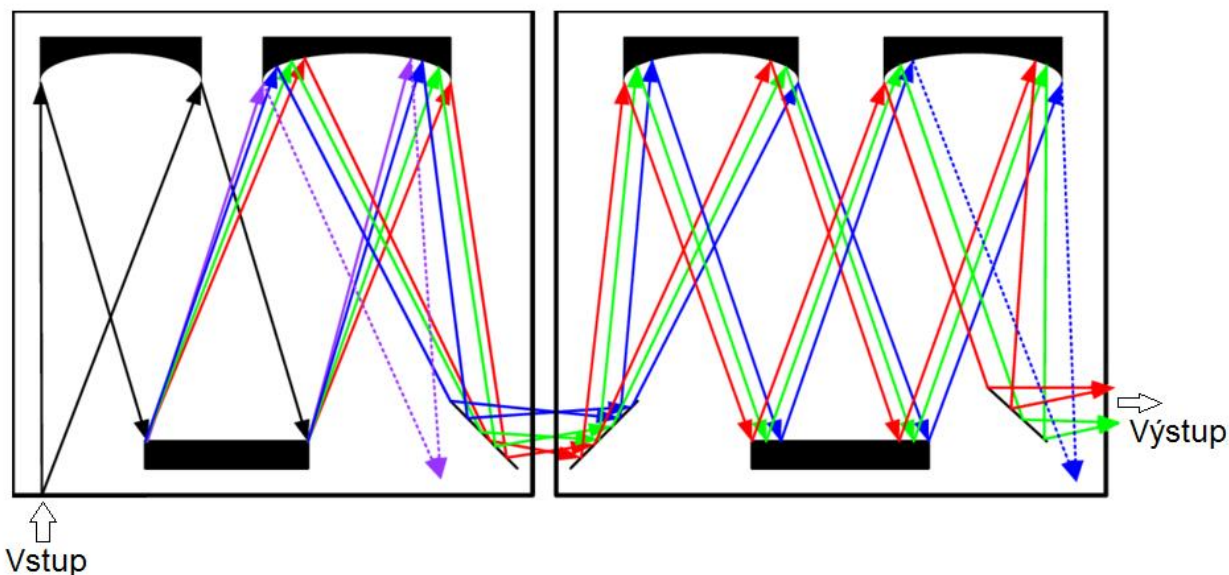
Optická lavice Avaspec-ULS: Symetrický Czerny - Turner monochromátor

- |                      |                      |
|----------------------|----------------------|
| 1. Detektor          | 7. Ostřicí zrcadlo   |
| 2. Konektor SMA      | 8. Světelná past CPC |
| 3. Difrakční mřížka  | 9. Světelná past CPC |
| 4. Štěrbina          | 10. DCL-UV/VIS       |
| 5. Druhá štěrbina    | 11. OSC-filtr        |
| 6. Kolimační zrcadlo |                      |

Obr. 4-4: Příklad uspořádání optické části přímo snímajícího spektroradiometru Avantes-ULS [upraveno, 36].

### 4.2.2 Spektroradiometry s dvojitým monochromátorem

I dobře navržená a zkonstruovaná optická část spektroradiometru s jednoduchým monochromátorem bude mít jistou část vnikajícího světla odraženou a rozptýlenou do prostoru optické lavice mimo požadovanou trasu paprsku. Pro určité aplikace je třeba zamezit vnikání i malého množství rozptýleného a odraženého světla na snímač, čehož dosáhneme použitím dvojitého monochromátoru [38]. Schéma tohoto zařízení je uvedeno na Obr. 4-5.



Obr. 4-5: Zjednodušené schéma dvojitého monochromátoru [upraveno, 39].

Mezi výhody spektroradiometrů s tímto optickým systémem patří zejména zamezení vnikání rušivého rozptýleného světla na snímač, a tedy zvětšení odstupu signálu od šumu (řádově se jedná o miliontiny špičkové měřené hodnoty), nevýhodou je pomalejší měření celého spektra (až řádově hodiny), větší složitost celého zařízení, a také o něco snížená citlivost, což lze ale řešit například DCL čočkou [40].

Prvním spektroradiometrem s dvojitým monochromátorem, uvedeným na trh, byl výrobek britské firmy Irradian s typovým označením SR9910, který se začal prodávat roku 1990 [41].

### 4.3 Porovnání dostupných spektroradiometrů

Posláním této kapitoly je alespoň částečně zmapovat současný (2018) trh se spektroradiometry, a porovnat některé jejich klíčové parametry.

Předními výrobci těchto přístrojů jsou v dnešní době zejména firmy Avantes, Konica Minolta Sensing, Instrument Systems, nebo International Light Technologies. Porovnání je zaměřeno zejména na laboratorní přístroje, přístroje specializované pro terénní měření v přehledu nejsou zahrnuty.

Tab. 4.: Porovnání vybraných spektroradiometrů [42–49].

Avantes – AvaSpec			
		ULS2048CL-EVO	HS2048XL-EVO
Rozsah vlnových délek	$\lambda$ [nm]	200 - 1100	200 - 1160
Rozlišení	$r$ [nm]	0,06 - 20	1,00 - 20
Optická lavice	-	Czerny - Turner	Asymetrická
Rozptýlené světlo	$SL$ [%]	0.19-1.0	< 1
Detektor	-	Lineární CMOS	Back-thinned CCD
Odstup signál/šum	$S/N$ [-]	300:1	525:1
Integrační čas	$t$	30 $\mu$ s - 59 s	2 $\mu$ s - 600 s
Konica – Minolta			
		CS-1000S	CS-2000
Rozsah vlnových délek	$\lambda$ [nm]	380 - 780	380 - 780
Rozlišení	$r$ [nm]	0,9	0,9
Optická lavice	-	"polychromátor"	"polychromátor"
Rozptýlené světlo	$SL$ [%]	NA	"vyjíměčně málo"
Detektor	-	Pole fotodiod	Pole fotodiod (512)
Odstup signál/šum	$S/N$ [-]	NA	NA
Integrační čas	$t$	40 ms - 60 s	5 ms - 120 s
Instrument Systems			
		CAS 140CT - 231	CAS 120
Rozsah vlnových délek	$\lambda$ [nm]	360 - 830	360 - 830
Rozlišení	$r$ [nm]	2,2	2,2
Optická lavice	-	Crossed Czerny - Turner	Crossed Czerny - Turner
Rozptýlené světlo	$SL$ [%]	0,01	0,05
Detektor	-	Back-thinned CCD	Back-thinned CCD
Odstup signál/šum	$S/N$ [-]	250:1	40:1
Integrační čas	$t$	10 ms - 65 s	4 ms - 20 s
International Light Technologies			
		ILT950	ILT560
Rozsah vlnových délek	$\lambda$ [nm]	200 - 1100	350 - 880
Rozlišení	$r$ [nm]	1,4	1,2
Optická lavice	-	Czerny - Turner	Czerny - Turner
Rozptýlené světlo	$SL$ [%]	< 0.3	< 0.2
Detektor	-	Lineární CMOS	Lineární CCD
Odstup signál/šum	$S/N$ [-]	300:1	220:1
Integrační čas	$t$	30 $\mu$ s - 59 s	1,1 ms - 60 s

Vlastnosti spektroradiometrů jsou do velké míry ovlivněny použitou difrakční mřížkou (větší měrný počet vrypů znamená větší rozlišení, ale relativně užší celkový rozsah), a také šířkou vstupní štěrbin (spektroradiometr s užší štěrbinou bude mít větší rozlišení).

Jelikož mřížku volíme podle potřebného měřeného spektra (zařízení s kratší vlnovou délkou je nutno rozkládat na mřížce s větším počtem vrypů), není možné jednoduše porovnat všechny možné kombinace měřících přístrojů a mřížek [50].

## 5 VÝPOČET UKAZATELŮ VĚRNOSTI PODÁNÍ BAREV

V této kapitole je popsán postup výpočtu čtyř ukazatelů podání barev světelného zdroje, a to klasický CRI index  $R_a$ , stupnici kvality barev CQS, index podání barev dle IES TM-30-15, a index věrnosti podání barev CIE 2017.

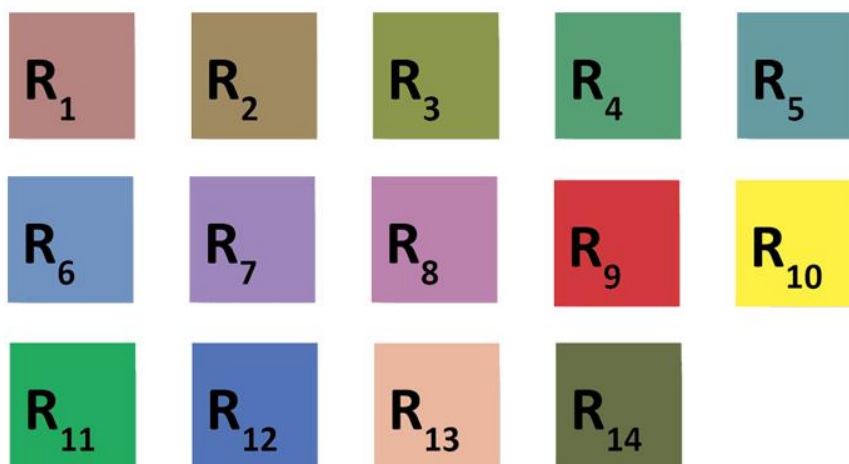
### 5.1 Index podání barev $R_a$

Nejstarším indexem podání barev je  $R_a$  index, který byl zaveden v šedesátých letech 20. století komisí CIE. Postupem času se z indexu  $R_a$  vyvinul index  $R_{9a}$  a posléze i  $R_{96a}$ . Tyto změny byly způsobeny přidáním dalších barevných vzorků do testovací palety (viz Tab. 5.).

Tab. 5.: Popis barevných vzorků pro výpočet indexů podání barev dle CIE 013.3-1995 [51, 52].

Číslo vzorku	Přibližný zápis odstínu dle Munsella	Vzhled barvy za denního světla	$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$
1	7,5 R 6/4	Světle šedavě červená	ANO	ANO	ANO
2	5 Y 6/4	Tmavě šedavě žlutá			
3	5 GY 6/8	Sytě žlutozelená			
4	2,5 G 6/6	Středně žlutavě zelená			
5	10 BG 6/4	Světle modrozelená			
6	5 PB 6/8	Světle modrá			
7	2,5 P 6/8	Světle fialová			
8	10 P 6/8	Světle načervenalé fialová			
9	4,5 R 4/13	Sytě červená	NE	NE	
10	5 Y 8/10	Sytě žlutá			
11	4,5 G 5/8	Sytě zelená			
12	3 PB 3/11	Sytě modrá			
13	5 YR 8/4	Světle nažloutle růžová			
14	5 GY 4/4	Středně olivově zelená			

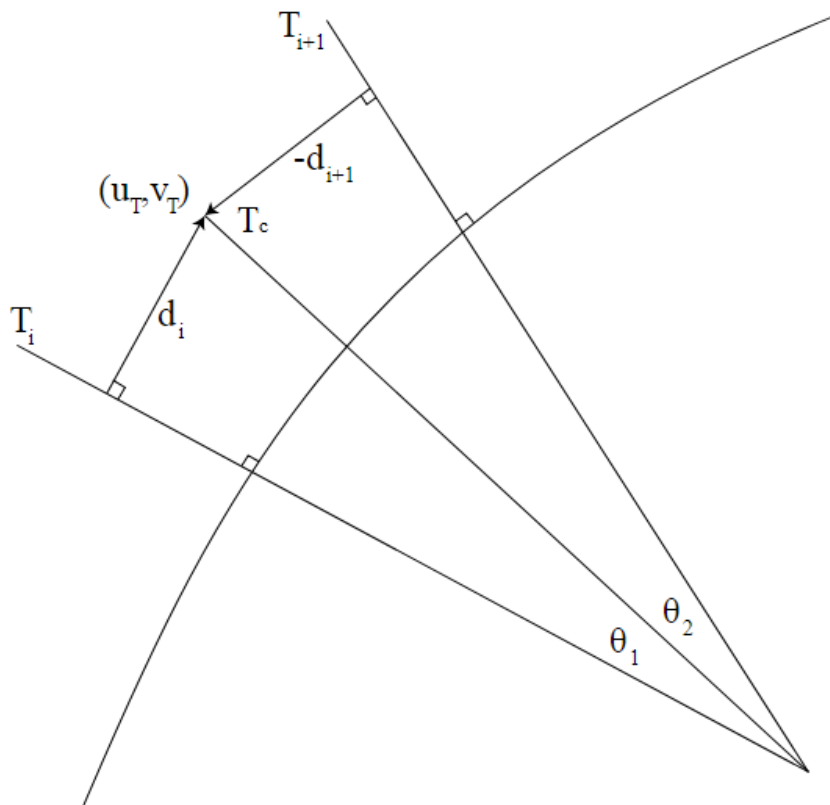
Popis dle Munsella je systém popisu barev, zavedený roku 1915 prof. Albertem Henry Munsellem. Formát tohoto zápisu je [H V/C], kde  $H$  značí odstín,  $V$  světlost, a  $C$  čistotu, více viz Munsellův atlas barev [53].



Obr. 5-1: Barevné vzorky, používané pro určení indexů  $R_a$ ,  $R_{9a}$ ,  $R_{96a}$  [54].



Aby bylo možné určit index podání barev  $R_a$ , musíme nejdříve zvolit referenční zdroj. Volba referenčního zdroje závisí na náhradní teplotě chromatičnosti zkoumaného zdroje, tudíž první krok pro výpočet  $R_a$  indexu je určení náhradní teploty chromatičnosti zkoumaného zdroje, což je obvykle nejvhodnější provést Robertsonovou (1968) metodou výpočtu CCT. Princip této metody je zobrazen na Obr. 5-2 níže.



Obr. 5-2: Princip výpočtu CCT pomocí Robertsonovy metody [upraveno, 56].

Nejprve si spektrometrickým měřením světla zkoumaného zdroje určíme jeho spektrum, které následně skalárními součiny s  $2^\circ$  funkcemi trichromatických členitelů CIE 1931 převedeme do souřadnic dle CIE 1931. Poté normujeme toto naměřené spektrum na hodnotu  $Y = 100$ , a opět si určíme jeho souřadnice  $[X, Y, Z]$ . Užitím vztahů (12) a (13) tyto souřadnice převedeme do prostoru CIE  $xyY$ . Následně provedeme transformaci do barevného prostoru CIE UCS/1960 dle MacAdama jako

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad (39)$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad (40)$$

Jelikož výpočet CCT dle Robertsona využívá interpolace vzdálenosti mezi izotermami (viz Obr. 5-2), musíme tyto izotermy nějak definovat. K tomu slouží Tab. 6.

Tab. 6.: Parametry izoterm pro výpočet CCT [57].

$T_c$ [K]	$u_t$	$v_t$	$t_T(u,v)$
$\infty$	0,18006	0,26352	-0,24341
100000,00	0,18066	0,26589	-0,25479
50000,00	0,18133	0,26846	-0,26876
33333,33	0,18208	0,27119	-0,28539
25000,00	0,18293	0,27407	-0,30470
20000,00	0,18388	0,27709	-0,32675
16666,67	0,18494	0,28021	-0,35156
14285,71	0,18611	0,28342	-0,37915
12500,00	0,18740	0,28668	-0,40955
11111,11	0,18880	0,28997	-0,44278
10000,00	0,19032	0,29326	-0,47888
8000,00	0,19462	0,30141	-0,58204
6666,67	0,19962	0,30921	-0,70471
5714,29	0,20525	0,31647	-0,84901
5000,00	0,21142	0,32312	-1,01820
4444,44	0,21807	0,32909	-1,21680
4000,00	0,22511	0,33439	-1,45120
3636,36	0,23247	0,33904	-1,72980
3333,33	0,24010	0,34308	-2,06370
3076,92	0,24792	0,34655	-2,46810
2857,14	0,25591	0,34951	-2,96410
2666,67	0,26400	0,35200	-3,58140
2500,00	0,27218	0,35407	-4,36330
2352,94	0,28039	0,35577	-5,37620
2222,22	0,28863	0,35714	-6,72620
2105,26	0,29685	0,35823	-8,59550
2000,00	0,30505	0,35907	-11,32400
1904,76	0,31320	0,35968	-15,62800
1818,18	0,32129	0,36011	-23,32500
1739,13	0,32931	0,36038	-40,77000
1666,67	0,33724	0,36051	-116,45000

V této tabulce označuje první sloupec teplotu chromatičnosti dané izotermu, druhý a třetí sloupec chromatické souřadnice dané izotermu v prostoru CIE UCS a čtvrtý sloupec je směrnice dané izotermu.

Mějme chromatické souřadnice zkoumaného světelného zdroje v prostoru CIE 1960  $[u, v]$ . Pro každý řádek tabulky 6 si určíme vzdálenost naměřeného bodu od dané izotermu jako

$$d_i = \frac{(v - v_t) - t_T * (u - u_T)}{\sqrt{1 + t_T^2}} \quad (41)$$

Pokud leží naměřený bod  $[u, v]$  mezi  $i$  a  $i+1$  izotermou, bude poměr  $d_i/d_{i+1}$  záporný [57].



Náhradní teplota chromatičnosti zkoumaného světelného zdroje se určí následovně:

$$T_C = \left[ \frac{1}{T_i} + \frac{\theta_1}{\theta_1 + \theta_2} * \left( \frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1} \quad (42)$$

Jelikož úhly  $\theta_1$  a  $\theta_2$  jsou pro sousední izotermy velmi malé, dopustíme se pouze malé chyby, pokud budeme tvrdit, že  $\theta_1/\theta_2 = \sin\theta_1/\sin\theta_2$ . Díky této implikaci můžeme rovnici (42) upravit do tvaru

$$T_C = \left[ \frac{1}{T_i} + \frac{d_i}{d_i - d_{i+1}} * \left( \frac{1}{T_{i+1}} - \frac{1}{T_i} \right) \right]^{-1} \quad (43)$$

Pokud má světlo zkoumaného světelného zdroje náhradní teplotu chromatičnosti vyšší než 5000 K, použijeme jako referenční světelný zdroj normalizované sluneční záření D, v opačném případě bude referenčním zdrojem Planckův tepelný zářič.

Následně provedeme kontrolu, zde má světlo referenčního zářiče dostatečně podobnou chromatičnost jako zkoumaný zdroj. Naměříme souřadnice  $[X, Y, Z]$  pro testovaný zdroj,  $[X_r, Y_r, Z_r]$  pro referenční zdroj, a použitím vztahů (21) – (29) je přetransformujeme do barevného prostoru CIE 1976/Luv. Z těchto hodnot si určíme odchylku chromatičnosti  $\Delta_C$  dle vztahu

$$\Delta_C = \sqrt{(u - u_r)^2 + (v - v_r)^2} < 5,4 * 10^{-3} K \quad (44)$$

Pokud je tato odchylka menší než uvedených  $5,4 * 10^{-3} K$  (odpovídá cca  $15 MK^{-1}$ ), můžeme přistoupit k výpočtu  $R_a$ . V opačném případě je kalkulaci možno provést také, ovšem výsledek nebude příliš přesný [51].

Po tomto ověření můžeme přistoupit k výpočtu spekter odražených od zkušebních barevných vzorků ( $T_i$ ,  $i = 1 \dots 8$  pro  $R_a$ ,  $i = 1 \dots 9$  pro  $R_{9a}$ ,  $i = 1 \dots 14$  pro  $R_{96a}$ ), a to jak pro zkoumaný světelný zdroj, tak referenční světelný zdroj. Toto provedeme prostým vynásobením daného spektra se spektrální odrazivostí každého ze vzorků. Poté z takto vypočítaných spekter určíme souřadnice  $[X_i, Y_i, Z_i]$  a  $[X_{r,i}, Y_{r,i}, Z_{r,i}]$ . Tyto naměřené hodnoty následně převedeme do souřadnic chromatičnosti  $[x_i, y_i]$  a  $[x_{r,i}, y_{r,i}]$ , opět použitím vztahů (12) a (13) [51].

Takto vypočítané souřadnice chromatičnosti pro referenční i zkoumaný zdroj přepočítáme do barevného prostoru CIE 1960/UCS pomocí vztahů (39) a (40).

Dalším krokem je korekce adaptivního barevného posunu. Tento krok je nutný z důvodu různé chromatické adaptace pod zkoumaným a referenčním světelným zdrojem. Pro tuto korekci použijeme Von Kriessovu transformaci.

Nejprve si určíme funkce  $c$ ,  $d$  nejprve pro samotné světlo zkoumaného světelného zdroje ( $c$ ,  $d$ ), poté pro světlo referenčního světelného zdroje ( $c_r$ ,  $d_r$ ), a nakonec pro světlo odražené od  $i$ -tého vzorku, osvětleného zkoumaným zdrojem ( $c_i$ ,  $d_i$ ) [51].

Tyto korekční funkce pro všechny zmiňované případy určíme pomocí vztahů

$$c = \frac{1}{v} * (4 - u - 10 * v) \quad (45)$$

$$d = \frac{1}{v} * (1,708 * v + 0,404 - 1,481 * u) \quad (46)$$

Poté, co máme určeny tyto koeficienty, můžeme přistoupit k samotné korekci barevných souřadnic dle vztahů

$$u'_i = \frac{10,872 + 0,404 * \frac{c_r}{c} * c_i - 4 * \frac{d_r}{d} * d_i}{16,518 + 1,481 * \frac{c_r}{c} * c_i - \frac{d_r}{d} * d_i} \quad (47)$$

$$v'_i = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 * \frac{c_r}{c} * c_i - \frac{d_r}{d} * d_i} \quad (48)$$

Nyní provedeme transformaci do barevného prostoru CIE 1964. Pro referenční světelný zdroj platí

$$W^*_{r,i} = 25 * \sqrt[3]{Y_{r,i}} - 17 \quad (49)$$

$$U^*_{r,i} = 13 * W^*_{r,i} * (u_{r,i} - u_r) \quad (50)$$

$$V^*_{r,i} = 13 * W^*_{r,i} * (v_{r,i} - v_r) \quad (51)$$

Stejným způsobem provedeme i transformaci pro zkoumaný zdroj, s jediným rozdílem, že budeme uvažovat korigované hodnoty souřadnic, tedy

$$W^*_i = 25 * \sqrt[3]{Y_i} - 17 \quad (52)$$

$$U^*_i = 13 * W^*_i * (u'_i - u') \quad (53)$$

$$V^*_i = 13 * W^*_i * (v'_i - v') \quad (54)$$

Pomocí takto transformovaných souřadnic je již možné přistoupit k výpočtu barevných diferencí pro každý barevný vzorek, což se provede pomocí vztahu

$$\Delta E_i = \sqrt{(U^*_{r,i} - U^*_i)^2 + (V^*_{r,i} - V^*_i)^2 + (W^*_{r,i} - W^*_i)^2} \quad (55)$$

Z takto určených barevných diferencí je již možno určit speciální index podání barev  $R_i$  pro každý vzorek, a to jako

$$R_i = 100 - 4,6 * \Delta E_i \quad (56)$$

Nakonec určíme celkový index podání barev  $R_a$  jako aritmetický průměr prvních osmi speciálních indexů  $R_i$ , tedy

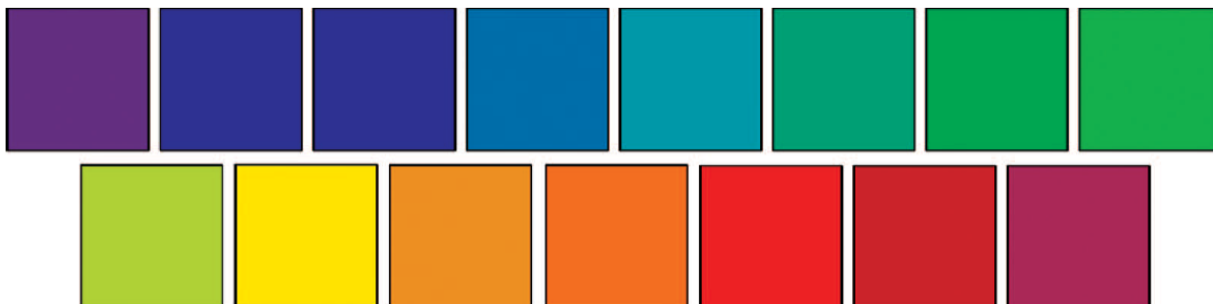
$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (57)$$

Průměrováním prvních devíti speciálních indexů  $R_i$  obdržíme index podání barev  $R_{9a}$  a všech čtrnácti index  $R_{96a}$ . V poslední revizi této normy je také obsažen patnáctý barevný vzorek, reprezentující standardizovanou pokožku průměrného asijského muže. Jeho zahrnutím do výpočtu obdržíme index podání barev  $R_{all}$ .

## 5.2 Color Quality Scale – CQS

CQS, česky snad „stupnice kvality barev“, je další z alternativ k indexu podání barev CRI. Tato metodika byla vyvinuta pracovníky amerického Národního institutu pro standardy a technologie (NIST) mezi lety 2005 a 2010. Tento ukazatel podání barev se v některých ohledech podobá CIE 013.3–1995 i IES TM-30-15. Zásadní rozdíly proti CRI jsou zejména [64]:

- Nová sada barevných vzorků.



Obr. 5-3: Barevné vzorky, používané pro určení indexu podání barev CQS [65].

Zatímco pro výpočet  $R_a$  indexu jsou použity barevné vzorky s nízkou sytostí barev, pro CQS jsou použity barevné vzorky velmi syté. Tyto barevné vzorky byly opět vybrány z Munsellova atlasu barev.

- Jiný barevný prostor

Barevný prostor CIE 1964 / UVW byl nahrazen prostorem CIE 1976 / LUV. Důvodem této změny byl zejména fakt, že v CIE UVW jsou barevné diference velmi nerovnoměrné – v oblasti červené barvy jsou i malé barevné diference velmi znatelné, zatímco v oblasti modré a žluté barvy by stejná diference byla jen těžko zaznamenatelná.

- Saturační faktor

Také nazývaný faktorem sytosti barev. Jedním z problémů CRI bylo to, že penalizoval světelné zdroje za zvýšení sytosti barev, byť by byly lidským okem vnímány jako příjemné a žádoucí. Stejný posun sytosti do vyšších hodnot hodnotu CQS pro světelný zdroj nesníží, k tomu by došlo až při posunu barevného tónu, světlosti, nebo při snížení sytosti barev.

- CCT faktor

Při výpočtu CRI má referenční světelný zdroj teplotu chromatičnosti shodnou se zdrojem testovaným. Skutečnost je ovšem taková, že příliš nízké či vysoké teploty chromatičnosti působí na vnímání barev negativně. Proto byl v CQS zaveden faktor teploty chromatičnosti, který penalizuje světelné zdroje, jejichž náhradní teplota chromatičnosti leží mimo rozsah 3500–6500 K. Adekvátně se snižuje i plocha pro barevný gamut, a to tím více, čím dále od ideálního rozsahu teplot chromatičnosti se testovaný světelný zdroj nalézá – nejhůře jsou na tom světelné zdroje s teplotou chromatičnosti pod 2000 K.

- Použití kvadratického průměru pro celkový index podání barev

Při výpočtu celkové barevné diference  $\Delta E$  byl pro CRI použit jednoduchý aritmetický průměr barevných diferencí jednotlivých barevných vzorků. Následkem toho bylo, že pokud vyšla jedna z barevných diferencí extrémně velká, na jejich průměru se to příliš neprojevovalo. Z tohoto důvodu je pro CQS počítána průměrná barevná diference jako kvadratický průměr jednotlivých barevných diferencí všech testovacích vzorků.

- Upravená škálovací konstanta

Pro výpočet speciálních indexů podání barev z barevných diferencí dle CIE 013.3 byly jednotlivé barevné diference násobeny faktorem 4,6 (vztah (57)). Pro potřeby výpočtu CQS byla tato konstanta změněna na hodnotu 3,1 (aby byly výsledky konzistentní a srovnatelné s  $R_a$ ).

- Úprava rozsahu možných výsledků

Aby nedocházelo k tomu, že ukazatel podání barev vyjde záporně, bylo v CQS zavedeno škálování výsledků dle vztahu (117).

Při výpočtu indexu podání barev CQS postupujeme následně [65]:

Nejprve si určíme náhradní teplotu chromatičnosti zkoumaného světelného zdroje Robertsonovou metodou, uvedenou výše. Poté můžeme přejít k výpočtu spektra referenčního zdroje. Zde platí všechny zákonitosti a vztahy, které jsou zmíněny v kapitole o CRI – předěl mezi absolutně černým zářičem a denním světlem D je opět na hodnotě  $T_c = 5000$  K.

Následně provedeme výpočet spekter pro světlo odražené od barevných vzorků, a tyto spektra následně převedeme do souřadnic dle CIE 1931, a to jak pro testovaný  $[X_{i,t}, Y_{i,t}, Z_{i,t}]$ , tak pro referenční  $[X_{i,r}, Y_{i,r}, Z_{i,r}]$  světelný zdroj, opět shodně s metodikou pro výpočet CRI. Všechny tyto spektra a souřadnice jsou poté normovány na hodnotu  $Y = 100$ .

Dalším krokem je chromatická adaptace. Není zde použita Von Kriessova transformace jako v případě CRI, nýbrž metoda CMCCAT2000. Samotná spektra testovaného a referenčního zdroje jsou převedena obvyklou metodou do souřadnic XYZ a normována na hodnotu  $Y = 100$ , čímž dostaneme souřadnice  $[X_{w,t}, Y_{w,t}, Z_{w,t}]$  a  $[X_{w,r}, Y_{w,r}, Z_{w,r}]$ . Poté jsou všechny barevné souřadnice transformovány do hodnot R, G, B jako

$$\begin{pmatrix} R_{i,t} \\ G_{i,t} \\ B_{i,t} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{i,t} \\ Y_{i,t} \\ Z_{i,t} \end{pmatrix} \quad (58)$$

$$\begin{pmatrix} R_{w,r} \\ G_{w,r} \\ B_{w,r} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{w,r} \\ Y_{w,r} \\ Z_{w,r} \end{pmatrix} \quad (59)$$

$$\begin{pmatrix} R_{w,t} \\ G_{w,t} \\ B_{w,t} \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_{w,t} \\ Y_{w,t} \\ Z_{w,t} \end{pmatrix} \quad (60)$$

kde

$$M = \begin{pmatrix} 0,7982 & 0,3389 & -0,1371 \\ -0,5918 & 1,5512 & 0,0406 \\ 0,0008 & 0,0239 & 0,9753 \end{pmatrix}$$

Poté je možné vypočítat korespondující hodnoty  $[R_{i,t,c}, G_{i,t,c}, B_{i,t,c}]$  pro všechny barevné vzorky osvětlené testovaným zdrojem jako

$$R_{i,t,c} = R_{i,t} * \alpha * \frac{R_{w,r}}{R_{w,t}} \quad (61)$$

$$G_{i,t,c} = G_{i,t} * \alpha * \frac{G_{w,r}}{G_{w,t}} \quad (62)$$

$$B_{i,t,c} = B_{i,t} * \alpha * \frac{B_{w,r}}{B_{w,t}} \quad (63)$$

kde

$$\alpha = \frac{Y_{w,t}}{Y_{w,r}} \quad (64)$$

Následně můžeme tyto korigované hodnoty transformovat zpět do souřadnic dle CIE 1931:

$$\begin{pmatrix} X_{i,t,c} \\ Y_{i,t,c} \\ Z_{i,t,c} \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} R_{i,t,c} \\ G_{i,t,c} \\ B_{i,t,c} \end{pmatrix} \quad (65)$$

kde

$$M^{-1} = \begin{pmatrix} 1,076450 & -0,237662 & 0,161212 \\ 0,410964 & 0,554342 & 0,034694 \\ -0,010954 & -0,013389 & 1,024343 \end{pmatrix}$$

Použitím vztahů (30) – (38) tyto souřadnice převedeme do barevného prostoru CIE LAB (referenční bílá bude pochopitelně pro testovaný a referenční zdroj odlišná), čímž dostaneme sady souřadnic  $[L_{i,r}, a_{i,r}, b_{i,r}]$  pro referenční a  $[L_{i,t}, a_{i,t}, b_{i,t}]$  pro testovaný světelný zdroj.

Z těchto souřadnic si můžeme určit chromu každého vzorku osvětleného jak testovaným ( $C_{i,t}$ ), tak referenčním ( $C_{i,r}$ ) světelným zdrojem, jako

$$C_{i,r} = \sqrt{a_{i,r}^2 + b_{i,r}^2} \quad (66)$$

$$C_{i,t} = \sqrt{a_{i,t}^2 + b_{i,t}^2} \quad (67)$$

Dalším krokem je výpočet rozdílů souřadnic:

$$\Delta L_i = L_{i,t} - L_{i,r} \quad (68)$$

$$\Delta a_i = a_{i,t} - a_{i,r} \quad (69)$$

$$\Delta b_i = b_{i,t} - b_{i,r} \quad (70)$$

Podobně se určí také rozdíl chromy:

$$\Delta C_i = C_{i,t} - C_{i,r} \quad (71)$$

Barevná diference pro jednotlivé barevné vzorky poté bude

$$\Delta E_i = \sqrt{\Delta L_i^2 + \Delta a_i^2 + \Delta b_i^2} \quad (72)$$

Nyní můžeme přistoupit k aplikaci saturačního faktoru:

$$\Delta E_{i,sat} = \begin{cases} \Delta E_i & \text{pro } \Delta C_i \leq 0 \\ \sqrt{\Delta E_i^2 - \Delta C_i^2} & \text{pro } \Delta C_i > 0 \end{cases} \quad (73)$$

Průměrná barevná diference se následně určí kvadratickým průměrem:

$$\Delta E_{rms} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta E_{i,sat}^2} \quad (74)$$

Nekorigovaný CQS index je následně určen jako

$$Q_{a,rms} = 100 - 3,1 * \Delta E_{rms} \quad (75)$$

Tento index je následně škálován, aby byl zajištěn výsledek v intervalu 0–100:

$$Q_{a,s} = 10 * \ln \left( e^{\frac{Q_{a,rms}}{10}} + 1 \right) \quad (76)$$

Nyní se přistoupí k výpočtu CCT faktoru. Pro hodnoty  $T_c < 3500$  K platí:

$$M_{CCT} = T_c^3 * 9,2672 * 10^{-11} - T_c^2 * 8,3959 * 10^{-7} + 0,00255 * T_c - 1,612 \quad (77)$$

Pro hodnoty  $T_c \geq 3500$  K lze předpokládat, že  $M_{CCT} = 1$ . Posledním krokem je určení celkového indexu CQS:

$$Q_a = M_{CCT} * Q_{a,s} \quad (78)$$

Podobně jako u indexu podání barev CRI lze určit speciální indexy pro jednotlivé barevné vzorky  $Q_i$  – pouze se ve výpočtu vynechá průměrování barevných diferencí, jinak je výpočet totožný. Také je možné určit index věrnosti podání barev  $Q_f$  – v tomto případě ve výpočtu nebude zahrnut saturační faktor, tedy budeme předpokládat, že  $\Delta E_{i,sat} = \Delta E_i$  [65].

Posledním možným výpočtem je určení indexu barevných preferencí  $Q_p$ , kde se ve výsledku pozitivně projeví zvýšená sytost barev. Vztah (75) je v tomto případě nahrazen vztahem

$$Q_{a,rms} = 100 - 3,78 * \left( \Delta E_{rms} - \frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} \Delta C_i * K(i) \right) \quad (79)$$

kde platí

$$K(i) = \begin{cases} 1 & \text{pro } C_t \geq C_r \\ 0 & \text{pro } C_t < C_r \end{cases} \quad (80)$$

### 5.3 Index podání barev IES TM-30-15

Tento index hodnocení podání barev byl zaveden roku 2015 společností Illuminating Engineering Society – IES. Důvodů pro zavedení bylo mnoho, přes 50 let používaný index podání barev  $R_a$  totiž nepříliš dokonale popisoval světelné parametry především LED světelných zdrojů a vůbec nezohledňoval sytost barev. Zásadní rozdíly mezi indexy  $R_a$  a TM-30-15 jsou uvedeny v Tab.7.

Tab. 7.: Základní porovnání CIE 13.3-1995 a IES TM-30-15 [58].

	CIE 13.3-1995 ( $R_a$ )	IES TM-30-15
Rok zavedení	1965	2015
Barevný prostor	CIE 1964 $U^*V^*W^*$	CAM02-UCS
Počet barevných vzorků	8 + 7	99
Referenční zdroj	AČT, CIE D	AČT, CIE D
Přelom mezi ref. zdroji	5000 K	4500 K–5500 K
Rozsah možných výsledků	$-\infty - 100$	0-100

Dalším rozdílem je i množství výstupních údajů, zatímco CIE 13.3-1995 má jako výstup prakticky pouze obecný index podání barev  $R_a$  a speciální indexy podání barev  $R_i$ , výsledek výpočtu dle IES TM-30-15 zahrnuje index věrnosti barev  $R_f$ , index gamutu  $R_g$ , a další vedlejší údaje. Barevné vzorky, používané pro výpočet dle IES TM-30-15 jsou znázorněny v Obr. 5-4.



Obr. 5-4: Barevné vzorky, používané pro určení indexu podání barev dle TM-30-15 [58].

Barevné vzorky pro tento index podání barev byly statisticky vybrány přibližně ze 105 000 výsledků měření barevných odstínů reálných předmětů, například látek, lidské kůže, přírodních materiálů, inkoustů a barev, a dalších [58].

Uvedený postup výpočtu dle TM-30-15 již zahrnuje opravu chyb, které se v této publikaci vyskytovaly – viz [60].

První krok při výpočtu indexu podání barev je opět určení CCT zkoumaného zdroje. To je možné provést identicky s určením CCT pro  $R_a$  index – viz kapitola 5.1 této práce. Pokud známe teplotu chromatičnosti zkoumaného zdroje, můžeme si zvolit referenční světelný zdroj. Narozdíl od CIE 13.3-1995, kde je ostře definován předěl mezi referenčními světelnými zdroji, je to u této metodiky zavedeno přechodové pásmo, kde dochází k míchání spekter obou druhů referenčních světelných zdrojů.

Pokud je teplota chromatičnosti měřeného světelného zdroje nižší, než 4500 K, bude referenčním zdrojem Planckovský světelný zdroj – čili absolutně černý zářič, jehož spektrum se určí ze vztahu

$$S_{r,P}(\lambda, T_t) = \frac{L_{e,\lambda}(\lambda, T_t)}{L_{e,\lambda}(560 \text{ nm}, T_t)} \quad (81)$$

kde platí, že

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T_t) = \lambda^{-5} \left[ e^{\frac{1,4388 \cdot 10^{-2}}{\lambda T_t}} - 1 \right]^{-1} \quad (82)$$

Pokud je teplota chromatičnosti zkoumaného zdroje vyšší, než 5500 K, použije se jako referenční světelný zdroj CIE standardizované denní světlo D, jehož spektrum se určí jako

$$S_{r,D}(\lambda, T_t) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (83)$$

kde  $S_0(\lambda)$ ,  $S_1(\lambda)$ , a  $S_2(\lambda)$  jsou tabelovanými funkcemi vlnové délky, a kde

$$M_1 = \frac{-1,3515 - 1,7703x_D + 5,9114y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (84)$$

$$M_2 = \frac{0,0300 - 31,4424x_D + 30,0717y_D}{0,0241 + 0,2562x_D - 0,7341y_D} \quad (85)$$

kde platí, že

$$y_D = -3 * x_D^2 + 2,87 * x_D - 0,275 \quad (86)$$

Parametr  $x_D$  závisí na teplotě chromatičnosti, a pro  $T_t = T_r \leq 7000 \text{ K}$  se určí jako

$$x_D = \frac{-4,6070 * 10^9}{T_r^3} + \frac{2,9678 * 10^6}{T_r^2} + \frac{0,09911 * 10^3}{T_r} + 0,244063 \quad (87)$$

Pro  $T_t = T_r > 7000 \text{ K}$  tento vztah přechází do tvaru

$$x_D = \frac{-2,0064 * 10^9}{T_r^3} + \frac{1,9018 * 10^6}{T_r^2} + \frac{0,24748 * 10^3}{T_r} + 0,23704 \quad (88)$$

kde platí, že  $T_t$  je CCT měřeného světelného zdroje, a  $T_r$  je CCT referenčního světelného zdroje.

Tyto vztahy platí i pro výpočet referenčního zdroje pro index podání barev CRI dle CIE 013.3–1995.



Pokud CCT testovaného zdroje spadá do rozmezí 4500 K – 5500 K, určí se referenční zdroj jako proporcionální směs spekter obou referencí, a to dle vztahu

$$S_{r,M}(\lambda, T_t) = \frac{5500 - T_t}{1000} * S_{r,P} + \left(1 - \frac{5500 - T_t}{1000}\right) * S_{r,D} \quad (89)$$

Tento plynulý přechod mezi referenčními světelnými zdroji eliminuje nespojitost, vyskytující se při výpočtu  $R_a$  indexu na úrovni CCT = 5000 K, která může způsobovat problémy zejména při měření světelných zdrojů s proměnnou teplotou chromatičnosti [59].

Podobně jako v případě výpočtu indexu  $R_a$  si zde určíme souřadnice testovaného světelného zdroje v barevném prostoru CIE 1931:

$$X_{10,r} = k_r \int_{380}^{780} S_r(\lambda) * \overline{x_{10}}(\lambda) d\lambda \quad (90)$$

$$Y_{10,r} = k_r \int_{380}^{780} S_r(\lambda) * \overline{y_{10}}(\lambda) d\lambda \quad (91)$$

$$Z_{10,r} = k_r \int_{380}^{780} S_r(\lambda) * \overline{z_{10}}(\lambda) d\lambda \quad (92)$$

kde platí, že

$$k_r = \frac{100}{\int_{380}^{780} S_r(\lambda) * \overline{y_{10}}(\lambda) d\lambda} \quad (93)$$

Tímto vztahem zajistíme normování na hodnotu  $Y = 100$ . Ze vztahů je patrné, že výpočet souřadnic je totožný s jejich určením v případě indexu podání barev  $R_a$ , pouze místo 2° funkcí trichromatických členitelů CIE 1931 použijeme 10° funkce (CIE 10° color matching functions). Podobně určíme i hodnoty souřadnic spekter, odražených od  $i$ -tého barevného vzorku, a to jak pro referenční [ $X_{10,r,i}$ ,  $Y_{10,r,i}$ ,  $Z_{10,r,i}$ ], tak pro měřený [ $X_{10,t,i}$ ,  $Y_{10,t,i}$ ,  $Z_{10,t,i}$ ] světelný zdroj, pouze ve vztahu přibude do integrantu násobení spektrální odrazivosti daného vzorku  $R_i(\lambda)$  [59].

Jak již bylo řečeno v úvodu této podkapitoly, výpočty indexu věrnosti barev dle TM-30 se odehrávají v barevném prostoru CIECAM02-UCS. Pro konfiguraci tohoto prostoru (zejména z hlediska chromatické adaptace a její transformace) pro výpočet potřebných veličin se použije následujících parametrů:

- Jas pozadí  $Y_b = 20 \text{ cd/m}^2$
- Parametr okolí  $F = 1$
- Parametr okolí  $N_c = 1$
- Parametr okolí  $c = 0,69$
- Jas přizpůsobovacího pole  $L_A = 100 \text{ cd/m}^2$
- Stupeň adaptace  $D = 1$

Použití těchto hodnot zajistí konzistentnost výsledků a opakovatelnost měření. Krom toho je nutné normovat spektrum referenčního světelného zdroje na hodnotu souřadnice  $Y = 100$  – identicky se všemi ostatními metodikami.

Použití zadaných konstant vede k následujícím hodnotám dalších potřebných parametrů:

$$k = \frac{1}{5 * L_A + 1} = 0,002$$

$$F_L = \frac{1}{5} * k^4 * (5 * L_A) + \frac{1}{10} (1 - k^4)^2 * \sqrt[3]{5 * L_A} = 0,7937$$

$$n = \frac{Y_b}{Y_w} = 0,2$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0,725n^{-0,2} = 1,0003$$

$$z = 1,48 + \sqrt{n} = 1,9272$$

Jelikož barevný prostor CIECAM02-UCS obsahuje transformaci chromatické adaptace, další úpravy barevných souřadnic nejsou nutné.

Dalším krokem je převod souřadnic  $[X_{10}, Y_{10}, Z_{10}]$  na souřadnice  $[R'_a, G'_a, B'_a]$ . Jelikož je nutné znát adaptační bod bílé, zde pro testovaný či referenční světelný zdroj, provede se nejdříve tento převod přímo pro samotné světlo těchto světelných zdrojů čili pro souřadnice  $[X_{10r}, Y_{10r}, Z_{10r}]$  nebo  $[X_{10b}, Y_{10b}, Z_{10b}]$ . Hodnoty, založené na měření samotného světelného zdroje budou nadále označovány indexem  $w$ . Prvním krokem tohoto převodu je transformace souřadnic do barevného prostoru LMS, založeného na odezvě čípků v lidském oku.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_{CAT02} * \begin{bmatrix} X_{10} \\ Y_{10} \\ Z_{10} \end{bmatrix} \quad (94)$$

kde platí, že

$$M_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & 0,0136 & 0,9834 \end{bmatrix}$$

Nyní je třeba provést adaptaci chromatičnosti podle samotného světla světelného zdroje, za předpokladu, že  $D = 1$  a  $Y_w = 100$ :

$$R_C = \left(\frac{100}{R_w}\right) * R \quad (95)$$

$$G_C = \left(\frac{100}{G_w}\right) * G \quad (96)$$

$$B_C = \left(\frac{100}{B_w}\right) * B \quad (97)$$

Odezvy čípků jsou poté převedeny do barevného prostoru  $[X_{10}, Y_{10}, Z_{10}]$  a zpět:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_{HPE} * \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = M_{HPE} * M^{-1}_{CAT02} * \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \quad (98)$$

kde

$$M_{HPE} = \begin{bmatrix} 0,38971 & 0,68898 & -0,07868 \\ -0,22981 & 1,18340 & 0,04641 \\ 0,00000 & 0,00000 & 1,00000 \end{bmatrix}$$

Poté je aplikován faktor přizpůsobení úrovně jasu, takže přizpůsobené odezvy čípků budou vypadat následovně:

$$R'_a = \frac{400 \left( F_L * \frac{R'}{100} \right)^{0,42}}{27,13 + \left( F_L * \frac{R'}{100} \right)^{0,42}} + 0,1 \quad (99)$$

$$G'_a = \frac{400 \left( F_L * \frac{G'}{100} \right)^{0,42}}{27,13 + \left( F_L * \frac{G'}{100} \right)^{0,42}} + 0,1 \quad (100)$$

$$B'_a = \frac{400 \left( F_L * \frac{B'}{100} \right)^{0,42}}{27,13 + \left( F_L * \frac{B'}{100} \right)^{0,42}} + 0,1 \quad (101)$$

Následně jsou určeny dva koreláty pro kanály červená – zelená ( $a$ ) a žlutá – modrá ( $b$ ):

$$a = R'_a - \frac{12}{11} * G'_a + \frac{1}{11} * B'_a \quad (102)$$

$$b = \frac{1}{9} * (R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (103)$$

Také je možné vypočítat čtyři relevantní koreláty vzhledu pro barevný prostor CIECAM02 – achromatickou odezvu ( $A$ ), světlost ( $J$ ), chromu ( $C$ ), a barevnost ( $M$ ):

$$A = \left( 2R'_a + G'_a + \frac{1}{20} * B'_a - 0,305 \right) \times N_{bb} \quad (104)$$

$$J = 100 * \left( \frac{A}{A_w} \right)^{CZ} \quad (105)$$

$$C = t^{0,9} * \sqrt{\frac{J}{100}} * (1,64 - 0,29^n)^{0,73} \quad (106)$$

$$M = C * F_L^{0,25} \quad (107)$$

Úhel odstínu  $h$  vypočítáme tak, že převedeme pravoúhlé souřadnice  $[a, b]$  do polárních souřadnic:

$$h = \angle(a, b) \quad (108)$$

Parametr  $t$  si určíme jako

$$t = \frac{\frac{50000}{13} * N_{cb} * N_c * e_t * \sqrt{a^2 + b^2}}{R'_a + G'_a + \frac{21}{20} * B'_a} \quad (109)$$

Kde excentricita  $e_t$  bude

$$e_t = \frac{1}{4} \left( \cos \left( \frac{\pi * h}{180} + 2 \right) + 3,8 \right) \quad (110)$$

Nyní můžeme konečně převést koreláty vzhledu do souřadnic CIECAM02-UCS:

$$J' = \frac{(1 + 100 \times 0,007) \times J}{1 + 0,007 \times J} \quad (111)$$

$$a' = M' * \cos\left(\frac{\pi h}{180}\right) \quad (112)$$

$$b' = M' * \sin\left(\frac{\pi h}{180}\right) \quad (113)$$

kde

$$M' = \frac{\ln(1 + 0,0028 * M)}{0,0228} \quad (114)$$

Ted' už můžeme přistoupit k výpočtu barevných diferencí pro všechny barevné vzorky:

$$\Delta E_{Jab,i} = \sqrt{(J_{t,i} - J_{r,i})^2 + (a'_{t,i} - a'_{r,i})^2 + (b'_{t,i} - b'_{r,i})^2} \quad (115)$$

Neškálovaný index věrnosti barev  $R'_f$  se určí jako

$$R'_f = 100 - 7,54 * \left( \frac{1}{99} \sum_{i=1}^{99} \Delta E_{Jab,i} \right) \quad (116)$$

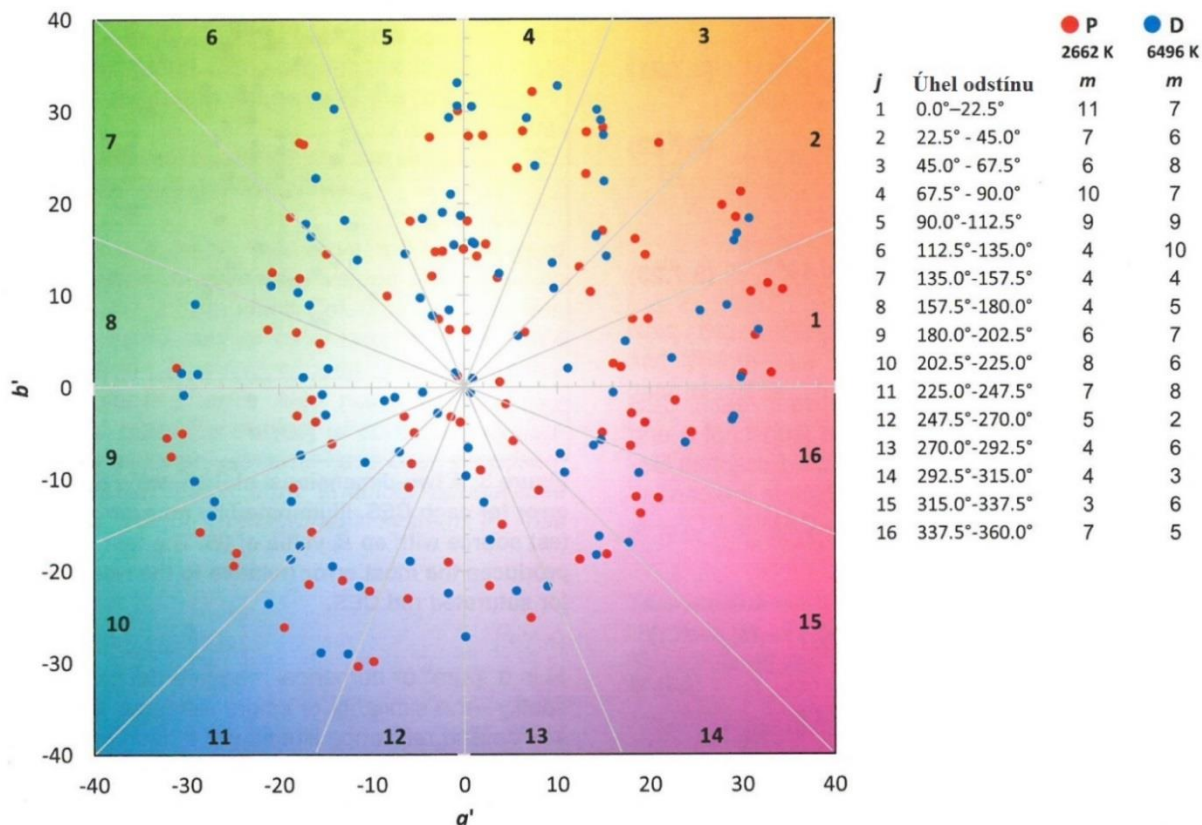
Abychom zajistili, že výsledek nebude menší jak 0, provedeme ještě škálování výsledné hodnoty podle vztahu

$$R_f = 10 * \ln\left(e^{\frac{R'_f}{10}} + 1\right) \quad (117)$$

### 5.3.1 Gamut index

Gamutem se rozumí dosažitelná oblast barev v určitém barevném prostoru. Tuto veličinu popisuje index gamutu  $R_g$ . Jinými slovy tento index popisuje relativní velikost plochy barevného prostoru, pokryté souřadnicemi  $[a', b']$  pro světlo testovaného zdroje v porovnání s referenčním světelným zdrojem (stejným, jako pro výpočet  $R_f$ ) [59].

Jelikož určení tohoto indexu zahrnuje velké množství (99) barevných vzorků, je vhodné rozdělit barevný prostor  $[a', b']$  do 16 sektorů, kde každý z nich zabírá  $22,5^\circ$ . Toto rozdělení je ilustrováno na Obr.5-5.



Obr. 5-5: Barevný prostor CIECAM02 s vyznačenými souřadnicemi všech 99 barevných vzorků, osvětlených jak Planckovským referenčním zdrojem (P), tak referenčním světelným zdrojem typu D [upraveno, 59].

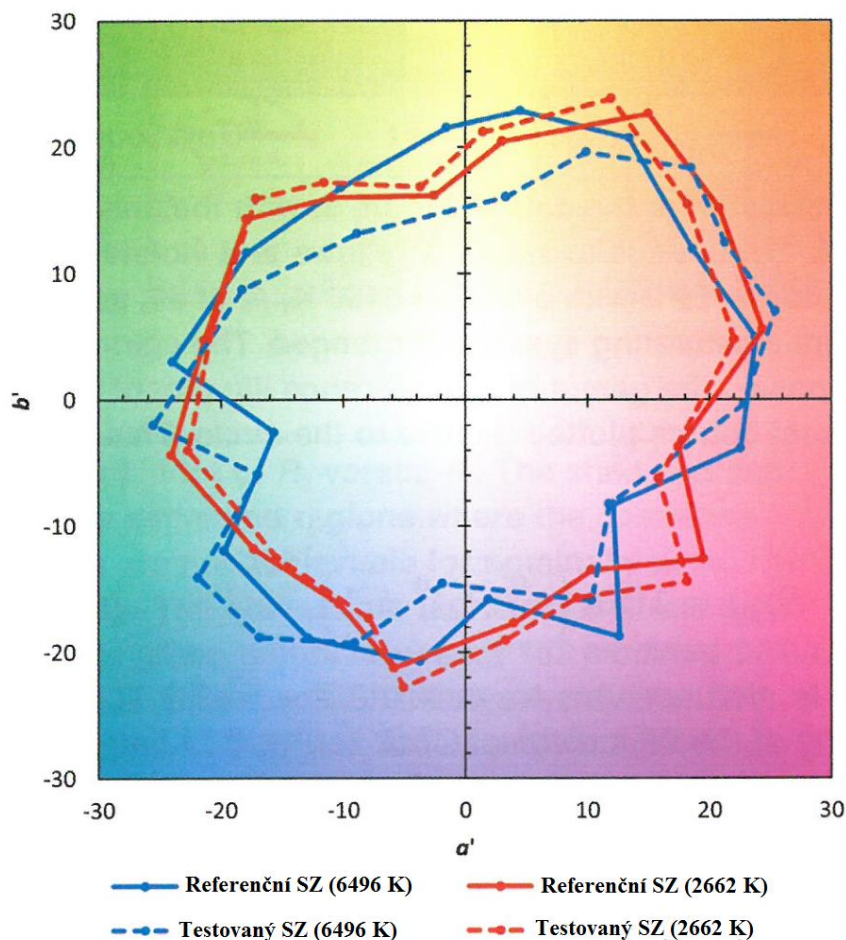
Pro každý z těchto 16 sektorů se vypočítá aritmetický průměr souřadnic  $[a', b']$  jak pro testovaný, tak referenční zdroj. Takto dostaneme 16 párů souřadnic, které nám definují polygon gamutu pro oba světelné zdroje. Příklad těchto polygonů je uveden na Obr. 5-6.  $R_g$  dostaneme porovnáním velikostí jejich ploch, tedy

$$R_g = \frac{S_t}{S_r} * 100 \tag{118}$$

kde  $S_t$  značí plochu polygonu testovaného zdroje, a  $S_r$  plochu polygonu referenčního zdroje.

Hodnota  $R_g = 100$  znamená, že testovaný světelný zdroj (v průměru) nezpůsobil změnu sytosti barev, hodnota  $> 100$  značí, že v průměru došlo k přesycení barev, zatímco pod světelným zdrojem s  $R_g < 100$  budou některé barvy nedokonale syté [59].

Můžeme také vynést graf závislosti  $R_f$  na  $R_g$  pro oba porovnávané zdroje, čímž získáme barevný vektor, obvykle normovaný tak, aby křivka pro referenční zdroj tvořila dokonalou kružnici.



Obr. 5-6: Porovnání polygonů gamutu pro dva měřené světelné zdroje [upraveno, 59].

## 5.4 Index věrnosti podání barev CIE 224:2017 (IES TM-30-18)

Komise CIE při tvorbě standardu pro index věrnosti podání barev CIE 224:2017 kompletně převzala standard IES TM-30-18 [61]. Ten je až na výjimky shodný se standardem IES TM-30-15, popsaným výše. Ve výpočtu indexu věrnosti podání barev  $R_f$  se změnila dvě podstatné záležitosti, popsané níže [62].

Hranice pro změnu referenčního světelného zdroje se posunula z hodnot 4500 K a 5500 K na hodnoty 4000 K a 5000 K. Díky tomu se změnil i vztah (89), a to na tvar

$$S_{r,M}(\lambda, T_t) = \frac{5000 - T_t}{1000} * S_{r,P} + \left(1 - \frac{5000 - T_t}{1000}\right) * S_{r,D} \quad (119)$$

Druhým rozdílem tohoto standardu oproti jeho starší verzi je změna konstanty ve vztahu (116). Neškálovaný index věrnosti barev  $R'_f$  se dle TM-30-18 určí jako

$$R'_f = 100 - 6,73 * \left(\frac{1}{99} \sum_{i=1}^{99} \Delta E_{Jab,i}\right) \quad (120)$$

Krom uvedených změn je výpočet indexu věrnosti barev dle TM-30-18 naprosto totožný s výpočtem podle standardu TM-30-15 [62]. Index gamutu  $R_g$  není přímo v normě CIE 224:2017 definován, ale jelikož ta je tvořena převzatou normou IES TM-30-18, byl přesto vypočítán a uveden pro srovnání

## 6 PRAKTICKÉ SROVNÁNÍ

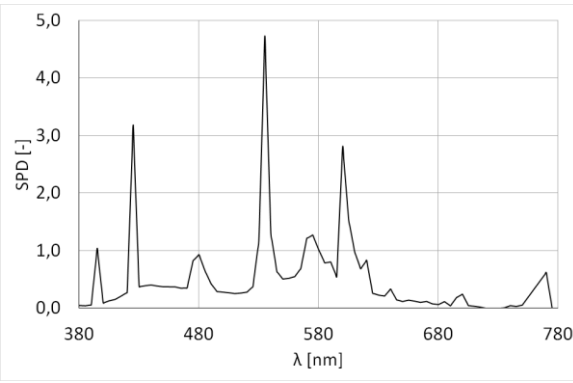
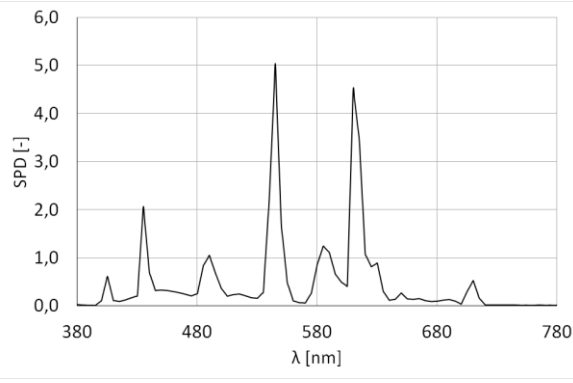
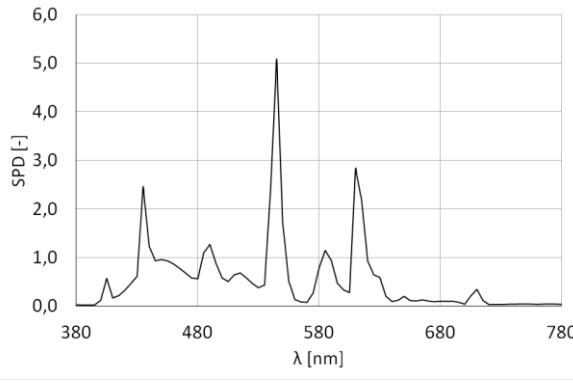
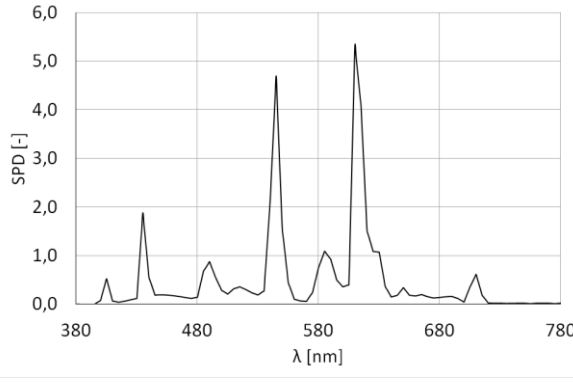
V této kapitole jsou uvedeny vypočtené hodnoty všech zmíněných indexů podání barev pro 59 světelných zdrojů. Všechna naměřená spektra byla převzata z kalkulačky indexu TM-30-18 pro excel, distribuované s touto normou.

Tab. 8.: Vypočítané hodnoty ukazatelů podání barev pro vybrané světelné zdroje.

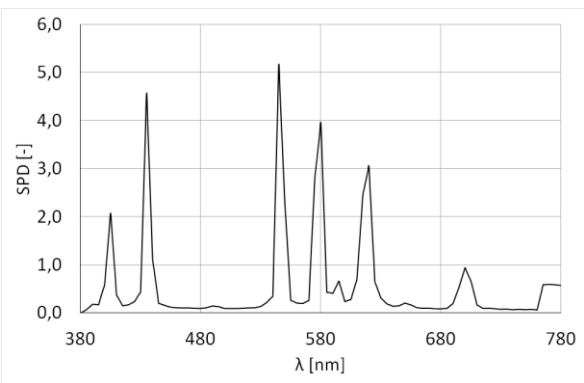
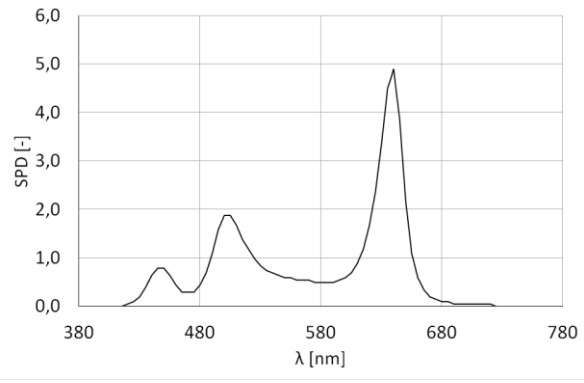
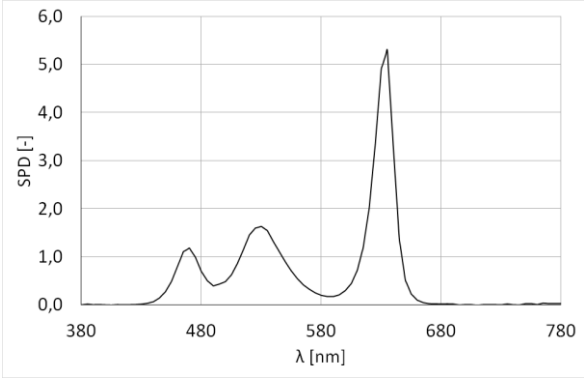
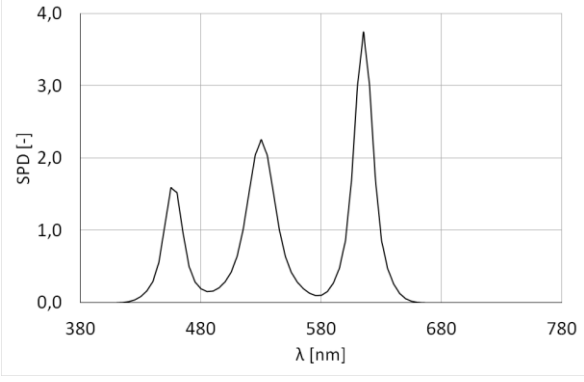
Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Halogenová lineární žárovka		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		99,54	99,47	99,51	99,53
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		98,75	100,70	98,89	100,70
		CCT [K]	CQS		
2701	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
		99,01	98,42	101,05	
Žárovka 60 W, A19		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		99,76	99,69	99,73	99,73
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		99,75	99,92	99,72	99,92
		CCT [K]	CQS		
2812	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
		99,79	99,78	99,95	
Žárovka s neodymovým sklem		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		76,94	70,11	72,94	72,38
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		85,57	108,57	87,12	108,57
		CCT [K]	CQS		
2756	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
		89,69	83,39	114,54	

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Zářivka se širokopásmovým luminoforem CIE F1 (model)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		75,88	62,22	66,55	66,09
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		78,36	89,83	80,68	89,83
		CCT [K]	CQS		
6425	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	74,93	75,89	84,57		
Zářivka se širokopásmovým luminoforem F32T8/930		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		95,22	92,65	92,61	92,83
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		89,30	102,70	90,45	102,70
		CCT [K]	CQS		
2910	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	93,80	92,68	102,49		
Zářivka se širokopásmovým luminoforem F40T12/CWX		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		87,29	77,47	81,07	81,30
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		82,61	100,03	84,38	100,06
		CCT [K]	CQS		
4032	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	85,13	84,18	98,68		
Zářivka s úzkopásmovým luminoforem CIE F10 (model)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		81,01	74,98	71,29	72,95
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		77,79	98,07	79,57	99,23
		CCT [K]	CQS		
4999	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	79,74	78,60	97,61		



Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Zářivka s úzkopásmovým luminoforem F32T8/741		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		69,69	50,76	55,03	54,99
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		73,14	88,13	75,07	88,94
CCT [K]	CQS				
4663	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	72,63	73,87	83,81		
Zářivka s úzkopásmovým luminoforem F32T8/835		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		85,98	78,10	77,11	78,32
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		80,60	101,83	82,68	101,83
CCT [K]	CQS				
3483	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	85,28	83,68	102,05		
Zářivka s úzkopásmovým luminoforem F32T8/865		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		85,07	79,46	77,74	78,89
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		83,80	99,65	85,54	99,65
CCT [K]	CQS				
6218	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	86,52	85,51	99,16		
Zářivka s úzkopásmovým luminoforem – modifikovaný model		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		86,17	80,32	79,47	80,24
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		79,75	106,16	81,92	106,16
CCT [K]	CQS				
3003	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	86,50	84,01	106,98		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Vysokotlaká sodíková výbojka C100S54 – Standard		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		16,62	-10,18	2,21	1,56
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		32,22	60,86	39,33	60,86
		CCT [K]	CQS		
1970	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	38,27	39,94	53,91		
Vysokotlaká sodíková výbojka SDW-T 100W/LV - Super		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		84,82	82,70	79,54	79,90
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		80,31	104,90	82,42	104,90
		CCT [K]	CQS		
2508	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	82,63	79,39	108,48		
Metalhalogenidová výbojka CDM 830		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		84,14	71,58	76,72	76,65
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		79,24	99,88	81,47	99,88
		CCT [K]	CQS		
3083	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	82,24	81,31	98,38		
Metalhalogenidová výbojka CDM 940		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		92,47	88,73	89,47	89,56
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		90,73	100,66	91,16	100,78
		CCT [K]	CQS		
4192	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	92,50	91,86	99,92		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Rtuťová výbojka H38JA-100/DX		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		53,00	41,31	37,51	38,61
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		43,98	89,28	49,95	89,28
		CCT [K]	CQS		
3725	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	49,90	49,47	88,39		
RGB bílá (445/500/640)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		34,74	17,32	16,02	16,13
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		53,06	111,86	58,09	111,86
		CCT [K]	CQS		
3069	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	45,80	43,71	124,39		
RGB bílá (470/530/635)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		38,21	19,46	28,40	27,43
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		57,92	108,42	62,43	108,42
		CCT [K]	CQS		
3388	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	53,79	50,99	121,41		
RGB bílá (455/530/615)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		65,75	65,26	64,45	63,86
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		74,34	112,97	77,10	112,97
		CCT [K]	CQS		
4002	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	71,92	67,10	121,48		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
RGB bílá (460/525/625)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		80,31	74,13	73,54	73,64
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		75,25	100,22	77,90	100,22
		CCT [K]	CQS		
6495	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	75,78	72,25	104,99		
RGB bílá (465/546/614)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		89,37	86,55	80,81	80,96
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		75,67	97,07	78,29	97,07
		CCT [K]	CQS		
4001	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	81,39	80,60	101,97		
RGBA bílá (445/495/555/615)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		92,06	91,07	91,38	90,86
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		87,38	98,16	88,73	98,16
		CCT [K]	CQS		
3304	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	92,17	91,91	99,06		
RGBA bílá (450/525/580/625)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		94,24	93,54	91,12	91,23
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		86,94	106,85	88,34	106,85
		CCT [K]	CQS		
3300	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	91,03	87,96	107,40		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
RGBA bílá (455/530/590/635) 4K-A		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		89,88	83,41	84,40	83,87
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		84,13	97,62	85,84	97,62
		CCT [K]	CQS		
3959	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	87,25	86,74	98,28		
RGBA bílá (461/526/576/624)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		97,49	97,16	94,37	94,51
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		87,38	100,78	88,73	100,78
		CCT [K]	CQS		
3300	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	94,12	92,54	103,04		
RGBA bílá (470/520/595/635) – 27K		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		70,24	65,71	65,34	66,09
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		62,26	84,31	66,31	84,31
		CCT [K]	CQS		
2700	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	56,07	55,62	79,99		
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		84,02	76,80	78,72	78,54
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		82,91	98,65	84,75	98,65
		CCT [K]	CQS		
2662	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	84,53	84,21	96,57		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		83,30	77,36	78,03	78,09
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		80,97	99,89	83,01	99,89
		CCT [K]	CQS		
2705	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	82,54	81,18	99,18		
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		91,78	89,55	88,83	88,83
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		87,36	91,22	88,72	91,22
		CCT [K]	CQS		
2880	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	86,49	87,20	87,52		
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		82,19	74,71	76,52	76,35
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		81,97	97,91	83,91	97,91
		CCT [K]	CQS		
2993	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	83,33	83,45	94,86		
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		87,82	84,06	83,37	83,54
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		85,83	100,60	87,35	100,60
		CCT [K]	CQS		
3022	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	87,12	86,38	99,67		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		82,67	75,39	77,07	76,93
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		82,64	98,04	84,50	98,04
		CCT [K]	CQS		
3087	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	83,50	83,54	95,15		
InGaN LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		83,93	77,74	78,30	78,36
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		82,81	96,87	84,65	96,87
		CCT [K]	CQS		
3146	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	83,26	83,12	95,59		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		76,93	67,61	68,94	68,87
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		77,69	93,22	80,08	93,22
		CCT [K]	CQS		
3356	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	77,36	77,91	90,28		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		73,85	63,40	64,97	64,94
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		73,60	90,11	76,43	90,11
		CCT [K]	CQS		
3577	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	72,81	73,49	87,73		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		60,30	43,52	46,38	46,35
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		59,89	83,56	64,11	83,62
		CCT [K]	CQS		
4085	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	57,28	58,02	79,65		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		75,62	66,69	66,61	66,78
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		74,56	94,85	76,90	95,13
		CCT [K]	CQS		
4252	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	74,81	74,52	92,52		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		84,78	77,38	79,10	79,05
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		83,67	97,55	85,06	97,75
		CCT [K]	CQS		
4251	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	83,76	83,61	95,38		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		84,37	78,61	78,26	78,53
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		81,24	96,11	83,12	96,73
		CCT [K]	CQS		
4327	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	81,08	80,79	95,40		



Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		66,71	56,06	55,61	55,85
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		64,71	94,69	67,73	95,14
		CCT [K]	CQS		
4368	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	68,47	67,40	91,47		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		78,19	68,89	70,21	70,29
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		75,24	90,22	78,03	90,94
		CCT [K]	CQS		
4431	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	74,85	75,44	88,62		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		72,63	61,98	62,11	62,09
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		74,12	91,61	76,52	92,51
		CCT [K]	CQS		
4744	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	74,12	74,65	88,00		
InGaN LED s fosforem – Neutrální bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		68,02	56,86	56,38	56,58
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		67,03	92,92	69,95	93,84
		CCT [K]	CQS		
4758	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	69,10	68,62	89,49		

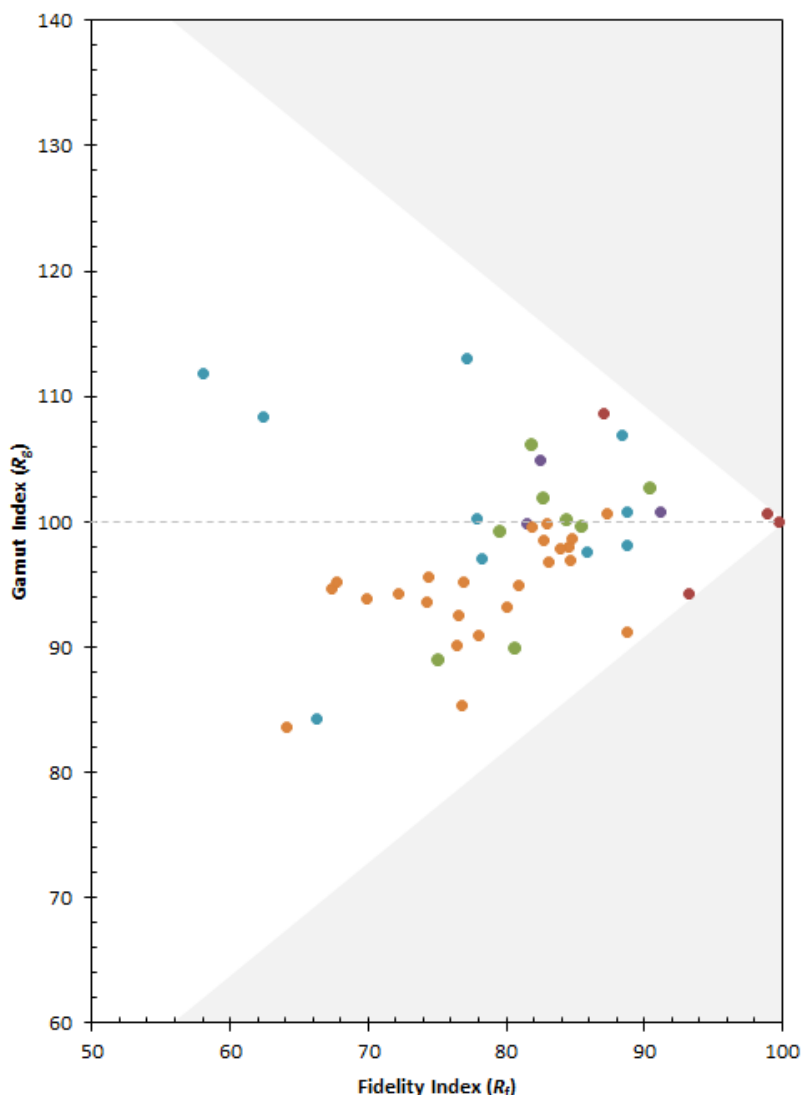
Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		66,69	55,24	55,31	55,58
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		63,92	94,30	67,35	94,70
		CCT [K]	CQS		
5171	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	66,49	64,95	91,33		
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		73,88	64,35	64,50	64,75
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		71,57	95,23	74,37	95,61
		CCT [K]	CQS		
5208	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	71,77	70,78	92,82		
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		86,90	80,88	82,02	82,10
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		84,63	99,23	86,07	99,59
		CCT [K]	CQS		
5227	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	84,58	83,86	97,68		
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		70,22	58,84	59,41	59,53
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		68,84	94,33	72,18	94,33
		CCT [K]	CQS		
5754	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	70,60	69,67	90,50		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		71,48	59,99	60,76	60,80
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		71,14	93,60	74,24	93,60
		CCT [K]	CQS		
5758	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	72,07	71,64	89,77		
InGaN LED s fosforem – Studená bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		81,53	75,17	77,31	77,49
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		74,00	85,41	76,79	85,41
		CCT [K]	CQS		
6809	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	77,15	77,97	85,22		
Fialová LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		79,74	71,23	73,72	73,49
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		77,26	97,08	79,70	97,08
		CCT [K]	CQS		
2709	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	80,97	80,99	94,08		
Fialová LED s fosforem – Teplá bílá		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		95,87	95,97	94,31	94,53
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		91,98	101,38	92,85	101,38
		CCT [K]	CQS		
2970	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	94,66	94,33	101,50		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Hybridní LED - InGaN		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		80,26	71,09	77,30	77,04
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		86,79	105,14	88,21	105,14
		CCT [K]	CQS		
2889	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	88,83	84,70	106,56		
Hybridní LED - InGaN		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		95,35	91,51	91,75	92,06
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		90,42	99,28	91,45	99,28
		CCT [K]	CQS		
3417	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	93,85	93,58	99,76		
Hybridní LED - GaN		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		86,64	83,36	83,45	83,46
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		86,52	97,19	87,97	97,19
		CCT [K]	CQS		
2993	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	86,58	86,55	96,14		
Hybridní LED - GaN		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		85,79	79,48	81,67	81,38
		TM-30-15		CIE 224:2017	
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		88,65	93,42	89,76	93,46
		CCT [K]	CQS		
4052	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	86,79	87,49	90,45		

Světelný zdroj	Spektrum	Indexy podání barev			
Absolutně černé těleso – 2700 K (reference)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		100,00	100,00	100,00	100,00
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		100,00	100,00	100,00	100,00
CCT [K]	CQS				
2700	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	100,00	100,00	100,00		
Smíšená reference pro 5000 K dle TM-30-18		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		99,31	99,33	99,15	99,14
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		100,00	100,00	98,47	100,68
CCT [K]	CQS				
4998	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	98,78	98,82	99,36		
CIE D75 (reference)		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		99,97	99,98	99,97	99,97
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		100,00	100,00	100,00	100,00
CCT [K]	CQS				
7499	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	100,00	100,00	100,00		
Shodná energie $S(\lambda) = I$		CIE 013.3 - 1995			
		$R_a$	$R_{9a}$	$R_{96a}$	$R_{all}$
		95,30	93,86	93,81	93,70
		TM-30-15	CIE 224:2017		
		$R_f$	$R_g$	$R_f$	$R_g$
		94,22	103,57	94,71	103,66
CCT [K]	CQS				
5454	$Q_a$	$Q_f$	$Q_g$		
	97,54	95,22	104,34		

Pokud vyneseme grafickou závislost indexu gamutu  $R_g$  na indexu věrnosti barev  $R_f$  (oba počítány dle IES TM-30-18 (CIE 224:2017)), dojdeme k následujícímu výsledku:



Obr. 6-1: Vzájemný vztah  $R_g$  a  $R_f$  pro zkoumané světelné zdroje.

Červená zde značí žárovky a halogenové žárovky, zelená zářivky, fialová vysokotlaké výbojky, modrá RGB a RGBA LED, oranžová LED s fosforem. Hybridní LED a speciální světelné zdroje nebyly do tohoto grafického srovnání zahrnuty.

Z výše uvedeného grafu mimo jiné vyplývá, že inkandescenční světelné zdroje mají stále nejlepší vlastnosti, co se věrnosti podání barev týče. Také je zajímavým zjištěním, že až na jedinou výjimku měly LED s fosforem index gamutu nižší, než 100, čili snižovaly sytost barev pod jejich světlem pozorovaných.

Pokročilé RGBA LED světelné zdroje v některých případech předčily v ohledu věrnosti podání barev i ty nejlepší LED s luminoforem (alespoň ty, zahrnuté do tohoto srovnání – na trhu jsou v současné době k dispozici i speciální led s hodnotou CRI údajně až 98, ty však nebyly obsaženy v testovacím vzorku).

Zprůměrováním vypočítaných dat dojdeme k následujícím hodnotám:

Tab. 9.: Průměrné hodnoty indexů podání barev pro zkoumané světelné zdroje.

Kategorie:	$R_a$ (CRI)	$R_f$ (TM-30-15)	$R_f$ (CIE 224:2017)	$Q_a$ (CQS)
Žárovky	99,65	99,25	99,31	99,40
Zářivky širokopásmové	82,80	83,42	85,17	81,29
Zářivky úzkopásmové	81,58	79,02	80,96	82,13
Výbojky	66,21	64,90	68,87	69,11
RGB LED	61,68	67,25	70,76	65,74
RGBA LED	88,78	81,62	83,59	83,53
InGaN LED – Teplá bílá	85,10	83,50	85,27	84,40
InGaN LED – Neutrální bílá	74,14	73,18	76,79	73,36
InGaN LED – Studená bílá	75,12	72,35	75,17	73,78
Hybridní LED	87,01	88,10	89,35	89,01
LED celkem	78,64	77,66	80,15	78,30
Celkem	80,21	79,26	81,52	80,17

Pro další zpracování dat bude platit, že  $R_{f(15)}$  je index věrnosti barev počítaný dle TM-30-15, a  $R_{f(18)}$  index věrnosti barev dle CIE 224:2017. Nyní si určíme průměrné hodnoty rozdílů jednotlivých indexů podání barev v závislosti na kategorii světelného zdroje:

Tab. 10.: Průměrné hodnoty rozdílů indexů podání barev pro zkoumané světelné zdroje.

Kategorie:	$R_{f(18)} - R_{f(15)}$	$R_{f(15)} - R_a$	$R_{f(18)} - R_a$	$Q_a - R_a$
Žárovky	0,05	-0,40	-0,35	-0,25
Zářivky širokopásmové	1,75	0,63	2,37	-1,51
Zářivky úzkopásmové	1,94	-2,57	-0,63	0,55
Výbojky	3,97	-1,31	2,66	2,90
RGB LED	3,51	5,57	9,09	4,06
RGBA LED	1,97	-7,16	-5,19	-5,25
InGaN LED – Teplá bílá	1,77	-1,60	0,17	-0,71
InGaN LED – Neutrální bílá	3,62	-0,97	2,65	-0,78
InGaN LED – Studená bílá	2,82	-2,77	0,05	-1,34
Hybridní LED	1,25	1,09	2,34	2,00
LED celkem	2,49	-0,97	1,52	-0,34
Celkem	2,27	-0,95	1,32	-0,03

Z Tab. 10 vyplývají následující závěry:

Indexy věrnosti podání barev dle CIE 224:2017 vycházejí bez výjimky větší, než ty počítané dle IES TM-30-15. Tato skutečnost je pravděpodobně způsobena změnou škálovací konstanty ve vztahu pro výpočet indexu věrnosti barev z barevných diferencí. Největší rozdíl mezi těmito ukazateli byl u výbojek a u klasických LED s fosforem s teplotou chromatičnosti v pásmu neutrální bílé.

Index věrnosti barev dle TM-30-15 se jeví v porovnání s klasickým CRI indexem  $R_a$  větší pouze pro zářivky se širokopásmovými luminofory, RGB LED, a hybridní LED, pro ostatní typy světelných zdrojů vyjde  $R_{f(15)}$  obvykle menší, než index  $R_a$ , a to v průměru o cca 1 bod.

Index  $R_{f(18)}$  v porovnání s indexem  $R_a$  znevýhodňuje zejména RGBA LED světelné zdroje, a to v průměru o 5,19 bodu. Je zajímavé, že pro RGB LED byl výsledek naopak v průměru o více jak 9 bodů vyšší.

Při porovnání výsledků indexů podání barev dle CQS a CIE 013.3-1995 jsou opět největší rozdíly u RGB a RGBA LED, kde první zmíněné mají index  $Q_a$  v průměru o cca 4 body vyšší, a druhé o více jak 5 bodů nižší než index podání barev  $R_a$ .

Zprůměrování výsledků všech výpočtů také odhalilo, že libovolný ukazatel podání barev vyjde obvykle lépe pro LED světelné zdroje s nižší teplotou náhradní chromatičnosti – týká se zejména teplé bílé čili  $CCT$  do 3300 K, mezi neutrální a studenou bílou nebyly rozdíly velké.

Pro přesnější určení trendů, které vykazovaly jednotlivé ukazatele podání barev v závislosti na zkoumaném světelném zdroji by bylo třeba zkoumat řádově větší vzorek spekter, výše uvedená zjištění jsou tedy spíše orientační.



## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo popsat a porovnat čtyři různé ukazatele podání barev (CRI index dle CIE 013.3–1995, CQS, IES TM-30-15, CIE 224:2017), a také v menší míře uvést čtenáře do problematiky fotometrie, spektrometrie a barevných prostorů v nich používaných, jakožto v malé míře i do technologií spektrometrů.

První kapitola této práce se věnuje základům fotometrie, tedy definici viditelného světla a způsobům jeho vzniku. Druhá kapitola popisuje světelně technické parametry, dotýká se rozdílů mezi radiometrií, fotometrií, a spektrometrií, a popisuje základní fotometrické veličiny a barevné prostory CIE. Třetí kapitola je zaměřena na popis spektrometrických měření, řeší rozdílné technologie spektrometrů, a obsahuje i krátkou rešerši aktuálně nabízených přístrojů. Čtvrtá kapitola popisuje samotný postup výpočtu pro všechny zmíněné indexy podání barev, a je tedy jádrem celé bakalářské práce. Pátá kapitola je tvořena především tabulkou, obsahující grafické znázornění několika desítek naměřených spekter světelných zdrojů, a pro tyto spektra vypočítané indexy podání barev. Následně je v ní provedeno i krátké zhodnocení a porovnání naměřených hodnot.

Z výsledků, uvedených v kapitole 6. je patrné, že index věrnosti podání barev  $R_f$  počítaný dle normy CIE 224:2017 bude mít pro téměř libovolný světelný zdroj vyšší hodnotu, než index věrnosti podání barev počítaný podle IES TM-30-15 (alespoň co lze usuzovat na základě vzorku zkoumaných spekter). U obou těchto metodik výpočtu se také projeví zajímavé trendy u RGB a RGBA LED, kdy první zmíněné dosahovaly v průměru větších hodnot a druhé menších hodnot, než pro oba typy světelných zdrojů určený index  $R_a$  podle metodiky CIE 013.3–1995.

Také se ve vypočítaných datech prokázal jistý jev, kde zářivky se širokopásmovými luminofory dosahovaly v porovnání se zářivkami s úzkopásmovými luminofory vyšších hodnot indexů věrnosti podání barev u všech uváděných metodik, vyjma metody CQS. Naopak u žárovek a halogenových žárovek byly rozdíly u všech indexů minimální, což lze vysvětlit tím, že spektrum inkandescenčního zdroje se téměř shoduje s referenčním spektrem záření absolutně černého tělesa (tedy pokud nejsou tyto světelné zdroje vybaveny filtrem, jako v případě žárovky s neodimovým sklem, které relativně málo propouští žlutou a červenou složku bílého světla).

V kategorii LED s modrou diodou a fosforem (které jsou momentálně na trhu asi nejrozšířenější) nejsou v rámci jednotlivých skupin náhradní teploty chromatičnosti rozdíly jednotlivých indexů podání barev příliš velké, nejhorších výsledků tyto zdroje dosahují při použití normy IES TM-30-15, naopak nejlépe si tyto světelné zdroje vedou tehdy, pokud se pro výpočet použije metodika CIE 224:2017. Jak již bylo zmíněno, tyto rozdíly jsou způsobeny především rozdílnou konstantou pro výpočet indexu věrnosti barev z barevných diferencí. Obecně se u těchto LED také projevil fakt, že lepších výsledků indexů věrnosti barev (kalkulovaných podle libovolné metodiky) dosahují světelné zdroje v oblasti teplé bílé (čili s náhradní teplotou chromatičnosti do přibližně 3300 K), s rostoucí CCT všechny indexy podání barev klesají.

Hybridní LED, u kterých lze očekávat masovější rozšíření v budoucnosti, dosahují nejhorších výsledků při použití metodiky CIE 013.3 – 1995, u ostatních metod výpočtu byly výsledky v průměru o 1 až 2 body vyšší.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Megablog. *Zelené a UV lasery* [online]. 2012. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/zelene-a-uv-lasery/>
- [2] SOKANSKÝ, Karel. Světelná technika. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9
- [3] Střední průmyslová škola Česká Lípa. *Fotometrie*. [online]. Dostupné z: [https://sps-cl.cz/public/MatFyz/Soubory/Fyzika/11\\_fotometrie/fotometrie.htm](https://sps-cl.cz/public/MatFyz/Soubory/Fyzika/11_fotometrie/fotometrie.htm)
- [4] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie Fyziky. *Radiometrické veličiny*. [online]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/536-radiometricke-veliciny>
- [5] NOVOTNÝ, Jiří. Světlo - časopis pro světlo a osvětlování. *Evropská norma pro osvětlování vnitřních prostorů*. [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/evropska-norma-pro-osvetlovani-vnitřnich-prostoru--16565>
- [6] PAJDAROVÁ, Andrea Dagmar. Západočeská univerzita v Plzni. *Fotometrie a kolorimetrie*. [online]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~adp/Fotometrie.pdf>
- [7] Wikiskripta. *Radiometrické a fotometrické veličiny*. [online]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Radiometrické\\_a\\_fotometrické\\_veličiny](https://www.wikiskripta.eu/w/Radiometrické_a_fotometrické_veličiny)
- [8] Westinghouse lighting. *Color temperature (Kelvin)*. [online]. Dostupné z: <http://www.westinghouselighting.com/color-temperature.aspx>
- [9] Stellux MGT. *Led information*. [online]. Dostupné z: <https://stelluxled.com/led-information/>
- [10] Katedra radioelektroniky K 13137. *Fotometrie*. [online]. Dostupné z: [http://radio.feld.cvut.cz/courses/X37DK2\\_template/materialy.php?akce=dlf&zdroj=vpm&fkey=12&xtgt=2f686f6d652f53657276696365732f7777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f2f5833374d4d542f53746172655f507265646e61736b795f323030362d3037](http://radio.feld.cvut.cz/courses/X37DK2_template/materialy.php?akce=dlf&zdroj=vpm&fkey=12&xtgt=2f686f6d652f53657276696365732f7777772f68746d6c2f6564755f6465706f742f2f5833374d4d542f53746172655f507265646e61736b795f323030362d3037)
- [11] Konica Minolta Europe. *What is the Colour Rendering Index?*. [online]. Dostupné z: [https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring\\_Instruments/4\\_Learning\\_Centre/C\\_A/What\\_is\\_Colour\\_Rendering\\_Index/Colour\\_Rendering\\_Index\\_EN.pdf](https://www.konicaminolta.eu/fileadmin/content/eu/Measuring_Instruments/4_Learning_Centre/C_A/What_is_Colour_Rendering_Index/Colour_Rendering_Index_EN.pdf)
- [12] Westinghouse lighting. *CRI - Color Rendering Index*. [online]. Dostupné z: <http://www.westinghouselighting.com/lighting-education/color-rendering-index-cri.aspx>
- [13] Wikimedia Commons. *CIExy1931*. [online]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931.svg>
- [14] Wikipedia. *CIE 1931 color space*. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1931\\_color\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1931_color_space)
- [15] CHANDLER, Abraham. Medium. *A Beginner's Guide to (CIE) Colorimetry*. [online]. Dostupné z: <https://medium.com/hipster-color-science/a-beginners-guide-to-colorimetry-401f1830b65a>
- [16] MACADAM, David L. Journal of the optical society of America. *Projective Transformations of I. C. I. Color Specifications*. **1937**(27). DOI: 10.1364/JOSA.27.000294.
- [17] Revolvy. *CIE 1960 color space*. [online]. Dostupné z: <https://www.revolvy.com/page/CIE-1960-color-space>

- [18] Wikipedia. *CIE 1960 UCS*. [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:CIE\\_1960\\_UCS.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:CIE_1960_UCS.png)
- [19] Wikimedia Commons. *Planckian locus*. [online]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planckian-locus.png>
- [20] Technická univerzita Ostrava. *Barvy a barevné systémy*. [online]. Dostupné z: [www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/ZPG/00/6.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FEI/ZPG/00/6.pdf)
- [21] Wikipedia. *CIE 1964 color space*. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/CIE\\_1964\\_color\\_space](https://en.wikipedia.org/wiki/CIE_1964_color_space)
- [22] University of Haifa. *Information on the CIE LUV color space*. [online]. Dostupné z: <http://cs.haifa.ac.il/hagit/courses/ist/Lectures/Demos/ColorApplet/me/infoluv.html>
- [23] Wikimedia Commons. *CIE 1976 UCS*. [online]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE\\_1976\\_UCS.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIE_1976_UCS.png)
- [24] LINDBLOOM, Bruce. *XYZ to Luv* [online]. Dostupné z: [http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_XYZ\\_to\\_Luv.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_XYZ_to_Luv.html)
- [25] Wikipedia. *CIELUV*. [online]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/CIELUV>
- [26] Lab color at luminance 50 %. *Wikipedia* [online]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Lab\\_color\\_at\\_luminance\\_50%25.png](https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Lab_color_at_luminance_50%25.png)
- [27] LINDBLOOM, Bruce. *XYZ to Lab* [online]. Dostupné z: [http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_XYZ\\_to\\_Lab.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_XYZ_to_Lab.html)
- [28] Wolfcrow. *What is the difference between CIE LAB, CIE RGB, CIE xyY and CIE XYZ?*. [online]. Dostupné z: <https://wolfcrow.com/what-is-the-difference-between-cie-lab-cie-rgb-cie-xyy-and-cie-xyz/>
- [29] Konica Minolta Sensing. *Radiometry, Spectroradiometry and Photometry* [online]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.us/learning-center/light-measurement/radiometry-spectroradiometry-photometry/>
- [30] Johnsen Lab. *Spectroradiometry Methods*. [online]. Dostupné z: <https://opticsoflife.org/pdfs/tech/spectmethods.pdf>
- [31] BOTHE, Karsten a Carsten SCHINKE. Institut für Solarenergieforschung in Hameln. *Spectroradiometric measurements*. [online]. Dostupné z: [https://isfh.de/wp-content/uploads/2018/01/ISFH\\_CalTeC-SRA\\_Flyer\\_web.pdf](https://isfh.de/wp-content/uploads/2018/01/ISFH_CalTeC-SRA_Flyer_web.pdf)
- [32] JANNOT, Ken. Horner Lighting. *ADVANTAGES OF RED ENHANCED REMOTE PHOSPHOR LIGHTING IN INSPECTION*. [online]. Dostupné z: <https://www.hornerlighting.com/advantages-of-red-enhanced-remote-phosphor-lighting-in-inspection/>
- [33] BeamLED. *Complete Guide To LED Colour Temperature*. [online]. Dostupné z: <https://www.beamled.com/info/blog/led-colour-temperature/>
- [34] 3dRender. *Kelvin Color Temperatures*. [online]. Dostupné z: <http://www.3drender.com/glossary/colortemp.htm>
- [35] SALMAN, Ahmed. Slideshare. *Lighting Systems 2014*. [online]. Dostupné z: [https://www.slideshare.net/e\\_ahmedsalman/lighting-systems-2014](https://www.slideshare.net/e_ahmedsalman/lighting-systems-2014)
- [36] Avantes. *Catalog X*. [online]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/catalog/>

- [37] Wikimedia Commons. *Czerny-Turner monochromator*. [online]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czerny-Turner\\_Monochromator.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Czerny-Turner_Monochromator.svg)
- [38] Edinburgh Instruments. *Double Monochromators*. [online]. Dostupné z: <https://www.edinst.com/products/double-monochromators/>
- [39] ZHIYUN, Li. ResearchGate. *Simplified diagram of an additive double monochromator*. [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Simplified-diagram-of-an-additive-double-monochromator\\_fig2\\_265734575](https://www.researchgate.net/figure/Simplified-diagram-of-an-additive-double-monochromator_fig2_265734575)
- [40] Avantes. *Spectrometers introduction*. [online]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/component/content/article/958-introductions/introduction-spectrometers/437-sensitivity>
- [41] Irradian. *SR9910-V7 Spectroradiometer*. [online]. Dostupné z: <http://www.irradian.co.uk/products/view/27>
- [42] Avantes. *AvaSpec-ULS2048CL-EVO (CMOS)*. [online]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/products/spectrometers/starline/item/1035-avaspec-uls-2048clevo>
- [43] International Light Technologies. *ILT UV, VIS, NIR spectrometer comparisons*. [online]. Dostupné z: [https://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/downloads/ilt\\_spectrometer\\_comparison\\_sept\\_18.pdf](https://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/downloads/ilt_spectrometer_comparison_sept_18.pdf)
- [44] Avantes. *AvaSpec-HS2048XL-EVO*. [online]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/products/spectrometers/sensline/item/1128-avaspec-hs2048xl-evo>
- [45] Ústav elektroenergetiky FEKT VUT. *Konica Minolta CS-1000A*. [online]. Dostupné z: <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/manuals/CS-1000A.pdf>
- [46] Konica Minolta Sensing. *CS-2000 Spectroradiometer*. [online]. Dostupné z: <https://sensing.konicaminolta.us/products/cs-2000-spectroradiometer/>
- [47] Instrument Systems. *CAS 140CT Array Spectrometer*. [online]. Dostupné z: [http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/CAS140CT\\_e.pdf](http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/CAS140CT_e.pdf)
- [48] Instrument Systems. *CAS 120 Array spectrometer*. [online]. Dostupné z: [http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/CAS120\\_EN\\_web.pdf](http://www.instrumentsystems.com/fileadmin/editors/downloads/Products/CAS120_EN_web.pdf)
- [49] International Light Technologies. *ILT950*. [online]. Dostupné z: [https://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/downloads/ilt950\\_950uv\\_data\\_sheet\\_final\\_2.pdf](https://www.intl-lighttech.com/sites/default/files/downloads/ilt950_950uv_data_sheet_final_2.pdf)
- [50] Avantes. *Avantes Catalog 2018*. [online]. Dostupné z: <https://www.avantes.com/catalog/files/assets/common/downloads/Avantes%20Catalog%20X.pdf>
- [51] *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*. 1. Austria: Commission internationale de l'éclairage, CIE Central Bureau, 1995. Publication CIE, no. 13.3. ISBN 978-390-0734-572.
- [52] Fawoo Tech. *Metodika pro získání CRI*. [online]. Dostupné z: <http://www.led-fawootech.cz/metodika-pro-ziskani-cri/>
- [53] Divadlo-technika. *Měření barevnosti a vzhledu*. [online]. Dostupné z: <http://divadlo-technika.webzdarma.cz/clanky/barevnost.htm>

- [54] Feeney Features Blog. *Color Rendering Index: Why It's important in Outdoor Lighting*. [online]. Dostupné z: <http://media.feeneyinc.com/blog/color-rendering-index-why-its-important-in-outdoor-lighting>
- [55] Waveform lighting. *Calculate color temperature (CCT) from CIE 1931 xy coordinates*. [online]. Dostupné z: <https://www.waveformlighting.com/tech/calculate-color-temperature-cct-from-cie-1931-xy-coordinates>
- [56] Wikipedia. *Robertson's CCT computation method*. [online]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Robertson%27s\\_CCT\\_computation\\_method.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Robertson%27s_CCT_computation_method.svg)
- [57] WYSZECKI, Günter a W. S. STILES. *Color science: concepts and methods, quantitative data, and formulae*. Wiley classics library ed. New York: John Wiley, 2000. ISBN 978-0471399186.
- [58] U.S. department of Energy. *Evaluating Color Rendition Using IES TM-30-15*. [online]. Dostupné z: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/tm-30\\_fact-sheet.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/12/f27/tm-30_fact-sheet.pdf)
- [59] DAVID, A., R. BURKETT, P FINI, K. HOUSER, Y. OHNO, K. TEUNISSEN a M. WEI. *IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition: TM-30-15*. Illuminating Engineering Society, 2015. ISBN 978-0-87995-312-6.
- [60] Illuminating Engineering Society. *IES TM-30-15 Errata*. [online]. Dostupné z: <https://www.ies.org/wp-content/uploads/pdf/erratas/TM-30-15-Errata.pdf>
- [61] SMET, K. *IES TM-30 Seminar Session* [online]. Dostupné z: [https://uploads-ssl.webflow.com/57698e8d8a6044ef2ce2d17b/5bc842dfe3e80e99724e7b20\\_SMET\\_TM30.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/57698e8d8a6044ef2ce2d17b/5bc842dfe3e80e99724e7b20_SMET_TM30.pdf)
- [62] DAVID, A., W. DAVIS, T. DAVIS, et al. *IES Method for Evaluating Light Source Color Rendition: TM-30-18*. Illuminating Engineering Society, 2018. ISBN 978-0-87995-379-9.
- [63] Světlo. *Měřítka podání barev*. [online]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/meritka-podani-barev--744>
- [64] FERGUSON, Ian T., Wendy DAVIS, Yoshi OHNO, John C. CARRANO, Tsunemasa TAGUCHI a Ian E. ASHDOWN. *Toward an improved color rendering metric* [online]. In: . 2005-8-18, 59411G- [cit. 2019-05-24]. DOI: 10.1117/12.615388. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.615388f>
- [65] DAVIS, Wendy. *Color quality scale*. *Optical Engineering* [online]. 2010, 49(3) [cit. 2019-05-24]. DOI: 10.1117/1.3360335. ISSN 0091-3286. Dostupné z: <http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.3360335>