

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE





**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA Elektrotechnická**

**Katedra elektroenergetiky**

Název bakalářské práce:

**Možnosti užití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti**

**Possibilities of applications of luminaires with optional color temperature**

Studijní program:	Elektrotechnika, energetika, management
Studijní obor:	Aplikovaná elektrotechnika
Autor bakalářské práce:	Václav Zelenka
Vedoucí práce:	Ing. Marek Bálský, Ph.D.



České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Václav Zelenka**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Možnosti užití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti**

Pokyny pro vypracování:

1. Možnosti užití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti a jejich vliv na vnímání světelných scén.
2. Návrh metodiky měření fotometrických a elektrických parametrů svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti.
3. Analýza fotometrických a elektrických parametrů vybraného vzorku svítidla s volitelnou teplotou chromatičnosti dle navržené metodiky.

Seznam odborné literatury:

- [1] ČSN EN 13032: Světlo a osvětlení - Měření a způsob uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel.
- [2] Publikace CIE 15:2004: Colorimetry
- [3] HABEL, Jíří, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

Vedoucí: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 18. 4. 2016



# Prohlášení

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

V Praze 10. 1. 2017

.....

Václav Zelenka





# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Markovi Bálskému, Ph.D. za cenné rady, pomoc a trpělivost při vedení této práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Halla za poskytnutí měřeného svítidla.



# Abstrakt

Předkládána práce se zabývá možnostmi využití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti a jejich vlivem na vnímání světelných scén.

Náplní teoretické části je seznámení se zrakovým ústrojím člověka, vlivem a účinkem světla na člověka, principem vnímání a určování chromatičnosti záření, principem LED.

Praktická část se zabývá návrhem metodiky a analýzou fotometrických a elektrických parametrů vybraného vzorku svítidla s volitelnou teplotou chromatičnosti.

## Klíčová slova

zrakové ústrojí, vnímání barev, trichromatické soustavy, teplota chromatičnosti, podání barev, světlo emitující diody, svítidla s volitelnou teplotou chromatičnosti

## Abstract

This thesis deals with possibilities of applications of luminaires with optional color temperature and their influence on the perception of light scenes.

The theoretical part starts with a description of human visual system, physiological effects of optical radiation, color specification, principle of perception and determining color temperature, principle of light emitting diode.

The practical part of this thesis are the draft methodology and analysis of photometric and electrical parameters of the selected sample luminaires with optional color temperature.

## Key words

human visual system, color specification, chromaticity coordinate, color temperature, color rendering, light emitting diode, luminaires with optional color temperature, tunable white



# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	1
1 Úvod .....	3
2 Zrakové ústrojí .....	4
2.1 Spektrální citlivost zraku.....	6
2.2 Vliv a účinek záření na člověka .....	8
3 Vnímání barev.....	12
3.1 Trichromatické soustavy.....	15
3.2 Teplota chromatičnosti .....	19
3.3 Podání barev.....	21
4 Světlo emitující diody (LED) .....	23
4.1 Princip světlo emitujících diod (LED).....	23
4.2 Spektrum světlo emitujících diod (LED).....	25
4.3 Tunable white.....	26
5 Metodika a popis měření .....	28
5.1 Popis svítidla.....	31
6 Naměřené hodnoty.....	32
6.1 Elektrické parametry svítidla .....	32
6.2 Naměřená Spektra (Fotometrické veličiny).....	34
7 Závěr.....	41
Seznam použité literatury .....	43
Seznam obrázků .....	45
Seznam tabulek .....	47
Seznam použitých vzorců.....	48

## Seznam použitých značek a symbolů

$L_a$	adaptační jas	(cd·m <sup>-2</sup> )
$V'(\lambda)$	křivka spektrální citlivosti podle CIE pro skotopické vidění	(-)
$V(\lambda)$	křivka spektrální citlivosti podle CIE pro fotopické vidění	(-)
$C(\lambda)$	poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla	(-)
$\lambda$	vlnová délka	(nm)
$\varphi_e(\lambda)$	poměrná spektrální hustota zářivého toku	(-)
$\Phi_{e\lambda}$	spektrální hustota zářivého toku	(W·m <sup>-1</sup> )
$\Phi_{e\lambda max}$	maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku	(W·m <sup>-1</sup> )
$\rho$	činitel odraznosti	
$\tau$	činitel propustnosti	
$R^\circ, G^\circ, B^\circ; X^\circ, Y^\circ, Z^\circ; \check{C}^\circ, Z^\circ, M^\circ$	barevné podněty	(-)
$R, G, B; X, Y, Z; \check{C}, Z, M;$	jednotlivá kolorimetrická množství	(-)
$\check{c}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$	kolorimetrické koeficienty	(-)
$X, Y, Z$	jednotlivé trichromatické složky	(-)
$\Phi$	vektor barevného podnětu	
$X^0, Y^0, Z^0$	jednotlivé světelné podněty ve směru os	(-)
$x, y, z$	trichromatické souřadnice	
$\lambda_d$	náhradní vlnová délka k záření charakterizovanému bodem F	(nm)
$\lambda_c$	doplňková vlnová délka k záření charakterizovanému bodem K v oblasti purpurových barev	(nm)
$x_{10}(\lambda), y_{10}(\lambda), z_{10}(\lambda)$	doplňkové kolorimetrické koeficienty pro pozorování ve větším úhlu	(-)
$L$	jas	(cd·m <sup>-2</sup> )
$T_c$	teplota chromatičnosti	(K)
$T_e$	ekvivalentní teplota chromatičnosti	(K)
$T_n$	náhradní teplota chromatičnosti	(K)
$R_a$	index podání barev	(-)

$U_{oi}, V_{oi}W_{oi}$	trichromatické složky popisující v soustavě $UVW$ barevný vjem i-tého vzorku při osvětlování srovnávacím zdrojem	(-)
$U_{ki}, V_{ki}W_{ki}$	trichromatické složky popisující v soustavě $UVW$ barevný vjem i-tého vzorku při osvětlování zkouškovým zdrojem	(-)
$n$	počet barevných vzorků	(-)
$\Phi_n$	světelný tok normálu	(lm)
$U_N$	jmenovité napětí	(V)
$E_N$	osvětlenost normálu	(W)
$E_{KN}$	osvětlenost při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji	(W)
$E_{KZ}$	osvětlenost při zhasnutém měřeném zdroji a rozsvíceném korekčním zdroji	(W)
$E_Z$	osvětlenost při rozsvíceném měřeném zdroji a zhasnutém korekčním zdroji	(W)
$\Phi_Z$	světelný tok měřeného zdroje	(lm)
$\eta_e$	měrný světelný výkon	(lm·W <sup>-1</sup> )
$P_p$	příkon	(W)
$Q$	jalový výkon	(Var)
$S$	zdánlivý výkon	(VA)
$A_{THD}$	index harmonického zkreslení proudu	(%)
CH1	označení LED modulu s teplotou chromatičnosti 2700 K	
CH2	označení LED modulu s teplotou chromatičnosti 6500 K	

# 1 Úvod

V současné době dochází k rozvoji nových technologií ve světelné technice, a to hlavně LED osvětlení a řídicí techniky svítidel. S tímto rozvojem a novými poznatky o vlivu viditelného světla na člověka dochází k tomu, že výrobci interiérových svítidel přichází s novými trendy osvětlování vnitřních prostor. Jedním z těchto trendů je užití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti.

V teoretické části této práce jsou shrnuty poznatky, které je třeba znát při aplikaci svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti.

V praktické části jsou proměřeny fotometrické a elektrické veličiny LED svítidla s možností volitelné teploty chromatičnosti, a to pro různé hodnoty teploty chromatičnosti.

Teoretická tvrzení je třeba exaktně popsat. Proměřením spekter daného svítidla můžeme přesně určit jeho složení a zjistit, zdali obsahuje ve svém spektru krátké vlnové délky, které mají značný vliv na člověka z hlediska cirkadiánního rytmu, ale nízký vliv z hlediska samotného zrakového vjemu.



## 2 Zrakové ústrojí

Zrak je základní smysl, který člověku umožňuje rozeznávat informace o okolí, ve kterém se pohybuje.

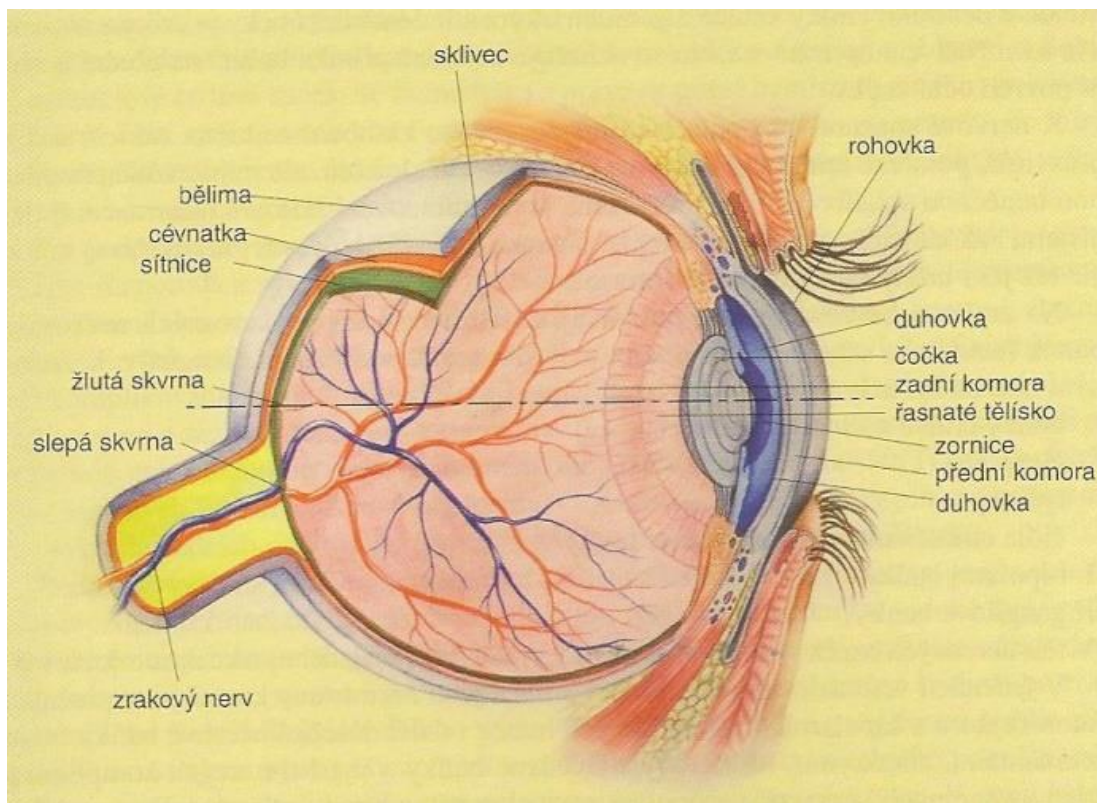
Zrakové ústrojí se skládá ze souboru orgánů, které slouží k zajištění příjmu informace přenášené světelným podnětem v soubor nervových podráždění, která způsobí zrakový vjem. Lidské zrakové ústrojí můžeme rozdělit na tři hlavní části. Centrální část (podkorové a korové části mozku), spojovací (zrakové nervy) a periferní (oči člověka). Oko je smyslový orgán zprostředkovávající příjem informací o okolním prostředí přenášené světlem, kde se tato informace přeměňuje v nervová podráždění a dochází i do značné míry k jejímu zpracování. Obě lidské oči jsou symetricky uloženy v tzv. očnicích v lebce.

Oko, které je znázorněno na obrázku číslo 1, má přibližně kulovitý tvar, který umožňuje snadné a rychlé otáčení v očnici. V zadní části je stěna oka složena ze tří vrstev, a to bělimy, cévnatky a sítnice. Bělina je neprůhledná bílá tkáň. Cévnatka se skládá ze spleti krevních cév a vlásečnic. Cévnatku od sítnice odděluje tenká elastická blána, přes kterou cévnatka sítnici vyživuje.

V přední části oka přechází bělima v pevný průhledný obal zvaný rohovka a cévnatka přechází jednak v tzv. řasné tělísko, na kterém je zavěšena oční čočka, a pak v duhovku. Prostor mezi rohovkou a duhovkou je vyplněn vnitrooční tekutinou. Duhovka slouží jako „mechanická“ optická clona oka. Ve středu duhovky se nachází kruhový otvor zvaný zornice, kterým vstupuje do oka světlo. Průměr zornice se mění, a to v závislosti na smrštění nebo uvolnění hladkých svalů duhovky, čímž se reguluje velikost světelného toku, který vstupuje do oka. Pod zornicí je umístěna čočka, což je dvojevypuklé průzračné tělísko polotuhé konzistence, které je obalené do pružného pouzdra. Na povrchu čočky se po celý život člověka vyvíjí nová tkáň, čímž se stále zvětšuje a její větší velikost s rostoucím věkem omezuje schopnost čočky měnit zakřivení podle potřeby.

Vnitřní prostor oka tvoří sklivec, což je bezbuněčná, průhledná, rosolovitá a pružná hmota. V zadní části oka se nachází zrakový nerv, který spojuje sítnici oka s dalšími nervovými zrakovými centry v mozku. Na spoji zrakového nervu a sítnice se nenachází žádné nervové buňky, takže zde nejsou ani fotoreceptory, a proto se toto místo nazývá slepá skvrna. Na středu sítnice se nachází jasně hnědá oblast, kde nejsou žádné cévy, tzv. žlutá skvrna. Její střední část se nazývá centrální jamka.

Za předpokladu zanedbání cévního zásobování oka lze říci, že se oko skládá ze dvou soustav, a to z optické a nervové soustavy. Optická soustava vytváří v sítnici zmenšený a převrácený obraz vnějšího světa. Tato soustava se skládá z rohovky, přední komory, duhovky se zorničkou, čočky a sklivce.



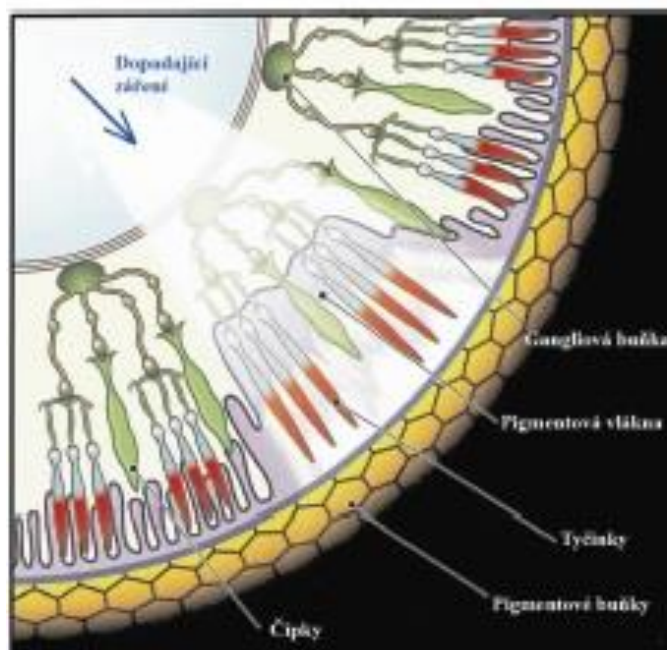
Obrázek č. 1: Schématický řez oční bulvou [1]

Nervová soustava se skládá z nervového zásobení a sítnice, což je průsvitná, tenká blána s velmi složitou a pravidelnou buněčnou skladbou. V sítnici dochází k základnímu zpracování zrakové informace. Dochází k jejímu přijetí a zakódování do podoby umožňující přenos do dalších úrovní zrakového ústrojí. Sítnice je rozdělena na několik vrstev, ve kterých se nachází fotoreceptory a další nervové buňky, její stavba je znázorněna na obrázku číslo 2. Tyto buňky jsou navzájem komplikovaně provázány. [1, 8, 9, 10]

Fotoreceptory dělíme na čípky a tyčinky. Čípky se uplatňují při denním (fotopickém) vidění a umožňují vidět za světla barevně. Tyčinky se uplatňují při nočním (skotopickém) vidění a umožňují vidět za šera, černobíle a neostře. Na kraji sítnice se nachází tyčinky, kterých je asi 130 milionů. Čípky se nachází v centrální jamce a je jich asi 6 milionů. Dalším druhem fotoreceptoru jsou tzv. cirkadiánní čidla, která jsou součástí gangliových buněk, a ty jsou dále spojeny se suprachiasmatickým jádrem (SCN), které řídí biologické pochody v lidském organismu ve 24 hodinových periodách. [8]

Základní funkční jednotkou sítnice je tzv. vjemové pole, což je kruhová část složená z fotoreceptorů, ze které lze stimulovat jedno vlákno zrakového nervu, tedy jednu gangliovou buňku sítnice. Těchto vjemových polí existuje mnoho typů a funkčních druhů, které reagují na úroveň osvětlenosti, dobu trvání zrakového podnětu, spektrální složení a na prostorové rozložení. Tyto buňky jsou vzájemně komplikovaně provázané

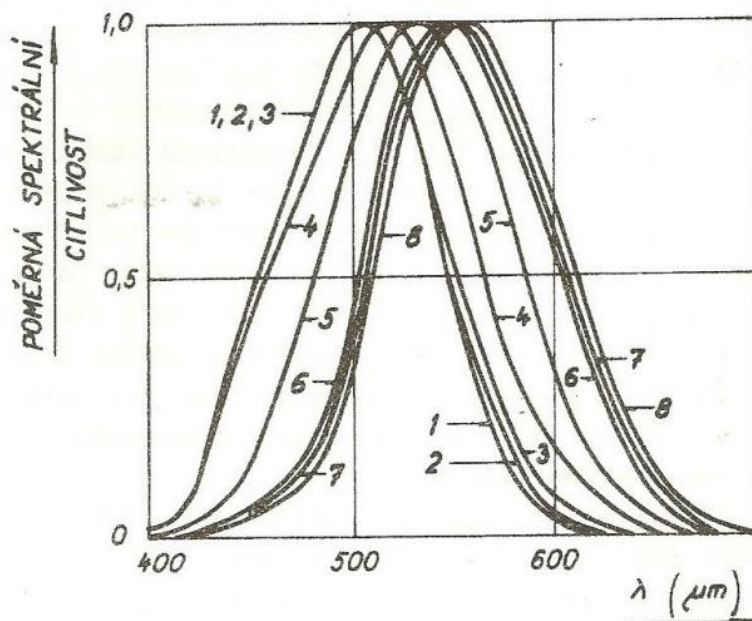
a zprostředkovávají zachycení, zpracování a přenos informace pomocí zrakového nervu dál do centrální části mozku. [1,5]



Obrázek č. 2: Stavba sítnice [7]

## 2.1 Spektrální citlivost zraku

Oko není stejně citlivé na záření odlišných vlnových délek. Průběh spektrální závislosti a její hranice viditelnosti se u různých osob liší. Největší citlivost zraku při optimálním osvětlení a fotonickém vidění je stanovena citlivostí čípků a nejčastěji se nalézá přibližně okolo vlnové délky 555 nm. Citlivost se nejčastěji udává v poměrných hodnotách, které jsou vztažené k maximální absolutní hodnotě citlivosti. Spektrální citlivost je závislá na adaptačním jasu, což se projevuje v podmínkách mezopického vidění, což je oblast mezi skotopickým a fotonickým viděním.[1]



Obrázek č. 3: Křivka poměrné spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek pro různé adaptační jasy  $L_a$  [2]

- 1 -  $L_a = 10^{-5} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  (křivka  $V'(\lambda)$  podle CIE pro skotopické vidění),  
 2 -  $L_a = 10^{-4} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 3 -  $L_a = 10^{-3} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 4 -  $L_a = 10^{-2} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 5 -  $L_a = 10^{-1} \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 6 -  $L_a = 1 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ , 7 -  $L_a = 10 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ,  
 8 -  $L_a = 100 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  (křivka  $V(\lambda)$  podle CIE pro fotopické vidění)

Pro sjednocení technických výpočtů s ohledem na lišící se spektrální citlivost jednotlivých pozorovatelů byla přijata mezinárodní komisí pro osvětlování (CIE) dohoda o hodnotách spektrální citlivosti takzvaného normálního fotometrického pozorovatele. Průběh poměrné spektrální citlivosti oka normálního fotometrického pozorovatele na obrázku číslo 3 znázorňuje  $8 \equiv V(\lambda)$  pro fotopické vidění [ČSN IEC 50(845)] a křivka  $1 \equiv V'(\lambda)$  pro skotopické vidění. Maximum křivky  $V'(\lambda)$  se nachází u kratších vlnových délek (asi 507 nm), protože při nízkých hladinách jasů se uplatňují především tyčinky. Z průběhů křivek na obrázku číslo 3 je patrné, že při přechodu od fotopického vidění ke skotopickému vidění se snižuje jasnost červených ploch a naopak roste jasnost ploch modrých, což je tzv. Purkyňův jev.[1, 7]

## 2.2 Vliv a účinek záření na člověka

Člověk vnímá světlo především jako prostředek k přenosu a získání informací o prostředí, ve kterém se právě nachází. Z důvodů zajištění správného přijímání a zpracování informací na všech úrovních zrakového systému a dodržení dostatečné rychlosti bez zkreslení a bez zbytečné námahy musí být osvětlení přizpůsobeno charakteru zrakové činnosti tak, aby zajistilo potřebný světelný výkon a nezbytnou zrakovou pohodu.

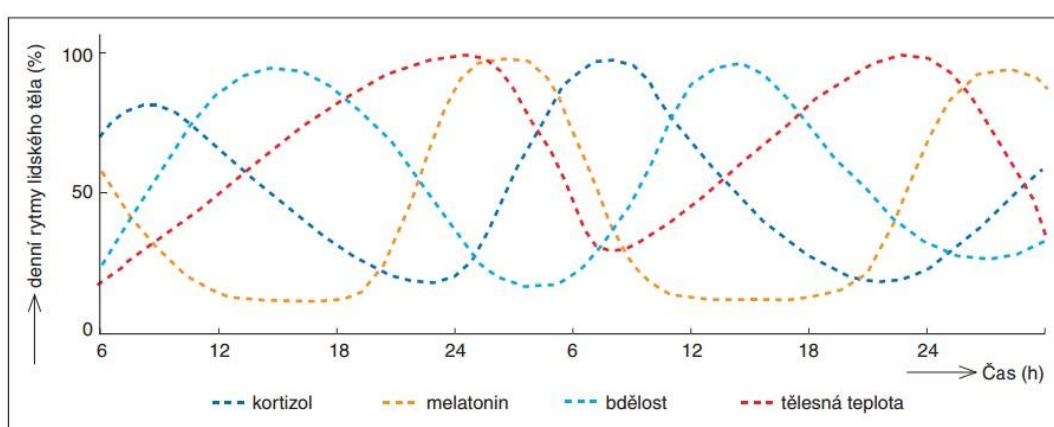
Špatné účinky světelného záření se můžou projevit například při oslnění, které může způsobit úraz či havárii, dále pak při nevhodně zvolené chromatičnosti světla, kdy takovéto světelné záření může zhoršovat nebo dokonce zamezovat rozlišení barev. Dále pak špatně zvolená chromatičnost světla může způsobit pocit nepohody, který vznikne kvůli špatně zvolenému barevnému tónu světla nebo nesouladem teploty chromatičnosti světla zdrojů s hladinami osvětlenosti. Při odpočinkové činnosti můžou hladiny jasů a osvětlení být nižší. Pro zajištění zrakové pohody v těchto případech je především rozhodující navození příjemného prostředí a vytvoření dobré nálady.

Při pracovních činnostech, kdy je nesprávně zvoleno osvětlení, dochází jak k únavě zraku, tak i k celkové únavě celého organismu. Po nějaké době se můžou dostavit různé zdravotní obtíže, jako například pálení očí, bolest hlavy a podobně. Tyto obtíže však mohou způsobit i jiné okolnosti, které je třeba brát v úvahu. [1, 2, 7]

Světlo má na lidský organismus důležitý vliv i z hlediska cirkadiánního cyklu, kdy většina biologických procesů v organismu pravidelně kolísá přibližně ve 24 hodinovém cyklu, který je charakteristický aktivní fází ve dne a klidovou fází v noci. Tento mechanismus je dán vývojem člověka od dávných dob, kdy dochází k pravidelnému střídání světelných podmínek ve dne a v noci, které je způsobeno rotací naší planety okolo Slunce. Dochází k ovlivnění celé řady biologických funkcí, jako je například tělesná teplota, tepová frekvence, krevní tlak, látkový metabolismus, ladění organismu k práci nebo k odpočinku, uvolňování hormonů, imunitní a sexuální funkce. V cirkadiánním rytmu mozek uzpůsobuje funkce veškerého organismu i samostatných orgánů tak, aby tyto funkce co nejlépe vyhovovaly požadavkům, které člověk zpravidla vykonává v různých denních i nočních obdobích. Tato funkce mozku se také nazývá pojmem cirkadiánní hodiny.[14]

Mezi nejvíce pocíťovaný cyklus patří ladění organismu k rannímu probuzení a denní práci nebo k odpočinku, případně ke spánku. Tento cyklus je způsoben rozdílným vylučováním hormonu melatoninu a kortizolu. Melatonin se také nazývá jako spánkový hormon a jeho závislosti na různých světelných podmínkách je velice dobře zmapovaná. Za tmy dochází k nejvyšší produkci tohoto hormonu a způsobuje ospalost,

zhoršení nálady. U některých jedinců může velké množství melatoninu způsobovat deprese. Hormon kortizol se též někdy nazývá jako stresový hormon, který způsobuje vyšší bdělost organismu. Tento hormon má nejvyšší sekreci ráno, kdy jsou jeho hodnoty 10 krát a až 20 krát vyšší než v noci. Na obrázku číslo 4 je znázorněn průběh čtyř důležitých cirkadiálních cyklů za dva zhruba celé cykly, tedy během 48 hodin. Z obrázku je patrné, že nejvyšší bdělost nastává okolo 12 hodiny a její minimum je okolo 3. - 4. hodiny ráno. S tím koresponduje hodnota hormonů, kdy hladina melatoninu je nejnižší během dne a vrcholí, když je bdělost na minimu. Hladina kortizolu vrcholí 4 - 5 hodin po maximu vrcholu melatoninu, což odpovídá ranním hodinám mezi 6. až 8. hodinou. Z grafu jsou dále patrné různé strmosti průběhů a načasování jednotlivých cirkadiálních cyklů. [14,15]



Obrázek č. 4: Průběh čtyř cirkadiálních rytů [15]

Obvyklý cirkadiální cyklus fyziologických procesů u zdravého člověka může probíhat takto:

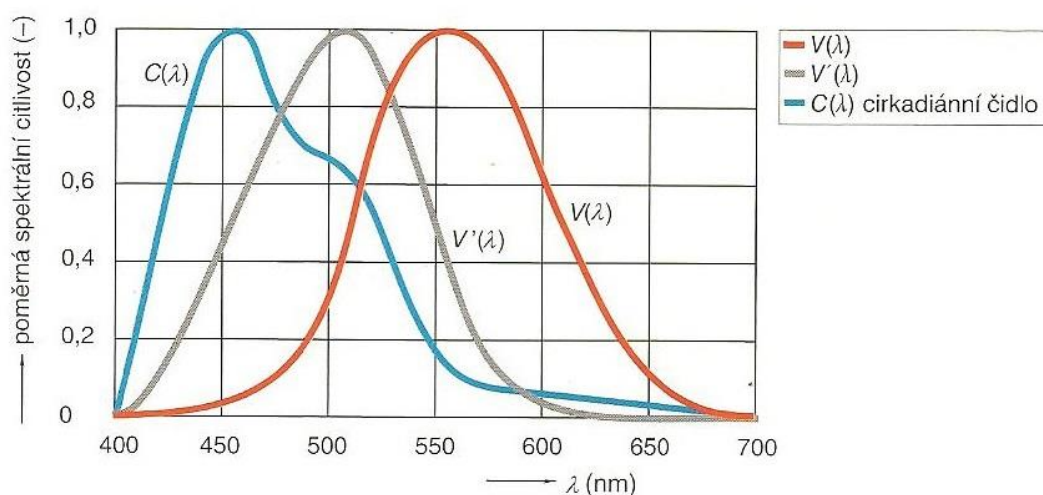
- 2:00 h hluboký spánek
- 6:00 h nejnižší teplota těla
- 8:00 h ukončení sekrece melatoninu, vrchol sekrece kortizolu
- 13:00 h nejvyšší bdělost
- 17:00 h největší svalová síla a kardiovaskulární účinnost
- 20:00 h začátek sekrece melatoninu
- 22:00 h nejvyšší teplota těla
- 22:30 h potlačení pohybu střev

Produkce těchto a dalších hormonů se řídí tím, že mozek dostává podněty o změně přijímaného světla indikovaného fotoreceptory (čidly cirkadiální soustavy) dále šířené pomocí gangliových buněk, které se nachází v sítnici oka. V gangliových buňkách je melanopsin, který slouží k rozeznání světla s různými spektrálními průběhy. Dochází k zaznamenání celkové úrovně a délky osvětlení. Tyto informace se dále předají řídicímu orgánu v mozku, který se nazývá suprachiasmatické jádro (SCN) a odtud jde

přenášena informace dále do mozku. Mozek následně rozliší podle druhu a barvy světla, který účinek na organismus má být na daný podnět aktivován. [8, 14,18]

Například při setmění jde informace do epifyzy (mozkové šišinky), která začne produkovat melatonin a dále připravovat organismus ke spánku. Naopak ráno dostane opačnou informaci o rostoucí úrovni světla a dá signál k pozastavení sekrece tohoto hormonu. Podobně se řídí i produkce ostatních hormonů.

Spektrální citlivost čidel cirkadiánní soustavy je soustředěna do modré oblasti viditelného spektra, která má maximum při vlnových délkách 460 až 465 nm. Úroveň odezvy tohoto typu receptoru na světlo dopadající do lidského oka byla přijata za míru cirkadiánního vlivu, která se nazývá činitel cirkadiánního účinku. Její citlivost v porovnání s čarami spektrální citlivosti čípků  $V(\lambda)$  a tyčinek  $V'(\lambda)$  je více posunuta do oblasti kratších vlnových délek, což je znázorněno na obrázku číslo 5.[1]



Obrázek č. 5: Poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla v porovnání s průběhy poměrné spektrální citlivosti ostatních fotoreceptorů [1]

*„Perioda cirkadiánního cyklu je u člověka 23,5 hodiny až 24,5 hodiny, podle její velikosti se určuje takzvaný chronotyp člověka. Člověk s periodou nižší jak 24 hodin se nazývá skřivan a člověk s periodou vyšší jak 24 hodin se nazývá sova. K tomu, aby nedocházelo k předcházení denních cyklů u skřivana a opožďování denních cyklů u sovy, slouží synchronizace člověka, která je způsobena citlivostí čidel cirkadiánní soustavy na modré světlo, které je obsaženo ve slunečním spektru v ranních, dopoledních a částečně i v odpoledních hodinách.“ [13]*

Naopak stimulace čidel cirkadiánní soustavy ve večerních hodinách vede k ovlivnění sekrece melatoninu, kdy se jeho náběh oddaluje. To může vést k poruchám spánku, horší regeneraci a náchylnosti k různým onemocněním. Při západu Slunce se v jeho spektru modrá složka téměř nevyskytuje. *Podle jistých názorů by se člověk pro optimální spánek neměl 2 hodiny před spánkem vystavovat zdroji světla s modrou složkou v jeho spektru.* [12]

Nedodržení biorytmů člověku způsobuje různé obtíže, které se mohou projevovat jako pocity nepohody, poruchy spánku až různé zdravotní potíže a onemocnění. Jednou z častých příčin narušení cirkadiánních rytmů je dlouhodobý pobyt v prostředí s nízkými hladinami osvětlenosti, které pociťují například obyvatelé velkých měst v zimním období, kteří pracují v zakrytých místech a dopravují se veřejnou podpovrchovou dopravou. Tyto lidé často trpí syndromem sezónní deprese, která má nepříznivý vliv na lidský organismus. Dlouhodobý nedostatek světla dokonce potlačuje standardní vývoj některých orgánů a působí negativně na chování jedinců ve skupinách. Tento fakt byl například pozorován při chovu užitkových zvířat a usuzuje se, že nedostatek světla se může podobně projevovat i u lidí.

Pozitivních vlivů světelného záření se užívá v lékařství například při léčbě kojenecké žloutenky, kdy se kojeneček ozařuje modrým světlem halogenidové výbojky. V posledních patnácti letech došlo k značnému rozvinutí znalostí reakcí různých mozkových center na různé světelné podněty do té míry, že můžeme působením určité barvy a vhodným rytmem jejího míhání stimulovat konkrétní mozková centra a tím příznivě ovlivnit průběh léčby, zajistit prevenci různých onemocnění včetně nemocí psychického charakteru. Některá zdravotnická zařízení již disponují zařízeními poskytující tzv. světelnou terapii.

Viditelné záření se využívá i v dalších technických oborech, nejenom v oblasti světelné techniky a zdravotnictví. [1,13, 18]



### 3 Vnímání barev

Z pohledu nauky o barvě nelze chápat barvu jako směs pojidla a barviva. Objektivní hodnocení barvy pozorovaných předmětů a světelných záření je poměrně komplikovaný fyziologicko-psychický děj. Vnímání barev nemusí být u všech jedinců stejné. Vnímání barvy určuje vlastnost zrakového počinu, který dovoluje pozorovateli rozpoznat rozdíl mezi dvěma oblastmi zorného pole, které mají stejnou strukturu, velikost a tvar, kdy pozorovaný rozdíl má totožný charakter jako rozdíl, který vznikne změnou spektrálního světla. Avšak nepatří sem metamerní barvy, ty totiž i při rozdílném spektrálním charakteru navozují totožný vjem barvy. Barevné vlastnosti světla se označují jako chromatičnost a barevné vlastnosti předmětů se označují jako kolorita. Tyto vlastnosti můžeme jednoznačně určit fyzikálně pomocí spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku pro záření rozdílných vlnových délek. Koloritu určuje spektrální složení záření zdroje osvětlujícího pozorovaný předmět a spektrální propustnost nebo odraznost materiálu předmětu. Chromatičnost určuje spektrální složení záření vysílaného z daného zdroje. Monofrekvenční složky kteréhokoliv záření ve viditelné oblasti spektra budí jednoznačně určitý barevný vjem, což znamená, že záření jakéhokoliv kmitočtu přísluší určitá barva spektra. Zrakové ústrojí přijímá záření aditivně a nedokáže rozlišovat jeho spektrální složení.

Barevný tón je kvalitativní rozdílnost vnímání jednotlivých spektrálních barev a vyjadřujeme jej názvy žlutá, modrá, fialová, apod. Rozlišení daného barevného tónu je pro kteréhokoli pozorovatele částečně odlišné a je určeno množstvím energie vyzářené v určité oblasti vlnových délek a také spektrální citlivostí oka.

Rozmezí vlnových délek (nm)	Barevný tón
380 až 430	fialová
430 až 465	modrofialová
465 až 490	modrá
490 až 500	modrozelená
500 až 560	zelená
560 až 575	zelenožlutá
575 až 585	žlutá
585 až 620	oranžová
620 až 770	červená

Tabulka č. 1: Vlnové délky spektrálních barev [7]

Barvy rozlišujeme na spektrální barvy, které lze určit ze spektra záření slunce či jiných zdrojů. Jejich přibližné hodnoty pro danou spektrální barvu jsou uvedeny v tabulce číslo 1. Dále pak existují tzv. nespektrální barvy, které nepatří do spektra slunečního světla nebo jiných světelných zdrojů. Patří mezi ně purpurové barvy. Vznikají mícháním krajních hodnot spektra viditelného záření, tedy fialové a červené barvy.

Barvy dále dělíme na pestré (chromatické) a nepestré (achromatické). K pestrým barvám řadíme barvy, které mají barevný tón, tedy čisté spektrální barvy nebo purpurové barvy a barvy odstínů vzniklých míšením dvou předchozích. Nepestré barvy tvoří barvy, které nemají barevný tón a vytvářejí spojitou řadu od bílé barvy, odstínů šedé, až po černou barvu.

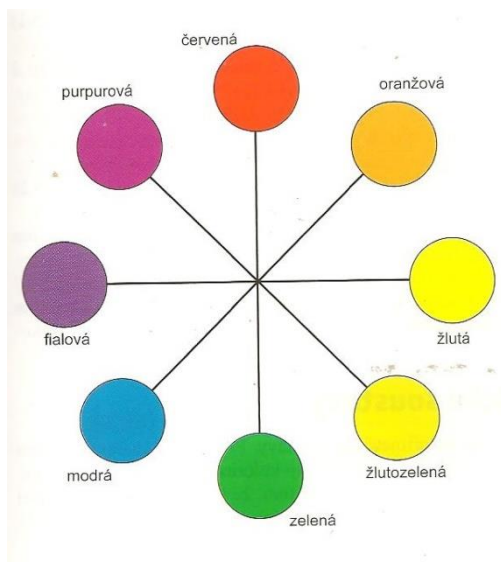
Dále můžeme barvy popisovat pomocí barevné sytosti, kdy spektrální barvy patří mezi syté (čisté). Sytost barvy označuje podíl čisté spektrální nebo purpurové barvy v určité barvě na celkovém barevném vjemu. Sytost se zmenší přidáním bílé barvy do spektrální barvy. Spektrální barvy mají sytost rovnu jedné. Černá, šedá a bílá barva mají sytost rovnu nule.

Spektrum viditelného záření lze rozdělit na tři základní barvy: červenou, zelenou a modrou. (RGB – Red, Green, Blue). Tyto tři barvy dohromady tvoří bílou barvu. Vyloučením jedné z těchto barev ze spektra záření, například modré barvy, dostaneme spektrum budící žlutý barevný tón. Podobně odstraněním jedné ze základních barev lze získat modrozelenou a purpurovou barvu. To je znázorněno na obrázku číslo 6.



Obrázek č. 6 Princip míšení tří základních barev [7]

Bílé světlo může také vzniknout smíšením dvou barev ve vhodném poměru. Tyto barvy, které to umožňují, se označují jako doplňkové (komplementární barvy) a jejich příklad je znázorněn na obrázku číslo 7.



Obrázek č. 7: Příklady dvojic doplňkových barev, které když se smísí ve vhodném poměru, vytvářejí nepestré bílé světlo [1]

Pomocí psychologického působení na člověka dělíme barvy na teplé, např. žlutá, oranžová, červená a studené, jako např. fialová, modrá, zelená. Stručný přehled vlivu obou těchto skupin na člověka při hladinách osvětlenosti do zhruba 2000 lx, je poznamenán v tabulce číslo 2. V případě překročení hladiny osvětlenosti nad 2 000 lx působí teplé barvy nepřírozně, ale studené barvy působí příjemně. [1,2,7]

Vliv na	Účinek barvy	
	oranžová	modrozelená
fyzickou aktivitu	tlumící	povzbuzující
	(pasivní)	(aktivní)
jasově optický dojem	světlý	temný
	vystupující	odstupující
citový (psychologický) dojem	teplý	studený
	suchý	vlažný
	zdůrazňující	uklidňující
	aktivní	pasivní
	dráždivý	uklidňující

Tabulka č. 2: Vlivy teplých a studených barev na člověka [1]

Záření, které v lidském zrakovém ústrojí vytváří zrakový vjem, nazýváme barevným podnětem, a ten lze charakterizovat spektrálním složením a světelným tokem nebo jasem. Jeho spektrální složení lze popsat křivkou poměrného spektrálního složení, tedy průběhem závislosti poměrné spektrální hustoty  $\varphi_e(\lambda)$  na vlnové délce, která je rovna:

$$\varphi_e(\lambda) = \frac{\Phi_{e\lambda}}{\Phi_{e\lambda max}} = \frac{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda}{\left(\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_{max}} \quad (1)$$

kde jsou

$\Phi_{e\lambda}$  spektrální hustota zářivého toku

$\Phi_{e\lambda max}$  maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku

V matematických modelech se tento poměr násobí činitelem odraznosti  $\rho$  či činitelem propustnosti  $\tau$ , které se vztahují ke stejné vlnové délce a charakterizují barevné vlastnosti materiálu.

Z tohoto vztahu vyplývá, že barevný vjem je určen jeho spektrálním složením, které se dá fyzikálně určit neohledně na zrakový orgán. [1, 7]

### 3.1 Trichromatické soustavy

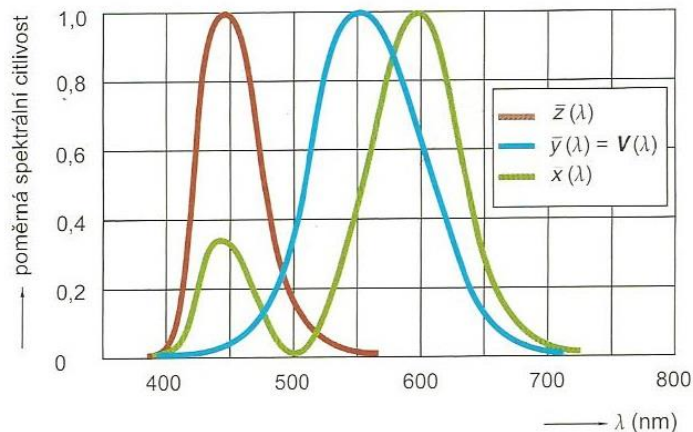
K objektivní charakteristice barev se používají kolorimetrické soustavy. K přesnému charakterizování barev je potřeba třech údajů. Z tohoto důvodu jsou kolorimetrické soustavy nazývány trichromatické soustavy. Jejich princip je založen na nahrazení libovolného barevného podnětu adiční směsí tří optimálně vybraných měrných barevných podnětů. Měrné barevné podněty jsou obecně tři lineárně nezávislé, avšak libovolně zvolené barevné podněty. Označujeme je například  $R^\circ, G^\circ, B^\circ$ ;  $X^\circ, Y^\circ, Z^\circ$ ;  $\check{C}^\circ, Z^\circ, M^\circ$  apod. Jednotlivá kolorimetrická množství barevných podnětů, pomocí nichž může adiční směs navodit stejný barevný vjem jako uvažovaný barevný podnět, označujeme jako trichromatické složky a značí se  $R, G, B$ ;  $X, Y, Z$ ;  $\check{C}, Z, M$ ; apod. K jejich výpočtu se používají kolorimetrické koeficienty, které značíme

$$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$$

$$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$$

$$\bar{c}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{m}(\lambda)$$

Jedná se o poměrná kolorimetrická množství měrných barevných podnětů dané soustavy, kterými se popisují monochromatické složky spektra vyznačující se stejnou hodnotou zářivého toku v oblastech sledovaných vlnových délek. Jejich průběhy jsou znázorněny na obrázku číslo 8.



Obrázek č. 8 Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické soustavy XYZ [1]

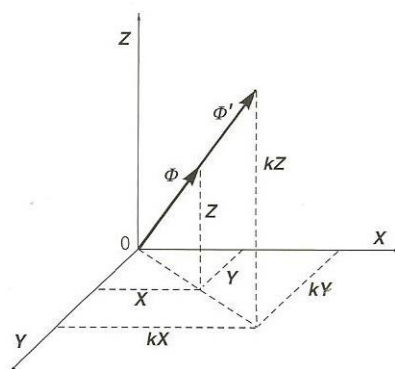
Jednotlivé trichromatické složky můžeme vypočítat integrací součinu poměrné spektrální hustoty zářivého toku barevného podnětu a kolorimetrického koeficientu v celé oblasti spektra.

$$X = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Y = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$Z = \int_0^{\infty} \varphi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Barevný podnět určují tři údaje, a to barevný tón, sytost barvy a intenzita barvy. Ty jsou jasně stanoveny třemi nezávislými složkami trichromatické soustavy, které můžeme znázornit v třírozměrné soustavě souřadnic.



Obrázek č. 9: Prostorová znázornění barevného podnětu v pravouhlé soustavě XYZ [1]

Ve vzniklém pravouhlém prostoru jsou na osách vyneseny základní barvy všech intenzit. Přímky procházející počátkem v 0 vyjadřují různé barevné tóny. Jas barevného podnětu není určen velikostí vektoru  $\Phi$ , ale odpovídá algebraickému součtu trichromatických složek  $(X+Y+Z)$ . Barevné podněty  $\Phi$  a  $\Phi'$ , viz obrázek číslo 9, leží na shodné přímce, která prochází počátkem, protože mají stejný barevný tón a sytost. Jejich světelné toky jsou úměrné a platí pro ně:

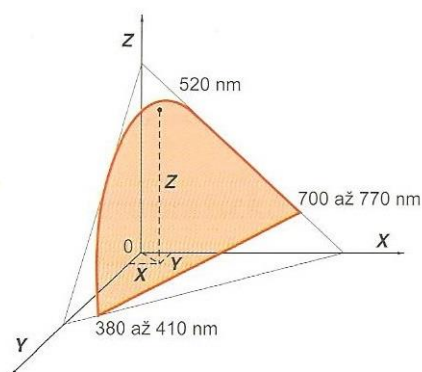
$$\Phi' = k \cdot \Phi, \quad (5), \text{ proto musí platit i pro jejich složky}$$

$$X' = k \cdot X \quad (6)$$

$$Y' = k \cdot Y \quad (7)$$

$$Z' = k \cdot Z \quad (8)$$

Na tomto základě můžeme barevný podnět popsat kolorimetrickou rovnicí  $\Phi = X X^0 + Y Y^0 + Z Z^0$  (9), kde  $X^0, Y^0, Z^0$  jsou jednotlivé světelné podněty ve směru os. Proložíme-li vytyčené body na osách rovinou, vznikne v kolorimetrickém prostoru barevný trojúhelník, který můžeme vidět na obrázku číslo 10.



Obrázek č. 10: Trojúhelník v rovině  $X+Y+Z = 1$  pravouhlého kolorimetrického prostoru [1]

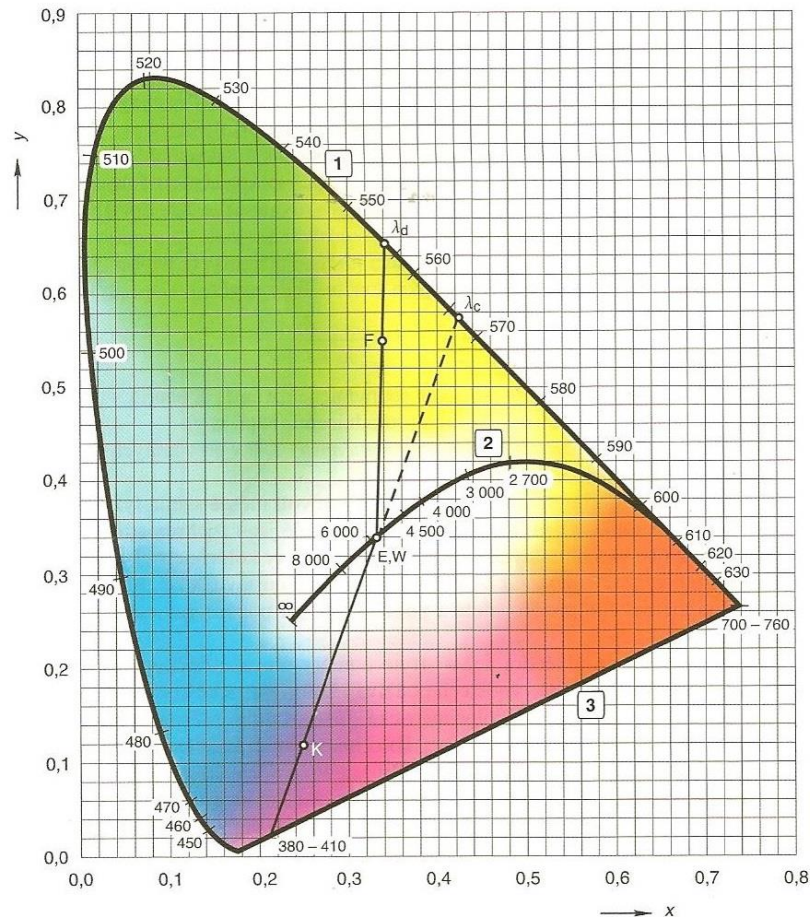
Prostorové zobrazení není příliš praktické. Pro zhodnocení barevného podnětu z hlediska tónu a sytosti postačí jeho rovinný diagram. Většinou se k tomu používá průmět zmíněné roviny do souřadnicové roviny  $XY$ , kde pak pro trichromatické souřadnice platí:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (11)$$

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

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

Součet těchto souřadnic je roven 1. Pracuje se pouze se dvěma souřadnicemi. Vzniká tak normální trojúhelník barev, neboli diagram chromatičnosti CIE v pravouhlých souřadnicích  $x, y$ , který je uveden na obrázku číslo 11.



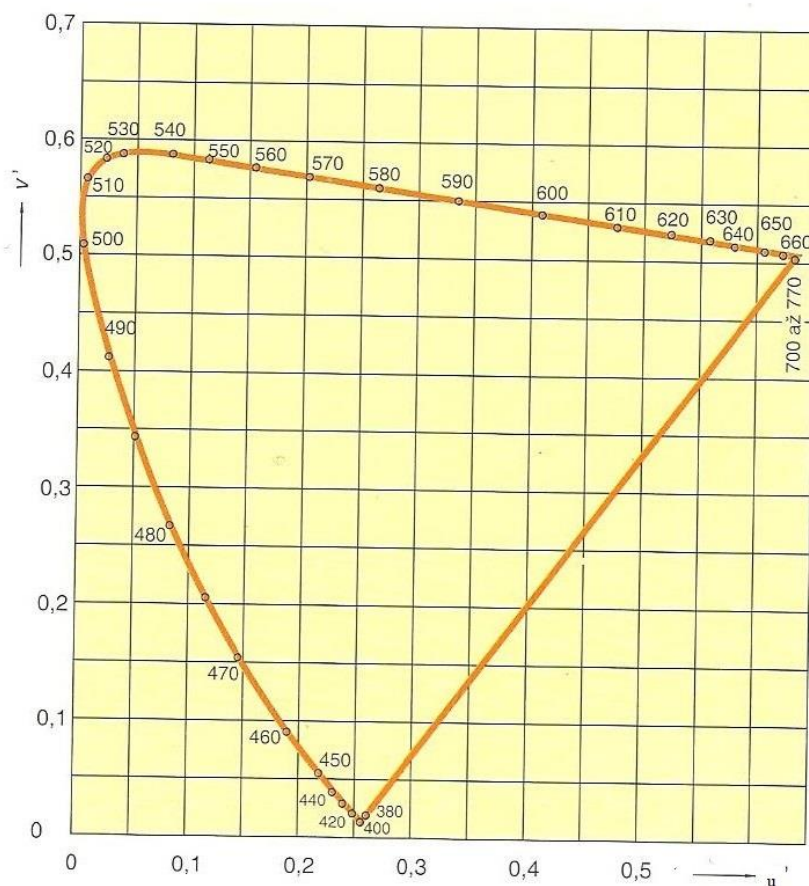
Obrázek č. 11: Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravouhlých souřadnicích  $x, y$  [1] 1 – křivka spektrálních světél s vyznačenými vlnovými délkami v nanometrech, 2 – čára teplotních zářičů se stupnicí v kelvinech, 3 – přímka purpurových barev,  $\lambda_d$  – náhradní vlnová délka k záření charakterizovanému bodem F,  $\lambda_c$  – doplňková vlnová délka k záření charakterizovanému bodem K v oblasti purpurových barev

Hodnoty kolorimetrických koeficientů se pokládají za základní čísla, která definují soustavu XYZ a týkají se normálního fotometrického pozorovatele při pozorování do velikosti zorného úhlu  $4^\circ$ . Při pozorování ve větším úhlu je nutné použít ve výpočtu doplňkové kolorimetrické koeficienty  $x_{10}(\lambda)$ ,  $y_{10}(\lambda)$ ,  $z_{10}(\lambda)$ . Měrné světelné soustavy XYZ byly navrženy tak, aby hodnoty kolorimetrických koeficientů se rovnaly hodnotám poměrné spektrální citlivosti  $V(\lambda)$  normálního fotometrického pozorovatele, proto je složka Y úměrná světelnému toku nebo jasu  $L$  barevného vjemu. Zde platí:

$$L = 683 \cdot Y \quad (14)$$

V technické praxi se pro subjektivní ohodnocení vjemu barvy používají rovnoměrné kolorimetrické prostory. Mezinárodně jsou normalizovány dvě soustavy. Soustava CIE LUV a CIE LAB. Číselné hodnoty těchto soustav jsou srovnatelné, ale nedají se navzájem převádět. CIE LAB se používá pouze pro ohodnocení textilních

materiálů. CIE LUV, jehož příklad je znázorněn na obrázku číslo 12, se používá v oboru světelných zdrojů, televizním a polygrafickém průmyslu. [1, 2, 7]



Obrázek č. 12: Příklad rovnoměrného kolorimetrického trojúhelníku CIE LUV [1]

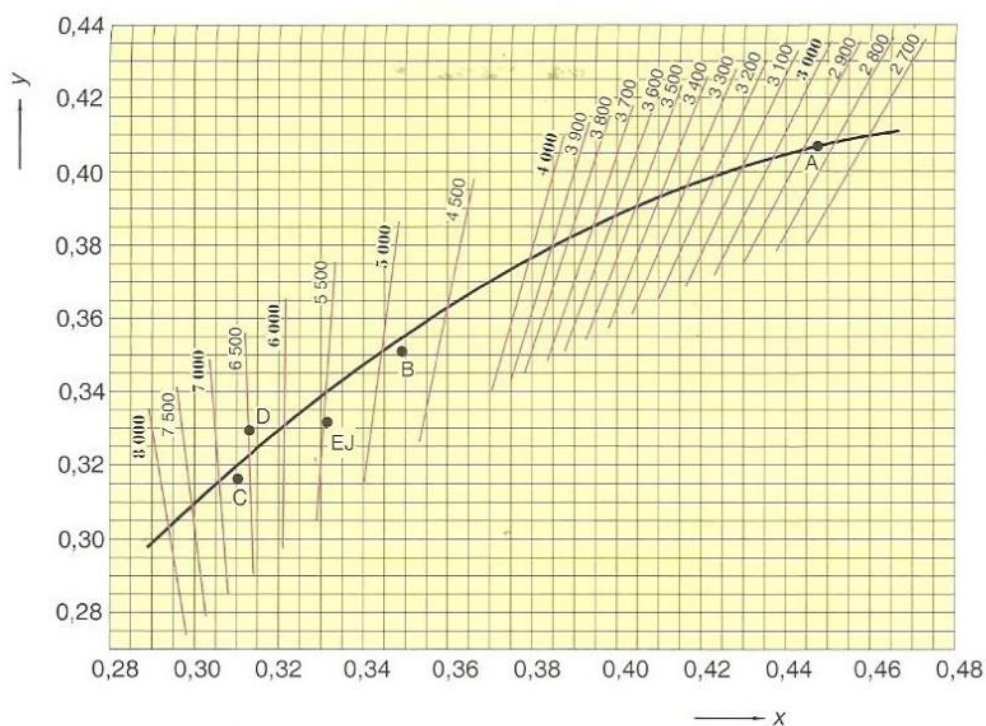
### 3.2 Teplota chromatičnosti

Kromě zmíněných trichromatických soustav v případě, že nebereme v úvahu světelný tok nebo jas zdroje, můžeme barvu určit pomocí teploty chromatičnosti. „Teplota chromatičnosti  $T_c$  je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření.“ [1, str. 125] Jednotkou teploty chromatičnosti jsou kelviny (K). Často se však v technické praxi udává převrácená hodnota teploty chromatičnosti násobená  $10^6$ , takže se udává v převrácených megakelvinech ( $MK^{-1}$ ).

U světelných zdrojů, které mají hodnoty záření jen přibližné k teplotnímu zářiči a jejich křivka spektrálního složení je souvislá bez velkých změn, se k popisu teploty chromatičnosti používá tzv. ekvivalentní teplota chromatičnosti  $T_e$ . U zdrojů, jejichž



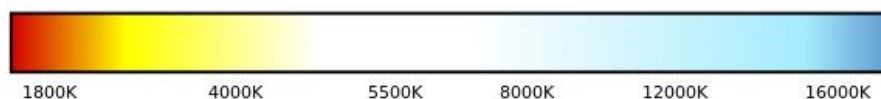
spektrální křivka má hodně prudkých změn, se k přibližnému popsání barvy využívá tzv. náhradní teploty chromatičnosti  $T_n$ . Ta je definována teplotou chromatičnosti odpovídajícího bodu, který se nachází na čáře teplotních zářičů nejbližší bodu, který odpovídá chromatičnosti uvedeného světla pod podmínkou, že se vzdálenost sleduje na rovnoměrném obrazci chromatičnosti. K určení ekvivalentní a náhradní teploty chromatičnosti se používá diagram na obrázku 13, na kterém jsou znázorněny čáry konstantních teplot chromatičnosti. Tento digram byl sestrojen pomocí transformace systému normál na křivku teplotních zářičů v rovnoměrném diagramu chromatičnosti.



Obrázek č. 13: Čára teplotních zářičů v souřadnicích  $x$ ,  $y$  s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti [1]

Ve světelné technice rozlišujeme tři základní barvy světla podle teploty chromatičnosti a to:

- teple bílá < 3 300 K
- bílá 3300 - 5000 K
- studeně bílá (denní) > 5000 K



Obrázek č. 14: Orientační barevné znázornění teplot chromatičnosti [7]

### 3.3 Podání barev

Vjem barvy závisí na spektrálním složení záření zdroje osvětlujícího předmět a na spektrálním činiteli odrazu nebo prostupu předmětu. Také ho však ovlivňuje i samotný zrak pozorovatele, a to kvůli jeho různé citlivosti k jednotlivým barvám, dále pak ho ovlivňuje stav adaptace zraku podle druhu osvětlení zorného pole. Nejčastěji člověk pozoruje předměty za denního světla či v žárovkovém světle, a tak se vjem barev za těchto okolností stal standardní představou a považuje se za normální. Při pozorování předmětů osvětlených jinými zdroji, například indukčními výbojkami, může docházet k velkému zkreslení barevného vjemu. Nelze přesně rozlišit barvy.

Podání barev charakterizuje působení spektrálního složení světla zdrojů na vjem barvy předmětu, který je osvětlován. Vjem barvy určitého předmětu se srovnává s jeho vzhledem za smluveného či obvyklého osvětlování. Při tomto hodnocení, jehož přesný postup stanovuje doporučení mezinárodní komise pro osvětlování, se neberou v potaz psychologické ani estetické vlivy. K přesnému číselnému určení kvality podání barev se používá index podání barev, který formuluje míru shody vjemu barvy předmětů, které jsou osvětleny určitým zdrojem a barvy předmětů osvětlených smluvním zdrojem za jasně stanovených pozorovacích podmínek. Metoda spočívá ve vyjádření číselného rozdílu vjemu barvy zvoleného komplexu osmi nebo čtrnácti barevných vzorků při osvětlování uvažovaným a smluveným zdrojem světla. Výpočtem se pak určí všeobecný index podání barev  $R_a$ . V případě potřeby podrobnějšího hodnocení se může stanovit pro všechny barevné vzorky jednotlivě speciální index podání barev  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  apod. Rozdíl vjemu barvy vzorku ve smluveném světle a zkoušeném světle se určuje z porovnání vzdálenosti  $\Delta E_i$  bodů, které popisují barevné vjemy v rovnoměrném kolorimetrickém prostoru CIE 1964 (UVW). Pro všeobecný index podání barev platí:

$$R_a = 100 - 4,6 \cdot \Delta \bar{E}_a \quad (15)$$

$$\Delta \bar{E}_a = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta \bar{E}_i \quad (16)$$

Pro speciální index podání  $R_i$  barev platí:

$$R_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i \quad (17)$$

$$\Delta E_i = \sqrt{(U_{oi} - U_{ki})^2 + (V_{oi} - V_{ki})^2 + (W_{oi} - W_{ki})^2} \quad (18)$$

kde jsou

$U_{oi}, V_{oi}, W_{oi}$  trichromatické složky popisující v soustavě  $UVW$  barevný vjem i-tého vzorku při osvětlování srovnávacím zdrojem

$U_{ki}, V_{ki}, W_{ki}$  trichromatické složky popisující v soustavě  $UVW$  barevný vjem i-tého vzorku při osvětlování zkouškovým zdrojem

$n$  počet barevných vzorků, nejčastěji osm nebo čtrnáct

Index podání barev dosahuje hodnot v rozmezí od 0 až 100. V přírodním denním světle a ve světle teplotních zdrojů dochází k nejuvěrnějšímu vjemu barev,  $R_a = 100$ . V žlutém monochromatickém světle sodíkových nízkotlakých výbojek se barva nedá skoro vůbec určit,  $R_a = 0$ . Podle normy ČSN EN 12464 se v pracovních prostorách vyžaduje  $R_a > 80$ . Přehled hodnot indexu podání barev pro různé světelné zdroje je uveden v tabulce číslo 3. [1,7]

Světelný zdroj	Teplota chromatičnosti $T_c$ (K)	Index podání barev $R_a$ (-)
žárovka	2700	100
halogenová žárovka	2800 až 3100	100
kompaktní zářivka	2700 až 6500	80 až 90
lineární zářivka	2700 až 8000	60 až 98
indukční výbojka	2700 až 4000	80
halogenidová výbojka	3000 až 5900	60 až 90
rtuťová výbojka	3200 až 4200	40 až 60
vysokotlaká sodíková výbojka	2000	25
vysokotlaká sodíková výbojka se zlepšeným podáním barev	2500	80
světelná dioda	2600 až 8000	70 až 90

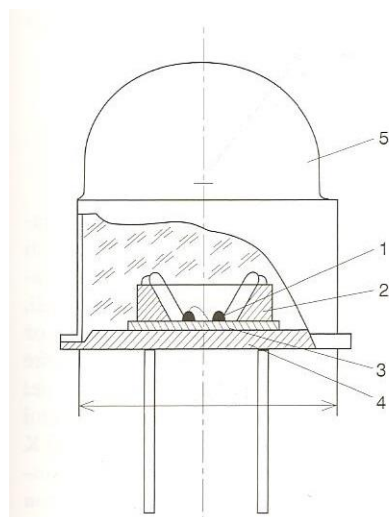
Tabulka č. 3: Barevné vlastnosti světelných zdrojů, které slouží pro osvětlování vnitřních prostorů [1]

## 4 Světlo emitující diody (LED)

LED z anglického light emitting diode jsou polovodičové součástky obsahující přechod PN, který, když je buzen průchodem elektrického proudu, emituje optické záření. Světelné diody zaznamenaly v poslední době obrovský rozvoj a všichni významní výrobci je mají ve svém výrobním a prodejním portfoliu. Jejich velký rozvoj souvisí se zdokonalováním a rozvojem materiálních technologií a zdokonalováním výrobních procesů polovodičové techniky. Jediným limitujícím faktorem v dosažení příznivého poměru cena/světlo je v současné době cena krystalu základního polovodiče, přesto teoretické možnosti zvyšování účinnosti přeměny elektrické energie na světlo předurčují světelné diody k dosažení velmi významného místa mezi základními skupinami světelných zdrojů. [7]

### 4.1 Princip světlo emitujících diod (LED)

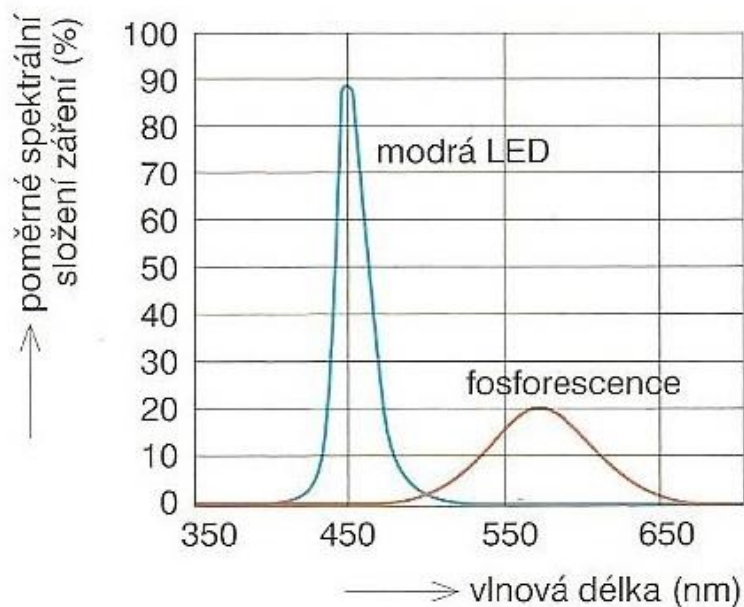
Světlo emitující dioda je elektronický prvek, který při průchodu stejnosměrného napětí v propustném směru vyvolá vzájemné přibližování elektronů a děr k místu kontaktu a jejich rekombinaci. Při rekombinaci páru všech elektronů a děr dochází k uvolnění určitého kvanta energie a ta se může vyzářit mimo krystal nebo může být tato energie absorbována zpět v krystalu, což způsobí zvýšení teploty, která se přes pouzdro odvádí do prostoru mimo diodu. Záření je pokaždé omezené na velice úzké spektrum, lze jej téměř pokládat za monochromatické. Diody takto mohou vyzařovat světlo červené, zelené, oranžové, žluté a modré barvy dle použitého materiálu na přechod PN. Pro vytvoření tohoto přechodu se využívají polovodiče typu  $A^{III}B^V$  velké čistoty, které jsou legovány malým množstvím vhodné příměsi, která tvoří přebytek elektronů u materiálů typu N nebo přebytek děr u materiálů typu P. Z principu funkce diody nelze přímo získat bílé světlo. Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly je zobrazeno na obrázku číslo 15. [1]



Obrázek č. 15: Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly  
 1 – polovodič s přechodem PN, 2- reflektor, 3 – keramická destička odvádějící teplo,  
 4 – podložka, 5 – polokulová čočka [1]

Světlo emitující diody vyzařující bílé světlo můžeme získat těmito způsoby:

- aditivním míšením, kdy dochází přímému míšení světla červené, zelené a modré LED
- využití fosforescence luminoforu



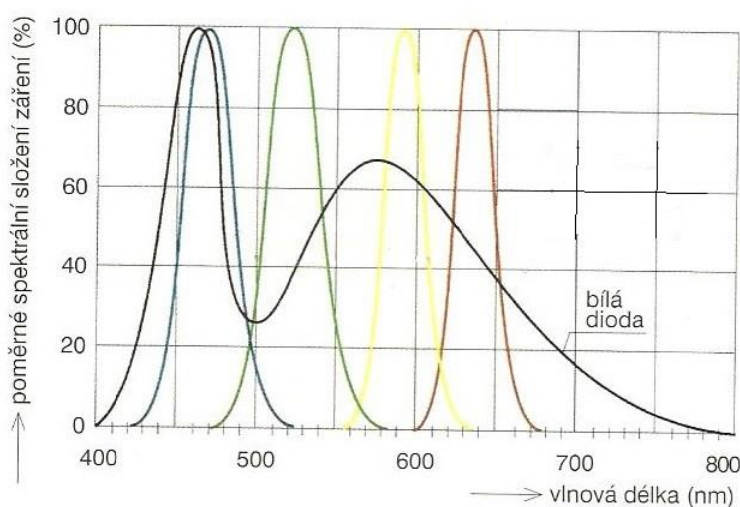
Obrázek č. 16: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody) [1]

Aditivní míšení vyžaduje ke své funkci náročný hardware a software. Výsledný jas je nižší a v důsledku degenerace jednotlivých druhů čipů dochází v průběhu života k nežádoucím změnám vyzařované barvy.

Použití luminoforu funguje stejně jako u zářivek. Používají se zde modré LED čipy, které se opatří vrstvou vhodně zvoleného luminoforu, který dodá výslednému světelnému spektru spektrální čáry v zelené, žluté a červené části spektra, protože luminofor umožňuje absorpci fotonu s vyšší energií a následnou emisi fotonu s nižší energií, což znamená s vyšší vlnovou délkou. Tato varianta je energeticky úspornější a v porovnání aditivní metodou jsou tyto čipy výrazně menší. Emisní spektrum takto získané bílé LED je znázorněno na obrázku číslo 16. [1,7]

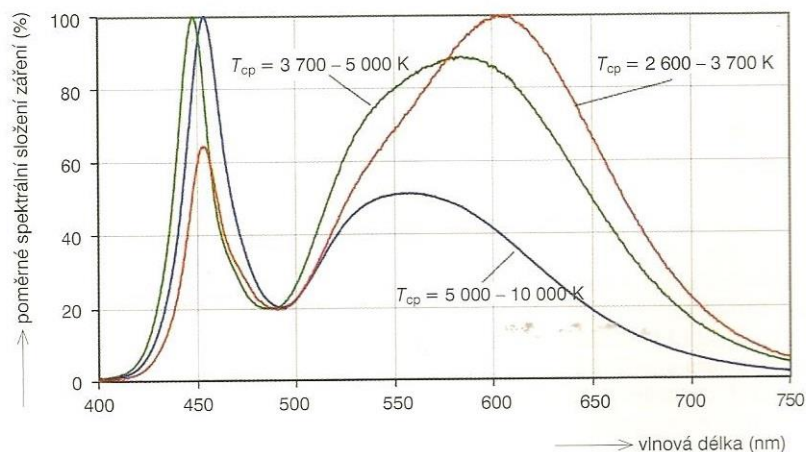
## 4.2 Spektrum světlo emitujících diod (LED)

Charakteristická spektra barevných LED společně se spektrem jednoho druhu bílé LED jsou znázorněny na obrázku č. 17.



Obrázek č. 17: Emisní spektrum vybraných LED [1]

Velmi širokého rozsahu náhradní teploty chromatičnosti, který je zhruba od 2500 K až do 4000 K u teplých odstínů a 5000 K až 10000 K u chladnějších odstínů, se dá dosáhnout u moderních bílých LED. Příklady emisních spekter bílých LED pro různé hodnoty náhradní teploty chromatičnosti jsou znázorněny na obrázku číslo 18.

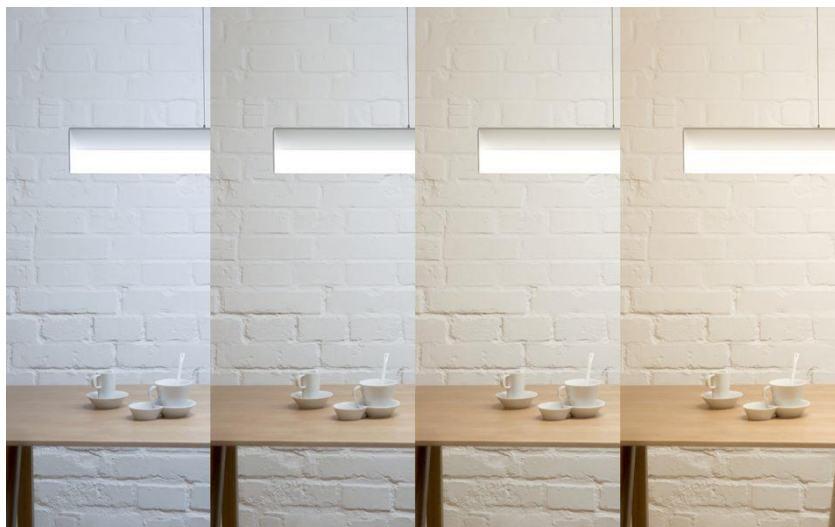


Obrázek č. 18: Emisní spektrum diod s rozdílnými náhradními teplotami chromatičnosti [1]

### 4.3 Tunable white

S rozvojem LED svítidel, řídicí techniky a znalostí o lidském organismu začínají výrobci osvětlovací techniky vyrábět svítidla s možností nastavování různých světelných scén, popřípadě biodynamických scén. Tyto scéný se používají ve vnitřních prostorách k napodobení například průběhu denního světla, což zejména v uzavřených pracovních prostorách vede prokazatelně ke zvýšení pohody a pracovní efektivity zaměstnanců či studentů, což je ověřeno řadou studií, např. studií: Účinek světla na úroveň výkonů žáku od firmy OSRAM, jejíž závěr udává: *“Pozornost a schopnost rozumového poznávání žáků lze zvýšit pomocí biologicky optimalizovaného osvětlení. S pomocí nového způsobu osvětlení, jehož cílem je simulace přirozeného denního světla, dosahovali žáci lepších výsledků standardizovaných testů zaměřených na schopnost soustředění”*. [16] Zároveň podstatně vzrostla rychlost jejich práce. V těchto prostorách se v průběhu dne mění intenzita, směr a barevné vlastnosti osvětlení pomocí programovacích řídicích systémů jako například digitální ovladač DALI.

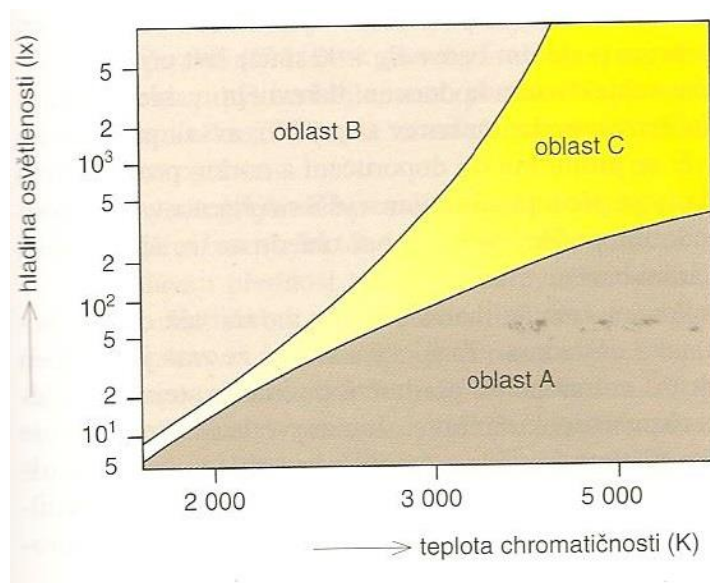
Jedním z parametrů, který se na LED svítidlech dá řídit, je teplota chromatičnosti. Tuto vlastnost svítidel výrobci označují anglickým názvem Tunable white. Princip volitelné teploty chromatičnosti (tunable white) je realizován pomocí řízení intenzity dvou LED modulů různé teploty chromatičnosti, např. 2700 K a 6500 K, které jsou v daném svítidle obsaženy. K tomu se například používá tzv. DALI LED driver např. od firmy Helvar. Na obrázku číslo 19 je znázorněno svítidlo s různými navolenými teplotami chromatičnosti.



Obrázek č. 19: Svítidlo SANT od firmy HALLA, které umožňuje regulaci teploty chromatičnosti [19]

Pro příjemný a přirozený vzhled prostoru je vhodné volit teplotu chromatičnosti s ohledem na požadovanou hladinu osvětlenosti. Tuto skutečnost znázorňuje tzv. Kruithoffův diagram, který je znázorněn na obrázku číslo 20. Tento diagram tvoří tři oblasti. Oblast A působí nevýrazně a velice chladným dojmem, oblast C působí přirozeným dojmem a oblast B vytváří nepřirozený vzhled barev. Tento diagram je vhodné použít při návrhu osvětlení s řízenou teplotou chromatičnosti.

Přirozená spojitost mezi těmito dvěma parametry je vysvětlována přizpůsobením lidského zraku přírodním podmínkám. Denní světlo se ráno a večer vyznačuje teplejšími a málo intenzivními hodnotami, než uprostřed dne, kdy je slunce na vrcholu. Tento stav nastává kvůli rozdílným podmínkám rozptylu a pohlcení světla v zemské atmosféře. [11]



Obrázek č. 20: Kruithoffův diagram [11]



## 5 Metodika a popis měření

V následující praktické části jsou proměřeny fotometrické a elektrické veličiny LED svítidla s možností volitelné teploty chromatičnosti, a to pro různé hodnoty teploty chromatičnosti. Jedná o svítidlo SANT od firmy Halla, které je popsáno v kapitole 5.1.

Měření probíhalo v laboratoři světelné techniky ČVUT FEL. Během měření jsme respektovali normy ČSN EN 13032 a ČSN EN ISO 11664. Světelná spektra a fotometrické veličiny byly měřeny spektrofotometrem HR 8 od firmy NARRAN S/N: HR8-330-800-122503. Měrné světelné toky byly proměřeny pomocí kulového integrátoru evidenčního čísla 7893, který je znázorněn na obrázku číslo 21. Pro měření proudu, napětí, příkonu a harmonických složek proudu a napětí byl použit analyzátor sítě Chauvin Arnoux C.A 8220. Svítidlo bylo napájeno z laboratorních zdrojů, které zajišťují potřebné elektrické parametry kvality napájení.

Zadávání jednotlivých teplot chromatičnosti probíhalo pomocí PC programu Helvar designer, viz obrázek 22, odkud byl řízen router 905 od firmy Helvar, který pak dále pomocí DALI sběrnice ovládal tzv. DALI LED driver v samotném svítidle, což je znázorněno na obrázku číslo 23.

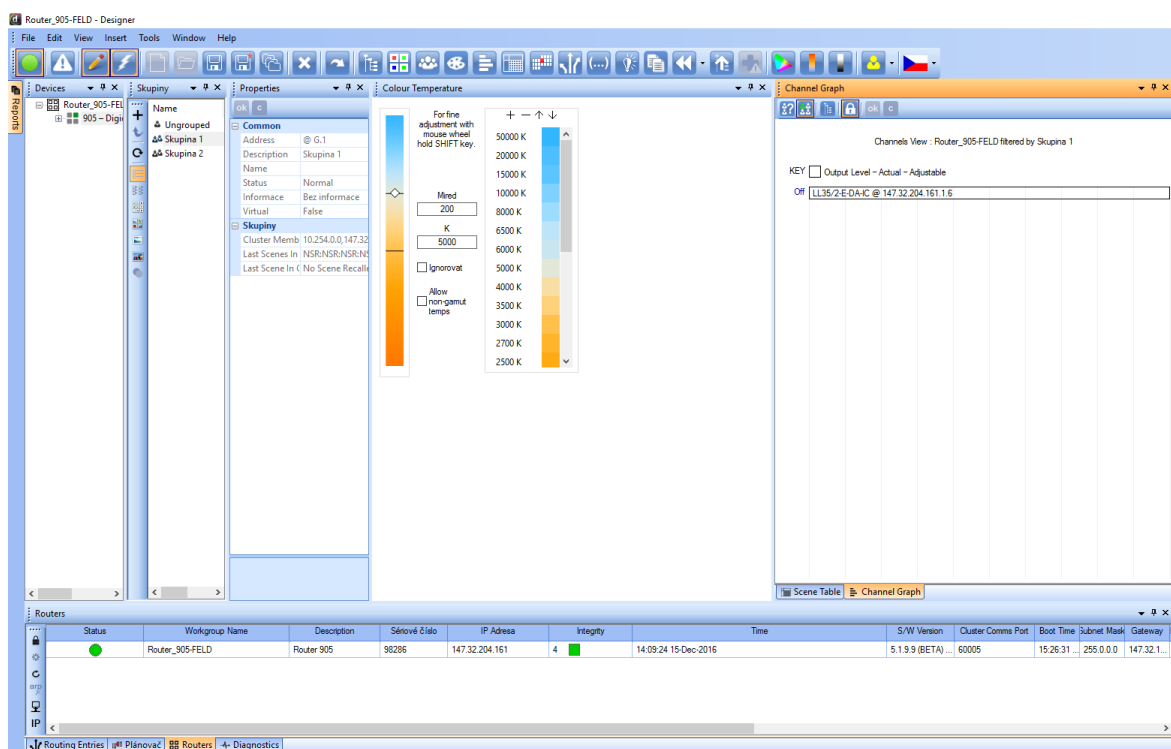
Na začátku měření jsme uchytili svítidlo na fotometrickou lavici, která je na obrázku číslo 24 tak, aby jednotlivé LED moduly směřovaly přímo proti sondě použitého spektrofotometru. Dodávaný difuzor byl ze svítidla sundán. Následně jsme přisunuli sondu spektrofotometru k LED modulu do fotometrického středu, což je znázorněno na obrázku číslo 25. Zatáhli jsme závěs okolo fotometrické lavice, rozsvítili měřené svítidlo a zahájili samotné měření spekter pro jednotlivé zvolené teploty chromatičnosti. Naměřené hodnoty, a to průběh intenzity ozáření, naměřená teplota chromatičnosti, index podání barev, souřadnice a obrázek trichromatického trojúhelníku, byly uloženy v PC a následně dále zpracovány.

Při měření měrného světelného toku bylo svítidlo umístěno do kulového integrátoru, a to dle pokynů výrobce, tedy zavěšeno tak, že LED moduly směřovaly směrem dolů. Při tomto měření byl sundán difuzor, který je k danému svítidlu dodáván. Toto měření proběhlo pro krajní hodnoty zvolené teploty chromatičnosti 2700 K a 6500 K.

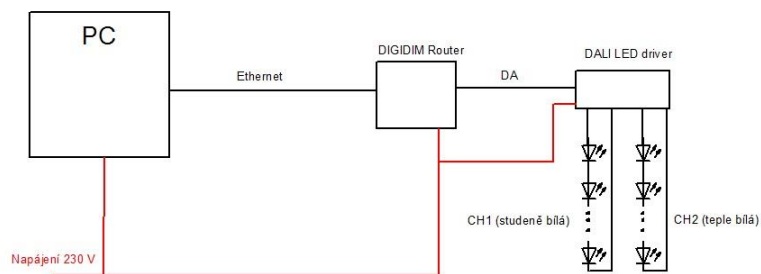
Na dalším stanovišti proběhlo měření proudu, napětí, příkonu a harmonických složek tak, že se na vstupní vodiče do měřeného svítidla umístila klešťová sonda zvoleného analyzátoru sítě. Toto měření proběhlo rovněž pro krajní hodnoty nastavené teploty chromatičnosti 2700 K a 6500 K.



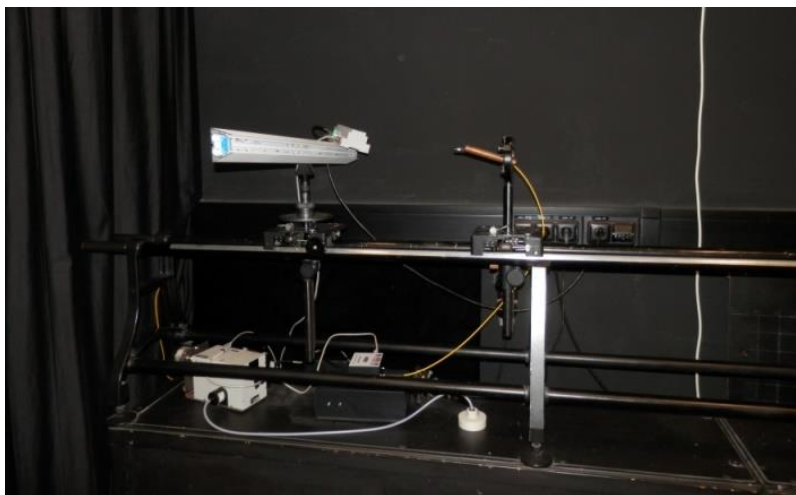
Obrázek č. 21: Použitý kulový integrátor [20]



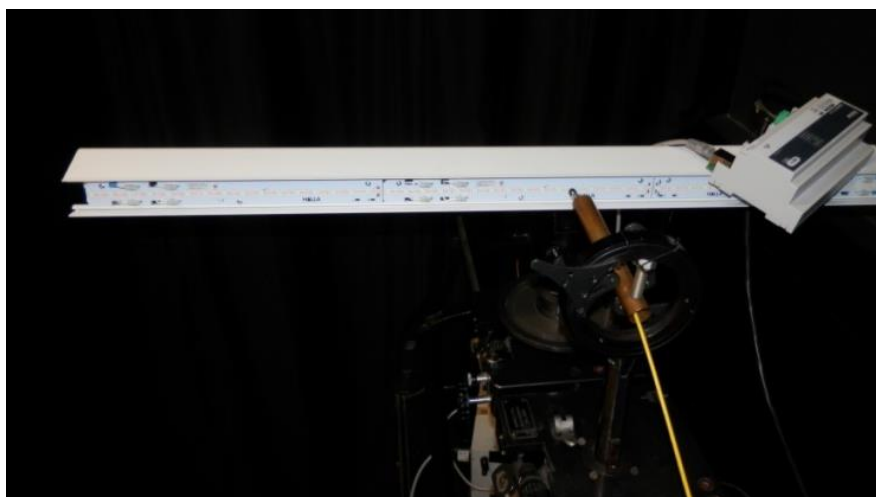
Obrázek č. 22: Obrázek Helvar designer programu v PC



Obrázek č. 23: Schéma zapojení svítidla



Obrázek č. 24: Uchycení svítidla a sondy spektrofotometru na fotometrické lavici



Obrázek č. 25: Na směřování sondy na příslušné LED moduly

Vzhledem k tomu, že DALI LED driver, který byl použit, umožňuje regulaci zadávané teploty chromatičnosti pouze v rozsahu 3000 K až 5000 K a použitý světelný zdroj má rozsah teplot chromatičnosti od 2700 K až 6500 K, dochází k odlišnosti mezi zadanou teplotou chromatičnosti a naměřenou teplotou chromatičnosti, proto bylo nutné stanovit přepočít mezi skutečnou a nastavenou teplotou chromatičnosti. To je uvedeno v tabulce číslo 4.

Požadovaná (K)	Nastavená (K)	Naměřená (K)
2700	3000	2800
3500	3389	3549
4500	3944	4501
5500	4500	5482
6500	5000	6403

Tabulka č. 4: Požadované, nastavené a naměřené hodnoty teploty chromatičnosti

## 5.1 Popis svítidla

Svítilo SANT od firmy Halla výrobního čísla 132-500K-15GFQ/TC je LED lineární svítidlo s opálovým difusorem, které je znázorněno na obrázku číslo 24, 25, 26, 27, 28, 29 a 30. Svítidlo SANT má dle výrobce vynikající světelné parametry. Vložené zdroje LED dosahují provozní účinnosti až  $150 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ .

Je vybaveno možností stmívání, s přímo-nepřímým vyzařováním a možností nastavování teploty chromatičnosti v rozsahu 2700 K – 6500 K. Svítidla je možné použít samostatně či jako kontinuální osvětlovací systém. Design toho svítidla navrhl Rob van Beek.[19]



Obrázek č. 26: Přímý pohled na svítidlo SANT



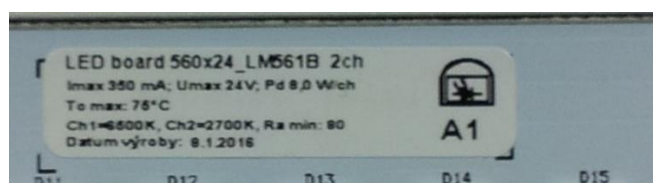
Obrázek č. 27: Horní pohled na svítidlo SANT



Obrázek č. 28: Boční pohled na svítidlo SANT



Obrázek č. 29: Pohled na jednotlivé LED moduly



Obrázek č. 30: Detail štítku pro vložené LED moduly

## 6 Naměřené hodnoty

### 6.1 Elektrické parametry svítidla

Určení skutečného světelného toku měrného světelného výkonu:

Světelný normál 13-5

$$\Phi_n = 1475 \text{ lm } \pm 5 \%$$

$$U_N = 220 \text{ V}$$

$$E_N = 120 \text{ } \mu\text{W}$$

$$E_{KN} = 121,1 \text{ } \mu\text{W}$$

$$E_{KZ} = 105,7 \text{ } \mu\text{W}$$

$$E_Z = 166,4 \text{ } \mu\text{W} \text{ pro } 6500 \text{ K}$$

$$E_Z = 168,4 \text{ } \mu\text{W} \text{ pro } 5000 \text{ K}$$

$$E_Z = 153,4 \text{ } \mu\text{W} \text{ pro } 2700 \text{ K}$$

Použité vztahy:

$$\Phi_Z = \Phi_n \cdot \frac{E_Z}{E_n} \cdot \frac{E_{kn}}{E_{kz}} \quad (19)$$

$$\eta_e = \frac{\Phi_Z}{P_p} \quad (20) \text{ pro celkové svítidlo}$$

Výsledky:

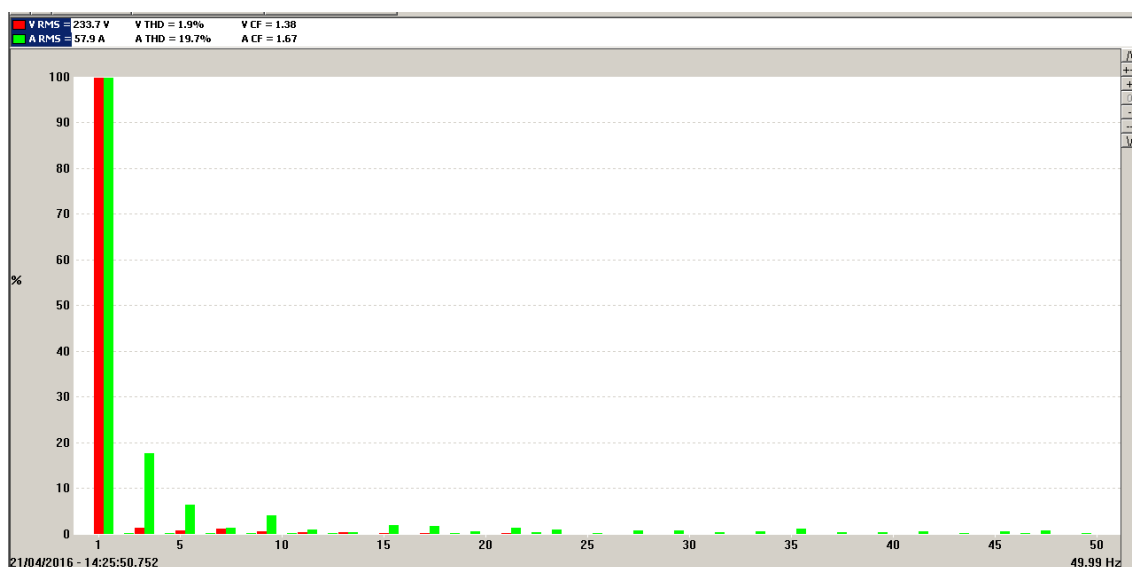
$T_c$ (K)	$\Phi_Z$ (lm)	$\eta_e$ (lm·W <sup>-1</sup> )
2700	2152,8	86,11
5000	2369,5	94,78
6500	2341,4	93,65

Tabulka č. 5: Skutečné světelné toky a měrné světelné výkony pro měřené teploty chromatičnosti

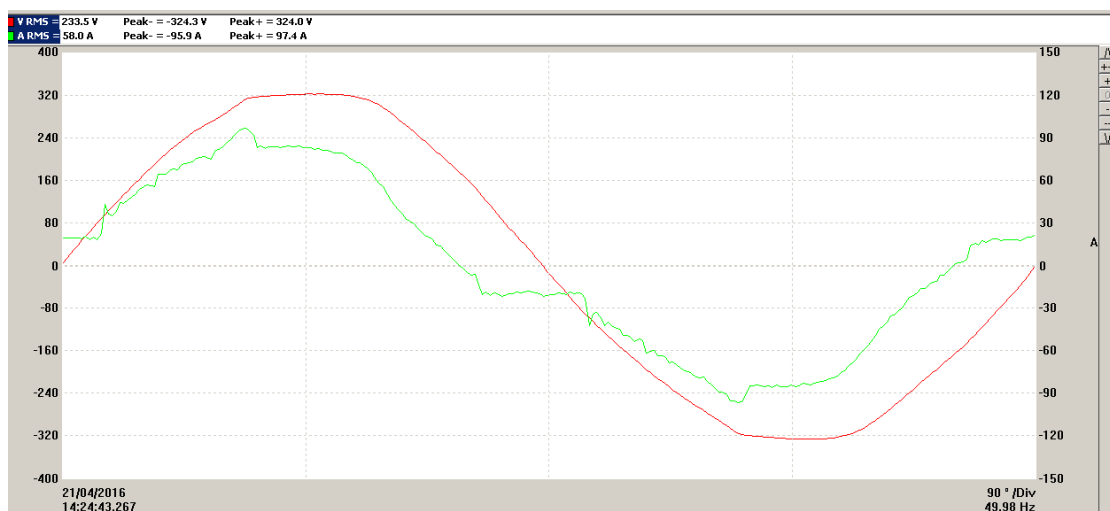
Naměřené výkony:

$T_c$ (K)	$P_p$ (W)	Q (Var)	S (VA)
2700	25,04	- 8,85	27,1
6500	24,86	- 8,96	26,98

Tabulka č. 6: Naměřené výkony



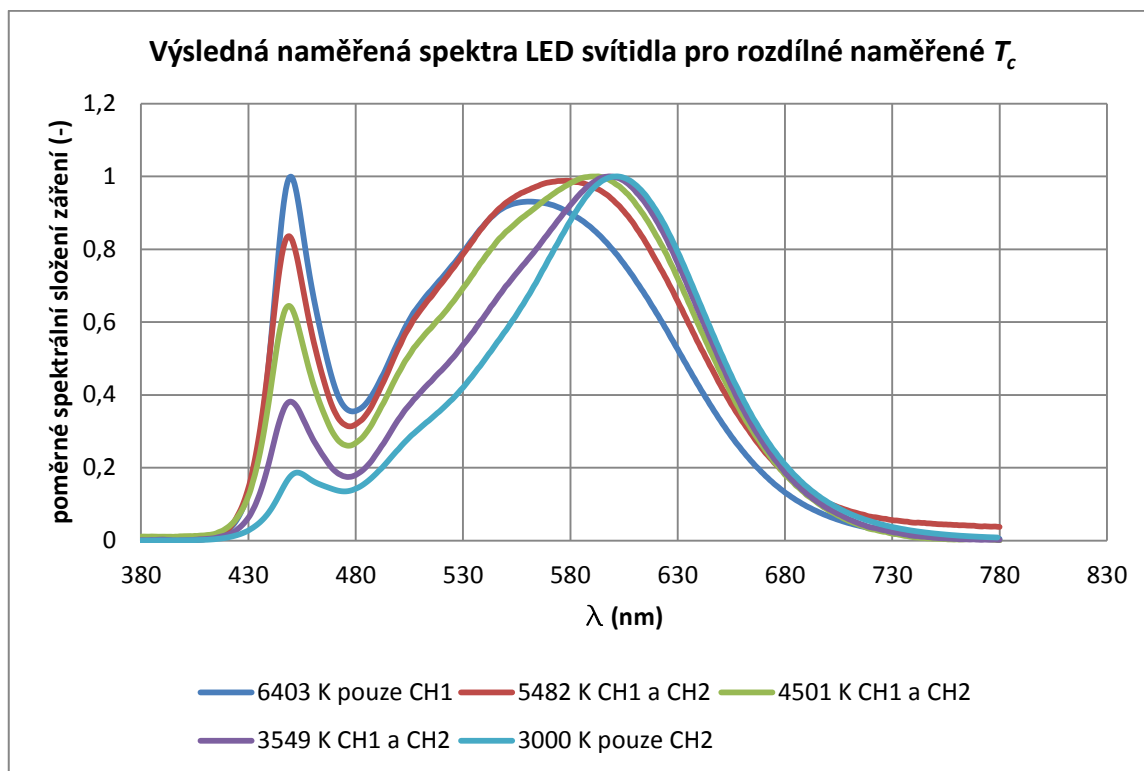
Obrázek č. 31: Spektrum harmonických složek pro 2700 K



Obrázek č. 32: Průběh proudu a napětí svítidlem při 2700 K

Naměřené měrné světelné výkony, viz tabulka číslo 5, jsou menší než udávané výrobcem, což je způsobeno tím, že výrobce udává měrný světelný výkon LED modulu a my jsme proměřili měrný světelný výkon celého svítidla, včetně příkonu DALI driveru. Naměřené činné, jalové a zdánlivé výkony, které jsou uvedeny v tabulce číslo 6, se pro různé navolené teploty chromatičnosti téměř neliší. Svítidlo vykazuje kapacitní charakter. Spektra harmonických složek, která jsou znázorněna na obrázku číslo 31 a průběhy proudu a napětí svítidlem, která jsou na obrázku číslo 32, jsou pro všechny měřené teploty chromatičnosti téměř totožné. Index  $A THD$  je 19,7 % až 19,9 %, což splňuje požadavky normy.

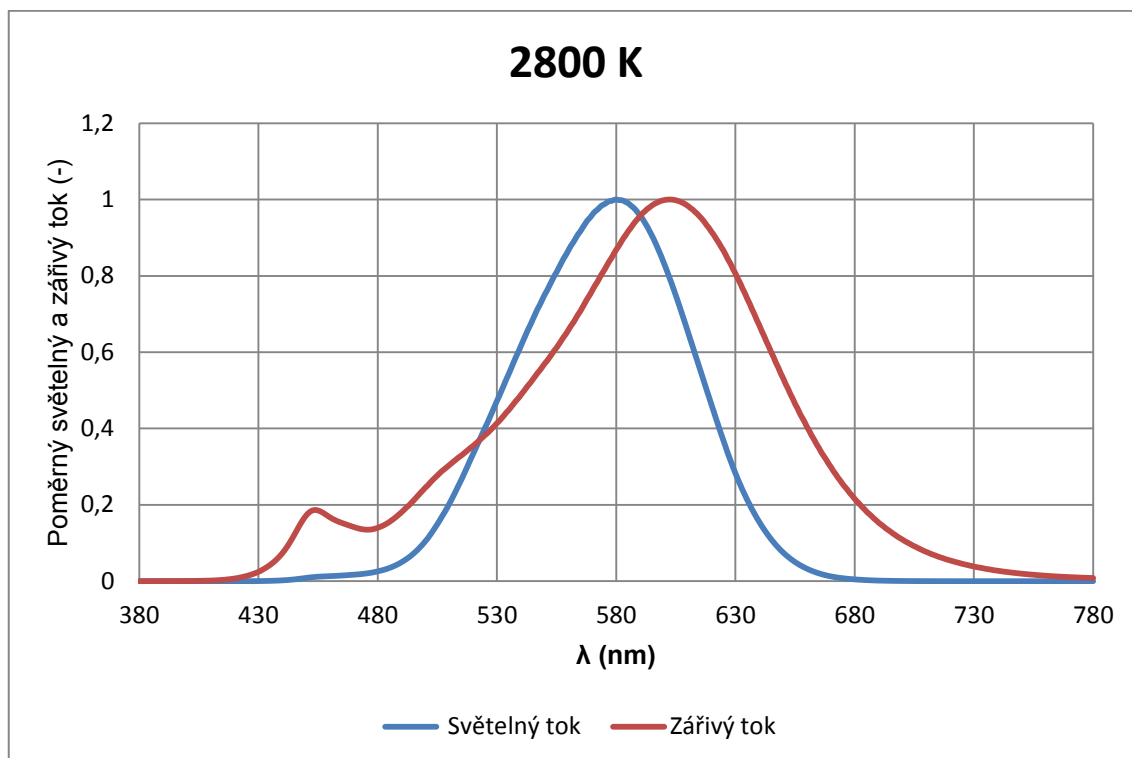
## 6.2 Naměřená Spektra (Fotometrické veličiny)



Obrázek č. 33: Výsledná naměřená spektra LED svítidla pro rozdílné naměřené  $T_c$

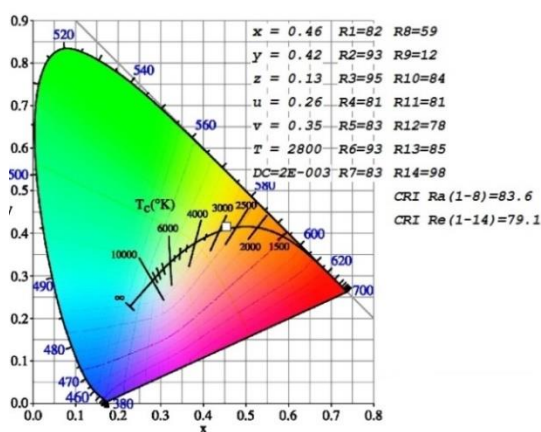
Naměřená spektra, která jsou znázorněna na obrázku č. 33, odpovídají spektru bílé LED a probíhají přes celé fotometrické spektrum. Jsou složena ze dvou vrcholů. První vrchol se nachází v oblasti vlnových délek 450 nm a odpovídá spektru, které vytváří přímo modrá dioda. Druhý vrchol se nachází v oblasti 580 nm až 600 nm a odpovídá oblasti, která je buzena luminoforem, který je na daný LED modul nanesen. S rostoucí teplotou chromatičnosti vzrůstá první vrchol a druhý lehce klesá. S vyšším množstvím krátkých vlnových délek dochází k nárůstu teploty chromatičnosti od teple bílých odstínů k studeně bílým odstínům.

## Naměřená teplota chromatičnosti 2800 K



Obrázek č. 34: 2800 K

V grafu, který můžeme vidět na obrázku číslo 34, je znázorněn průběh světelného toku a zářivého toku v závislosti na vlnové délce. Průběh zářivého toku se skládá ze dvou vrcholů. První se nachází v oblasti 450 nm a druhý v oblasti 600 nm. Pomyslná vytyčená oblast prvního vrcholu je oproti pomyslné oblasti druhého vrcholu zanedbatelná a světelný tok neovlivňuje.

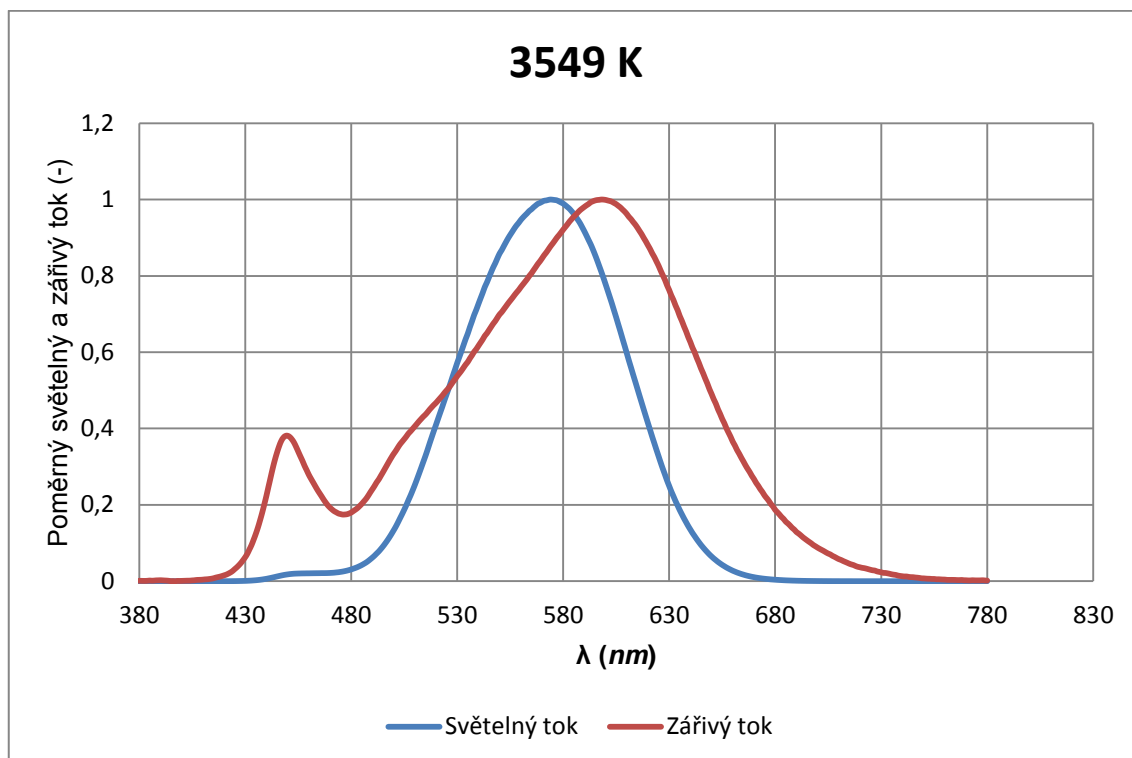


Obrázek č. 35: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 2800 K

Na obrázku číslo 35 je znázorněn trichromatický trojúhelník, na jehož křivce barev černého tělesa je znázorněn bod, který odpovídá měřené teplotě chromatičnosti. Dále jsou na obrázku uvedeny souřadnice tohoto bodu, hodnota chromatičnosti, vzorky podání barev a výsledné indexy podání barev.

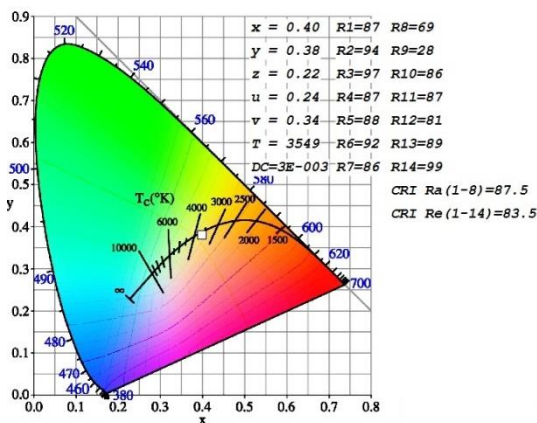


## Naměřená teplota chromatičnosti 3549 K



Obrázek č. 36: 3549 K

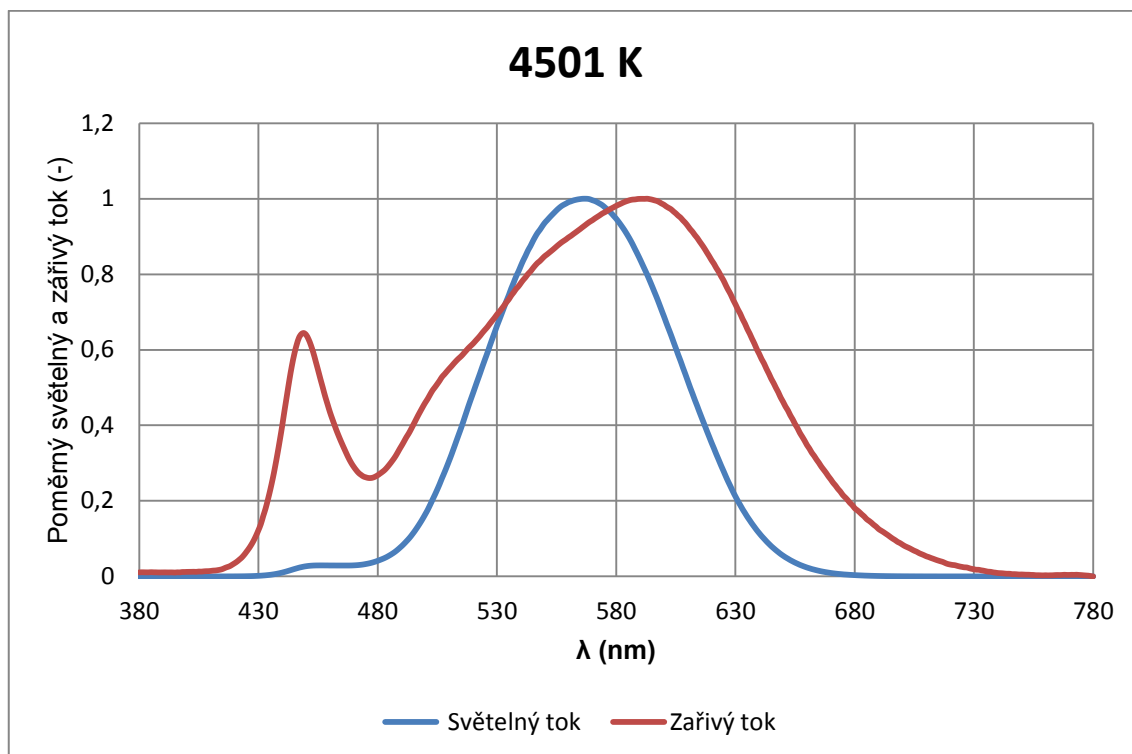
V grafu, který můžeme vidět na obrázku číslo 36, je znázorněn průběh světelného toku a zářivého toku v závislosti na vlnové délce. Průběh zářivého toku se skládá ze dvou vrcholů. První se nachází v oblasti 450 nm a druhý v oblasti 600 nm. Pomyslná vytyčená oblast prvního vrcholu je oproti pomyslné oblasti druhého vrcholu malá a světelný tok téměř neovlivňuje.



Obrázek č. 37: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 3549 K

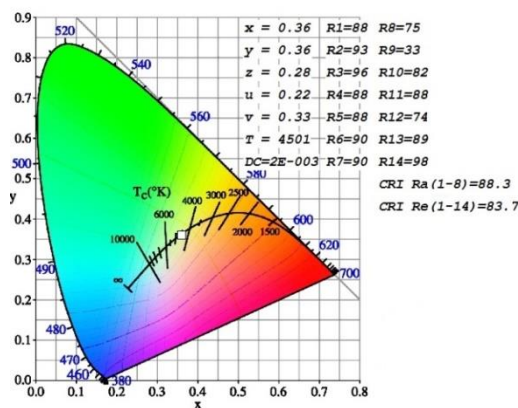
Na obrázku číslo 37 je znázorněn trichromatický trojúhelník, na jehož křivce barev černého tělesa je znázorněn bod, který odpovídá měřené teplotě chromatičnosti. Oproti předešlé teplotě chromatičnosti 2800 K je patrný posun tohoto bodu směrem doleva po křivce. Dále jsou na obrázku uvedeny souřadnice tohoto bodu, hodnota chromatičnosti, vzorky podání barev a výsledné indexy podání barev.

## Naměřená teplota chromatičnosti 4501 K



Obrázek č. 38: 4501 K

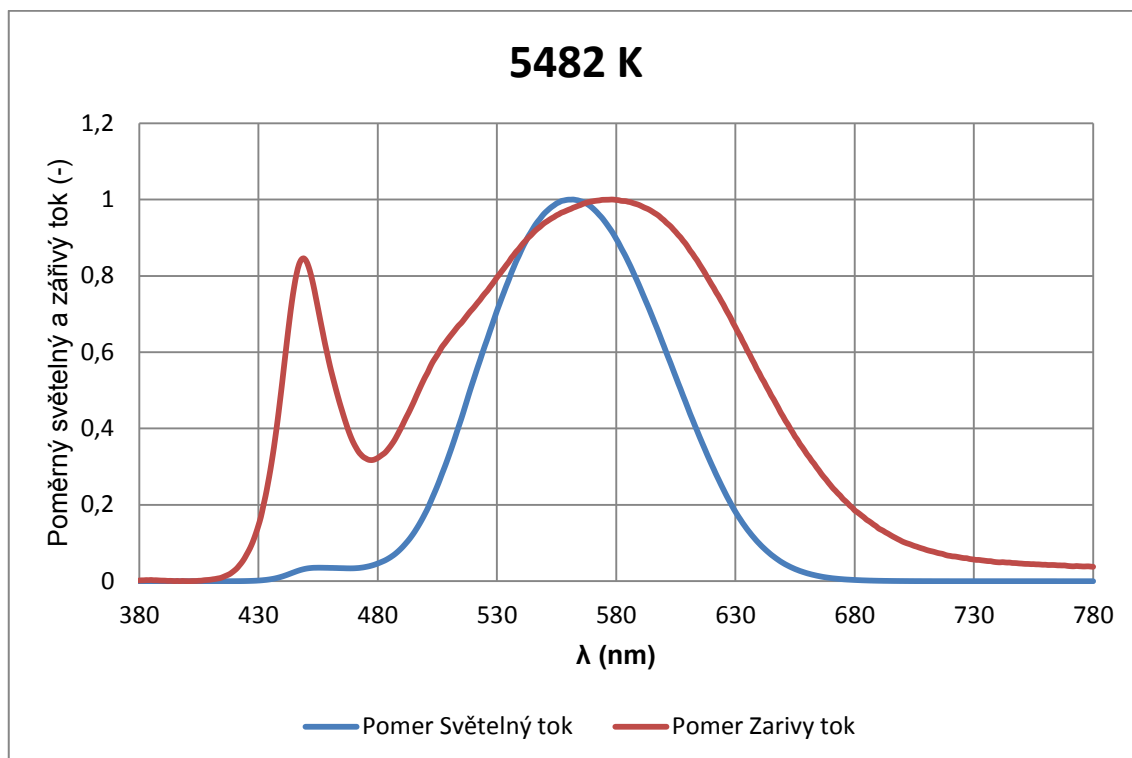
V grafu, který můžeme vidět na obrázku číslo 38, je znázorněn průběh světelného toku a zářivého toku v závislosti na vlnové délce. Průběh zářivého toku se skládá ze dvou vrcholů. První se nachází v oblasti 450 nm a druhý v oblasti 600 nm. Pomyslná vytyčená oblast prvního vrcholu je oproti pomyslné oblasti druhého vrcholu malá a světelný tok lehce ovlivňuje v oblasti krátkých vlnových délek.



Obrázek č. 39: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 4501 K

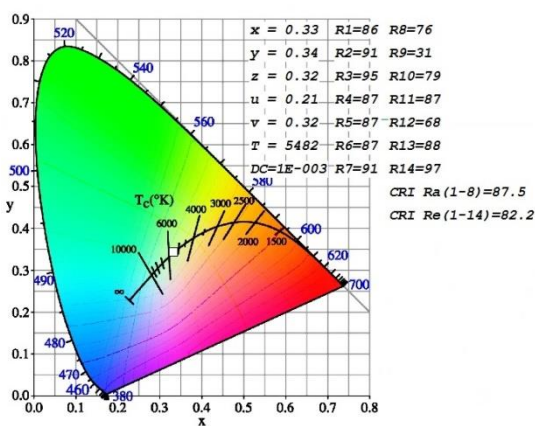
Na obrázku číslo 39 je znázorněn trichromatický trojúhelník, na jehož křivce barev černého tělesa je znázorněn bod, který odpovídá měřené teplotě chromatičnosti. Oproti předešlé teplotě chromatičnosti 3549 K je patrný posun tohoto bodu směrem doleva po křivce. Dále jsou na obrázku uvedeny souřadnice tohoto bodu, hodnota chromatičnosti, vzorky podání barev a výsledné indexy podání barev.

## Naměřená teplota chromatičnosti 5482 K



Obrázek č. 40: 5482 K

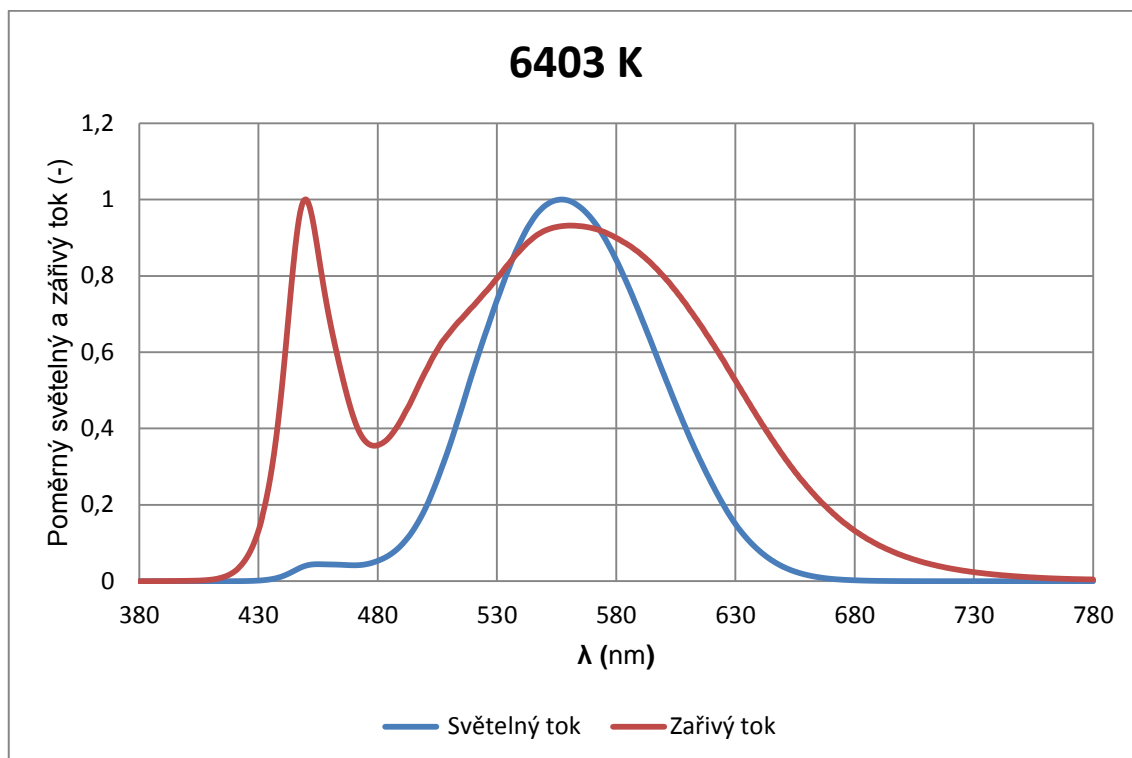
V grafu, který můžeme vidět na obrázku číslo 40, je znázorněn průběh světelného toku a zářivého toku v závislosti na vlnové délce. Průběh zářivého toku se skládá ze dvou vrcholů. První se nachází v oblasti 450 nm a druhý v oblasti 600 nm. Pomyslná vytyčená oblast prvního vrcholu je oproti pomyslné oblasti druhého vrcholu malá a světelný tok ovlivňuje v oblasti krátkých vlnových délek.



Obrázek č. 41: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 5482 K

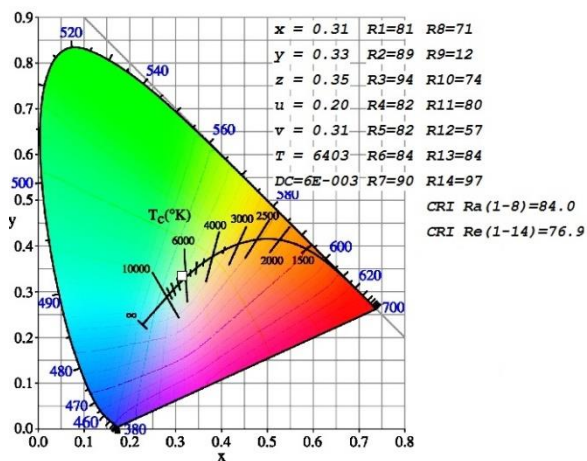
Na obrázku číslo 41 je znázorněn trichromatický trojúhelník, na jehož křivce barev černého tělesa je znázorněn bod, který odpovídá měřené teplotě chromatičnosti. Oproti předešlé teplotě chromatičnosti 4501 K je patrný posun tohoto bodu směrem doleva po křivce. Dále jsou na obrázku uvedeny souřadnice tohoto bodu, hodnota chromatičnosti, vzorky podání barev a výsledné indexy podání barev.

## Naměřená teplota chromatičnosti 6403 K



Obrázek č. 42: 6403 K

V grafu, který můžeme vidět na obrázku číslo 42, je znázorněn průběh světelného toku a zářivého toku na vlnové délce. Průběh zářivého toku se skládá ze dvou vrcholů. První se nachází v oblasti 450 nm a druhý v oblasti 600 nm. Pomyslná vytyčená oblast prvního vrcholu je oproti pomyslné oblasti druhého vrcholu malá a světelný tok ovlivňuje v oblasti krátkých vlnových délek.



Obrázek č. 43: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 6403 K

Na obrázku číslo 43 je znázorněn trichromatický trojúhelník, na jehož křivce barev černého tělesa je znázorněn bod, který odpovídá měřené teplotě chromatičnosti. Oproti předešlé teplotě chromatičnosti 5482 K je patrný posun tohoto bodu směrem doleva po křivce. Dále jsou na obrázku uvedeny souřadnice tohoto bodu, hodnota chromatičnosti, vzorky podání barev a výsledné indexy podání barev.

Naměřená $T_c$ (K)	$R_a$ (1-8) (-)	$R_e$ (1-14) (-)
2800	83,6	79,1
3549	87,5	83,5
4501	88,3	83,7
5482	87,5	82,2
6403	84	76,9

Tabulka č. 7: souhrnu podání barev pro jednotlivé naměřené teploty chromatičnosti

Z uvedených grafů je patrné, že s rostoucí teplotou chromatičnosti je v daném spektru vyšší poměr krátkých vlnových složek oproti delším vlnovým složkám. Tyto vlnové délky ovlivňují světelný tok, a tedy i pozorovatele velice málo co se týče samotného zrakového vjemu. Avšak jejich maximum 450 nm se shoduje se spektrální oblastí maximální citlivosti čidel cirkadiánní soustavy a dochází zde k maximální stimulaci čidel cirkadiánní soustavy. Tato stimulace je dobrá pro organismus během dne, nikoliv však ve večerních hodinách před spánkem. Index podání barev je pro krajní hodnoty naměřených teplot chromatičnosti nižší než pro hodnoty pohybujících se okolo středu, a to 4500 K.

## 7 Závěr

Předkládaná práce se zabývá možnostmi využití svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti a jejich vlivem na vnímání světelných scén.

V teoretické části bylo nejprve popsáno zrakové ústrojí člověka, jeho princip a vliv záření na člověka. Člověk vnímá světlo především jako prostředek k přenosu a získání informací o prostředí, ve kterém se právě nachází, ale světlo má také důležitý vliv na člověka z hlediska biologických procesů, například cirkadiálního rytmu. Ten ovlivňuje vyplavování hormonů do lidského organismu a to tzv. kortizolu (stresový hormon) a melatoninu (únavový hormon), jejichž vyplavování řídí mozek na základě informací, které jsou indikovány zrakovým ústrojím. Ve zrakovém ústrojí se nachází mimo běžně známých fotoreceptorů čípků a tyčinek i cirkadiální čidla, která mají maximální spektrální citlivost ve vlnových délkách 460 nm – 465 nm, což odpovídá modrému světlu. Stimulováním těchto receptorů dochází k potlačení vyplavování hormonu melatonin a dochází k vyplavování hormonu kortizol, a to je třeba brát v úvahu při navrhování osvětlení vzhledem k dané činnosti, kterou má člověk vykonávat.

Dále jsem se zabýval principem vnímání a popisu barvy světelného záření, tedy chromatičností, což je komplikovaný subjektivní fyziologicko-psychický děj. Vjem barvy závisí na spektrálním složení záření zdroje osvětlujícího předmět, spektrálním činiteli odrazu nebo prostupu předmětu a na samotném zraku pozorovatele. Barvu můžeme popisovat objektivně pomocí trichromatické soustavy, kdy ji pomocí směsi tří vhodně zvolených údajů znázorníme v kolorimetrické soustavě. Dále můžeme barvu světelného zdroje popsat pomocí teploty chromatičnosti, kdy její barvu přirovnáme k záření černého tělesa, jehož záření má tutéž chromatičnost. Pro ohodnocení věrnosti barvy předmětu, který je ozařován určitým zářením, slouží index podání barev.

V další části jsem se zabýval principem LED, což je polovodičová součástka s PN přechodem, který když je buzen průchodem elektrického proudu, emituje optické záření.

V poslední kapitole teoretické části jsem se zabýval aplikací interiérových svítidel s volitelnou teplotou chromatičnosti. Tato vlastnost je v anglickém jazyce nazývána jako tunable white. S rozvojem LED svítidel, řídicí techniky a znalostí o lidském organismu, je možné nastavovat u svítidel různé světelné scény, popřípadě biodynamické scény. Tyto scény se používají ve vnitřních prostorech k napodobení například průběhu denního světla, což zejména v uzavřených pracovních prostorech vede prokazatelně ke zvýšení pohody a pracovní efektivity zaměstnanců či studentů. Pro příjemný a přirozený vzhled prostoru je vhodné volit teplotu chromatičnosti s ohledem na požadovanou hladinu osvětlenosti. Tuto skutečnost znázorňuje tzv. Kruithoffův diagram.

V praktické části jsem podle zvolené metodiky analyzoval fotometrické a elektrické parametry svítidla s možností volitelné teploty chromatičnosti. Vzhledem k tomu, že DALI LED driver, který byl použit, umožňoval regulaci zadávané teploty chromatičnosti pouze v rozsahu 3000 K až 5000 K a použitý světelný zdroj má rozsah teplot chromatičnosti od 2700 K až 6500 K, došlo k odlišnosti mezi zadanou teplotou chromatičnosti a naměřenou teplotou chromatičnosti, proto bylo nutné stanovit přepočít mezi skutečnou a nastavenou teplotou chromatičnosti.

Měrné světelné výkony jsou menší než udávané výrobcem, což je způsobené tím, že výrobce udává měrný světelný výkon LED modulu a my jsme proměřili měrný světelný výkon celého svítidla, včetně příkonu DALI driveru. Naměřené činné, jalové a zdánlivé výkony se pro různé navolené teploty chromatičnosti téměř neliší. Svítidlo vykazuje kapacitní charakter. Spektra harmonických složek a průběhy proudu a napětí svítidlem jsou měřené a splňují požadavky. Naměřená spektra odpovídají spektru bílé LED a potvrzují teoretický průběh. Z uvedených grafů je patrné, že s rostoucí teplotou chromatičnosti je v daném spektru vyšší poměr krátkých vlnových složek oproti delším vlnovým složkám. Tyto vlnové délky ovlivňují světelný tok, a tedy i pozorovatele velice málo co se týče samotného zrakového vjemu. Avšak jejich maximum 450 nm se shoduje se spektrální oblastí maximální citlivosti čidel cirkadiánní soustavy a dochází zde k maximální stimulaci čidel cirkadiánní soustavy. Tato stimulace je dobrá pro organismus během dne, nikoliv však ve večerních hodinách před spánkem. Index podání barev je pro krajní hodnoty naměřených teplot chromatičnosti nižší než pro hodnoty pohybujících se okolo středu zvolených teplot chromatičnosti, a to okolo 4500 K, což je způsobené tím, že krajní hodnoty se velice liší od standardních denních podmínek.

# Seznam použité literatury

- [1] HABEL, Jiří. *Osvětlování*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998, 328 s. ISBN 80-01-01770-2.
- [2] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 622 s. ISBN 9788086534213.
- [3] ČSN EN 13032: Světlo a osvětlení – Měření a způsob uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel.
- [4] ČSN EN 12464: Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory
- [5] ČSN EN ISO 11664: Normální kolorimetrický pozorovatel CIE
- [6] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. *Colorimetry*. 3rd ed. Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 2004. ISBN 9783901906336.
- [7] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [8] TROJAN, Stanislav. *Lékařská fyziologie*. Vyd. 4., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
- [9] MOUREK, Jindřich. *Fyziologie: učebnice pro studenty zdravotnických oborů*. 2., dopl. vyd. Praha: Grada, 2012. Sestra (Grada). ISBN 9788024739182.
- [10] SILBERNAGL, Stefan a Agamemnon DESPOPOULOS. *Atlas fyziologie člověka*. 6. vyd., zcela přeprac. a rozš., Vyd. 3. české. Praha: Grada, 2004. ISBN 80-247-0630-X.
- [11] All Things Lighting. All Things Lighting [online]. [cit. 2015-12-30]. Dostupné z: <http://agi32.com/blog/>
- [12] Blue light has a dark side [online]. Harvard: Harvard health publication, 2010 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.health.harvard.edu/staying-healthy/blue-light-has-a-dark-side>



[13] Náš vnitřní čas [online]. FEL ČVUT: Helena Illnerová, 2016 [cit. 2016-12-14].  
Dostupné z: <https://slideslive.com/38896641/helena-illnerova-nas-vnitri-cas>

[14] BOMMEL VAN, W. J. M. – BELD VAN DEN, G. J. – OUYEN VAN, M. H.  
F.: *Industrial lighting and productivity*. Philips Lighting : The Netherlands [online].  
August 2002, [cit. 2016-10-02]. Dostupné z:  
[www.lighting.philips.com/in\\_en/applications/industry/pdf/industrial\\_lighting\\_and\\_productivity/pli-0005\\_whitep-uk\\_20sep.pdf](http://www.lighting.philips.com/in_en/applications/industry/pdf/industrial_lighting_and_productivity/pli-0005_whitep-uk_20sep.pdf)

[15] FUKSA, Antonín. Světlo a biologické hodiny: účinky a užití optického záření. In:  
Odborné časopisy: Světlo [online]. [cit. 2017-01-03]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42567.pdf>

[16] HELBIG, Hannah. Studie: Účinek světla na úroveň výkonu žáků.  
In: OSRAM: [online]. Ulm: Transferzentrum für Neurowissenschaft und Lernen, 2011  
[cit. 2017-01-03]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/novinky-a-znalosti/biologicke-ucinky-svetla---svetlo-znamena-kvalitu-zivota/vedecke-studie-o-biologicky-ucincich-svetla/studie-ucinku-svetla-na-vykon-studentu/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/biologicke-ucinky-svetla---svetlo-znamena-kvalitu-zivota/vedecke-studie-o-biologicky-ucincich-svetla/studie-ucinku-svetla-na-vykon-studentu/index.jsp)

[17] WALERCZYK, Stan. Human centric lighting. In: *Architecturalssl* [online]. Seattle:  
Human Centric Lighting Society, 2011 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z:  
<http://humancentriclighting.com/wp-content/uploads/2012/07/Stan-Article-SSL1.pdf>

[18] Human Centric Lighting. *Riegens* [online]. United Kingdom: Riegens, 2016 [cit.  
2017-01-03]. Dostupné z: <https://www.riegens.com/en-gb/human-centric-lighting>

[19] Halla SANT. *Halla* [online]. Praha: Halla, 2016 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z:  
<http://www.halla.cz/sant>

[20] Přístrojové vybavení laboratoře světelné techniky. *Powerwiki* [online]. Praha:  
ČVUT FEL, 2016 [cit. 2017-01-03]. Dostupné z:  
<https://www.powerwiki.cz/wiki/SvetloPristroje>

# Seznam obrázků

- Obrázek č. 1: Schématický řez oční bulvou
- Obrázek č. 2: Stavba sítnice
- Obrázek č. 3: Křivka poměrné spektrální citlivosti zraku k záření různých vlnových délek pro různé adaptační jasy  $L_a$
- Obrázek č. 4: Průběh čtyř cirkadiánních rytmů
- Obrázek č. 5: Poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla v porovnání s průběhy poměrné spektrální citlivosti ostatních fotoreceptorů
- Obrázek č. 6: Princip míšení tří základních barev
- Obrázek č. 7: Příklady dvojic doplňkových barev, které když se smísí ve vhodném poměru, vytvářejí nepestré bílé světlo
- Obrázek č. 8: Spektrální průběhy kolorimetrických koeficientů trichromatické soustavy XYZ
- Obrázek č. 9: Prostorová znázornění barevného podnětu v pravoúhlé soustavě XYZ
- Obrázek č. 10: Trojúhelník v rovině  $X+Y+Z = 1$  pravoúhlého kolorimetrického prostoru
- Obrázek č. 11: Diagram chromatičnosti mezinárodní kolorimetrické soustavy XYZ v pravoúhlých souřadnicích  $x, y$
- Obrázek č. 12: Rovnoměrný kolorimetrický trojúhelník
- Obrázek č. 13: Čára teplotních zářičů v souřadnicích  $x, y$  s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti
- Obrázek č. 14: Orientační barevné znázornění teplot chromatičnosti
- Obrázek č. 15: Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly
- Obrázek č. 16: Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody)
- Obrázek č. 17: Emisní spektrum vybraných LED
- Obrázek č. 18: Emisní spektrum diod s rozdílnými náhradními teplotami chromatičnosti.
- Obrázek č. 19: Svítidlo SANT od firmy HALLA, které umožňuje regulaci teploty chromatičnosti
- Obrázek č. 20: Kruihoffův diagram
- Obrázek č. 21: Použitý kulový integrátor
- Obrázek č. 22: Obrázek Helvar designer programu v PC
- Obrázek č. 23: Schéma zapojení svítidla
- Obrázek č. 24: Uchycení svítidla a sondy spektrofotometru na fotometrické lavici
- Obrázek č. 25: Na směrování sondy na příslušné LED moduly
- Obrázek č. 26: Přímý pohled na svítidlo SANT
- Obrázek č. 27: Horní pohled na svítidlo SANT
- Obrázek č. 28: Boční pohled na svítidlo SANT
- Obrázek č. 29: Pohled na jednotlivé LED moduly

- Obrázek č. 30: Detail štítku pro vložené LED moduly
- Obrázek č. 31: Spektrum harmonických složek pro 2700 K
- Obrázek č. 32: Průběh proudu a napětí svítidlem při 2700 K
- Obrázek č. 33: Výsledná naměřená spektra LED svítidla pro rozdílné naměřené  $T_c$
- Obrázek č. 34: 2800 K
- Obrázek č. 35: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 2800 K
- Obrázek č. 35: 3549 K
- Obrázek č. 37: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 3389 K
- Obrázek č. 38: 4501 K
- Obrázek č. 39: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 4501 K
- Obrázek č. 40: 5482 K
- Obrázek č. 41: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 5482 K
- Obrázek č. 42: 6403 K
- Obrázek č. 43: Naměřený trichromatický trojúhelník pro 6403 K

# Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Vlnové délky spektrálních barev

Tabulka č. 2: Vlivy teplých a studených barev na člověka

Tabulka č. 3: Barevné vlastnosti světelných zdrojů, které slouží pro osvětlování  
vnitřních prostorů

Tabulka č. 4: Požadované, nastavené a naměřené hodnoty teploty chromatičnosti

Tabulka č. 5: Skutečné světelné toky a měrné světelné výkony pro měřené teploty  
chromatičnosti

Tabulka č. 6: Naměřené výkony

Tabulka č. 7: Souhrn podání barev pro jednotlivé naměřené teploty chromatičnosti

# Seznam použitých vzorců

Rovnice č. 1: Poměrné spektrální hustoty [1]

Rovnice č. 2: Trichromatické složky  $X$  [1]

Rovnice č. 3: Trichromatické složky  $Y$  [1]

Rovnice č. 4: Trichromatické složky  $Z$  [1]

Rovnice č. 5: Vektoru barevného podnětu  $\Phi'$  [1]

Rovnice č. 6: Trichromatické složky  $X'$  vektoru barevného podnětu  $\Phi'$  [1]

Rovnice č. 7: Trichromatické složky  $Y'$  vektoru barevného podnětu  $\Phi'$  [1]

Rovnice č. 8: Trichromatické složky  $Z'$  vektoru barevného podnětu  $\Phi'$  [1]

Rovnice č. 9: Kolorimetrické rovnice [1]

Rovnice č. 10: Roviny v kolorimetrickém prostoru  $XYZ$  [1]

Rovnice č. 11: Trichromatické souřadnice  $x$  [1]

Rovnice č. 12: Trichromatické souřadnice  $y$  [1]

Rovnice č. 13: Trichromatické souřadnice  $z$  [1]

Rovnice č. 14: Závislosti jasů barevného vjemu na trichromatické složce  $Y$  [1]

Rovnice č. 15: Všeobecného indexu podání barev [1]

Rovnice č. 16: Vzdálenosti pro všeobecný index podání barev [1]

Rovnice č. 17: Speciálního indexu podání barev [1]

Rovnice č. 18: Vzdálenosti pro speciální index podání barev [1]

Rovnice č. 19: Světelného toku měrného světelného zdroje [7]

Rovnice č. 20: Měrného světelného výkonu [7]