

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky
Obor: Elektroenergetika



Analýza spektra světelných diod a jejich
vhodnost pro umělé osvětlení

Diplomová práce

Vypracoval: Bc. Jan Klenovec
Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.
Rok: 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klenovec** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **411208**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza spektra světelných diod a jejich vhodnost pro umělé osvětlení

Název diplomové práce anglicky:

Spectral analysis of LED light and its suitability for artificial lighting

Pokyny pro vypracování:

1. Rešerše odborné literatury popisující spektrální vlastnosti světelných diod a jejich vliv na vnímání prostředí.
2. Měření spektrálních vlastností vybraných vzorků světelných diod.
3. Posouzení změřených spektrálních vlastností světelných diod z hlediska jejich vhodnosti pro různé prostory.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 12 464: Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů
- [2] Licht.wissen 19: Impact of Light on Human Beings. Frankfurt am Main: Fördergemeinschaft Gutes Licht, 2014, ISBN 978-3-926193-99-5
- [3] HABEL, Jirí, et al. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 438 s. ISBN 978 80 86534 21 3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Marek Bálský Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Jan Klenovec

Poděkování

Děkuji Ing. Marku Bálskému, Ph.D. za vedení mé diplomové práce a za podnětné návrhy, které ji obhájily. Dále děkuji firmě HALLA, a.s. za poskytnutí vzorků LED světelných zdrojů.

Jan Klenovec

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou spekter světelných diod a vyhodnocením jejich účinků na zdraví člověka. Informace v této práci poukazují na to, že umělé světlo nemá vliv pouze na zrak člověka, ale také má daleko větší účinky na celkový zdravotní stav uživatele. Tato diplomová práce se dělí do tří hlavních kapitol. V první kapitole je popsáno, jakým způsobem má být navrženo osvětlení pro kvalitní zrakové úkony, vliv světla na zdraví člověka a design osvětlení ve speciálních případech použití. Ve druhé kapitole jsou popsány přístroje a zařízení použité pro měření vzorků LED světelných zdrojů a také naměřené výsledky LED světelných zdrojů. Ve třetí kapitole jsou výsledky vyhodnoceny jak z pohledu vhodnosti použití v různých speciálních prostorech dle kapitoly č. 1, tak i z pohledu podání barev.

Klíčová slova:

Světlo, osvětlení, spektrum, teplota chromatičnosti, LED, index podání barev, biologický rytmus, cirkadiánní rytmus, vnitřní hodiny, melatonin, biologický efekt, energetická účinnost, prostor

Abstract

This diploma thesis focuses on analysis of spectra of LED diodes and evaluates their effect on the human health. The information in this thesis show, that artificial light does not affect only the eyesight, but has much further impact on the human health. The thesis is divided into three main chapters. The first chapter describes a design of the light source for quality vision interactions, effects of the light on the human health and a lighting design in special application cases. The second chapter describes the instruments and devices used for a measurement of LED source samples, and presents measured results of those sources. At last, the third chapter focuses on evaluation of the results from two fields of view - usability in a special areas, according to chapter 1, and usability based on a color rendering index.

Keywords:

Light, lighting, spectrum, color temperature, LED, color rendering index ,biological rhythm, circadian rhythm, internal clock, melanopsin, biological effect, energy efficiency, space

Seznam použitých zkratek

LED – light-emitting diode (dioda emitující světlo)

T_C – teplota chromatičnosti

T_{CP} – náhradní teplota chromatičnosti

Φ_e – zářivý tok

Φ_v – světelný tok

Φ_c – cirkadiánní tok

$\Phi_{e\lambda}$ – zářivý tok jedné vlnové délky

$\Phi_{v\lambda}$ – světelný tok jedné vlnové délky

$\Phi_{c\lambda}$ – cirkadiánní tok jedné vlnové délky

λ – vlnová délka

R_a – index podání barev

E – osvětlenost

\bar{E}_z – udržovaná střední válcová osvětlenost

$E_{\acute{u}kol}$ – osvětlenost místa zrakového úkolu

U_0 – rovnoměrnost osvětlení

SCN – suprachiasmatická jádra

SAD – sezónní afektivní porucha

IEC – International Energy Agency

LCD – liquid-crystal display

FWHM – full width at half maximum

CCT – correlated color temperature (Viz T_c)

CRI – color rendering index (Viz R_a)

I_{OUT} – výstupní proud

U_{OUT} – výstupní napětí

P_{OUT} – výstupní výkon

U_N – napájecí napětí

F_N – napájecí frekvence

I_N – napájecí proud

t_a – teplota okolí

Obsah

Úvod.....	3
1. Účinky světelného záření na člověka.....	5
1.1. Základní pojmy	5
1.1.1. Teplota chromatičnosti.....	5
1.1.2. Zářivý tok.....	5
1.1.3. Světelný tok	5
1.1.4. Index podání barev	6
1.1.5. Prostorový úhel.....	6
1.1.6. Osvětlenost	7
1.1.7. Světelně technické vlastnosti materiálů.....	7
1.1.8. Barevný tón světla	7
1.2. Požadavky na osvětlení pracovních prostorů	8
1.2.1. Osvětlenost pracovního prostoru	8
1.2.2. Rozložení jasu.....	10
1.3. Biologické účinky světla na člověka	11
1.3.1. Biologický rytmus.....	11
1.3.2. Cirkadiánní rytmus.....	12
1.3.3. Vnitřní hodiny	14
1.3.4. Oční fotoreceptory ovlivňující cirkadiánní cykly.....	15
1.3.5. Účinky světla na tvorbu melatoninu.....	15
1.3.6. Biologické účinky vnitřního osvětlení na cirkadiánní rytmy člověka	16
1.4. Kritéria biologicky účinného osvětlení.....	17
1.4.1. Ovlivňující faktory	17
1.4.2. Spektrální vlastnosti světla	18
1.4.3. Osvětlení	19
1.4.4. Geometrické uspořádání	19
1.4.5. Dynamika	20
1.4.6. Energetická účinnost biologicky účinného osvětlení.....	20
1.5. Osvětlení pracovních prostor se zvláštními požadavky	21
1.5.1. Vzdělávací instituce a školy.....	22

1.5.2.	Kanceláře	24
1.5.3.	Dispečinky.....	26
1.5.4.	Domovy pro seniory a domy s pečovatelskou službou	27
1.5.5.	Prostory pro zdravotní péči.....	29
1.5.6.	Průmyslové prostory	30
1.5.7.	Domácí prostory	34
2.	Měření spektrálních vlastností vzorků světelných diod.....	36
2.1.	Použitá zařízení.....	36
2.1.1.	Měřicí přístroj.....	36
2.1.2.	Zdroj	37
2.1.3.	Vzorky.....	38
2.1.4.	Chladič	41
2.2.	Naměřená spektra vzorků	41
2.2.1.	Spektra čipů.....	43
2.2.2.	Spektra pásků	51
2.3.	Shrnutí výsledků měření.....	58
3.	Vyhodnocení změřených spekter z hlediska vhodnosti použití.....	59
3.1.	Vyhodnocení z hlediska vlivu na zdraví člověka	59
3.1.1.	Vyhodnocení LED čipů.....	59
3.1.2.	Vyhodnocení LED pásků	63
3.2.	Vyhodnocení z hlediska podání barev	68
	Závěr.....	71
	Seznam použitých zdrojů	73
	Seznam tabulek	74
	Seznam obrázků	74
	Seznam grafů.....	75
	Přílohy.....	77

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá biologickými účinky světla na člověka a posouzením vhodnosti použití změřených LED světelných zdrojů pro různá prostředí.

Toto téma jsem si zvolil, neboť problematika osvětlovacích soustav v souvislosti s dopadem na zdraví uživatelů je nyní aktuální.

Cílem práce je teoreticky popsat základní problematiku umělého osvětlení, požadavky na osvětlení pracovních prostorů, biologické účinky světla na člověka a kritéria biologicky účinného osvětlení. Budu se dále zabývat tím, jaké osvětlení v závislosti na denní době je vhodné pro různá prostředí, jako jsou vzdělávací instituce a školy, kanceláře, dispečinky, domovy pro seniory, prostory pro zdravotní péči, průmyslové a domácí prostory. Dalším cílem je změřit a vyhodnotit spektrální vlastnosti vzorků LED světelných zdrojů dodaných firmou Halla, a.s. Jejich vzájemné porovnání z hlediska biologických účinků - určení, které vzorky jsou biologicky účinnější oproti ostatním změřeným. Bude popsána vhodnost vzorků pro konkrétní pracovní prostory a určena vhodnost použití v různé denní dobu.

1. Účinky světelného záření na člověka

1.1. Základní pojmy

1.1.1. Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T_c je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má tutéž chromatičnost jako uvažované záření. Jednotkou teploty chromatičnosti je Kelvin [K].

[1]

1.1.2. Zářivý tok

Zářivý tok ϕ_e je výkon přenášený zářením, respektive energie přenášená zářením za 1 s. Jednotkou zářivého toku je watt [W]. Zářivý tok se vypočte dle vztahu (1). [2]

$$\phi_e = \frac{dW_e}{dt} [W] \quad (1)$$

1.1.3. Světelný tok

Světelný tok ϕ je zářivý tok ϕ_e zhodnocený zrakem podle spektrální citlivosti oka. Jednotkou světelného toku je lumen [lm]. Světelný tok $\phi(\lambda)$ o jediné vlnové délce λ se vypočte dle vztahu (2).

$$\phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) = 683 \cdot V(\lambda) \cdot \phi_e(\lambda) [lm; lm \cdot W^{-1}, -, W] \quad (2)$$

Kde:

$K(\lambda)$ – světelný účinek monofrekvenčního záření λ [$lm \cdot W^{-1}$]

$V(\lambda)$ – poměrný světelný účinek záření λ = poměrná spektrální citlivost zraku

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} [-; lm \cdot W^{-1}, lm \cdot W^{-1}] \quad (2.1)$$

[2]

Světelný tok ϕ pro záření složené se spočte dle vztahu (2.2)

$$\phi = 683 \cdot \int_0^{\infty} \left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

Kde:

$\left(\frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda}\right)_\lambda$ – spektrální hustota zářivého toku ϕ_e v bode λ

[2]

1.1.4. Index podání barev

Index podání barev R_a charakterizuje, jaký bude pozorovatelný barevný vjem osvětleného předmětu v závislosti na spektrálním složení světla zdroje. Index podání barev R_a je bezrozměrný a nabývá hodnot $R_a = 0$ až $R_a = 100$. Je-li $R_a = 0$ barvy nelze rozlišit, je-li $R_a = 100$ barvy můžeme rozlišit nejlépe. [1]

1.1.5. Prostorový úhel

Prostorový úhel Ω je roven velikosti plochy vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule. Přičemž středy koule, kuželové plochy a prostorového úhlu jsou totožné. Prostorový úhel Ω má jednotku [sr] a vypočte se dle vztahu (3).

$$\Omega = \frac{A_k}{r^2} [sr; m^2, m] \quad (3)$$

Kde:

A_k – plocha vyřatá na povrchu jednotkové koule

r – poloměr jednotkové koule

Prostorový úhel nabývá maximální hodnoty $\Omega_{MAX} = 4 \pi$

[2]

1.1.6. Osvětlenost

Osvětlenost E je plošná hustota světelného toku $d\phi$ dopadlého na plošku dA . Jednotkou osvětlenosti E je lux [lx]. Osvětlenost E má jednotku lux [lx] a vypočte se dle vztahu (4).

$$E = \frac{d\phi_{dopad}}{dA} [lx; lm, m^2] \quad (4)$$

Kde:

$d\phi_{dopad}$ – dopadlý světelný tok

dA – uvažovaná plocha

[2]

1.1.7. Světelně technické vlastnosti materiálů

Světelný tok ϕ dopadající na uvažovaný materiál se v obecném případě rozdělí na tři tyto části:

ϕ_ρ – odraženou,

ϕ_τ – prošlou,

ϕ_α – pohlcenou

$$\phi = \phi_\rho + \phi_\tau + \phi_\alpha [lm; lm, lm, lm] \quad (5)$$

Vlastnosti látek charakterizují tyto tři integrální činitele, a to integrální činitel:

$$\text{odrazu } \rho = \frac{\phi_\rho}{\phi},$$

$$\text{odrazu } \tau = \frac{\phi_\tau}{\phi},$$

$$\text{odrazu } \alpha = \frac{\phi_\alpha}{\phi}$$

$$\rho + \tau + \alpha = 1 \quad (6)$$

[2]

1.1.8. Barevný tón světla

Barevný tón světla se vztahuje k chromatičnosti vyzařovaného světla, jejíž kvantifikace se provádí pomocí náhradní teploty chromatičnosti T_{CP} .

Barevný tón světla je během dne proměnlivý. Barevný tón umělého osvětlení je konstantní a dělí se do tří skupin: teple bílý do 3 300 K, neutrálně bílý 3 300 K – 5 300 K a studeně bílý > 5 300 K. [3]

1.2. Požadavky na osvětlení pracovních prostorů

Na požadavky osvětlení pracovních prostor je kladen čím dál větší důraz, neboť lidé tráví stále více času v uzavřených prostorech, což úplně neprospívá lidskému zdraví.

Pro požadavky na osvětlení nejen pracovních prostor jsou normou předepsána různá kritéria. Základní termín pro řešení lokálního osvětlení se nazývá světelné prostředí.

Na světelné prostředí jsou kladeny 3 základní požadavky:

- *Zraková pohoda* – je-li tento požadavek splněn, cítí se člověk dobře a tudíž má větší pracovní výkonnost
- *Zrakový výkon* – je-li tento požadavek splněn, může člověk plnit pracovní výkon po dlouhý čas bez nepřiměřených známek únavy
- *Bezpečnost* – jsou-li dobře nasvíceny potenciaální nástrahy, spíše se zamezí možné příčině úrazu

[3]

Aby byly tyto tři základní požadavky splněny, musí umělé i denní osvětlení splňovat dvě hlavní kritéria – osvětlenost pracovního prostoru a rozložení jasu.

1.2.1. Osvětlenost pracovního prostoru

Správná osvětlenost v místě a v okolí zrakového úkolu má velký vliv na to, jak pracovník rychle, pohodlně a bezpečně vykonává zrakový úkol.

Existuje řada udržovaných osvětleností poskytující vnímatelné rozdíly, která zajišťuje potřebnou zrakovou pohodu v různých pracovních prostředích. [3]

Řada se skládá z těchto hodnot osvětlenosti v [Lx]:

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000 – 5000

V normě ČSN EN 12464-1 Osvětlení pracovních prostorů jsou sepsány tabulky, ve kterých se nachází minimální osvětlenosti pro velké množství pracovních prostor. Osvětlenosti dle těchto tabulek v konkrétních prostorech nesmí během času a stavu osvětlovací soustavy poklesnout pod předepsané hodnoty. Tabulkové hodnoty jsou předepsány pro normální podmínky vidění a berou v úvahu tyto činitele: psychofyzilogická hlediska jako zrakovou a celkovou pohodu, požadavky na zrakové úkoly, zrakovou ergonomii, praktické zkušenosti, provozní bezpečnost a hospodárnost.

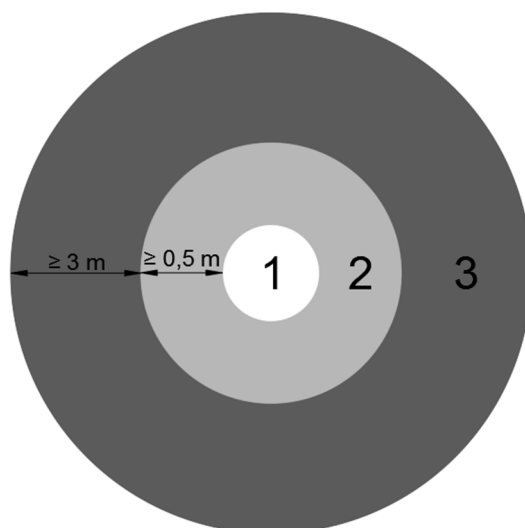
Také musí být dodrženo určité osvětlení v bezprostředním okolí zrakového úkolu, které je definováno vzdáleností alespoň 0,5 m od místa zrakového úkolu. Viz obrázek č. 1. [3]

Např. pokud je osvětlenost místa zrakového úkolu 800 lx, musí být bezprostřední okolí zrakového úkolu osvětleno alespoň 500 lx. Pokud hodnoty osvětlenosti v místě zrakového úkolu klesnou pod hodnotu 150 lx, musí být hodnota osvětlenosti v bezprostředním okolí zrakového úkolu stejná. Viz tabulka č. 1.

Osvětlenost místa zrakového úkolu $E_{\text{úkol}}$ [lx]	>750	500	300	200	150	100	< 50
Osvětlenost bezprostředního okolí úkolu $E_{\text{okolí}}$ [lx]	500	300	200	150	$E_{\text{úkol}}$	$E_{\text{úkol}}$	$E_{\text{úkol}}$

Tabulka 1: Hodnoty osvětlenosti v místě a bezprostředním okolí zrak. úkolu [3]

Osvětlenost v pozadí zrakového úkolu má být udržována na alespoň 1/3 hodnoty osvětlenosti v bezprostředním okolí zrakového úkolu a má mít velikost alespoň 3 m od bezprostředního okolí zrakového úkolu. [3] Viz obrázek č. 1



Obrázek 1: Minimální rozměry bezprostředního okolí a pozadí zrak. úkolu

Legenda:

- 1 – místo zrakového úkolu
- 2 – bezprostřední okolí zrakového úkolu
- 3 – pozadí zrakového úkolu

V místě a okolí výkonu zrakového úkolu musí být také dodržena předepsaná rovnoměrnost osvětlení. Rovnoměrnosti osvětlení v místě zrakového úkolu U_0 pro různé pracovní prostředí jsou též sepsány v tabulkách normy ČSN EN 12464-1 Osvětlení pracovních prostorů. V bezprostředním okolí zrakového úkolu musí být dodržena rovnoměrnost osvětlení alespoň $U_0 \geq 0,4$ a v pozadí úkolu musí být rovnoměrnost osvětlení alespoň $U_0 \geq 0,1$. [3]

Rovnoměrnost osvětlení U_0 je podíl minimální osvětlenosti k osvětlenosti průměrné v uvažovaném prostoru. [6]

1.2.2. Rozložení jasu

Je-li dobře rozložený jas v zorném poli, dochází ke zlepšení adaptace zraku, což má za následek lepší viditelnost prováděného úkolu.

Viditelnost se zlepší, neboť se zlepší zraková ostrost, kontrastní citlivost a účinnost zrakových funkcí.

Je-li osvětlení navrženo špatně z pohledu jasových poměrů, mohou se objevit příliš velké jasy, které způsobují oslnění, příliš velké kontrastní jasy, které způsobují únavu očí, nebo příliš malé jasy a kontrasty jasů, které mají za příčinu monotónní pracovní prostředí. Aby byly správně splněny tyto tři podmínky, musí být při návrhu osvětlovací soustavy zohledněny činitelé odrazu a osvětleností všech povrchů v řešeném prostoru. Pro hlavní rovnoměrně rozptýlené plochy jsou doporučeny tyto činitele odrazu: strop: 0,7 – 0,9, stěny: 0,5 – 0,8, podlaha 0,2 – 0,4. Pro hlavní předměty má být činitel odrazu od 0,2 do 0,7. [3]

1.3. Biologické účinky světla na člověka

Světlo a jeho účinky jsou klíčem ke zdraví a psychické pohodě. Světlo ovlivňuje jak fyziologické, tak i psychologické stavy jako je nálada, emoce a zdvořilost.

Světlo nám nejen zajišťuje dobré podmínky pro vizuální úkoly, ale také má velký vliv na nevizuální biologické účinky, neboť nastavuje vnitřní biologické „hodiny“, které řídí veškeré tělesné funkce ve 24 hodinové rytmu. Aby „hodiny“ správně fungovaly, musejí být neustále synchronizovány právě nejlépe denním světlem. Vypadnou-li hodiny ze synchronismu, můžeme se poté cítit unaveni, bez nálady a mít oslabený imunitní systém. Avšak dostatek denního světla je v dnešní moderní průmyslové době velkým problémem, neboť většinu času trávíme v uzavřených prostorech pod umělým osvětlením, které je monotónní a oproti dennímu světlu velice slabé. Denní světlo i při špatném počasí dosahuje několik desítek tisíc luxů. Dosáhnout takovéto hodnoty ve vnitřních prostorech je technicky i ekonomicky téměř nemožné. Umělé osvětlení tedy dosahuje hodnot maximálně jednotky tisíc luxů, spíše stovky luxů. [4]

1.3.1. Biologický rytmus

Biologický rytmus je řízen „programem“ v mozku, který se musí v lidském těle spustit každý den. Tento rytmus je našimi vnitřními „hodinami“, které neřídí jen spánek, ale také srdeční frekvence, krevní tlak atd. Respektive každý orgán v těle má svůj vlastní

rytmus, který se musí pravidelně synchronizovat s okolním světem. Nejdůležitější řídicí veličinou je průběh jasů světla během dne a noci. [4]

Většina tělesných funkcí je cyklických a lze je chronologicky rozdělit do třech základních částí podle délky rytmu:

1. Ultradiánní rytmy pokrývající několik hodin.
2. Cirkadiánní rytmy trvající jeden den (jsou zaměřeny na den a noc).
3. Infradiánní rytmy jsou v období měsíců (střídání ročních období).

[4]

1.3.2. Cirkadiánní rytmus

Člověk a jeho tělesné funkce mají denní a sezónní rytmy – od jednotlivých buněk až po celé orgány. Každá tato část kontroluje svůj časový program a v průběhu dne má cyklické vzestupy a pády např. dech, srdeční tep, bdění a spánek. [4]

Těsně předtím, než se člověk probudí, naše tělo zvýší teplotu, krevní tlak a srdeční puls. [4]

Zhruba hodinu po probuzení tělo produkuje stimulační hormony. Od 10 hodin dopoledne je naše tělo v nejlepší kondici, kdy nám jde nejlépe učením a přemýšlením, avšak v této době také lékaři potvrzují nejvíce výskytů infarktu. [4]

Mezi polednem a 14. hodinou se cítíme nejvíce unaveni, z důvodu velké aktivity žaludku, který v této době tráví oběd. Tento fakt nastává, i když oběd vynecháme.

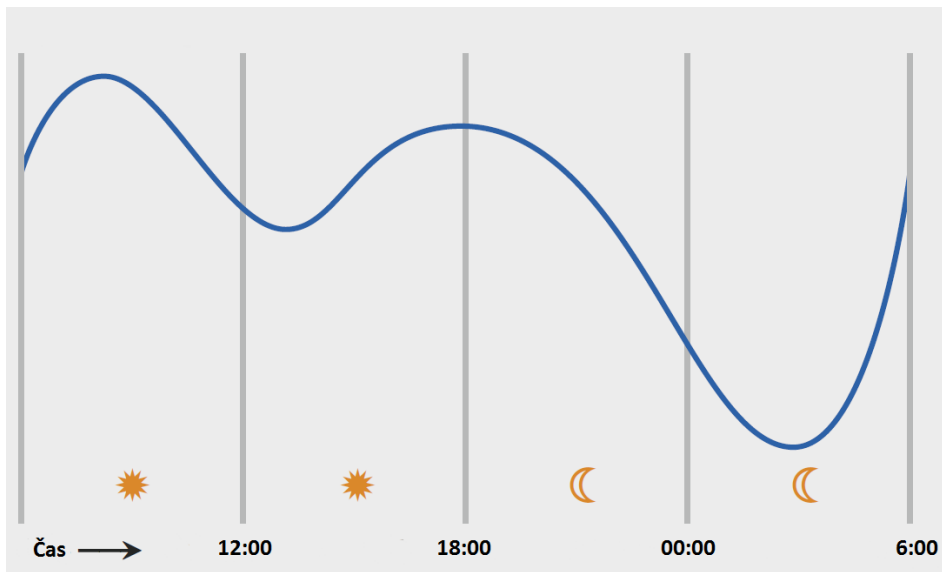
Mezi 14. až 17. hodinou je nejvhodnější sportovat, neboť v této době vykazují nejlepší výsledky svaly.

Mezi 16. až 18. hodinou mají největší výkonnost játra.

O 3. hodině ráno má tělo energie nejméně.

[4]

Obrázek č. 2 zobrazuje výkonnost člověka během dne



Obrázek 2: Výkonnost člověka během dne [4]

Tělesné rytmy se také značně mění s věkem člověka.

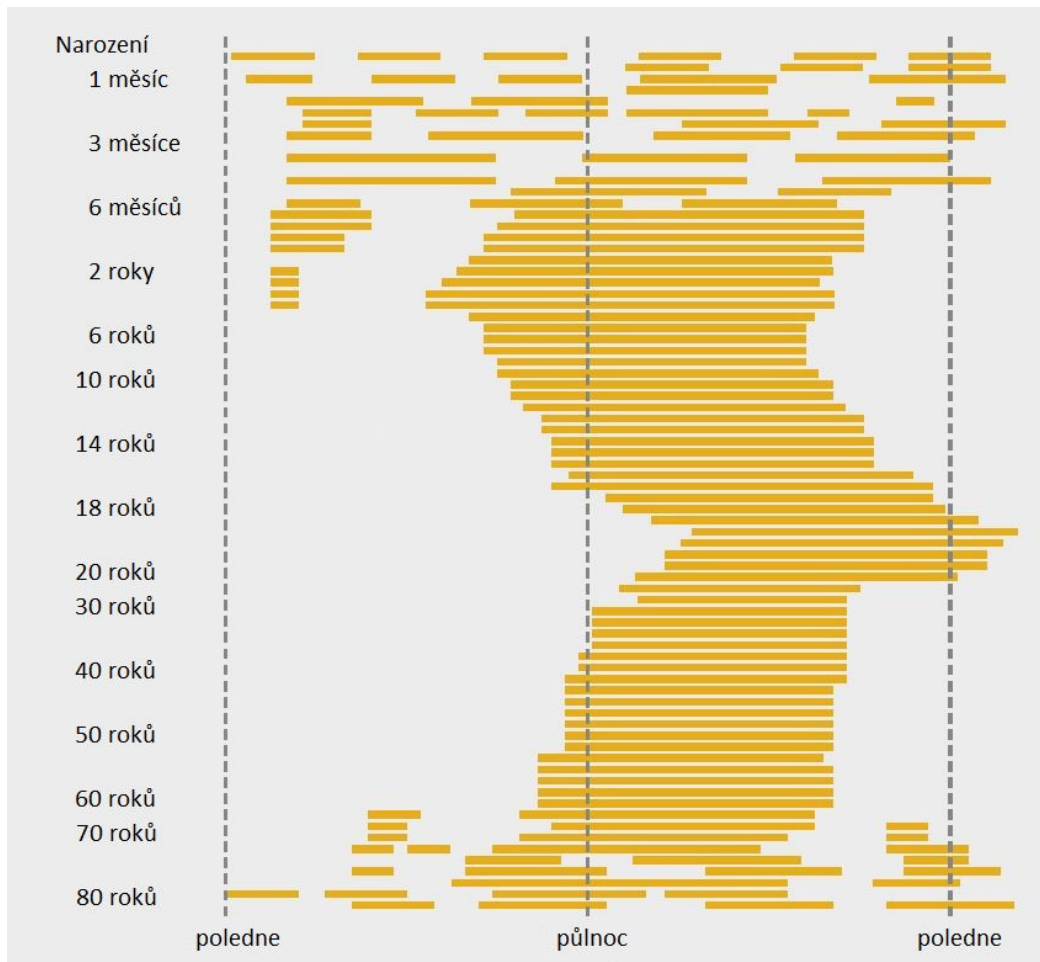
U novorozeňat jsou cirkadiánní rytmy téměř na úrovni ultradiánních, proto dítě potřebuje během dne několikrát spát a poté má „akční čas“ v nočních hodinách. [4]

U mladistvých se začnou vnitřní „hodiny“ zpomalovat, proto večer ponocují a ráno spí do poledních hodin. [4]

Od 30 let kvalita spánku neustále klesá, i když člověk chodí spát v pravidelných cyklech. [4]

Kolem 70 let se tyto příznaky stávají aktuálnějšími, neboť naše tělo přestává rozlišovat mezi dnem a nocí. Cykly jsou pořád stejné, avšak se stále více rozcházejí se dnem a nocí. [4]

Průběh cirkadiánních rytmů v závislosti na věku zobrazuje obrázek č. 3.



Obrázek 3: Průběh cirkadiánních rytmů člověka v průběhu života [4]

1.3.3. Vnitřní hodiny

Vnitřní „hodiny“ v každém z nás mají jiné tempo, každý z nás ale reaguje na den a noc. Mnoho buněk a orgánů má svůj vlastní rytmus ve své režii, bez ohledu na vnější okolí. Proto tedy pro všechny tyto periferní rytmy zapojené do biologických procesů jsou poskytovány hlavní „hodiny“, které musí mít synchronizaci s okolním světem. [4]

Rodiče možná znají jev, kdy před uložením unaveného dítěte jdou do koupelny dítěti vyčistit zuby a po vyčistění je dítě nabitě energií. Tento jev může být způsoben nevhodným osvětlením koupelny – osvětlení s velkým podílem modrého spektra. Modré spektrum světla zaregistrují gangliové buňky v oku a pošlou signál do hlavních „hodin“. [4]

1.3.4. Oční fotoreceptory ovlivňující cirkadiánní cykly

Dříve byly známy pouze 2 oční fotoreceptory – čípky a tyčinky, které zprostředkovávají denní a noční vidění. Na konci 20. století však byl znovu objeven třetí fotoreceptor, který ovlivňuje biologické rytmy tím, že nastavuje vnitřní tělesné hodiny. Tento třetí typ fotoreceptorů se nazývá gangliové buňky. [7]

Gangliové buňky se nacházejí v hlubokých vrstvách sítnice a mají přímé spojení s mozkem, přesněji řečeno se suprachiasmatickými jádry (SCN) hypotalamu za kořenem nosu. [4]

Tato jádra jsou prostředníkem reakce mezi světlem a dotčeným orgánem reagujícím na světlo – centrálním kontrolním bodem, který synchronizuje mnoho drobných hodin v těle. [4]

SCN se skládá ze dvou mozkových jader velikosti zrna rýže, které se nacházejí v místě křížení zrakových nervů. Každé jádro je složeno z tisíců nervových buněk, jejichž rytmy jsou synchronizovány s denním světlem. [4]

1.3.5. Účinky světla na tvorbu melatoninu

Pouze asi 1 % až 3 % gangliových buněk jsou nevizuální fotoreceptory. Uvnitř těchto buněk se nachází fotocitlivý protein známý jako melatonin. Gangliové buňky obsahující melatonin se nachází po celé sítnici, nejcitlivější jsou ale ve spodní části. [4]

Gangliové buňky jsou nejcitlivější na modré spektrum světla okolo vlnové délky 480 nm. Tento fakt byl zjištěn experimentálně, kdy byli vybraní jedinci v noci ozařováni světlem s různými vlnovými délkami po dobu 1,5 hodiny. Při ozařování jim bylo měřeno množství melatoninu (spánkového hormonu) v krvi, přičemž právě při hodnotě 480 nm bylo naměřeno množství melatoninu nejnižší. Melatonin obsažený v gangliových buňkách také negativně reaguje na modré spektrum světla, proto se výroba melatoninu ve dne zpomalí a tudíž se necítíme unaveni. [4]

Dosáhnout umělým osvětlením stejné úrovně jakou má denní osvětlení je technicky i ekonomicky téměř nemožné, ale i úrovně 500 lx až 1 500 lx mohou být biologicky kvalitní. Proto je vhodné kombinovat denní světlo se světlem umělým a to jak z pohledu intenzity tak i chromatičnosti. [4]

Správným načasováním vhodného osvětlení je možné zvýšit pohodu a produktivitu např. v zaměstnání, kdy zhruba v polovině dne je vhodné mírně zvýšit osvětlení i teplotu chromatičnosti a ve večerních hodinách naopak oba tyto parametry snížit a připravit tak tělo na spánek. [4]

1.3.6. Biologické účinky vnitřního osvětlení na cirkadiánní rytmy člověka

Biologicky kvalitní umělé osvětlení by mělo kopírovat cirkadiánní rytmy uživatele, tak, aby byly podporovány biologické procesy, které určují fázi odpočinku a fázi aktivity. Z toho tedy vyplívá nutnost umět dynamicky řídit osvětlení, aby bylo možno co nejlépe napodobit průběh denního světla. Dle [4] je doporučováno strávit alespoň půl hodiny denně na denním světle. Jestliže se však v interiéru vhodným způsobem zkombinuje denní světlo se správným umělým světlem, mohla by se doporučená minimální doba strávená na denním světle výrazně snížit bez toho, aby došlo ke snížení kvality života. [4]

Aktivaci biologických rytmů umělým osvětlením lze dosáhnout světlem s vysokým obsahem modrého spektra světla s vlnovou délkou cca 480 nm v součinnosti s vysokou úrovní osvětlení. Pouze vysoká úroveň modrého spektra ve světle však nestačí k tomu, aby bylo dosaženo požadovaného efektu. Světlo musí mít i vhodný směr dopadu – tj. nejlépe tedy z plošného svítidla shora. Tento směr je velice důležité dodržet, neboť nejvíce gangliových buněk ovlivňujících produkci melatoninu se nachází ve spodní straně sítnice. Pro tento účel jsou nejvhodnější svítidla, které mají přímo-nepřímou vyzařovací charakteristiku, příp. nepřímou vyzařovací charakteristiku, kdy se vyzařované světlo odráží od stropu. Svítidla by měla mít možnost regulace modré složky světla, která by měla být regulována tak, že od rána do poledních hodin bude mít vzrůstající trend a od poledních hodin do večera zase klesající a v nočních hodinách ji co nejvíce omezit. [4]

Regulace modré složky světla může být docílena použitím alespoň dvou typů LED zdrojů s různou teplotou chromatičnosti ve svítidle. Například bude-li svítidlo osazeno dvěma sadami LED zdrojů, kdy jedna sada bude mít teplotu chromatičnosti 2 700 K a druhá sada 6 000 K. Požadovaného efektu lze tedy dosáhnout tak, že vhodným řízením stmívání resp. rozsvěcení budeme zvyšovat/snižovat světelný tok z první sady s T_c 2 700 K na druhou sadu s T_c 6 000 K v dopoledních hodinách a opačným postupem v odpoledních hodinách. Ve večerních hodinách nám tedy zůstane svítit pouze 1. sada s T_c 2 700 K, jejíž světelné spektrum obsahuje nejméně modré složky.

1.4. Kritéria biologicky účinného osvětlení

Od biologicky efektivního osvětlení se očekává, že dosáhne těchto pozitivních účinků:

- Stabilizace cirkadiánního rytmu uživatele
- Časově stabilní cyklus spánku a aktivity synchronizovaný do 24 hodin
- Posílení amplitudy biologických hodin
- Aktivace a zlepšení koncentrace
- Stabilizace pracovní výkonnosti a snížení okamžité únavy
- Posílení regenerace
- Zlepšení nálady
- Posílení imunitního systému

[4]

Je nutné však vzít v úvahu, v jaké denní době je vhodné takto účinné osvětlení používat, neboť při nevhodném načasování by mohlo mít přesně opačný účinek, než jaký se očekává. [4]

1.4.1. Ovlivňující faktory

Z důvodu energetické účinnosti nesmí být biologických účinků dosaženo pouhým zvyšováním osvětlenosti. Celkové množství světla se musí řídit účelně se znalostí

mezioborového designu s pomocí využívání spektra, vyzařovacích charakteristik svítidel, nasměrování světla a délky působení světla. [5]

Tabulka základních faktorů podstatně ovlivňujících biologické účinky světla na člověka:

Vyšší aktivační biologický efekt	Nižší aktivační biologický efekt
Vyšší úroveň osvětlení	Nižší úroveň osvětlení
Delší čas expozice světla	Kratší čas expozice světla
Vyšší obsah modrého světla	Nižší obsah modrého světla
Prostorové osvětlení	Bodové osvětlení
Dynamické osvětlení	Statické osvětlení
Nízké osvětlení před uvažovanou expozicí efektivního světla	
Expozice světla dopoledne	Expozice světla odpoledne

Tabulka 2: Základní faktory ovlivňující biologické účinky světla [5]

1.4.2. Spektrální vlastnosti světla

Biologický účinek denního světla v určitém čase je z velké části způsoben kombinací osvětlení a spektrálním složením světla. Během dne má denní světlo vysokou teplotu chromatičnosti a způsobuje vysokou osvětlenost, což právě způsobuje biologickou aktivaci lidského organismu. Ve vnitřních prostorech tedy tento účinek může být docílen použitím vhodných světelných zdrojů obsahujících vysokou úroveň modrého světla, neboť se technicky obtížně dosahuje podobných intenzit osvětlení, jaké jsou ve venkovních prostředích. [5]

Spektrální vlastnosti denního světla se během dne mění a to tak, že při východu a při západu Slunce jsou zvýšeny složky červeného spektra. V období před východem a po západu Slunce spektrum obsahuje větší relativní podíl modré složky, nicméně úroveň osvětlení je tak nízká, že toto světlo s poměrně výraznou složkou modrého světla neovlivní biologické účinky na lidský organismus. [5]

Pro osoby, jejichž rytmus je založen na přirozeném průběhu dne, tedy pro osoby, které nepracují na směny, by mělo být spektrum a intenzita umělého osvětlení pozdě

večer a v noci založeno pouze na množství světla, které je potřebné pro vizuální účinek, bez obsahu modré spektrální složky. [5]

Kromě snahy o dosažení co nejefektivnějšího osvětlení z hlediska vizuálního vnímání, by měl být také brán zřetel na efektivitu soustavy v oblasti modré spektrální složky. Z tohoto důvodu se hodnotí použité materiály ve svítidlech z pohledu odrazu a přenosu světla. Vícenásobné odrazy světla ve svítidle mohou výrazně zvýšit jinak relativně malé spektrální posuny. [5]

Již během procesu návrhu osvětlovací soustavy musí být vzaty v úvahu optické vlastnosti materiálů, které budou použity na vymalování stropu a stěn, výrobu podlah, výbavy interiéru atd. Z tohoto pohledu jsou nevhodné dřevěné prvky, zemité barvy a opálové prvky, neboť mohou velice snížit účinnost světelného zdroje se zvýšeným obsahem modrého světla. [5]

1.4.3. Osvětlení

Aby byl zajištěn biologický efekt světla, musí být brána současně v potaz hladina osvětlenosti a teplota chromatičnosti. [5]

Je nutné, aby svislá osvětlenost ve všech směrech dosáhla v oku pozorovatele alespoň 250 lx při 8 000 K. Pod touto hranicí není biologický účinek patrný. Tato orientační hodnota předpokládá vystavení pozorovatele této osvětlenosti po dobu několika hodin nejlépe v ranních hodinách. [5]

1.4.4. Geometrické uspořádání

Biologický účinek světla se zvětšuje pro dané záření s velikostí prostorových úhlů všech jasných ploch v zorném poli. Prostorový úhel je přímo úměrný geometrickému povrchu oblastí a nepřímo úměrný druhé mocnině vzdálenosti. [5]

V [5] je uvedeno, že bodové světelné zdroje s prostorovým úhlem do 0,1 sr nemají žádný biologický účinek. Nárůst biologického účinku pak lze pozorovat

při zvětšujících se prostorových úhlech jasně zářících ploch od 0,1 sr do 0,5 sr. Chceme-li dosáhnout osvětlení s dobrým biologickým účinkem, musíme dosáhnout prostorového úhlu většího než 0,5 sr pro pozorovatele.

Velkých jasně zářících ploch lze dosáhnout za použití:

- Velkých světelných ploch (např. okna, velké světlo-rozptylující kryty svítidel)
- Světélkujících materiálů (např. OLED technologie)
- Osvětlení s rozlehlou nepřímou složkou
- Prvků, které odrážejí světlo přes velké plochy (např. police)
- Podsvícených transparentních materiálů (např. světelné stropy, střešní okna s umělým světlem)

Při návrhu se však musí dbát na to, aby nedocházelo k oslnění pozorovatele. [5]

1.4.5. Dynamika

Dynamika světla zahrnuje změny intenzity osvětlení, spektra, rozložení a směru světla. Správné nastavení těchto parametrů z hlediska jejich délky trvání, denního času, rychlosti změny a změny směru velice ovlivňuje jejich biologickou účinnost. Při navrhování biologicky účinného osvětlení musí být vždy bráno v potaz, k jakým účelům bude řešený prostor využíván. [5]

1.4.6. Energetická účinnost biologicky účinného osvětlení

Kvalitní osvětlení je takové, které splňuje potřeby lidí a také normy, které dbají na životní prostředí a energetickou náročnost. Díky moderním osvětlovacím technologiím však nejsou tyto dva cíle v rozporu. [4]

Podle International Energy Agency (IEC) připadá na osvětlení 15 % celosvětové spotřeby elektrické energie. Je-li třeba tuto hodnotu snížit, musí se začít využívat inteligentní systémy se stmívatelnými LED zdroji, které budou udržovat jas LED zdrojů v závislosti na denní době. S takovýmto systémem lze ušetřit až 35 % energie

spotřebované osvětlovacími systémy. Ve snaze o co nejnižší energetickou náročnost však nesmí trpět kvalita osvětlení. [4]

Otázka energetické náročnosti závisí na úhlu pohledu. Jestliže se biologicky účinné osvětlení bude porovnávat s klasickou nejlepší dostupnou LED technologií, vyjde pak biologicky účinné řešení energeticky hůře, protože ke správným biologickým účinkům je zapotřebí větší svislé osvětlenosti. Bude-li se srovnávat se zastaralým typem osvětlení určeným k rekonstrukci, bude energetická náročnost výrazně lepší. První porovnávaný případ je však v rozporu s normativními požadavky dle [3], neboť tato norma řeší pouze energetickou náročnost, nikoliv však biologicky efektivní osvětlení. Na druhou stranu by však biologicky účinné osvětlení nemuselo mít větší spotřebu, i když je nutné instalovat osvětlení s větším jmenovitým příkonem oproti konvenčnímu řešení. Lze správně naplánovat dynamiku osvětlení podle denní doby. Tudiž například v poledních hodinách nemusí osvětlovací soustava podávat maximální instalovaný výkon, ale pouze několik procent maximální hodnoty. [5]

Aby tedy bylo možné správně porovnat energetickou účinnost konvenčního řešení s řešením biologicky účinného osvětlení, musí se porovnat roční spotřeba elektrické energie, nikoliv pouze instalované výkony. [5]

1.5. Osvětlení pracovních prostor se zvláštními požadavky

Navrhování biologicky účinného osvětlení je třeba přizpůsobit tak, aby vyhovovalo denní době. Je velmi důležité zejména pro osoby, které tráví značnou část dne v interiéru a jsou tedy téměř odříznuti od denního světla. Klasickými zástupci takovýchto prostor jsou vzdělávací instituce a školy, kanceláře, dispečinky, domovy pro seniory a domy s pečovatelskou službou, prostory pro zdravotní péči, průmyslové prostory a domácí prostory. Naopak prostory, kde tato problematika není nutná řešit, jsou schodiště, chodby, toalety, kuchyňky, místnosti s kopírkami nebo vnitřní veřejné parkoviště. [5]

Biologické účinky nejsou zajišťovány pouze hlavním osvětlovacím zdrojem v prostoru, ale také dalšími zdroji světla jako jsou displeje a monitory. V závislosti na

návrhu a použití mohou takovéto zdroje narušit zejména ve večerních hodinách cirkadiánní rytmy pozorovatele. [5]

Úkolem biologicky účinného osvětlení však není reprodukovat všechny vlastnosti denního světla. Umělé osvětlení by nemělo vyzařovat ultrafialové záření, ani infračervené záření. [5]

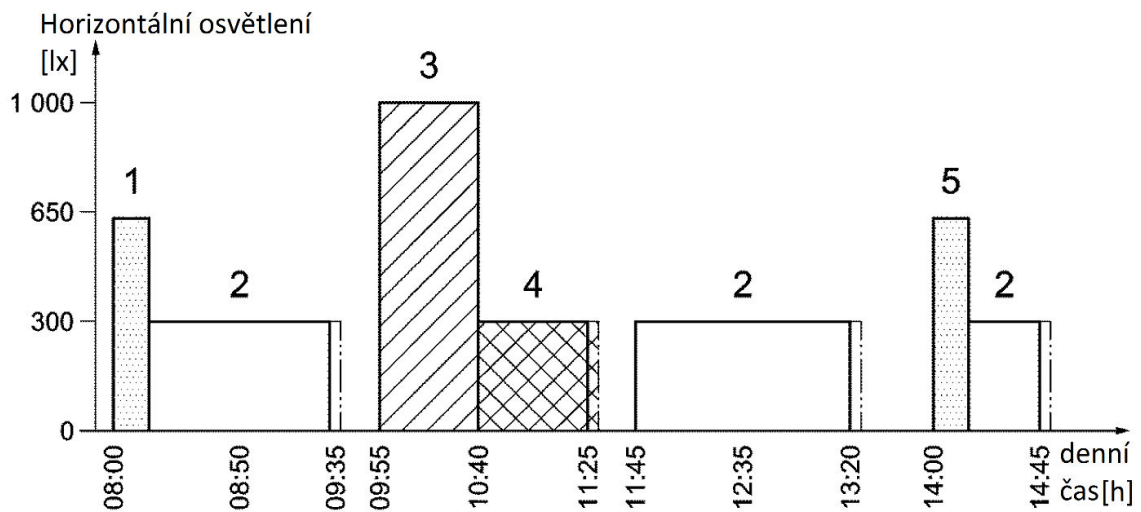
V ideálním případě by mělo být biologicky účinné osvětlení navrženo tak, aby vyhovovalo cirkadiánnímu rytmu uživatele a jeho požadavkům. Přednost by tedy měla být dána individuálně nastavitelnému osvětlení. [5]

1.5.1. Vzdělávací instituce a školy

Žáci i učitelé musí plnit různé kognitivní a zrakové úkoly. Je proto nezbytné, aby navržené osvětlení vyhovovalo těmto vykonávaným úkolům. Při navrhování biologicky účinného osvětlení musí být bráno v úvahu, zda výukové prostory budou využívány pouze dětmi a mladistvými v ranních, dopoledních a odpoledních hodinách, nebo budou sloužit i pro výuku dospělých ve večerních hodinách. [5]

Úkoly požadované ve vyučovacích hodinách se velice liší z ohledu na to, jak velká je požadována úroveň pozornosti, neboť v jedné hodině se píše test nebo čte a v následující se vede hromadná diskuze. Tudíž osvětlení musí mít proměnlivou teplotu chromatičnosti a intenzitu osvětlení, neboť právě při psaní testů nebo čtení musí být vysoká intenzita osvětlení a teplota chromatičnosti alespoň 5 000 K, aby byla dosáhnuta maximální pozornost studentů. Naopak při hromadných diskuzích je žádoucí, aby byla navozena uvolněná atmosféra. Proto je potřebná nižší intenzita osvětlení a teplota chromatičnosti maximálně 3 000 K. [5]

Vhodný průběh osvětlení během výukového dne je znázorněn na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Průběh osvětlení během výukového dne [5]

Legenda:

1 – „Dobrý den“ – Aktivační osvětlení v ranních hodinách. Zajišťuje synchronizaci tělesných hodin a podporuje pozornost hned od 1. hodiny. Aktivační osvětlení: 12 000 K, 650 lx.

2 – „Normální hodina“ – Standardní osvětlení: 4 000 K, 300 lx.

3 – „Test“ – Světlo, které cíleně podpoří soustředěnost. Osvětlení pro zvýšenou soustředěnost: 6 000 K, 1 000 lx.

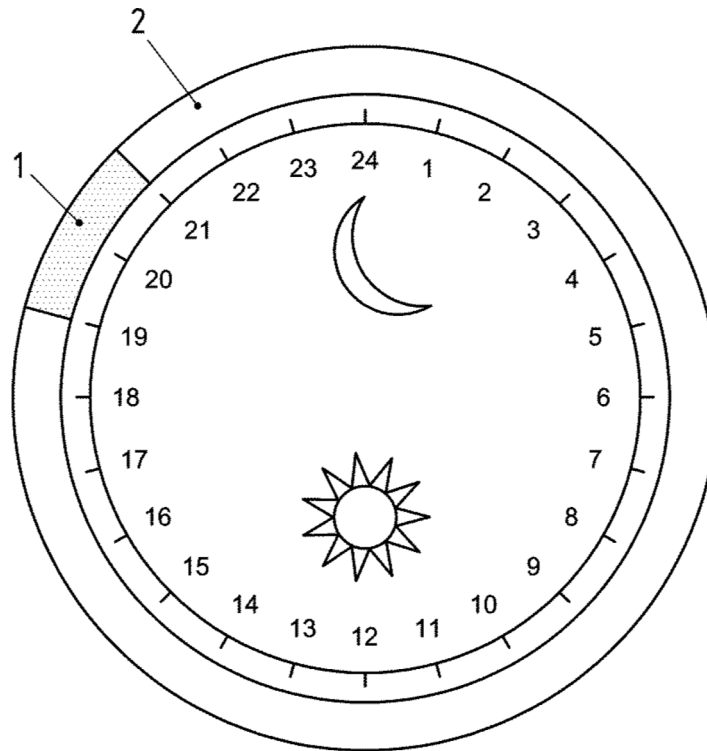
4 – „Zpět do hodiny“ - Žáci jsou ještě rozrušeni po testu. Proto je potřebné nízké teplé uklidňující osvětlení: 2 700 K, 300 lx.

5 – „ Únava po obědě“ – Po obědě se člověk cítí ospale, proto je potřeba tělo aktivovat. Aktivační světlo: 12 000 K, 650 lx.

Stejné doporučení platí i pro vzdělávání dospělých v případě, že výuka probíhá přes den, kdy může být podpořena koncentrace nebo navozena uvolněná atmosféra skupinových diskuzí. Jestliže výuka probíhá ve večerních hodinách, může být tímto osvětlením podpořena všímavost jedinců, musí být však zajištěno, aby osvětlení

neovlivňovalo jejich normální spánkový rytmus. Tudiž aktivační osvětlení může být použito maximálně 2 hodiny před tím, než jdou lidé spát. [5]

Doporučené osvětlení ve večerních výukových hodinách je znázorněna na obrázku č. 5.



Obrázek 5: Doporučené osvětlení ve večerních výukových hodinách [5]

Legenda:

1 – 3 000 K, 200 lx.

2 – Intenzita osvětlení musí odpovídat požadavkům konkrétnímu zřakovému úkolu

Používají-li se k výuce prezentační média, je nutné, aby byla dobře čitelná.

[3]

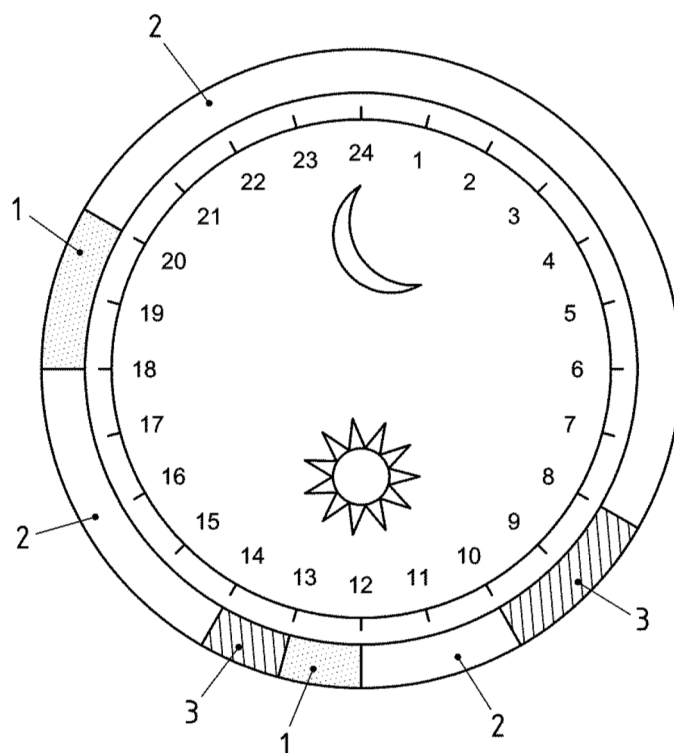
1.5.2. Kanceláře

Požadavků kladených na pracovníky v kancelářích je mnoho a jsou velice různé. Norma ČSN EN 12464-1 popisuje nezbytné předpoklady a minimální hodnoty pro výkon

vizuálních úloh, avšak tato norma nijak nepopisuje biologické působení světla na člověka.

Zvláště v tmavých zimních měsících není možné, aby se biologické hodiny úředníků synchronizovaly s denním světlem. Použitím biologicky účinného světla lze tedy dosáhnout kompenzace nedostatku denního světla, což má pozitivní vliv na náladu a pohodu pracovníků. [5]

Rytmus a průběh osvětlení a teploty chromatičnosti by měl být v závislosti na prováděném úkolu a rozvrhu časován jako např. na obrázku č. 6.



Obrázek 6: Příklad průběhu osvětlení v kanceláři [5]

Legenda:

1 – 3 000 K, 200 lx

2 – Intenzita osvětlení musí odpovídat konkrétním požadavkům zrakového úkolu

3 – 8 000 K, 250 lx

Osvětlení konferenčních a zasedacích místností by mělo být nejlépe manuálně nastavitelné pomocí panelu na různé světelné scény, protože v takovýchto prostorách probíhají akce s odlišnými požadavky na osvětlení. Pro večerní používání je nutné, aby byla nastavena teplá barva světla a nízká úroveň osvětlenosti dvě hodiny před tím, než jdou účastníci spát. [5]

V odpočinkových místnostech by mělo být biologicky účinné osvětlení instalováno tehdy, když není možno toto osvětlení instalovat přímo na místě výkonu. Je-li biologické osvětlení řešeno tímto způsobem, musí být přestávky plánovány takovým způsobem, aby osvětlení bylo pro zaměstnance biologicky nejpříznivější. [5]

Vstupní prostory a chodby jsou spojovacími prvky v budově. Jsou určeny pro komunikaci, orientaci a slouží jako přechodné oblasti mezi kanceláři, konferenčními, odpočinkovými a sekundárními místnostmi. V návrhu osvětlení v těchto místech musí být zajištěno, aby zde nebyly příliš velké rozdíly osvětlenosti vůči prostorům, které spojují. Rozdíly by měly být vyrovnávány pomocí inteligentního řízení. [5]

1.5.3. Dispečinky

Ve velínech jsou kladeny velké nároky na soustředěnost pracovníka, což je situace, která dělá biologicky účinné světlo velmi důležité.

Velíny se vyznačují tím, že mimo jiné mají tyto vlastnosti:

- Používají se 24 hodin denně (práce na směny)
- Vykonávají se zde svislé vodorovné i šikmé zřizovací úlohy, přičemž některé jsou umístěny u stropu
- Jsou zde velmi odlišné zřizovací úlohy na pracovním místě a v pracovním prostoru
- Může být nutné omezení osvětlení
- V některých případech může být požadováno světlo zcela vyloučit

Příkladem těchto prostorů jsou velíny v elektrárnách a průmyslových halách, kontrolní stanice pro záchranné služby, centra pro řízení dopravy nebo počítačová centra. [5]

V těchto případech je nutné, aby osvětlení nejen zajišťovalo dobré podmínky pro zrakové úlohy a podporovalo cirkadiánní rytmus, pozornost a tím i bezpečnost práce. [5]

Řízení osvětlení musí být přizpůsobeno tak, aby vyhovovalo rytmům pracovníků, pracujících na směny a tím se zabránilo negativním dopadům na jejich přirozené rytmy. V případech nehody, nebo nutnosti zvýšené pozornosti musí být zajištěna vysoká úroveň osvětlení s vysokou teplotou chromatičnosti. [5]

1.5.4. Domovy pro seniory a domy s pečovatelskou službou

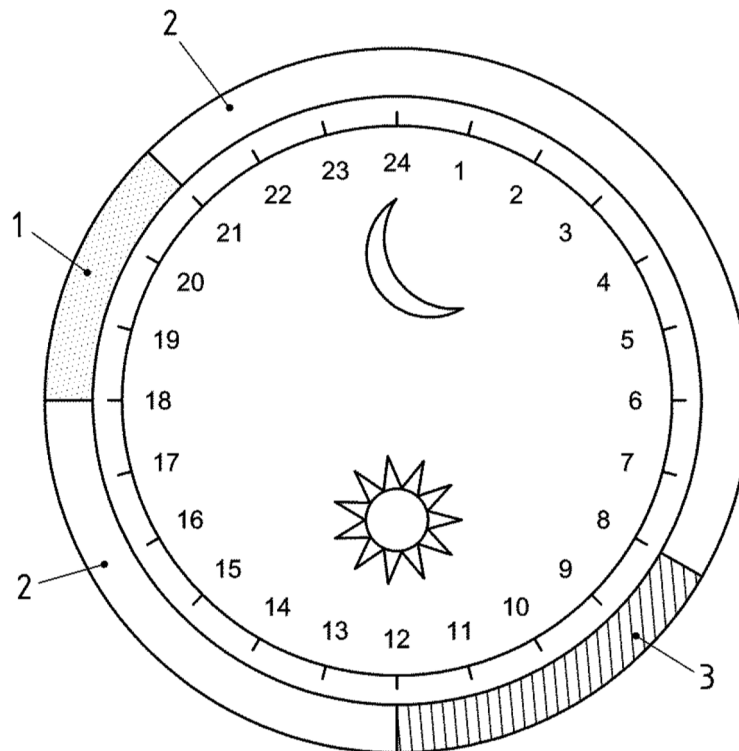
Cirkadiánní osvětlení trvale zlepšuje rytmy seniorů a pacientů trpících demencí. Biologicky účinné osvětlení seniory aktivuje během dne a večer podporuje lepší spánek. Přičemž tyto podmínky ve stejné době podporují také pečovatele k lepším pracovním výkonům. [5]

Osvětlení v domovech seniorů musí splňovat vysoké požadavky, neboť ovlivňuje zlepšení zdravotního stavu a mírní onemocnění související se stářím. Většina seniorů trpí také zrakovým onemocněním, což též ovlivňuje kvalitu jejich života. [5]

Například zákal čočky zapříčiní, že senior potřebuje ke čtení nebo manuálnímu pracím až 1 500 lx, což je čtyřikrát více než zdravý dvacetiletý člověk. Navíc 60 % – 80 % obyvatel domova seniorů trpí nějakou formou demence. Klesá schopnost koordinace pohybu a orientace v prostoru a zvyšuje se tedy nebezpečí pádu. Postižený si např. může snadno splést pouhý stín s nějakým předmětem. [5]

Společenské místnosti v domovech seniorů jsou charakterizovány tím, že zde spolu obyvatelé tráví delší čas během dne a tudíž nejsou vystaveni dennímu světlu. Proto by v těchto prostorech mělo být zajištěno světlo s vysokou biologickou účinností. Také se doporučují ve společenských místnostech velká okna, aby do nich vnikalo co možná nejvíce přirozeného světla. [5]

Na obrázku č. 7 je znázorněn příklad, jaká dynamika světla by měla být v domově seniorů během dne.



Obrázek 7: Příklad průběhu osvětlení společenské místnosti v domově seniorů [5]

Legenda:

1 – 3 000 K, 200 lx

2 – Intenzita osvětlení musí odpovídat konkrétním požadavkům zrakového úkolu

3 – 8 000 K, 250 lx

Na obrázku č. 7 je vidět, že v ranních a dopoledních hodinách by mělo mít světlo teplotu chromatičnosti alespoň 5 000 K. Naopak ve večerních hodinách by světlo mělo mít teplotu chromatičnosti maximálně 3 000 K. V případě večerního a nočního osvětlení by mělo být co možná nejvíce sníženo prostorové osvětlení a použít pouze účelový bodový zdroj světla. V noci by osvětlenost měla být omezena na minimum potřebné a předepsané pro základní orientaci v prostoru. [5]

Osvětlení koupelen domova seniorů musí být navrženo tak, aby ve večerních hodinách nemělo žádný biologický účinek – tudíž teplé bílé světlo. V ranních hodinách

by naopak mělo mít biologický účinek – tudíž studené bílé světlo. Tohoto efektu lze docílit například dvěma různými sadami LED čipů ve svítidle. [5]

Při návrhu osvětlení na chodbách by měl být brán zřetel na to, aby nedocházelo k odrazům světla na podlaze a stínům, které „předběhnou“ obyvatele při chůzi po chodbě. Osvětlenost v průběhu dne by měla být udržována na hodnotě 8 000 K a 250 lx v ose z, ve výšce 160 cm od podlahy (ve výšce očí). [5]

1.5.5. Prostory pro zdravotní péči

V nemocnicích není odborná péče jediným důležitým ukazatelem, je potřeba, aby se pacient cítil v dobrých rukou s příjemnou atmosférou. Je prokázáno, že pacienti, kteří jsou vystaveni větší intenzitě světla, se léčí rychleji. [5]

Dynamické světlo by mělo být navrženo tak, aby simulovalo změny denního světla, které působí na cirkadiánní rytmy pacienta a tak napomáhá k rychlejšímu uzdravení. [5]

Mnoho nemocnic využívá osvětlení, které je nejen ergonomické, ale také vyvolává pozitivní emocionální reakce a podporuje dobrý zdravotní výsledek – pacienti i ošetřovatelé se cítí lépe, čímž je zajištěn účinnější výsledek ošetření. [5]

Ne všechna lehátka v nemocnici se nacházejí v blízkosti oken, proto je velice důležité adaptivní cirkadiánní osvětlení, které pacientovi pomáhá se ráno snáze probudit a večer lépe usnout. Osvětlení v nemocničním prostředí by mělo v ranních hodinách dosahovat úrovně až 1 600 lx a chladných teplot chromatičnosti pro aktivující účinky. Ve večerních hodinách by mělo mít nízké úrovně teplé bílé s maximální teplotou chromatičnosti 3 300 K, aby se pacientovi dobře usínalo. [5]

Dynamické osvětlení je založeno na inteligentním řízení, tak aby mohlo vyhovět specifickým požadavkům a mohlo být řízeno personálem nemocnice při večerním, či nočním ošetřování. Pomocí osobní řídicí jednotky mohou pacienti sami ovládat osvětlení nad svým lůžkem. [5]

Světlo v prostorách pro zdravotní péči by mělo být nastaveno za účelem rychlého zotavení – tedy biologicky účinné osvětlení, které se řídí přirozeným denním rytmem. Stabilita rytmu posiluje imunitní systém. Silné noční osvětlení lze použít pro akutní léčbu a má přednost před možným narušením rytmu. [5]

V prostorách pro zdravotní péči, kde je většina pacientů ležících, je výhodné využít pro osvětlení stropní plochy nad lehátkem. Světlo by nemělo být oslňující a mělo by být studeně bílé během dne a teple bílé během večerních hodin. Dále by mělo světlo pacientovi umožňovat relaxační činnosti jako je třeba čtení, ale nemělo by mít aktivační účinek. [5]

Zaměstnanecké pokoje a personální kanceláře musí mít také intenzivní biologicky účinné osvětlení. Jsou-li tyto pokoje používány i pro odpočinek zaměstnanců, musí jít umělé osvětlení vypnout. [5]

Víceúčelové místnosti, společné prostory a chodby by měly mít biologický efekt měnící se v souladu s průběhem denního světla. [5]

Osvětlení v čekárnách by mělo být uklidňující, jasné s veselou atmosférou. Takové světlo je to pravé pro potlačení strachu a úzkosti. [5]

1.5.6. Průmyslové prostory

V současné době je brán malý ohled na biologické osvětlení v průmyslových prostorech, kde probíhá směnný provoz. Je tedy potřebný pracovní model osvětlení, který bude co nejméně narušovat lidské biorytmy. [5]

V současné době existují dva modely pracovního osvětlení:

- Posouvání cirkadiánního rytmu
- Stabilizace cirkadiánního rytmu kombinovaná s aktivací v kritických situacích

[5]

První možné řešení je posunutí cirkadiálního rytmu jedince.

Obecně platí, že práce na směnný provoz způsobuje odchýlení od přirozeného lidského rytmu spánku a bdělosti. Teoreticky je možné posunout tyto dvě fáze vhodným působením umělého osvětlení na nový rytmus, který by odpovídal směnnému provozu. Prakticky však je v dosažení tohoto modelu mnoho překážek. Kromě světla v noci jsou pracovníci vystaveni i vlivu světla přes den, neboť nebudou spát celý den. Přičemž přísun tohoto světla je velice obtížně kontrolovatelný. Krom toho musí být časové intervaly biologicky účinného osvětlení pro nový rytmus neustále přizpůsobovány jedinci, čehož se obtížně dosahuje tam, kde pracuje několik zaměstnanců pohromadě. [5]

Cílený posun cirkadiálního rytmu je možno dosáhnout pomocí následujících opatření:

- Zaměstnanec by měl trávit čas ve správném světle večer před noční směnou, ale i večery v jeho volném čase mezi nočními směnami.
- Osvětlení na začátku noční směny musí být silné s velkým obsahem modrého spektra. Dále prostorově rozložené a nesmí oslňovat.
- Takovéto osvětlení musí být zajištěno až do doby, kdy tělesná teplota jedince klesne na nejnižší úroveň. Doba nejnižší tělesné teploty se však s posunem cirkadiálního rytmu posouvá k ranním hodinám také, tudíž se musí prodlužovat i doba správného osvětlení během několika nocí.
- Svítidla musí být prostorová a umístěna tak, aby byla v horní části zorného pole pozorovatele.
- Před koncem směny se musí úroveň osvětlení snížit a odstranit jeho modrá složka.
- Po skončení směny musí být úroveň efektivního světla co nejmenší. Tudíž je tedy doporučováno, aby zaměstnanci při cestě domů používali brýle s filtry v oblasti modrého spektra. Doma co nejvíce zatemnili ložnici a šli co nejdříve spát.

Cíleně plánovaný cirkadiální posun pro noční směny má výhody:

- Větší bdělost a ochotu pracovat.
- Kvalitnější a delší spánek po směně během dne.
- Lepší nálada a motivace pracovat.

Cíleně plánovaný cirkadiánní posun pro noční směny má nevýhody:

- Za jednu noc nelze rytmus posunout o více než 3 hodiny.
- Denní návyky jednotlivce ve volnu mohou neutralizovat fázový posun.
- Špatně navržený světelný rytmus může cirkadiánní rytmus uživatele zcela rozhodit.

Pokud jde o plánovaný posun cirkadiánního rytmu, lze vyvodit tyto závěry:

- Posun není možný za krátký čas.
- Je nutný dohled zdravotního personálu na uživatele.
- Návrh a realizace vyžaduje hodně organizačního úsilí.
- Zaměstnanci v tomto procesu musí spolupracovat.

[5]

Druhým možným řešením je stabilizace cirkadiánního rytmu kombinovaná s aktivací v kritických situacích.

Tato strategie se snaží udržet tělesné hodiny co nejstabilněji s přirozeným rytmem i v době nočních směn, aby byl rytmus zaměstnance okamžitě správně synchronizován, vrátí-li se období denních směn. Pro tento koncept může zaměstnanec pracovat na nočních směnách pouze pár dní za delší čas. V tomto konceptu se používá malá úroveň osvětlení, tak že je zde riziko únavy zaměstnance, což může zapříčinit zvýšený výskyt chyb a nehod. Z tohoto důvodu musí být zaměstnanci aktivováni vysokými úrovněmi osvětlení ve velmi krátkých intervalech pouze v kritických situacích.

[5]

Pro tento koncept osvětlení musejí být dodržena tato opatření:

- Aby se zabránilo posunu rytmu, musejí být rychlé a krátké změny osvětlení.
- Vysoce biologicky efektivní osvětlení v průběhu celé směny může snížit amplitudu biologických hodin. Není proto vhodné pro trvalé použití.
- Osvětlení musí být udržováno na minimu pro prováděné zrakové úkoly a musí z něho být vyloučena modrá složka.

- V dopoledních hodinách, při cestě domů a odpoledne po vyspání by osvětlení naopak mělo být s vysokou biologickou účinností, aby se amplituda biologických hodin nesnižovala.
- V tomto režimu však hrozí poruchy spánku, proto je vhodný jen pro ojedinělé noční směny.
- Využívat aktivující světlo jen účelně v případě rizikových činností.

Stabilizace cirkadiánního rytmu kombinovaná s aktivací v kritických situacích má výhody:

- Aktivace zvýší úroveň bdělosti bez změny cirkadiánního rytmu.
- Tento přístup je vhodný tam, kde během směny postačuje nízká úroveň ostražitosti a výkonu, kromě pár kritických okamžiků, kdy je nutno použít aktivačního světla.

Stabilizace cirkadiánního rytmu kombinovaná s aktivací v kritických situacích má nevýhody:

- Není možno zajistit dostatečné osvětlení pracovního prostoru bez vlivu na lidský denní rytmus.
- Přirozený rytmus lze udržovat pouze udržováním minimální možné úrovně osvětlení bez obsahu modré složky.
- Náhlá trvalá aktivace v době nízké bdělosti a výkonu může vést ke zdravotním problémům.
- Používáním tohoto konceptu z pravidla vede k více poruchám spánku, než v případě používání prvního konceptu, kdy se tělesný rytmus alespoň částečně přizpůsobí pracovní době.

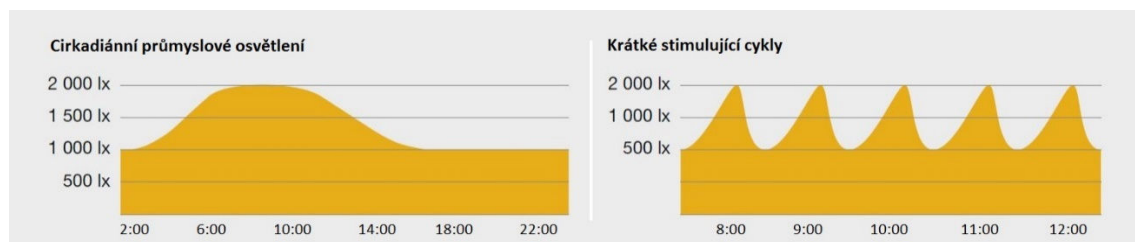
[5]

K vyšší produktivitě práce a lepší pocitové pohodě a kvalitnějšímu spánku zaměstnanců při denních směnách může vést vhodné dynamické osvětlení. Tento fakt byl dokázán testem, kdy:

- V prvním případě byla hala osvětlována standardně plynule se zvedající úrovní osvětlení:
 - od 1 000 lx do 2 000 lx v ranních hodinách a poté zpět plynule se snižující se úrovní osvětlení
 - z 2 000 lx na 1 000 lx v odpoledních hodinách při teplotě chromatičnosti 4 000 K.
- Ve druhém případě osvětlení během dne kolísalo mezi 500 lx a 2 000 lx.

[4]

Obrázek č. 8 znázorňuje dva případy osvětlení haly během pracovní směny.



Obrázek 8: Průběh osvětlení ve výrobní hale [4]

Z výsledků testů vyplynulo, že 2. způsob osvětlování je pro pracovníky lepší. [4]

1.5.7. Domácí prostory

Dynamické, biologicky účinné osvětlení může přispět ke světelnému komfortu také v domácnosti. Cirkadiánní osvětlení v domácnostech jsou však v současné době velice vzácná. Se správným výběrem svítidel a světelných zdrojů do domácnosti může být dosaženo velice dobrých biologických výsledků. [4]

Každý člověk potřebuje dostatek studeně bílého světla, aby se aktivoval a byl v dobré kondici. Správné osvětlení domácnosti pomáhá zlepšit kvalitu života zejména v zimních měsících. Každý, kdo nemůže strávit alespoň půl hodiny denně na denním světle, měl by se alespoň vystavovat studeně bílému světlu o teplotě chromatičnosti alespoň 5 300 K. [4]

Experimenty v laboratořích potvrdily, že při použití studeně bílého světla se produkce melatoninu velice snížila již během deseti minut. To znamená, že je-li správné světlo zařazeno v domácnosti již ráno v kuchyni při snídani, nebo v koupelně při ranní hygieně, tělo je velice rychle aktivováno. [4]

Mnoho lidí trpí nedostatkem světla v tmavých zimních měsících, kdy se cítí unavení, neteční s velkými výkyvy nálad, které se mohou vyvinout až v sezónní afektivní poruchu (SAD). SAD může být léčena doma pomocí malých světelných terapeutických zařízení. Tyto zařízení fungují tak, že vyzařují studené bílé světlo v krátkovlnné oblasti modrého spektra. Zařízení dodávají světlo s teplotou chromatičnosti 6 500 K – 10 000 K, která je podobná dennímu světlu. K dispozici je také speciální světelný budík, který 30 minut před probuzením začne napodobovat paprsky slunečního svitu. [4]

Relaxační světlo ve večerních hodinách, použité alespoň dvě hodiny před spaním, připraví tělo ke kvalitnímu spánku. Takové světlo musí být teple bílé – tudíž s nízkým obsahem modré spektrální složky, aby v těle uživatele stoupla produkce melatoninu. Takovéto světlo může zajistit buď LED s teple bílým světlem, nebo klasická žárovka či halogenová žárovka. Krom toho by osvětlení ve večerních hodinách mělo být směrové – bodové, nikoliv prostorové, což platí i pro noční čtení. Člověk by se neměl vystavovat alespoň 2 hodiny před ulehnutím do postele LCD monitorům, které produkují velké množství modrého spektra ve světle. [4]

2. Měření spektrálních vlastností vzorků světelných diod

2.1. Použitá zařízení

Ke změření úlohy této diplomové práce byly použity 4 hlavní skupiny předmětů, a to: měřicí přístroj - spektrometr, zdroj pro napájení LED světelných zdrojů, vzorky světelných zdrojů a chladiče LED čipů.

2.1.1. Měřicí přístroj

K měření spektrálních vlastností vzorků světelných diod byl použit spektrometr MAVOSPAC BASE. Se sériovým číslem 16D10129.

Technické parametry měřicího přístroje:

Sensor:	CMOS image sensor, 256 pixelů
Vstupní čočka:	průměr 7 mm
Min. vzdálenost čočky od měř. povrchu:	25 mm
Mezní chyba, kosinová korekce:	< 3 %
Spektrální rozsah:	380 nm – 780 nm
FWHM:	< 15 nm
Fyzické rozlišení:	1,72 nm
Digitální rozlišení:	16 bit
Reprodukovatelnost vlnové délky:	+/- 0,5%
Odstup signálu ku šumu:	1000:1
Parazitní světlo:	-25 dB
Nejistoty měření při standartním zdroji světla typu A, 2856 K, 1000 lx	
Nejistota měření osvětlení:	+/- 3 %
Reprodukovatelnost chromatičnosti:	+/- 0,0005
Nejistota měření, CCT:	+/- 2 %
Nejistota měření, CRI:	+/- 1,5 %
Nejistota měření, flicker:	+/- 1,5 %

V příloze č. 1 je přiložen kalibrační protokol.

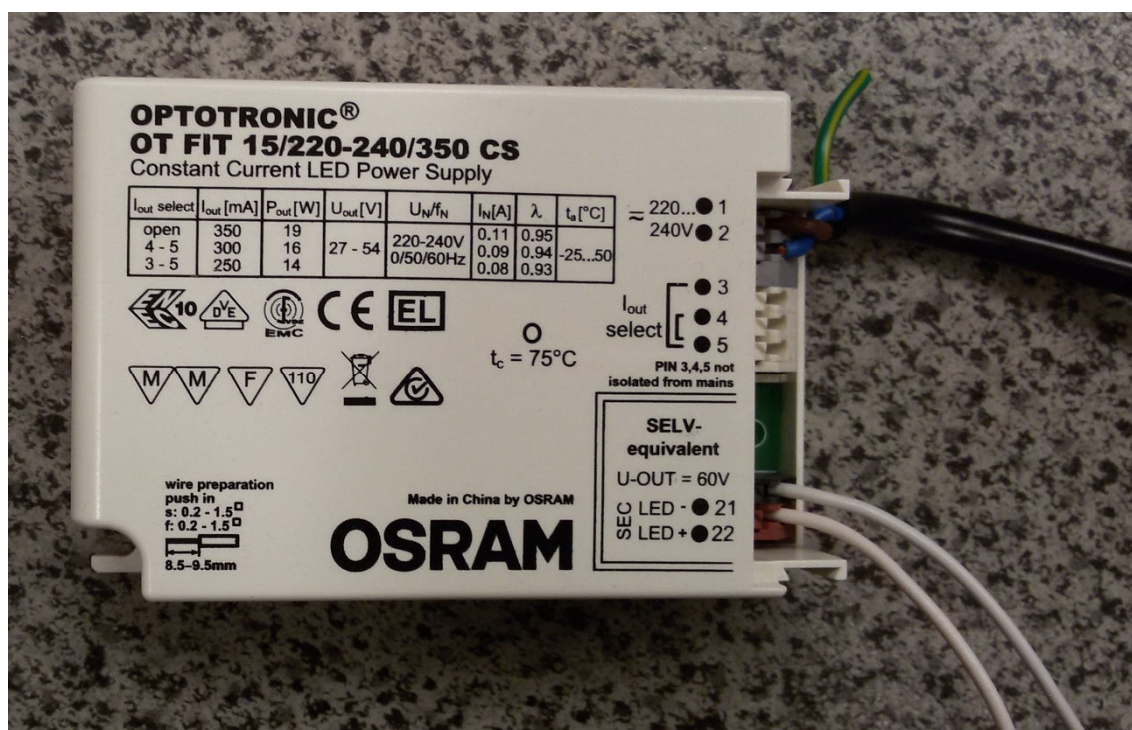
2.1.2. Zdroj

K napájení měřených vzorků byl použit proudový zdroj OPTOTRONIC - OT FIT 15/220-240/350 CS.

Technické parametry zdroje:

I_{OUT} select	I_{out} [mA]	U_{out} [V]	P_{OUT} [W]	U_N/f_N	I_N [A]	λ	t_a [°C]
Open	350	27 – 54	19	220 – 240 V 0/50/60 Hz	0.11	0.95	-25 až 50
4 – 5	300		16		0.09	0.94	
3 – 5	250		14		0.08	0.93	

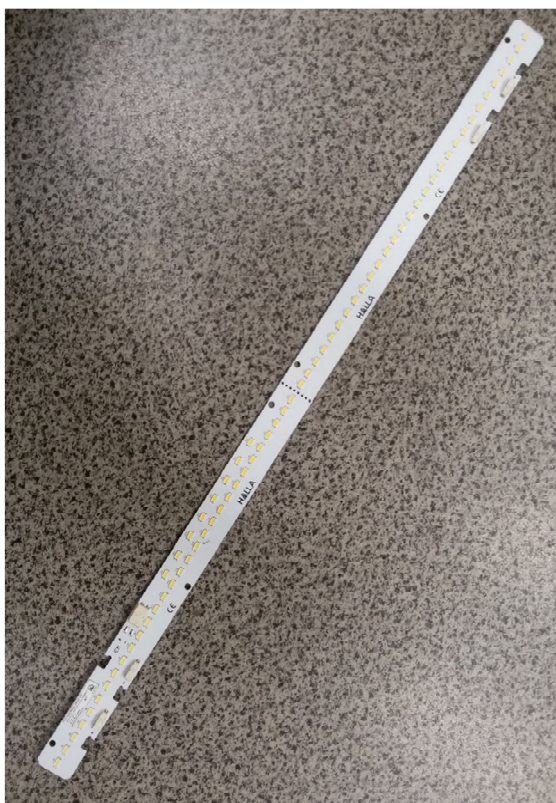
Tabulka 3: Technické parametry zdroje



Obrázek 9: Použitý proudový zdroj

2.1.3. Vzorok

Bylo změřeno 8 LED čipů vyrobených firmou CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD, viz obrázek č. 11. Dále 7 pásků osazených LED čipy, z nichž 2 jsou též vyrobeny firmou CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD a zbylých 5 je od firmy SAMSUNG ELECTRONICS, viz obrázek č. 10.



Obrázek 10: Vzhled měřeného pásku



Obrázek 11: Vzhled měřených čipů

V tabulce č. 4 se nachází seznam změřených LED čipů, ve kterém je uveden pracovní název, produktový kód – pravý název produktu, výrobce, výrobcem udávaná teplota chromatičnosti, index podání barev a vyzařovaný světelný tok.

Pracovní název	Produktový kód	Výrobce	Nominální teplota chromatičnosti	Index podání barev	Vyzařovaný světelný tok
			T_c [K]	R_a [-]	Φ [lm]
Chip č. 1	CLU036-1208C1-403H5G3	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	4000	> 90	3140
Chip č. 2	CLU038-1206C4-273H5K2	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	2700	> 90	2380
Chip č. 3	CCL032-1212A5-273M1A2	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	2700	> 80	2860
Chip č. 4	CLU034-1205B8-303M1A2	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	3000	> 80	2110
Chip č. 5	CLU038-1206C4-303H5K2	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	3000	> 80	2490
Chip č. 6	CLL032-1205A5-403M1A2	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	4000	> 80	1390
Chip č. 7	CLU028-1204C4-303H7K4	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	3000	97 +/- 1	1470
Chip č. 8	CLU028-1204C4-403H7K4	CITIZEN ELECTRONICS CO.,LTD	4000	97 +/- 1	1510

Tabulka 4: Seznam změřených LED čipů

V tabulce č. 5 se nachází seznam změřených LED pásků, ve kterém je uveden pracovní název, produktový kód – pravý název produktu, výrobce, výrobcem udávaná teplota chromatičnosti, index podání barev a vyzařovaný světelný tok 1 čipu, počet čipů na pásku a celkový světelný tok vyzařovaný páskem.

Pracovní název	Produktový kód	Výrobce	Nominální teplota chromatičnosti	Index podání barev	Vyzařovaný světelný tok 1 čipu	Počet čipů na pásku	Vyzařovaný světelný tok celého pásku
			T_c [K]	Ra [-]	Φ [lm]	[ks]	Φ [lm]
Pásek č. 1	SPMWHT 541MD5WATM S3	SAMSUNG ELECTRONICS	4000	> 80	32	60	1920
Pásek č. 2	SPMWH T541MD5WARM S3	SAMSUNG ELECTRONICS	5000	> 80	33	60	1980
Pásek č. 3	CLL130-0101B2-403M1C5	CITIZEN ELECTRONIC S CO.,LTD	4000	> 80	19,3	84	1620
Pásek č. 4	CLL130-0101B2-303M1C5	CITIZEN ELECTRONIC S CO.,LTD	3000	> 80	18,2	84	1530
Pásek č. 5	SPMWHT 541MD5WAPM	SAMSUNG ELECTRONICS	6500	> 90	31	36	1120
Pásek č. 6	SPMWHT 541MD5WATM	SAMSUNG ELECTRONICS	2700	> 90	29	36	1040
Pásek č. 7	SPMWHT 541MD5WAVM S3	SAMSUNG ELECTRONICS	3000	> 80	30,5	60	1830

Tabulka 5: Seznam změřených LED pásků

2.1.4. Chladič

Pro chlazení vzorků měřených LED světelných zdrojů byl použit chladič dodaný s čipy. Viz obrázek č. 12.



Obrázek 12: Chladič LED čipu

2.2. Naměřená spektra vzorků

V této kapitole se nacházejí naměřená, respektive přepočtená spektra jednotlivých vzorků LED čipů a LED pásků. Přepočtené výsledky jsou vztaženy k danému toku na nanometr.

Ke graficky zobrazeným výsledkům se došlo tak, že:

Z měřicího přístroje jsme získaly hodnoty $\phi_{e\lambda} - \text{naměř}$ [$\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$], které byly navzorkovány pro pásky po kroku 1,72 nm od hodnoty $\lambda - \text{naměř} = 378,81$ nm až 780,5 nm. Hodnoty pro čipy byly navzorkovány po kroku 5 nm od hodnoty $\lambda - \text{naměř} = 380$ nm až 780 nm.

Tyto hodnoty byly pomocí programu Wolfram Mathematica proložené a vyhodnocené tak, aby se dostal soubor hodnot $\phi_{e\lambda} - prolož$ [mW/(m²·nm)] od 380 nm do 780 nm po kroku 1 nm.

Dále se vypočetlo $\phi_{v\lambda} - pom$ dle vzorce (7):

$$\phi_{v\lambda-pom} = \phi_{e\lambda-prolož} \cdot V(\lambda) \quad (7)$$

Kde:

$\phi_{e\lambda} - prolož$: Naměřená - proložená hodnota

$V(\lambda)$: Absolutní hodnota $V(\lambda)$ křivky

Z čehož se vypočte skutečný světelný tok $\phi_{v\lambda}$ (8) pro jednotlivé frekvence spektra:

$$\phi_{v\lambda} = \frac{\phi_{v\lambda-pom} \cdot \phi_v}{\sum_{\lambda=380}^{780} \phi_{v\lambda-pom}} \left[\frac{\text{lm}}{\text{nm}} \right] \quad (8)$$

Kde:

ϕ_v : Světelný tok udaný v katalogovém listu pro daný vzorek

$\sum \phi_{v\lambda-pom}$: Součet pomocných světelných toků

Z vypočteného světelného toku $\phi_{v\lambda}$ se vypočte skutečný zářivý tok $\phi_{e\lambda}$ (9) a skutečný cirkadiánní tok $\phi_{c\lambda}$ (10):

$$\phi_{e\lambda} = \frac{\phi_{v\lambda}}{V(\lambda)} \left[\frac{\text{W}}{\text{nm}} \right] \quad (9)$$

$$\phi_{c\lambda} = \phi_{e\lambda} \cdot C(\lambda) \left[\frac{\text{lm}}{\text{nm}} \right] \quad (10)$$

$C(\lambda)$: Absolutní hodnota $C(\lambda)$ křivky

Skutečný světelný tok $\phi_{v\lambda}$ a skutečný cirkadiánní tok $\phi_{c\lambda}$ se dále přepočte na 1 W dle vzorce (11) pro $\phi_{v\lambda W}$ a (12) pro $\phi_{c\lambda W}$:

$$\phi_{v\lambda W} = \frac{\phi_{v\lambda}}{\phi_e} \left[\frac{\text{lm}}{\text{nm} \cdot \text{W}} \right] \quad (11)$$

$$\phi_{c\lambda W} = \frac{\phi_{c\lambda}}{\phi_e} \left[\frac{\text{lm}}{\text{nm} \cdot \text{W}} \right] \quad (12)$$

Kde:

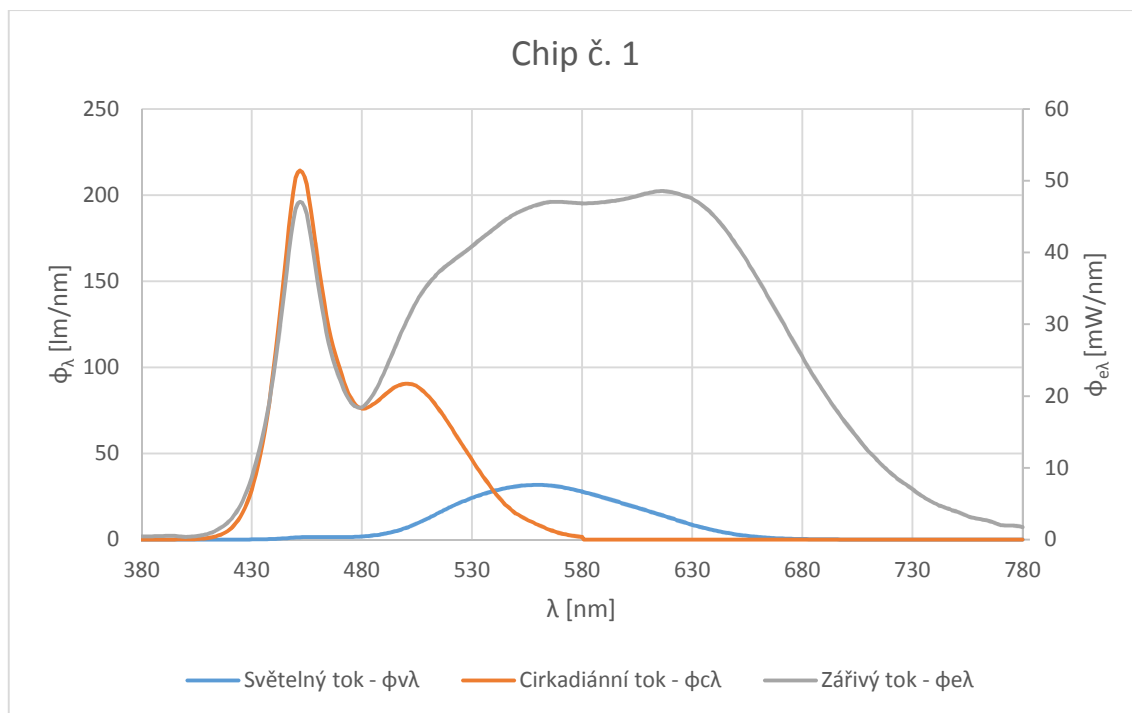
ϕ_e : Celkový zářivý tok, který se spočte dle vzorce (13):

$$\phi_e = \sum_{\lambda=380}^{780} \phi_{e\lambda} [\text{W}] \quad (13)$$

2.2.1. Spektra čipů

LED chip č. 1 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 4000$ K, světelný tok $\phi_v = 3140$ lm a index podání barev $R_a > 90$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 4010 K. Index podání barev R_a byl roven hodnotě 90,7, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 31,7$ lm byl na vlnové délce 560 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 11\,070$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 214$ lm na vlnové délce 452 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 10,5$ W.

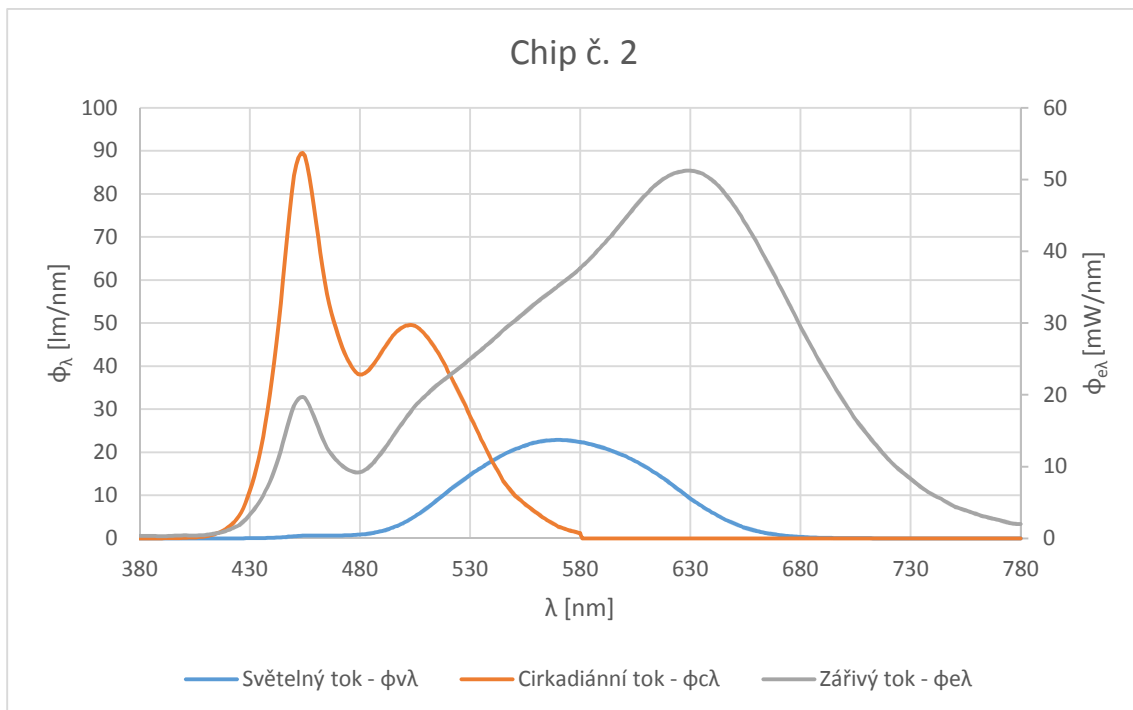
Graf č. 1 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 1: Chip č. 1

LED chip č. 2 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 2700$ K, světelný tok $\phi_v = 2380$ lm a index podání barev $Ra > 90$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 2780 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 93,9, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 22,9$ lm byl na vlnové délce 570 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 5380$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 89,5$ lm na vlnové délce 454 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 8,60$ W.

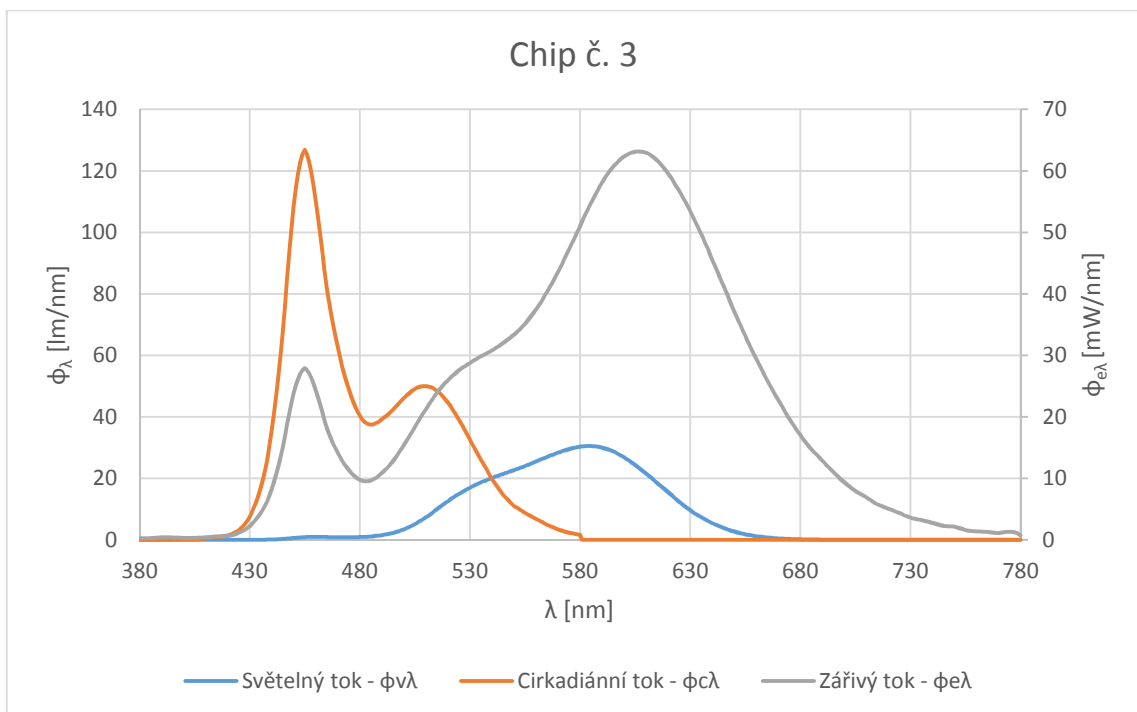
Graf č. 2 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 2: Chip č. 2

LED chip č. 3 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 2700$ K, světelný tok $\phi_v = 2860$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 2750 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 82,3, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 30,5$ lm byl na vlnové délce 584 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 6200$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 127$ lm na vlnové délce 455 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 8,77$ W.

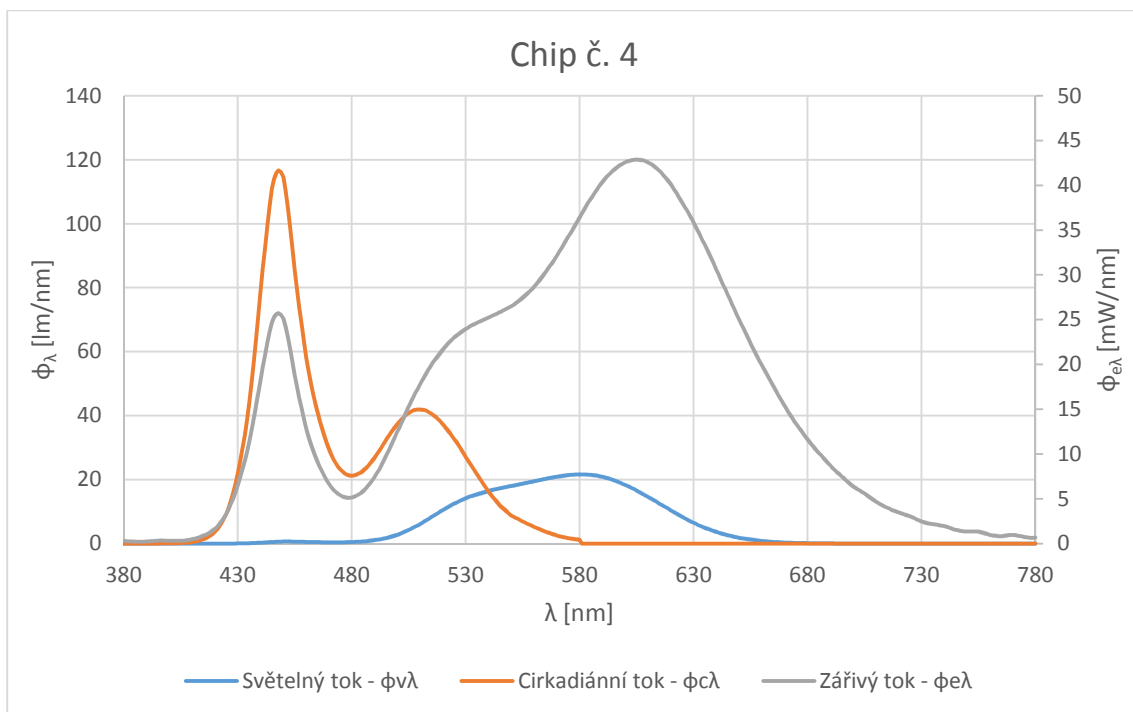
Graf č. 3 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 3: Chip č. 3

LED chip č. 4 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 3000$ K, světelný tok $\phi_v = 2110$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3040 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 83, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 21,6$ lm byl na vlnové délce 581 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 5310$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 166$ lm na vlnové délce 448 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 6,45$ W.

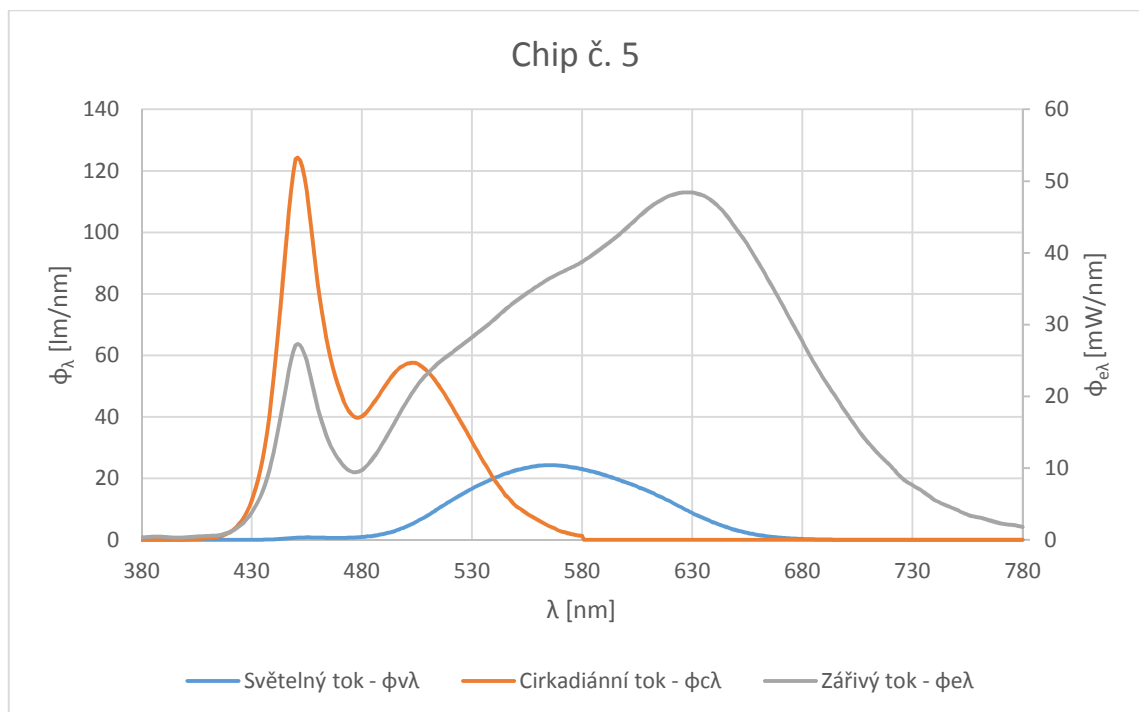
Graf č. 4 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 4: Chip č. 4

LED chip č. 5 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 3000$ K, světelný tok $\phi_v = 2490$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3070 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 92,7, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 24,3$ lm byl na vlnové délce 566 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 6420$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 124$ lm na vlnové délce 451 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 8,75$ W.

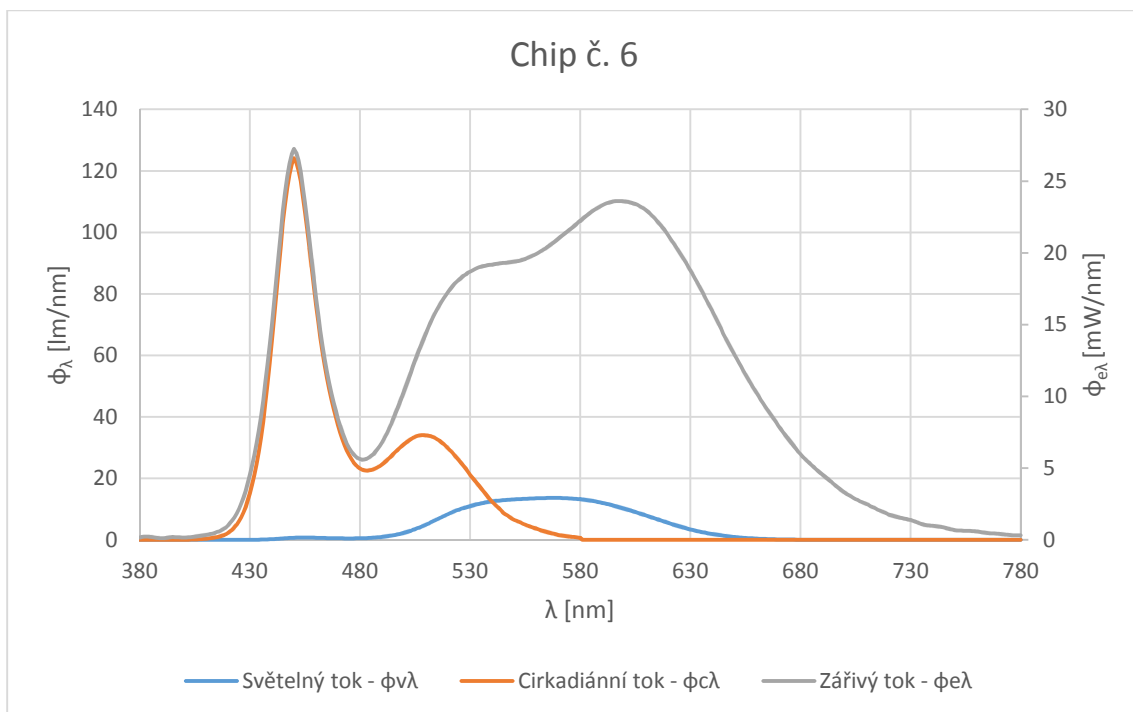
Graf č. 5 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 5: Chip č. 5

LED chip č. 6 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 4000$ K, světelný tok $\phi_v = 2110$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 4070 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 84,5, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 13,7$ lm byl na vlnové délce 562 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 5080$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 124$ lm na vlnové délce 450 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 4,28$ W.

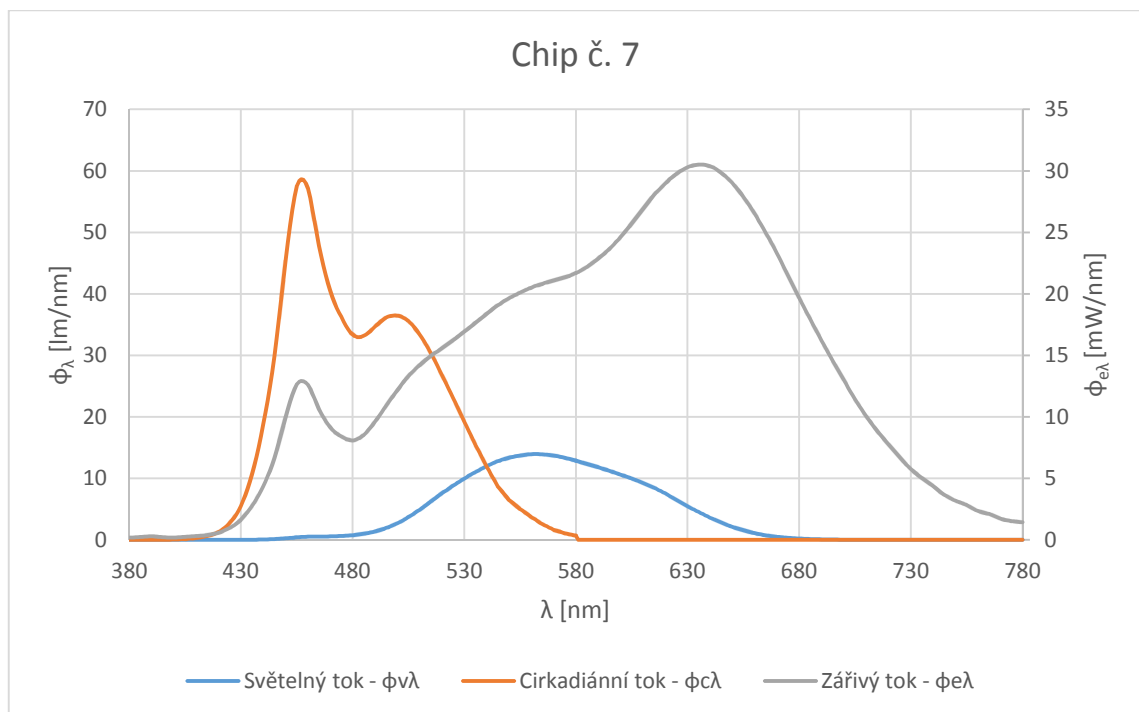
Graf č. 6 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 6: Chip č. 6

LED chip č. 7 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 3000$ K, světelný tok $\phi_v = 1470$ lm a index podání barev $Ra = 97 \pm 1$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3050 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 97,6, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 13,9$ lm byl na vlnové délce 562 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 3770$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 58,6$ lm na vlnové délce 457 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,45$ W.

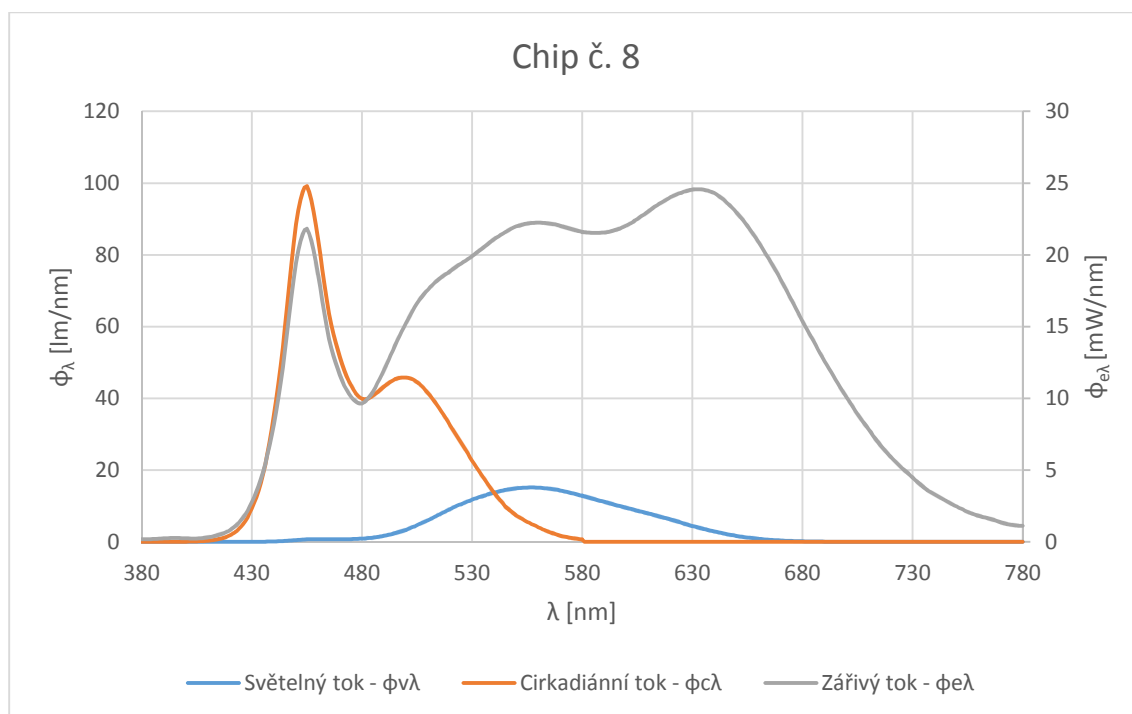
Graf č. 7 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 7: Chip č. 7

LED chip č. 8 má katalogově udávanou teplotou chromatičnosti $T_c = 4000$ K, světelný tok $\phi_v = 1510$ lm a index podání barev $Ra = 97 \pm 1$. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3940 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 94,3, což je hodnota, se kterou vzorek nevyhovuje katalogovému listu, vyhovuje však veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 15,2$ lm byl na vlnové délce 556 nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 5230$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 99,2$ lm na vlnové délce 455 nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,32$ W.

Graf č. 8 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :

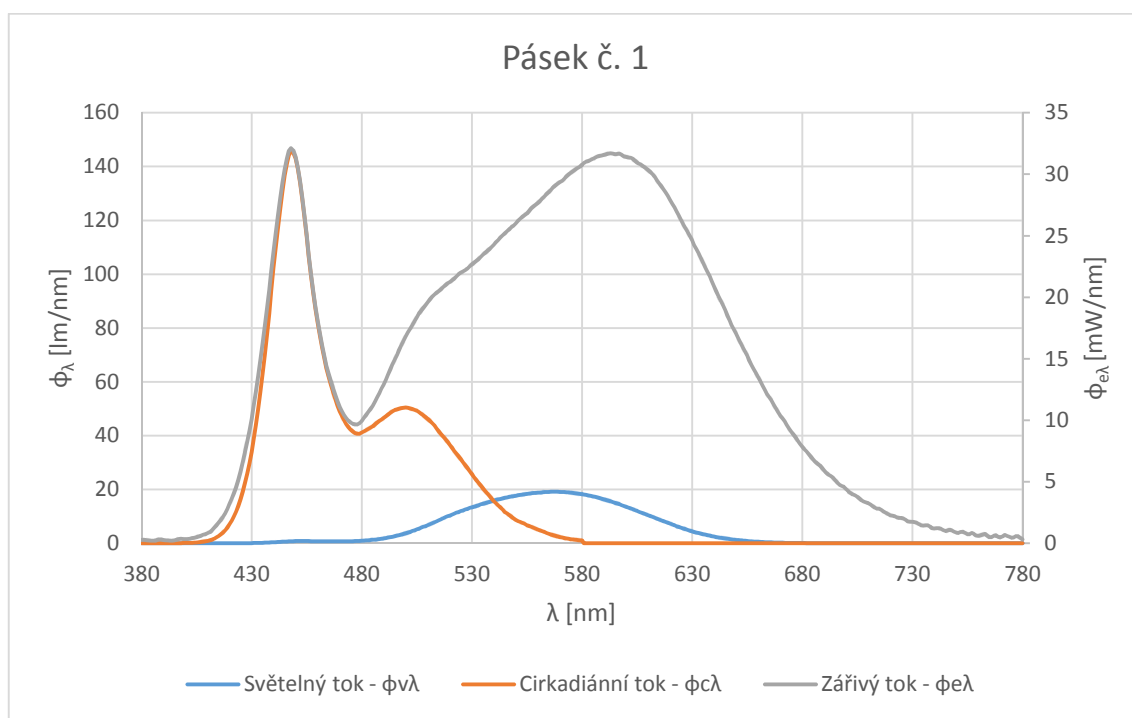


Graf 8: Chip č. 8

2.2.2. Spektra pásků

LED pásek č. 1 je osazen 60 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 4000$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 31$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1860$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 4070 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 84,1, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 19,2$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 568$ nm. Celkový cirkadiánní tok byl $\phi_c = 6970$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 145$ lm na vlnové délce $\lambda = 488$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,77$ W.

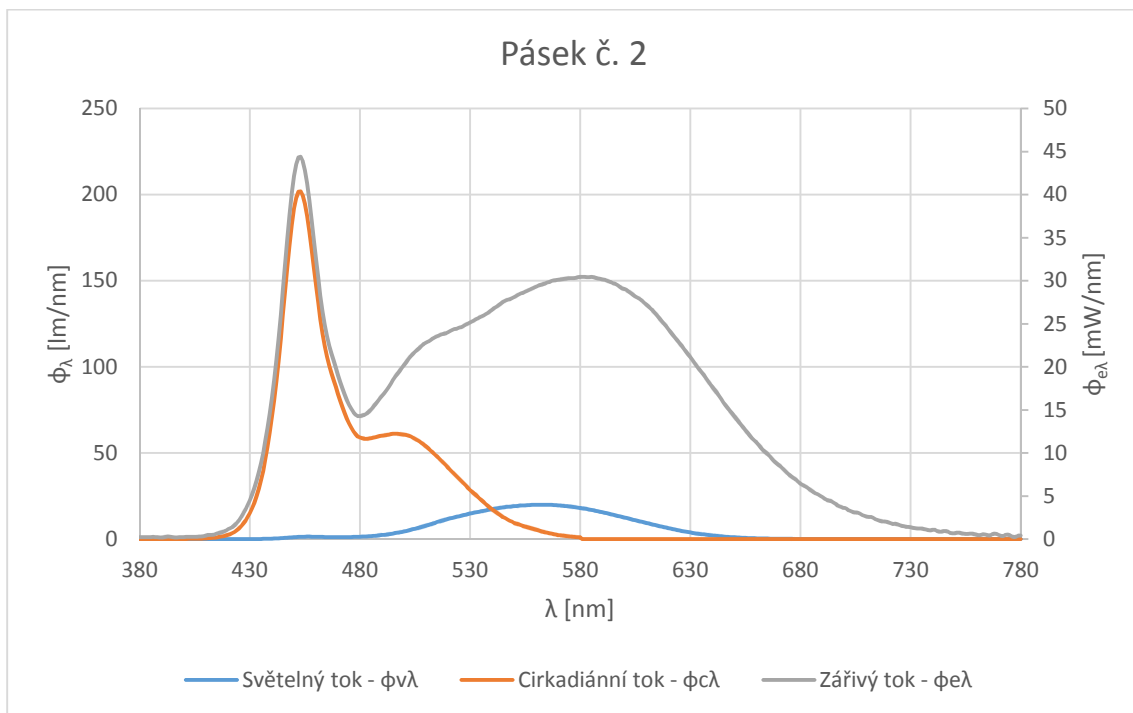
Graf č. 9 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 9: Pásek č. 1

LED pásek č. 2 je osazen 60 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 5000$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 32$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1920$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 4910 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 83,2, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 20$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 562$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 8490$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 202$ lm na vlnové délce $\lambda = 453$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,92$ W.

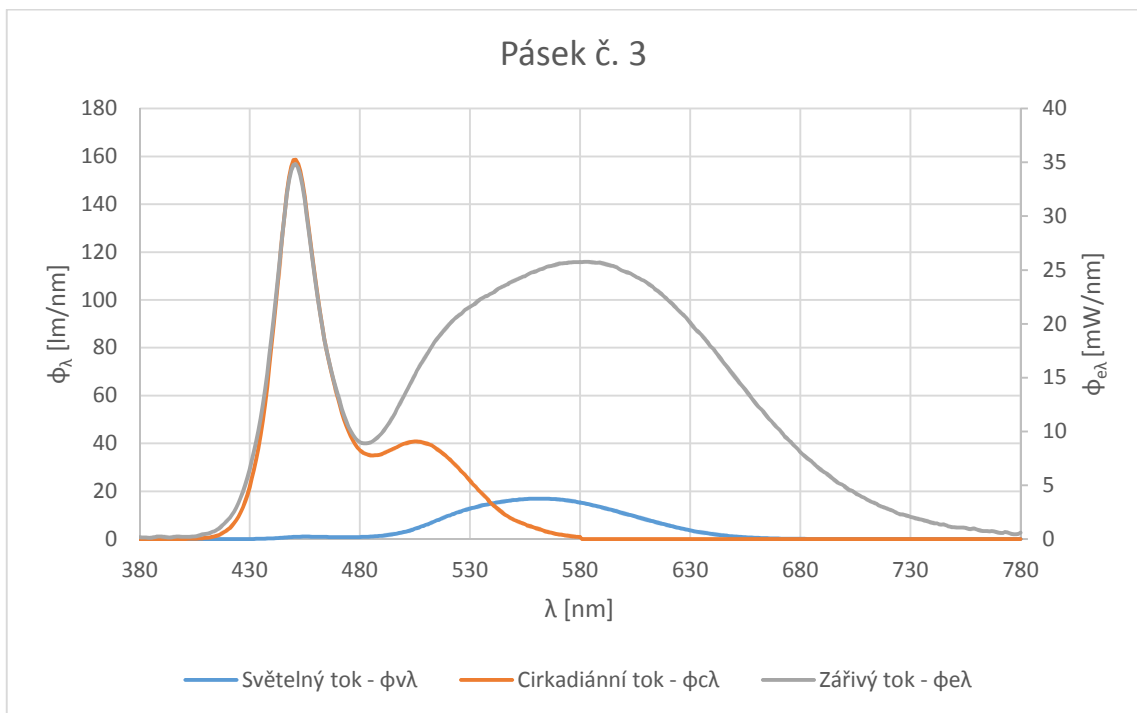
Graf č. 10 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 10: Pásek č. 2

LED pásek č. 3 je osazen 84 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 4000$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 19,3$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1620$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 4550 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 84, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 16,9$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 561$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 6720$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 159$ lm na vlnové délce $\lambda = 451$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,18$ W.

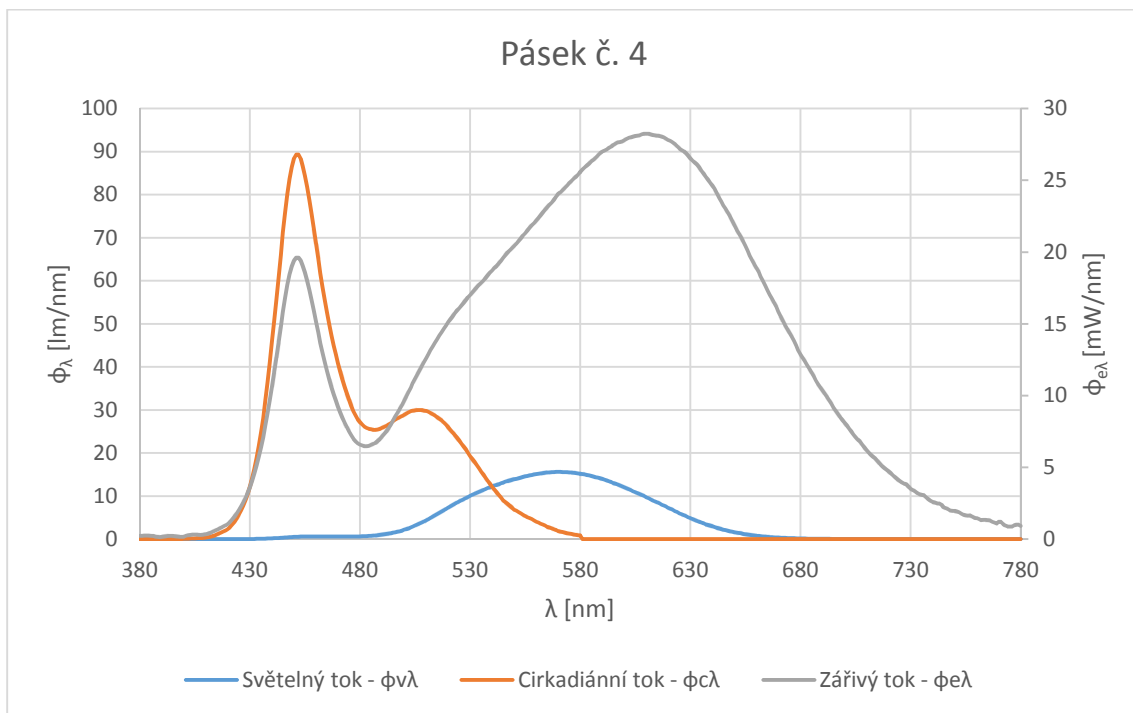
Graf č. 11 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 11: Pásek č. 3

LED pásek č. 4 je osazen 84 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 3000$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 18,2$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1530$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3210 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 87, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 15,6$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 570$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 4400$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 89,3$ lm na vlnové délce $\lambda = 452$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,11$ W.

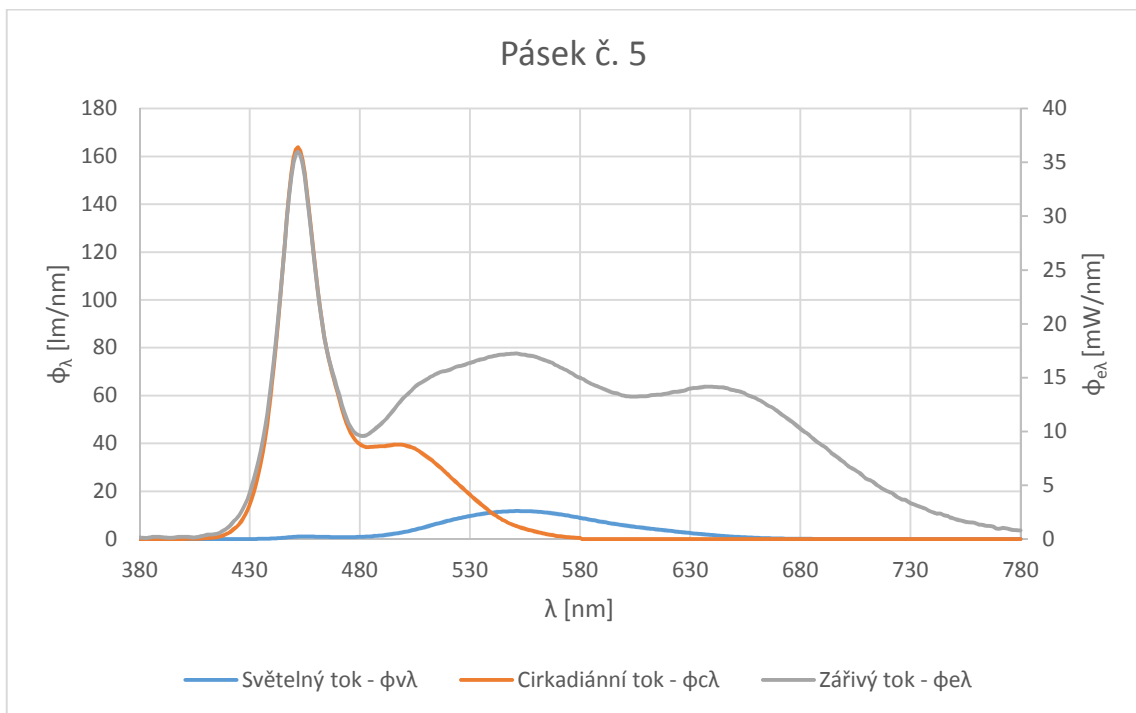
Graf č. 12 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 12: Pásek č. 4

LED pásek č. 5 je osazen 36 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 6500$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 31$ lm a index podání barev $Ra > 90$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1120$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 6160 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 94,1, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 11,7$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 551$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 6310$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 164$ lm na vlnové délce $\lambda = 452$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 4,24$ W.

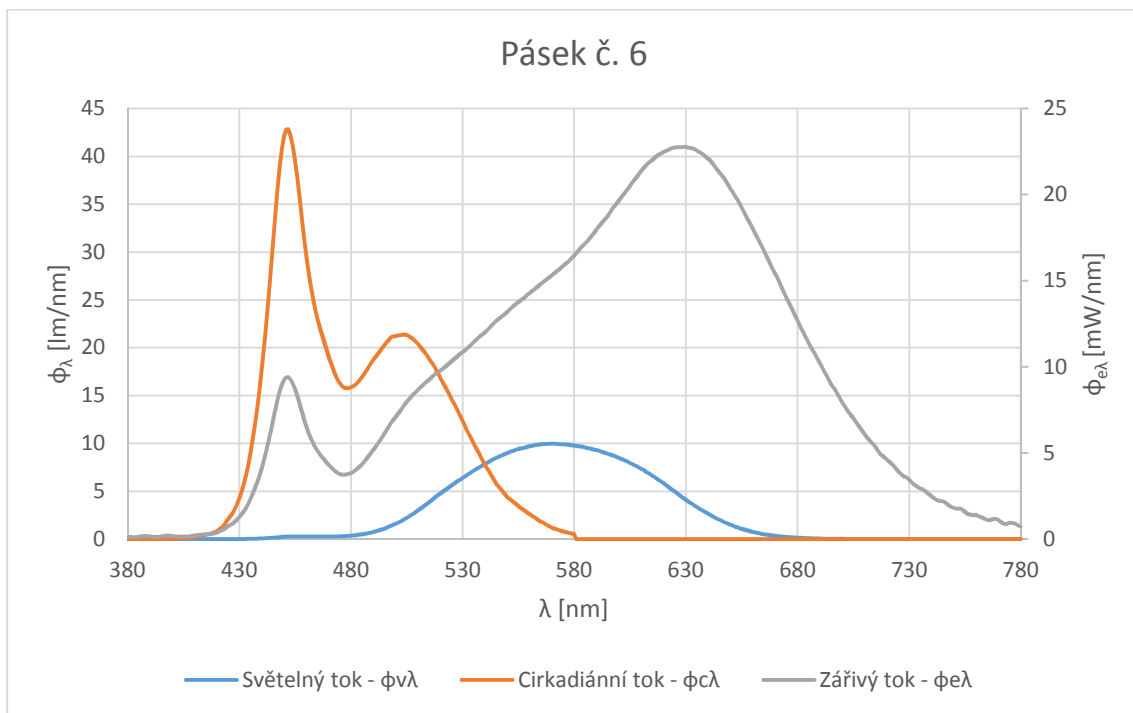
Graf č. 13 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 13: Pásek č. 5

LED pásek č. 6 je osazen 36 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 2700$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 29$ lm a index podání barev $Ra > 90$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1040$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 2750 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 93,9, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i veškerým normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 9,96$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 570$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 2360$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 42,8$ lm na vlnové délce $\lambda = 451$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 3,75$ W.

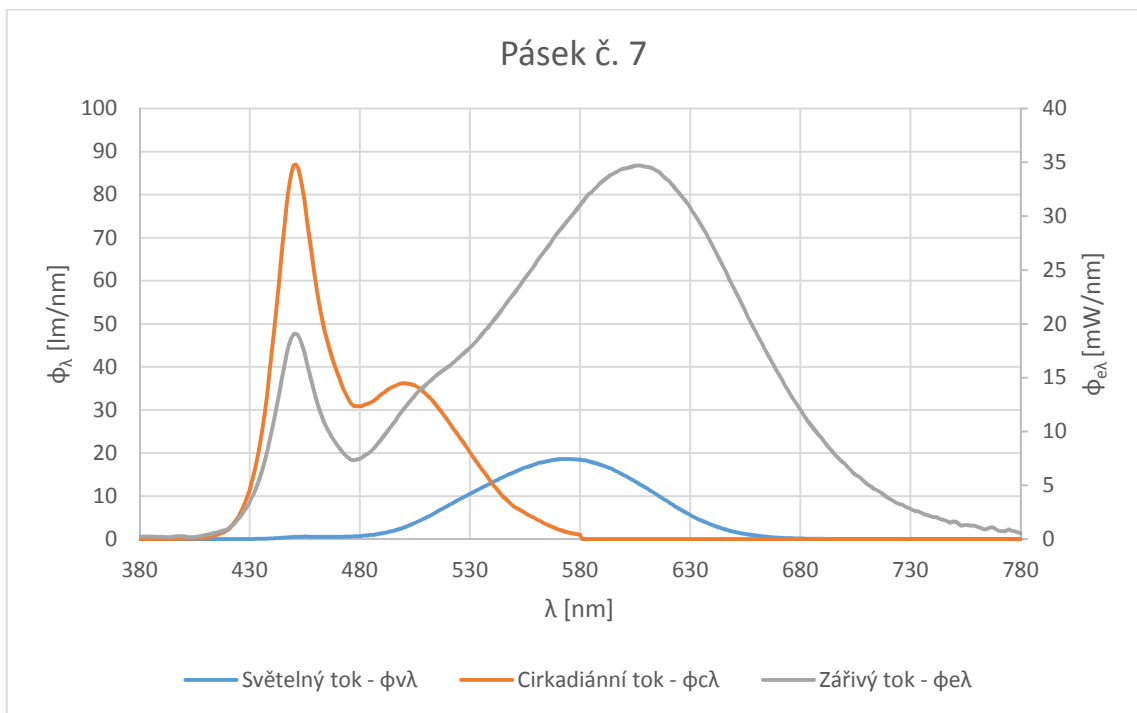
Graf č. 14 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 14: Pásek č. 6

LED pásek č. 7 je osazen 60 ks LED chipů, kde každý chip má katalogově udávanou teplotu chromatičnosti $T_c = 3000$ K, světelný tok $\phi_{v1} = 29,5$ lm a index podání barev $Ra > 80$. Světelný tok celého pásku tedy byl $\phi_v = 1770$ lm. Při měření tento vzorek dosahoval teploty chromatičnosti 3020 K. Index podání barev Ra byl roven hodnotě 83,8, což je hodnota, se kterou vzorek vyhovuje jak katalogovému listu, tak i většině normou definovaným prostorům. Nejvyšší světelný tok $\phi_{v\lambda} = 18,6$ lm byl na vlnové délce $\lambda = 575$ nm. Celkový cirkadiánní tok měl $\phi_c = 4510$ lm s nejvyšší hodnotou $\phi_{c\lambda} = 87$ lm na vlnové délce $\lambda = 451$ nm. Celkový zářivý tok byl $\phi_e = 5,59$ W.

Graf č. 15 zobrazuje průběh jednotlivých toků v závislosti na vlnové délce λ :



Graf 15: Pásek č. 7

2.3. Shrnutí výsledků měření

Tabulka č. 6 zobrazuje shrnutí naměřených výsledků pro vzorky LED čipů. V tabulce se nachází porovnání naměřených a katalogových hodnot teplot chromatičnosti a indexů podání barev. Dále zobrazuje vypočtené celkové cirkadiánní a zářivé toky jednotlivých vzorků.

Pracovní název	Katalogová teplota chromatičnosti	Naměřená teplota chromatičnosti	Katalogový index podání barev	Naměřený index podání barev	Vypočtený cirkadiánní tok	Vypočtený zářivý tok
	T_c [K]	T_c [K]	Ra [-]	Ra [-]	ϕ_c [lm]	ϕ_e [W]
Chip č. 1	4000	4010	> 90	90,7	11070	10,50
Chip č. 2	2700	2780	> 90	93,9	5380	8,60
Chip č. 3	2700	2750	> 80	82,9	6200	8,77
Chip č. 4	3000	3040	> 80	83,0	5310	6,45
Chip č. 5	3000	3070	> 80	92,7	6420	8,75
Chip č. 6	4000	4070	> 80	84,5	5080	4,28
Chip č. 7	3000	3050	97 +/- 1	97,6	3770	5,45
Chip č. 8	4000	3940	97 +/- 1	94,3	5230	5,32

Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro LED čipy

Tabulka č. 7 zobrazuje shrnutí naměřených výsledků pro vzorky LED pásků. V tabulce se nachází porovnání naměřených a katalogových hodnot teplot chromatičnosti a indexů podání barev. Dále zobrazuje vypočtené celkové cirkadiánní a zářivé toky jednotlivých vzorků.

Pracovní název	Katalogová teplota chromatično sti	Naměřená teplota chromatično sti	Katalogový index podání barev	Naměřený index podání barev	Vypočtený cirkadiánní tok	Vypočtený zářivý tok
	T_c [K]	T_c [K]	Ra [-]	Ra [-]	ϕ_c [lm]	ϕ_e [W]
Pásek č. 1	4000	4070	> 80	84,1	6970	5,77
Pásek č. 2	5000	4910	> 80	83,2	8490	5,92
Pásek č. 3	4000	4550	> 80	84,0	6720	5,18
Pásek č. 4	3000	3210	> 80	87,0	4400	5,11
Pásek č. 5	6500	6160	> 90	94,1	6310	4,24
Pásek č. 6	2700	2750	> 90	93,9	2360	3,75
Pásek č. 7	3000	3020	> 80	83,8	4510	5,59

Tabulka 7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro LED pásky

3. Vyhodnocení změřených spekter z hlediska vhodnosti použití

3.1. Vyhodnocení z hlediska vlivu na zdraví člověka

V této kapitole jsou porovnány jednotlivé vzorky z pohledu vhodnosti použití pro různé prostory dle kapitoly 1.5.

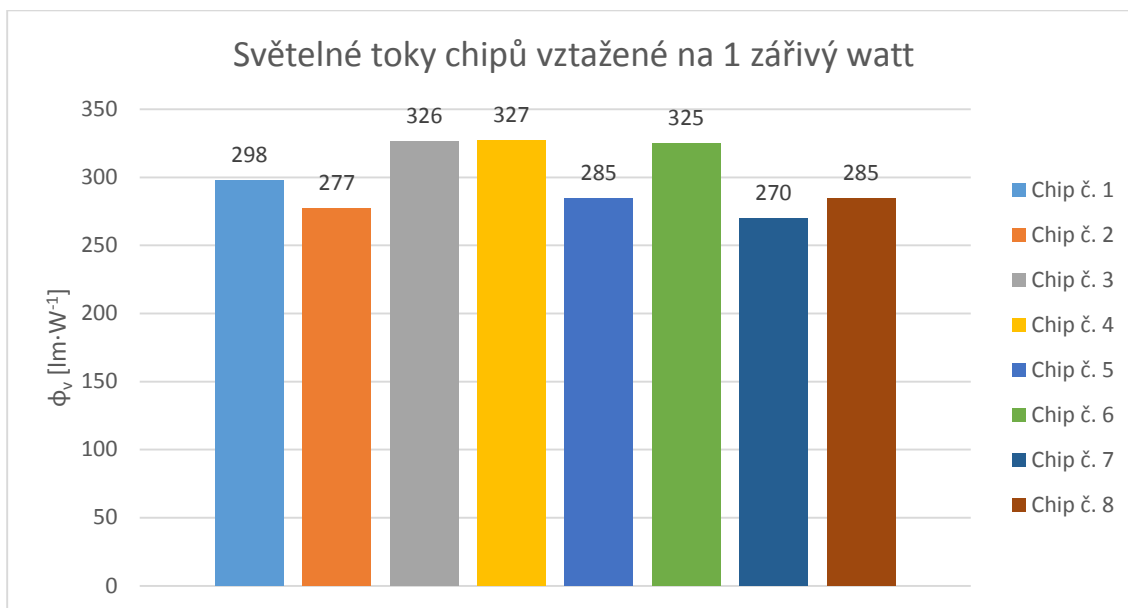
Průběhy světelných i cirkadiánních toků jsou vztaženy na 1 zářivý watt, neboť nebylo možné vzorky správně vyhodnotit dle skutečných světelných i cirkadiánních toků. Vyhodnocení dle skutečných toků není možné, neboť nejvýkonnější vzorek má vždy nejvyšší jak světelný, tak i cirkadiánní tok bez ohledu na teplotu chromatičnosti. Navrhuje-li se však osvětlovací soustava, dbá se z pravidla na správné osvětlení z pohledu světelných toků, tudíž je jasné, že silnějších vzorků by bylo použito menší množství, než vzorků slabších.

3.1.1. Vyhodnocení LED čipů

Dle tabulky č. 8 a grafu č. 16 je zřetelné, že z pohledu světelných toků je nejlepší chip č. 4 s $327 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dále těsně následuje chip č. 3 a chip č. 6, poté chip č. 1, chip č. 5 s chipem č. 8, chip č. 2 a nejhůře na tom je chip č. 7 s $270 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.

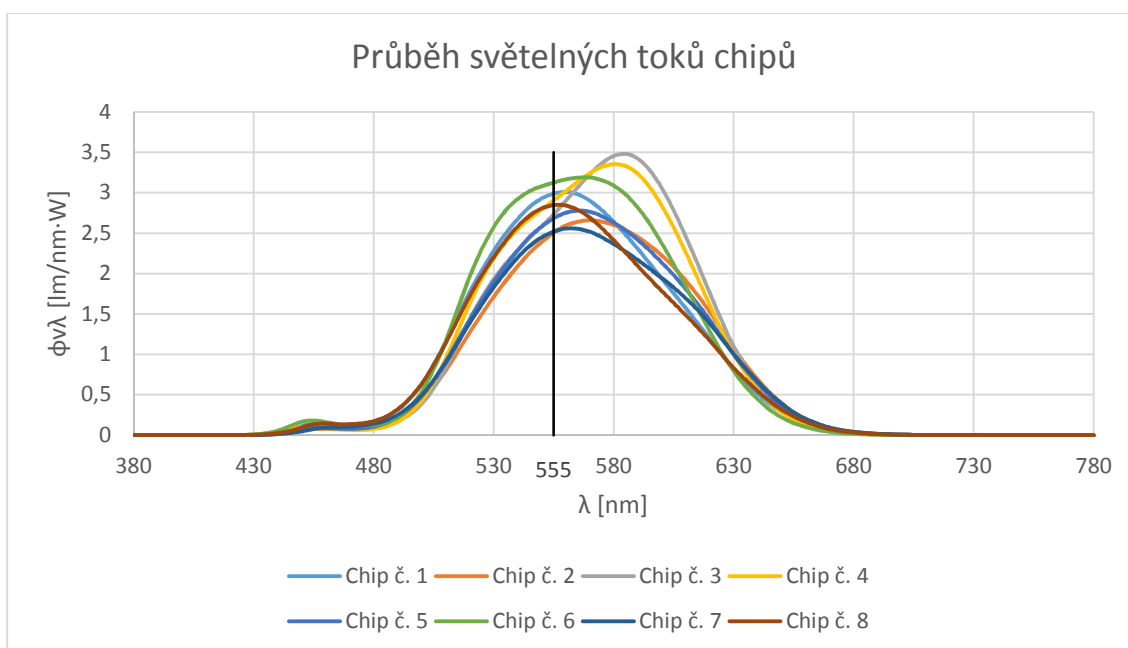
Vzorek	ϕ_c/ϕ_v [-]	ϕ_c [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	ϕ_v [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]
Chip č. 1	3,53	1050	298
Chip č. 2	2,26	625	277
Chip č. 3	2,17	708	326
Chip č. 4	2,52	824	327
Chip č. 5	2,58	734	285
Chip č. 6	3,65	1190	325
Chip č. 7	2,57	692	270
Chip č. 8	3,46	984	285

Tabulka 8: Porovnání LED čipů



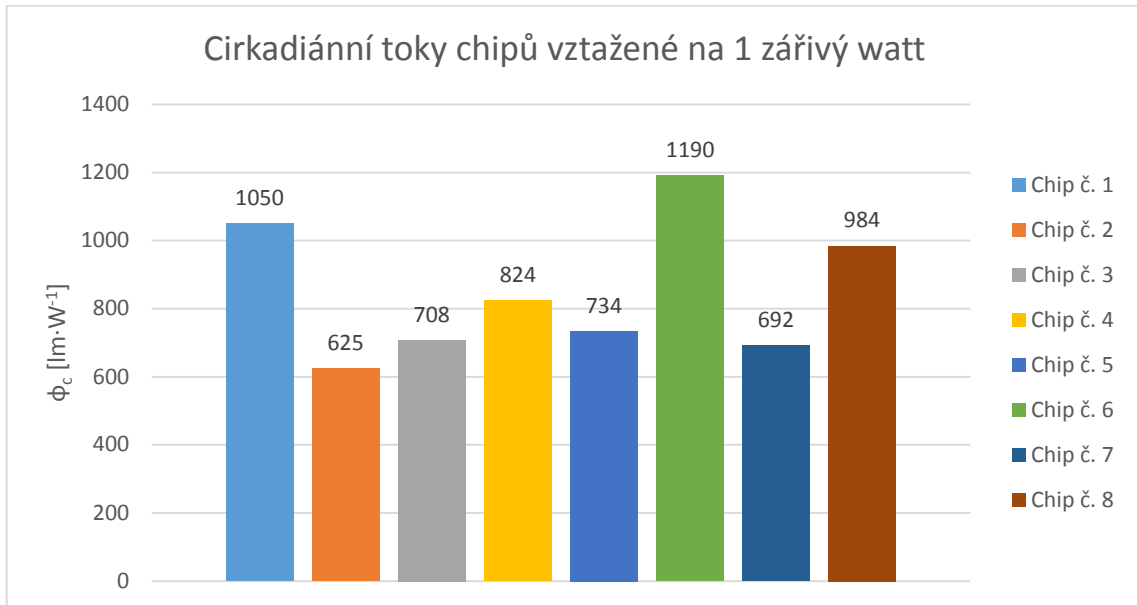
Graf 16: Světelné toky chipů vztažené na 1 zářivý watt

V grafu č. 17 jsou vyneseny průběhy světelných toků jednotlivých čipů.



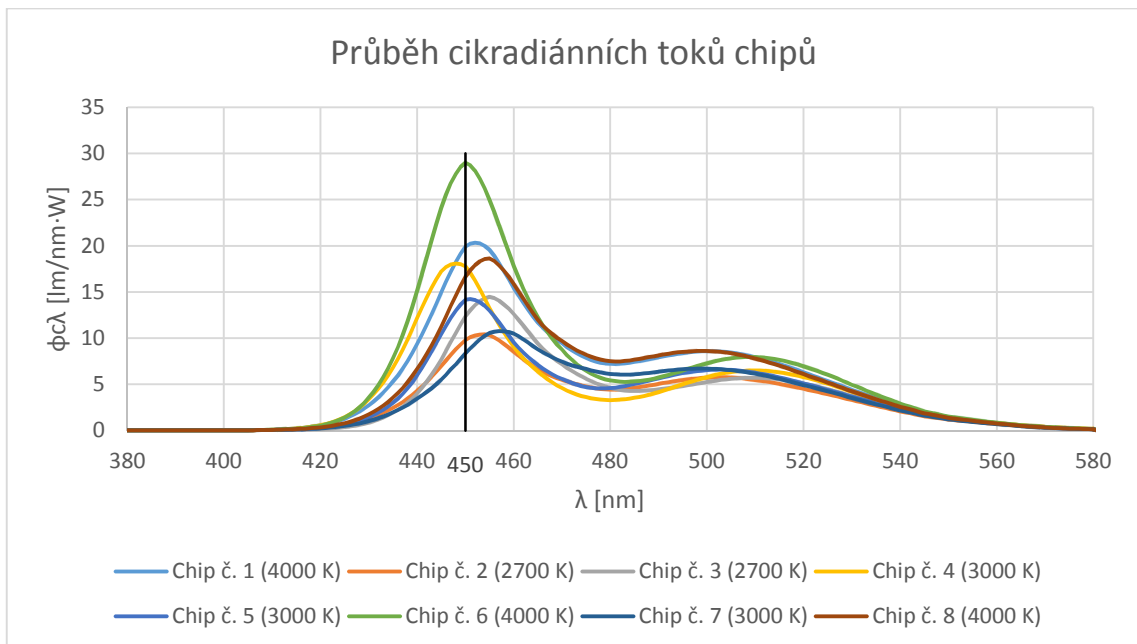
Graf 17: Průběh světelných toků chipů

Dle tabulky č. 8 a grafu č. 18 je dále zřetelné, že z pohledu cirkadiánních toků je nejlepší chip č. 6 s $1190 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dále následuje chip č. 1, chip č. 8, chip č. 4, chip č. 5, chip č. 3, chip č. 7 a nejhůře na tom je chip č. 2 s $625 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.



Graf 18: Cirkadiánní toky chipů vztažené na 1 zářivý watt

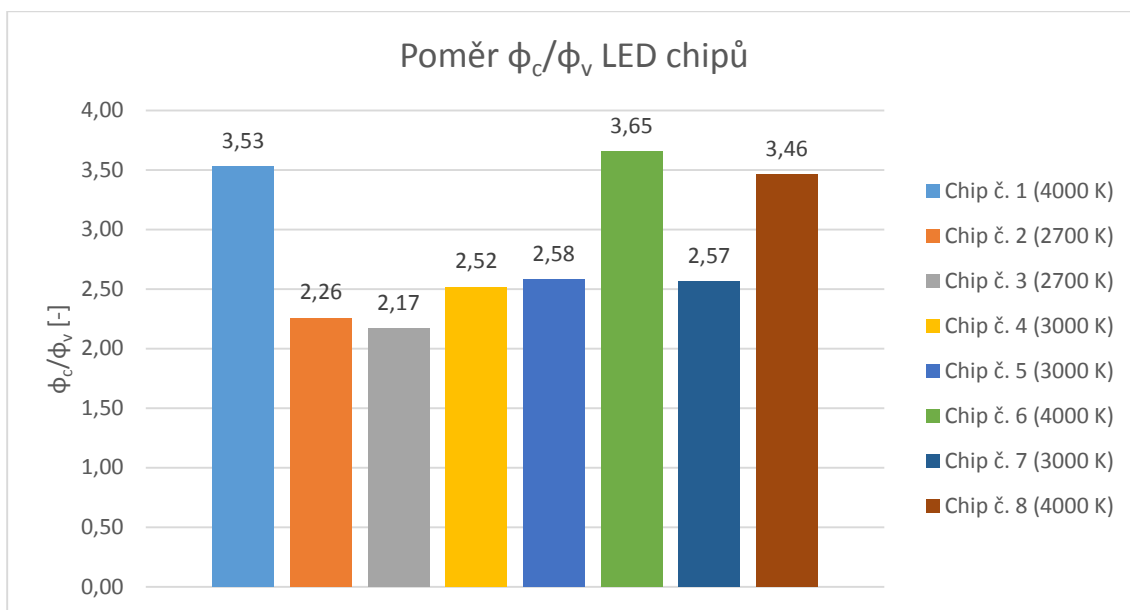
V grafu č. 19 jsou vyneseny průběhy cirkadiánních toků jednotlivých čipů. Je poměrně zřejmé, že vzorky s větší teplotou chromatičnosti mají také vyšší cirkadiánní toky.



Graf 19: Průběh cirkadiánních toků chipů

Tabulka č. 8 a graf č. 20 dále znázorňují poměr cirkadiánního toku k světelnému toku, což vyznačuje, které chipy jsou nejvýhodnější z pohledu cirkadiánního toku. Tedy čím větší poměrné číslo, tím větší má vzorek podíl cirkadiánního toku k toku světelného.

Tento poměr má tedy nejlepší chip č. 6 s chipem č. 1 a chipem č. 8. Podstatně hůře na tom jsou chipy č. 4, č. 5 a č. 7. A ještě o něco horší poměr má chip č. 2 s chipem č. 3. Tento graf také velice zřetelně dokazuje předpoklad, že vzorky s vyšší teplotou chromatičnosti budou z pohledu cirkadiánních toků lepší, neboť první 3 jmenované vzorky – tj. chip č. 1, č. 6 a č. 8 mají teplotu chromatičnosti $T_c = 4000$ K. Druzí 3 jmenovaní – tj. chip č. 4, č. 5 a č. 7 mají teplotu chromatičnosti $T_c = 3000$ K. Poslední dva - tj. chip č. 2 a č. 3, z tohoto pohledu nejhorší, mají teplotu chromatičnosti $T_c = 2700$ K.



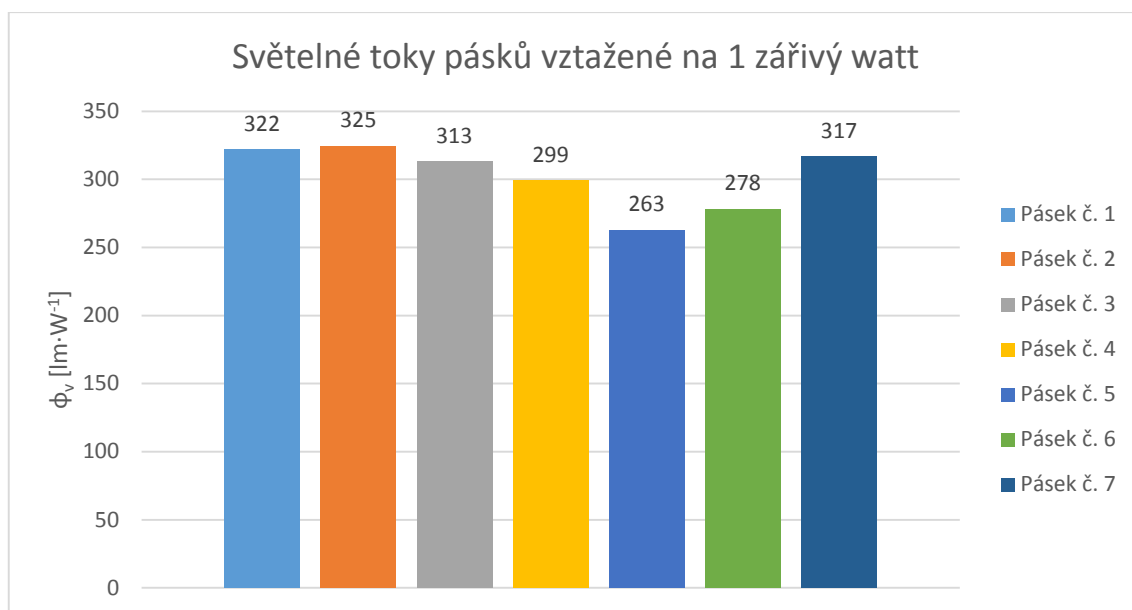
Graf 20: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED chipů

3.1.2. Vyhodnocení LED pásků

Dle tabulky č. 9 a grafu č. 21 je zřetelné, že z pohledu světelných toků je nejlepší pásek č. 2 s $325 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dále následuje pásek č. 1, pásek č. 7, pásek č. 3, pásek č. 4, pásek č. 6 a nejhůře na tom je z pohledu světelných toků pásek č. 5 s $263 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.

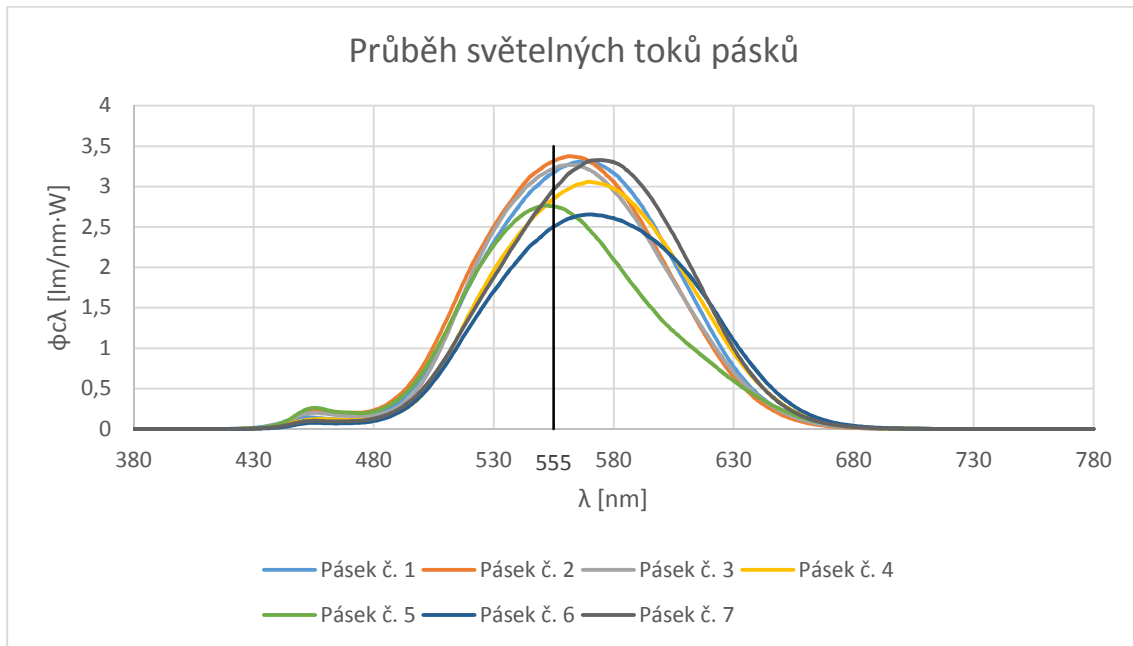
Vzorek	ϕ_c/ϕ_v [-]	ϕ_c [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]	ϕ_v [$\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$]
Pásek č. 1	3,75	1210	322
Pásek č. 2	4,42	1440	325
Pásek č. 3	4,15	1300	313
Pásek č. 4	2,88	862	299
Pásek č. 5	5,65	1490	263
Pásek č. 6	2,26	628	278
Pásek č. 7	2,55	807	317

Tabulka 9: Porovnání LED pásků



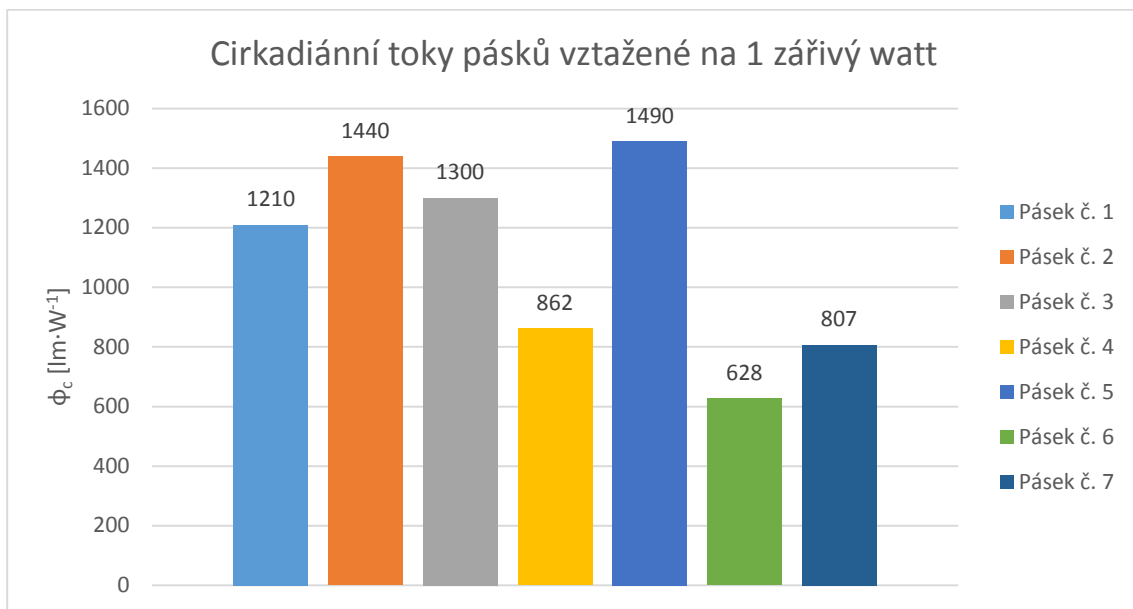
Graf 21: Světelné toky pásků vztažené na 1 zářivý watt

V grafu č. 22 jsou vyneseny průběhy světelných toků jednotlivých páseků.



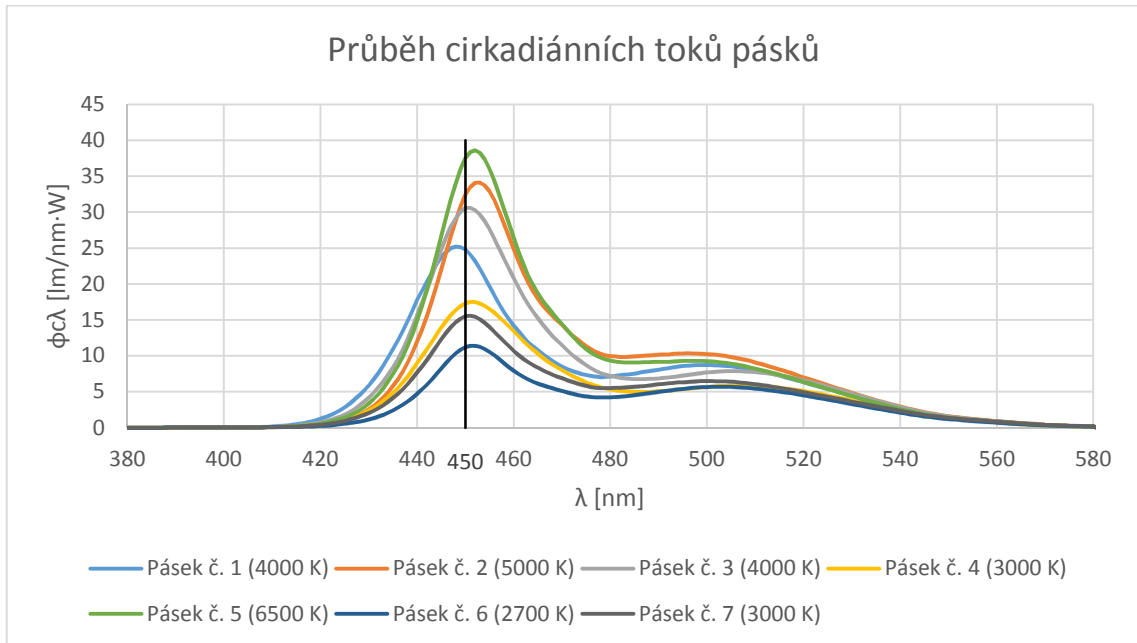
Graf 22: Průběh světelných toků páseků

Dle tabulky č. 9 a grafu č. 23 je dále zřetelné, že z pohledu cirkadiánních toků je nejlepší pásek č. 5 s $1490 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$, dále následuje pásek č. 2, pásek č. 3, pásek č. 1, pásek č. 4, pásek č. 7 a nejhůře na tom je pásek č. 6 s $628 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$.



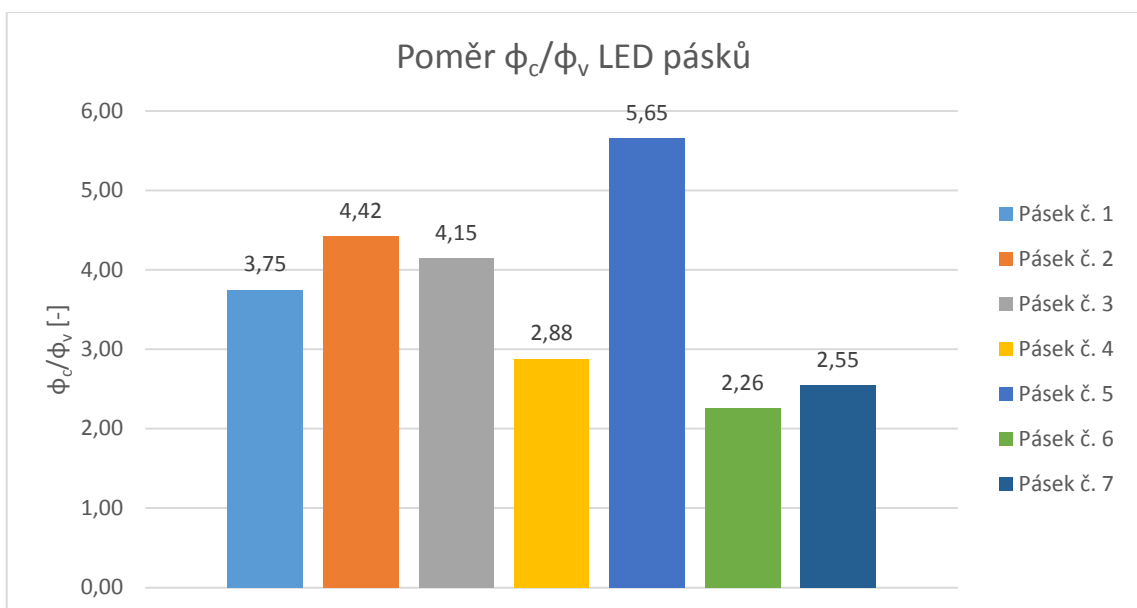
Graf 23: Cirkadiánní toky páseků vztažené na 1 zářivý watt

V grafu č. 24 jsou vyneseny průběhy cirkadiánních toků jednotlivých pásek. Z grafu je patrné, že vzorky s větší teplotou chromatičnosti mají také vyšší cirkadiánní toky.



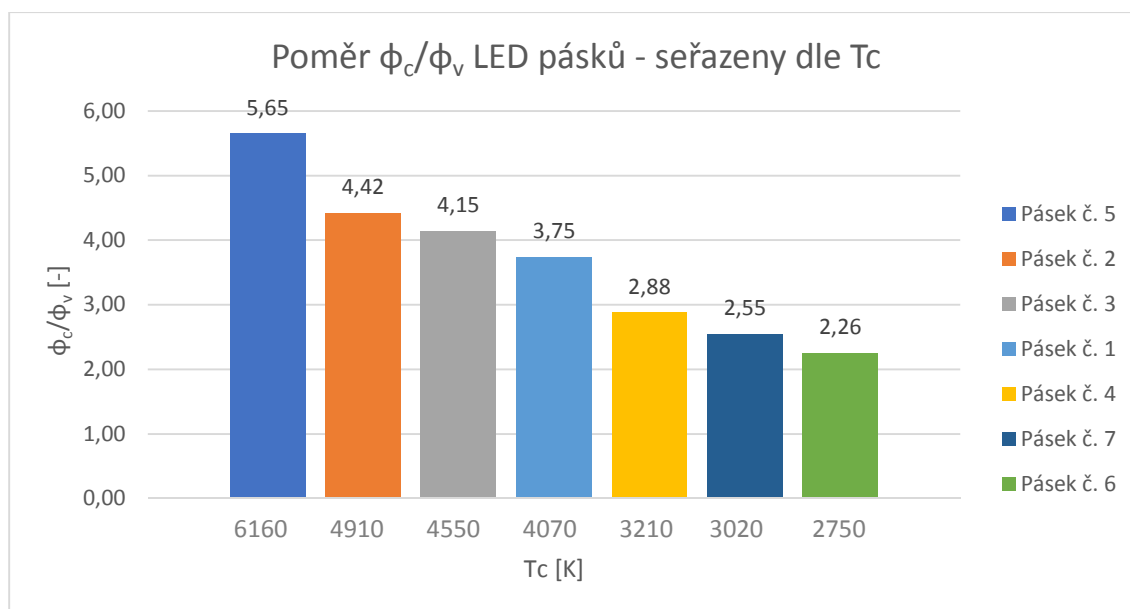
Graf 24: Průběh cirkadiánních toků pásek

Tabulka č. 9 a graf č. 25 dále znázorňují poměr cirkadiánního toku k světelnému toku, což vyznačuje, které pásky jsou nejvýhodnější z pohledu cirkadiánního toku. Tedy čím větší poměrné číslo, tím větší má vzorek podíl cirkadiánního toku vůči toku světelného.



Graf 25: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED pásek

Graf č. 26 též znázorňuje poměr cirkadiánního toku k toku světelnému. Avšak vzorky jsou pro názornost seřazeny od nejvyšší teploty chromatičnosti po nejnižší. V tomto grafu jsou zobrazeny naměřené teploty chromatičností, neboť např. Pásek č. 3 s $T_c = 4550$ K by měl mít dle katalogového listu 4000 K.



Graf 26: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED pásků - seřazeny podle T_c

Z naměřených a vyhodnocených dat tedy vyplývá, že z pohledu světelných toků tedy s nejnižším podílem cirkadiánního toku a tudíž s nejnižším biologickým účinkem jsou nejlepší tyto vzorky:

Chip č. 2 a chip č. 3 s poměrnou hodnotou $\phi_c/\phi_v \approx 2,2$.

Pásek č. 6 s poměrnou hodnotou $\phi_c/\phi_v \approx 2,3$

Z pohledu cirkadiánních toků, tedy s nejvyšším biologickým účinkem jsou nejlepší tyto vzorky:

Chip č. 1, chip č. 6, chip č. 8 s poměrnou hodnotou $\phi_c/\phi_v \approx 3,5$.

Pásek č. 5 s poměrnou hodnotou $\phi_c/\phi_v \approx 5,7$

Dle teorie v kapitole 1.5.1. vychází, že pro školy vzdělávací instituce, ve kterých se doporučuje mít velice dynamicky řízenou teplotu chromatičnosti se hodí všechny měřené vzorky. Neboť v ranních hodinách po příchodu studentů do školy je vyžadováno vysoce biologicky účinné aktivující světlo, které by bylo nejlépe dosaženo s použitím LED pásku č. 5. Poté přichází „normální hodiny“, kde se doporučují teploty chromatičnosti kolem 4000 K, čemuž nejvhodněji odpovídají vzorky: Chip č. 1, Chip č. 6, Chip č. 8

a Pásek č. 1. Při hodinách, kdy se píší testy se opět doporučují vyšší teploty chromatičnosti, čemuž opět nejlépe odpovídá Pásek č. 5 a Pásek č. 2. Po testu je dobré použití uklidňujícího světla s nízkou teplotou chromatičnosti, na což se hodí Chip č. 2, Chip. č. 3 nebo Pásek č. 6. V odpoledním vyučování, kdy přijde poobědová únava, je opět zapotřebí aktivující světlo s vysokou teplotou chromatičnosti, tudíž je nejvhodnější použití Pásku č. 5 jako v případě ranní aktivace. V případě večerního vyučování by mělo být zajištěno, aby minimálně 2 hodiny před tím, než jdou lidé spát byla teplota chromatičnosti nízká, na což by se mohly použít tyto vzorky: Chip č. 2, č. 3, č. 4, č. 5 a č.7 a Pásek č. 6, č. 7.

Dle teorie v 1.5.2. vychází, že v kancelářských prostorech je dobré zajistit v ranních hodinách a poobědovém čase aktivující světlo, na což vyhovuje vzorek č. 5. Naopak při obědě a ve večerních hodinách je dobré použít světlo uklidňující, kterým opět odpovídají tyto vzorky: Chip č. 2, č. 3, č. 4, č. 5 a č.7 a Pásek č. 6, č. 7.

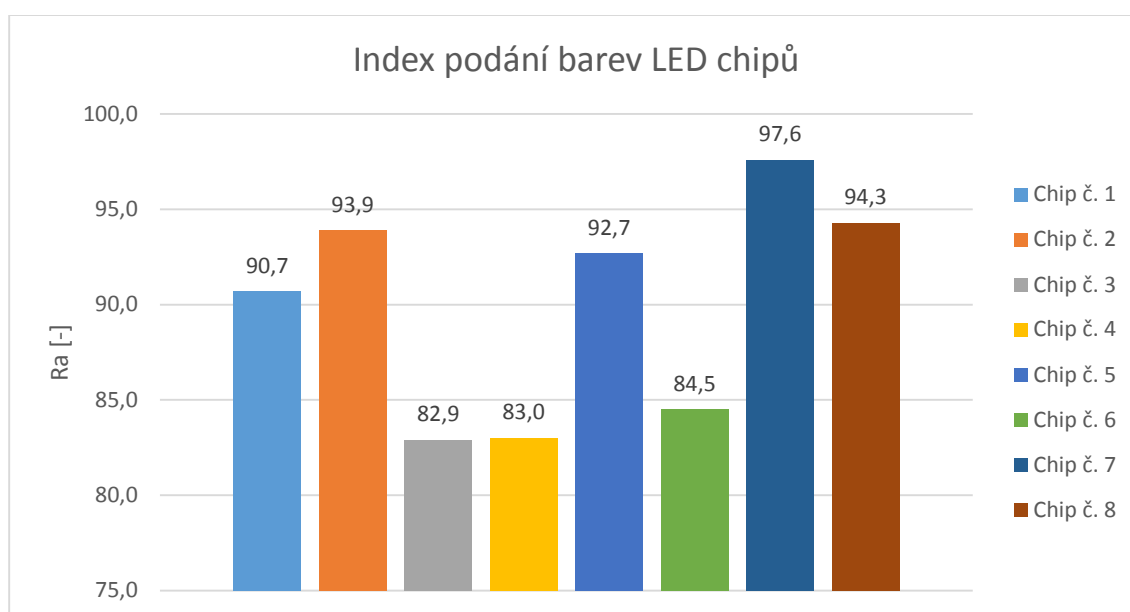
V domovech důchodců, v domech s pečovatelskou službou a v prostorech pro zdravotní péči se opět ráno a v dopoledních hodinách doporučuje osvětlení s aktivujícím účinkem, na což je vhodný Pásek č. 5 a Pásek č. 2. a ve večerních hodinách – před spaním světlo s uklidňujícím účinkem, na což se hodí vzorky: Chip č. 2, č. 3, č. 4, č. 5 a č.7 a Pásek č. 6, č. 7.

V průmyslových prostorech je vhodné použití světelných zdrojů s teplotou chromatičnosti kolem 4000 K, kterým odpovídají vzorky: Chip č. 1, č. 6, a č. 8 a Pásek č. 1, případně Pásek č. 3.

3.2. Vyhodnocení z hlediska podání barev

Graf č. 27 zobrazuje naměřené indexy podání barev jednotlivých LED chipů. Všechny vzorky mají $Ra > 80$, což znamená, že vyhovují většině pracovních prostředí definovaných normou ČSN EN 12 464-1.

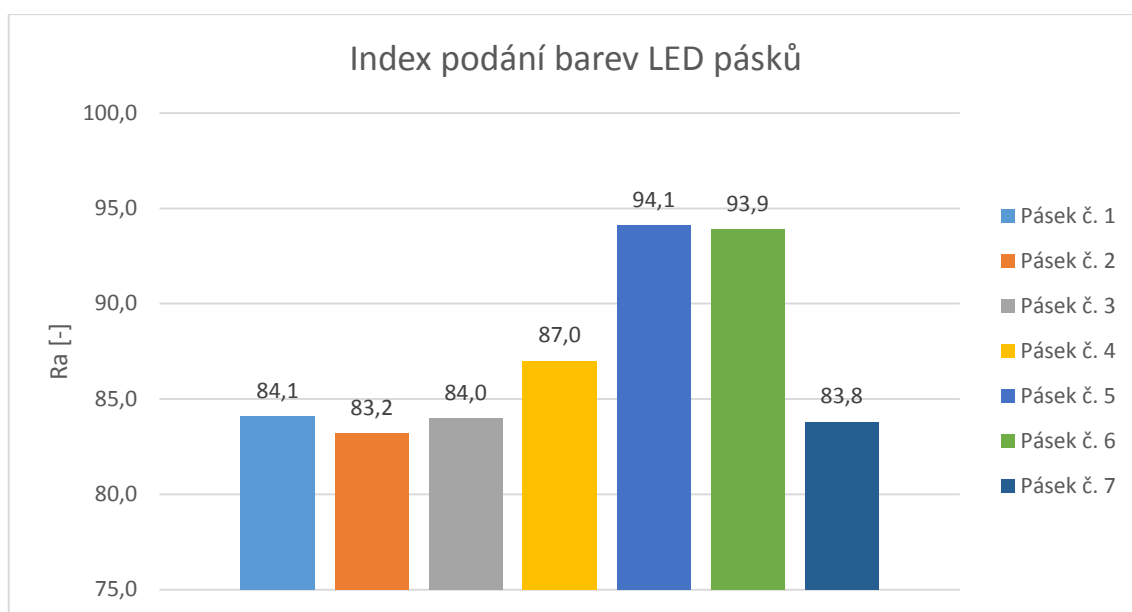
Konkrétněji tedy chip č. 1, chip č. 2, chip č. 5, chip č. 7 a chip č. 8 vyhovují všem normou definovaným prostorům. Chip č. 3, chip č. 4 a chip č. 6 vyhovují většině pracovních prostor, vyjma některých pracovních prostor ve zdravotnictví a průmyslových a řemeslných prostorech, kde jsou zvýšeny nároky na podání barev.



Graf 27: Indexy podání barev LED chipů

Graf č. 28 zobrazuje naměřené indexy podání barev jednotlivých LED pásků. Všechny vzorky mají $Ra > 80$, což znamená, že vyhovují většině pracovních prostor definovaných normou ČSN EN 12 464-1.

Všem pracovním prostorům vyhovují pouze dva vzorky. Tj. LED pásek č. 5 a LED pásek č. 6, které mají $Ra > 90$.



Graf 28: Indexy podání barev LED pásků

Závěr

V této práci jsem se zabýval biologickými dopady světla na lidské zdraví a následným vyhodnocením naměřených hodnot LED světelných zdrojů pro konkrétní využití.

Pro práci bylo změřeno celkem 15 vzorků LED světelných zdrojů, z čehož 8 vzorků byly samostatné LED světelné čipy a zbylých 7 vzorků byly pásky, osazené desítkami menších LED čipů.

U každého vzorku byla změřena spektrální vyzařovací charakteristika v rozsahu vlnových délek od 380 nm do 780 nm a index podání barev pomocí spektrometru MAVOSPACE BASE. Z naměřené spektrální charakteristiky byl vypočten relativní zářivý tok v závislosti na vlnové délce. Z relativních zářivých toků byly vypočteny, s pomocí katalogově udaného celkového světelného toku a křivky spektrální citlivosti zraku, světelné toky pro jednotlivé vlnové délky. Ze světelných toků byly vypočteny cirkadiánní toky a skutečné zářivé toky. Dále byly světelné a cirkadiánní toky vztaženy na 1 zářivý watt, neboť nelze mezi sebou porovnávat vzorky s různými zářivými výkony.

Tento výpočet byl proveden pro každý vzorek a posléze byly výsledky porovnány mezi sebou, z čehož bylo zjištěno, které vzorky jsou biologicky účinnější a které naopak méně účinné. Z výpočtů a porovnání vyšlo, že biologicky účinnější jsou vzorky s vyšší teplotou chromatičnosti. Konkrétně biologicky nejúčinnější vyšel vzorek s pracovním názvem „Pásek č. 5“, který měl nejvyšší poměr cirkadiánního toku k toku světelnému $\frac{\phi_c}{\phi_v} = 5,65$ a měl nejvyšší teplotu chromatičnosti $T_C = 6140$ K. Naopak biologicky nejméně účinný vyšel vzorek s pracovním názvem „Chip č. 3“, který měl nejnižší poměr cirkadiánního toku k toku světelnému $\frac{\phi_c}{\phi_v} = 2,17$ s nejnižší teplotou chromatičnosti $T_C = 2750$ K.

Z výše uvedených skutečností je tedy zřejmé, že „Pásek č. 5“ má největší aktivační účinek na lidský organismus, tudíž by měl být použit v případech, kdy je zapotřebí zvýšená aktivita a pozornost, naopak by neměl být používán ve večerních hodinách před spaním.

„Chip č. 3“ má naopak nejnižší aktivační účinek, proto je vhodný pro prostředí, kde má být uvolněná nálada, nebo pro použití ve večerních hodinách.

Z pohledu indexu podání barev vyhovují všechny vzorky většině pracovních prostor definovaných normou ČSN EN 12 464-1, vyjma některých pracovních prostor ve zdravotnictví nebo průmyslu, kde dochází ke kontrole barev.

Domnívám se, že výsledky z této diplomové práce by mohly být využity v průmyslu, neboť měřené vzorky byly dodány firmou HALLA, a.s., která se zabývá výrobou svítidel a návrhem osvětlovacích soustav.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] Habel, Jiří. *Elektrické světlo* [online]. 2007 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/A1B15EN3/EN3_1_zaklady.ppt
- [3] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [4] *licht.wissen 19: Impact of Light on Human Beings* [online]. Germany: Fördergemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative des ZVEI, 2014 [cit. 2017-04-19]. ISBN PDF edition 978-3-926193-99-5. Dostupné z: en.licht.de/fileadmin/shop-downloads/1409_LW19_E_Impact-of-Light-on-Human-Beings_web.pdf
- [5] DIN SPEC 67600. *Biologically effective illumination - Design guidelines. English translation of DIN SPEC 67600:2013-04*. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung, 2013.
- [6] *SVĚTLO A OSVĚTLENÍ* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUK EwifpJDEoffTAhVIYpoKHb9sCbgQFggsMAE&url=http%3A%2F%2Ffei1.vsb.cz%2Fkat420%2Fvyuka%2FBakalarske%2Fprednasky%2Fsvetlo%2520a%2520osvetlovani.pdf&usg=AFQjCNED0bpKps96doZrkclrhq1ROeiZ5A&sig2=-ywZmKZ2y8UzH_qqPI6hXw&cad=rja
- [7] *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* [online]. 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://en.m.wikipedia.org/wiki/Intrinsically_photosensitive_retinal_ganglion_cells

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty osvětlenosti v místě a bezprostředním okolí zrak. úkolu [3].....	9
Tabulka 2: Základní faktory ovlivňující biologické účinky světla [5]	18
Tabulka 3: Technické parametry zdroje	37
Tabulka 4: Seznam změřených LED chipů	39
Tabulka 5: Seznam změřených LED pásků	40
Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro LED čipy	58
Tabulka 7: Naměřené a vypočtené hodnoty pro LED pásky	58
Tabulka 8: Porovnání LED chipů	59
Tabulka 9: Porovnání LED pásků	63

Seznam obrázků

Obrázek 1: Minimální rozměry bezprostředního okolí a pozadí zrak. úkolu	10
Obrázek 2: Výkonnost člověka během dne [4]	13
Obrázek 3: Průběh cirkadiánních rytmů člověka v průběhu života [4]	14
Obrázek 4: Průběh osvětlení během výukového dne [5].....	23
Obrázek 5: Doporučené osvětlení ve večerních výukových hodinách [5]	24
Obrázek 6: Příklad průběhu osvětlení v kanceláři [5]	25
Obrázek 7: Příklad průběhu osvětlení společenské místnosti v domově seniorů [5]	28
Obrázek 8: Průběh osvětlení ve výrobní hale [4]	34
Obrázek 9: Použitý proudový zdroj	37
Obrázek 10: Vzhled měřeného pásku	38
Obrázek 11: Vzhled měřených čipů.....	38
Obrázek 12: Chladič LED čipu	41

Seznam grafů

Graf 1: Chip č. 1.....	43
Graf 2: Chip č. 2.....	44
Graf 3: Chip č. 3.....	45
Graf 4: Chip č. 4.....	46
Graf 5: Chip č. 5.....	47
Graf 6: Chip č. 6.....	48
Graf 7: Chip č. 7.....	49
Graf 8: Chip č. 8.....	50
Graf 9: Pásek č. 1.....	51
Graf 10: Pásek č. 2.....	52
Graf 11: Pásek č. 3.....	53
Graf 12: Pásek č. 4.....	54
Graf 13: Pásek č. 5.....	55
Graf 14: Pásek č. 6.....	56
Graf 15: Pásek č. 7.....	57
Graf 16: Světelné toky chipů vztažené na 1 zářivý watt.....	60
Graf 17: Průběh světelných toků chipů.....	60
Graf 18: Cirkadiánní toky chipů vztažené na 1 zářivý watt.....	61
Graf 19: Průběh cirkadiánních toků chipů.....	61
Graf 20: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED chipů.....	62
Graf 21: Světelné toky pásků vztažené na 1 zářivý watt.....	63
Graf 22: Průběh světelných toků pásků.....	64
Graf 23: Cirkadiánní toky pásků vztažené na 1 zářivý watt.....	64
Graf 24: Průběh cirkadiánních toků pásků.....	65
Graf 25: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED pásků.....	65
Graf 26: Poměr ϕ_c/ϕ_v LED pásků - seřazeny podle T_c	66
Graf 27: Indexy podání barev LED chipů.....	68
Graf 28: Indexy podání barev LED pásků.....	69

Přílohy

1. Kalibrační protokol

Kalibrierprotokoll

GOSSEN

Calibration protocol

Modell • Model

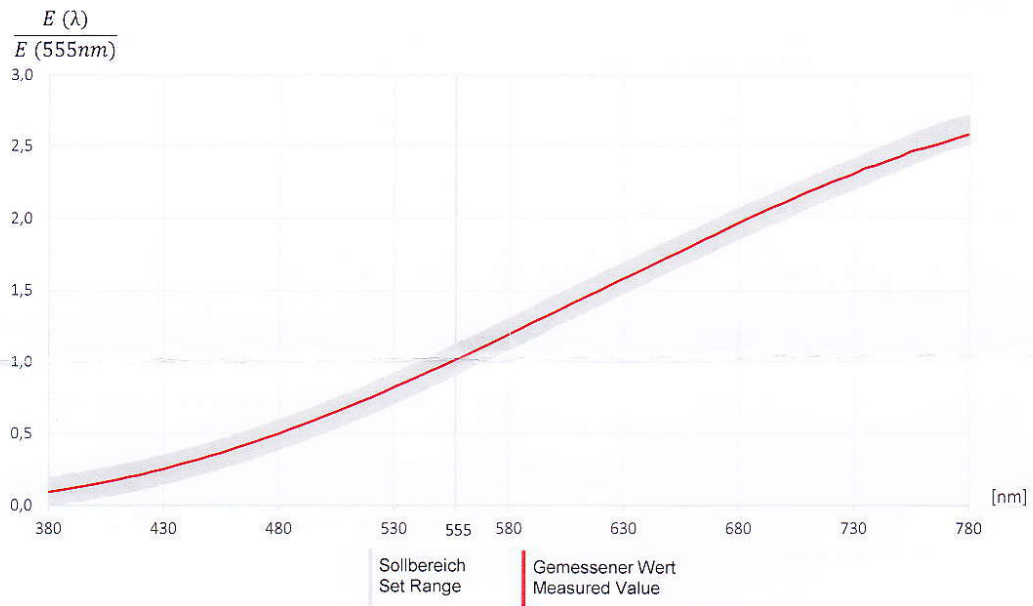
MAVOSPEC BASE

Seriennummer • Serial number

16D10129

Endtest • Final Test

Gemessen am Gossen Kalibrierstandard FEL 1000W, Normlicht A
Measured on Gossen Calibration Standard FEL 1000W, Illuminant A



	Sollwert Nominal value	Gemessener Wert Measured Value	Abweichung Deviation	Toleranz Tolerance	Beurteilung Test result
CCT [K]	2856	2817	-1,4%	± 2,0%	pass
E vis [lx]	1000,00	1008,1	0,8%	± 3,0%	pass

Prüfer • Inspector

GOSSEN
Kalibrier-service
[Signature]

GOSSEN Foto- und Lichtmesstechnik GmbH | Lina-Ammon-Str.22 | 90471 Nürnberg | Germany
Phone: +49 911 8602-181 | Fax: +49 911 8602-142 | info@gossen-photo.de | www.gossen-photo.de