



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta
elektrotechnická
Katedra
elektroenergetiky**

Nežádoucí účinky venkovního osvětlení na okolní prostředí

Obtrusive effects of outdoor lighting on the environment

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Alexandr Sizov

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sizov** Jméno: **Alexandr** Osobní číslo: **481098**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektroenergetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Nežádoucí účinky venkovního osvětlení na okolní prostředí

Název diplomové práce anglicky:

Obtrusive effects of outdoor lighting on the environment

Pokyny pro vypracování:

- 1) Zpracujte přehled požadavků platných i připravovaných technických norem a doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí.
- 2) Z odborné literatury zjistěte průběhy spektrálních přijímacích charakteristik fotoreceptorů člověka, zvířat a rostlin a spektrální průběhy konvenčních i moderních světelných zdrojů využívaných ve venkovním osvětlení.
- 3) Posuďte rozsah vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní obyvatele, živočichy a rostliny na základě spektrálních přijímacích charakteristik jejich fotoreceptorů.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN P 36 0455 Osvětlení pozemních komunikací - Doplnující informace
- [2] ČSN EN 13201 Osvětlení pozemních komunikací
- [3] ČSN EN 12464-2 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 2: Venkovní pracovní prostory

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: **25.02.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **20.05.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **19.02.2023**

Ing. Marek Bálský, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

.....

Alexandr Sizov

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Marku Bálskému, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za jeho cenné rady a čas, který mi věnoval. Rovněž bych chtěl poděkovat paní PaedDr. Anně Babkové a panu Ing. Zdeňku Babkovi za neocenitelnou pomoc a také své rodině, a hlavně mojí manželce za podporu a víru, které mi poskytovali během studia a vypracování této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval mému nadřízenému, vědoucímu oddělení elektro ve firmě Bilfinger Tebodin Czech Republic, s.r.o. panu Ing. Vladimíru Markovi a kolegovi Ing. Josefu Křištofíkovi za odborné rady v tématu rušivého osvětlení. Nakonec chci poděkovat pánu Ing. Janu Štěpánkovi za hodiny českého jazyka.

SOUHRN

Tato diplomová práce se zabývá zkoumáním nežádoucích účinků venkovního osvětlení na okolní prostředí. Cílem práce je zpracovat přehled platných technických norem a doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí. Dále také z odborné literatury zjistit průběhy spektrálních přijímacích charakteristik fotoreceptorů živých organismů a spektrální průběhy konvenčních i moderních světelných zdrojů využívaných ve venkovním osvětlení. Následujícím úkolem je posoudit rozsah vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní obyvatele, živočichy a rostliny na základě spektrálních přijímacích charakteristik jejich fotoreceptorů. Práce je rozdělena do tří hlavních částí, z nichž každá se věnuje tématu, odpovídajícímu jednomu z uvedených základních cílů.

Klíčová slova: světlo, osvětlení, rušivé světlo, venkovní osvětlení, světelné znečištění, cirkadiánní rytmus, melatonin, biologický efekt, teplota chromatičnosti, světelné zdroje

SUMMARY

This thesis is dedicated to the study of the adverse effects of outdoor lighting on the environment. The aim of this work is to compile an overview of the current technical standards and recommendations to prevent the adverse effects of outdoor lighting systems on the environment. Also to find in the professional literature the direction of the spectral receiving characteristics of photoreceptors of living organisms and the spectral directions of conventional and modern light sources used in outdoor lighting. The next task is to assess the degree of impact of outdoor lighting systems on the surrounding inhabitants, animals and plants based on the spectral reception characteristics of their photoreceptors. The work is divided into three main parts, each of which is devoted to a topic corresponding to one of the main tasks.

Key words: light, lighting, obtrusive light, outdoor lighting, light pollution, circadian rhythm, melatonin, biological effect, chromaticity temperature, light sources

OBSAH

ÚVOD.....	1
1 Přehled požadavků platných i připravovaných českých technických norem	2
1.1 Definice termínů a technické parametry světelných zdrojů.....	2
1.2 Přehled požadavků českých technických norem	3
1.3 Doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí. 7	
2 Charakteristiky konvenčních i moderních světelných zdrojů využívaných ve venkovním osvětlení	9
2.1 Technické charakteristiky světelných zdrojů a svítidel	9
2.1.1 Světelný tok.....	10
2.1.2 Svítivost	10
2.1.3 Křivky svítivosti.....	10
2.1.4 Index podání barev	11
2.1.5 Teplota chromatičnosti.....	12
2.1.6 S/P.....	12
2.1.7 Doba života světelných zdrojů	12
2.2 Typy světelných zdrojů	13
2.2.1 Vysokotlaká sodíková výbojka	13
2.2.2 Nízkotlaká sodíková výbojka.....	14
2.2.3 Halogenidová výbojka	14
2.2.4 Vysokotlaká rtuťová výbojka.....	15
2.2.5 LED světelné zdroje.....	16
3 Vliv venkovních osvětlovacích soustav na okolní obyvatele, živočichy a rostliny	16
3.1 Průběhy spektrálních přijímacích charakteristik fotoreceptorů	16
3.1.1 Stavba a funkce orgánu zraku člověka	16
3.1.2 Světelné rytmy a biorytmy člověka	20
3.1.3 Melanopický efekt a činitel cirkadiánní účinnosti.....	23
3.1.4 Charakteristiky fotoreceptorů živočichů a rostlin	31
3.2 Vliv venkovních osvětlovacích soustav na lidské zdraví	32
3.2.1 Vliv melatoninu na sebevědomí člověka.....	33
3.2.2 Onemocnění a poruchy způsobené poklesem melatoninu.....	35
ZÁVĚR	37
SEZNAM LITERATURY.....	39
SEZNAM TABULEK.....	44
SEZNAM OBRÁZKŮ	44

ÚVOD

Venkovní osvětlení je jednou z částí našeho běžného života, které obvykle nepřidáváme velký význam. Osvětluje pozemní komunikace, památky, parkoviště, billboardy, městskou architekturu. Ne vždy si však uvědomujeme, že to může mít negativní vliv na lidské zdraví a floru i faunu. Nevyužité světlo od venkovních osvětlovacích soustav se rozptyluje do okolí, zvyšuje jas noční oblohy a překáží jejímu pozorování.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vlivu nežádoucích účinků venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí. Práce bude rozdělena do tří částí, každá z nich se bude věnovat jednomu ze tří základních cílů.

V první části práce bude zpracován přehled platných technických norem a budou uvedeny pokyny a doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovního osvětlení na okolní prostředí.

V druhé části budou popsány spektrální charakteristiky světelných zdrojů v osvětlovacích soustavách venkovního osvětlení. Na základě získaných dat spektrálních charakteristik světelných zdrojů bude vypočtena závislost obsahu modré části spektra na melanopickém efektu a citlivost lidských očních pigmentů.

Třetí část práce se zabývá popisem vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní obyvatele. Bude věnována pozornost vlivu osvětlení na pokles melatoninu v lidském těle a následně budou uvedena z toho vyplývající nebezpečí.

1 Přehled požadavků platných i připravovaných českých technických norem

1.1 Definice termínů a technické parametry světelných zdrojů

Česká legislativa obsahuje zákon č. 92/2004 Sb., o ochraně ovzduší, který definoval termín světelného znečištění jako “světelným znečištěním viditelné záření umělých zdrojů světla, které může obtěžovat osoby nebo zvířata, způsobovat jim zdravotní újmu nebo narušovat některé činnosti a vychází z umístění těchto zdrojů ve vnějším ovzduší nebo ze zdrojů světla, jejichž záření je do vnějšího ovzduší účelově směřováno”. [1]

Termíny forem světelného znečištění stanovují evropské normy, které přijala i ČR (ČSN EN 12665 – Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení) a řada evropských zemí. Dále jsou uvedeny základní termíny související s rušivým osvětlením.

- Oslnění (glare) je normou definováno jako podmínky vidění, při kterých vzniká nepohoda nebo snížená schopnost vidět podrobnosti nebo předměty. [2]

- Omezující oslnění (disability glare) – takové oslnění, při kterém se viditelnost předmětů zhoršuje, avšak to nemusí nutně způsobovat nepohodu. [2]

- Rušivé oslnění (discomfort glare) je definováno jako oslnění, které naopak způsobuje nepohodu, ale nemusí při tom zhoršovat viditelnost předmětů. [2]

- Rušivé světlo (obtrusive light) – neúčinné světlo, jehož kvantitativní, směrové nebo spektrální vlastnosti způsobují obtěžování, nepohodu nebo omezují schopnost vidět podstatné informace. [2]

- Neúčinné světlo (spill light) je umělé světlo vyzařované svítidlem za hranice osvětlovaného objektu. [2]

Oxfordským slovníkem je termín světelného znečištění definován jako “brightening of the night sky caused by street lights and other man-made sources, which has a disruptive effect on natural cycles and inhibits the observation of stars and planets.”, překladem tedy je zvýšení jasů noční oblohy způsobené venkovním osvětlením a jinými zdroji umělého osvětlení, které mají rušivý účinek na přírodní cykly a znemožní pozorování hvězd a planet. [3]

Nebudeme se dohadovat o správnosti uvedených termínů [4] [5], pro diplomovou práci určíme, že světelné znečištění je komplexní pojem, který lze definovat formou nežádoucích účinků umělého osvětlení, které se dá pozorovat v různých oblastech, jako jsou: flóra, fauna, lidské zdraví, ekonomika, bezpečnost, amatérské pozorování a vědecké studium hvězdné oblohy.

Nadbytečný rozptyl světla může být popsán jako dopad světla, které se odchyluje od místa svého určení. Nekvalitní osvětlovací zařízení a obecně špatná konstrukce systému osvětlení vedou k tomu, že se světlo nedostane jen na silnici, ale i na domy lidí, svítí jim do oken, což způsobuje značné nepohodlí.

Omezení rušivých účinků světla v podobě oslnění je spojeno i se zajištěním bezpečnosti lidí na silnici. Mohou být definovány jako nežádoucí jas světelného zdroje a mohou způsobit podráždění, nepohodlí nebo ztrátu vizuálních schopností a úplné oslepnutí. Poslední účinek je extrémně nebezpečný, protože řidiči na krátkou dobu zcela ztrácejí schopnost vidět, to může vést k smrtelným dopravním nehodám. Právě oslnění je proto považováno za nejnebezpečnější aspekt světelného znečištění na komunikacích [6].

1.2 Přehled požadavků českých technických norem

Hlavními zdroji světelného znečištění jsou velká města a průmyslové komplexy. Světelné znečištění vzniká každým umělým světelným zdrojem venkovního osvětlení, architektonickým osvětlením, svítícími billboardy nebo reflektory, které nadbytečně svítí mimo nutně osvětlované oblasti.

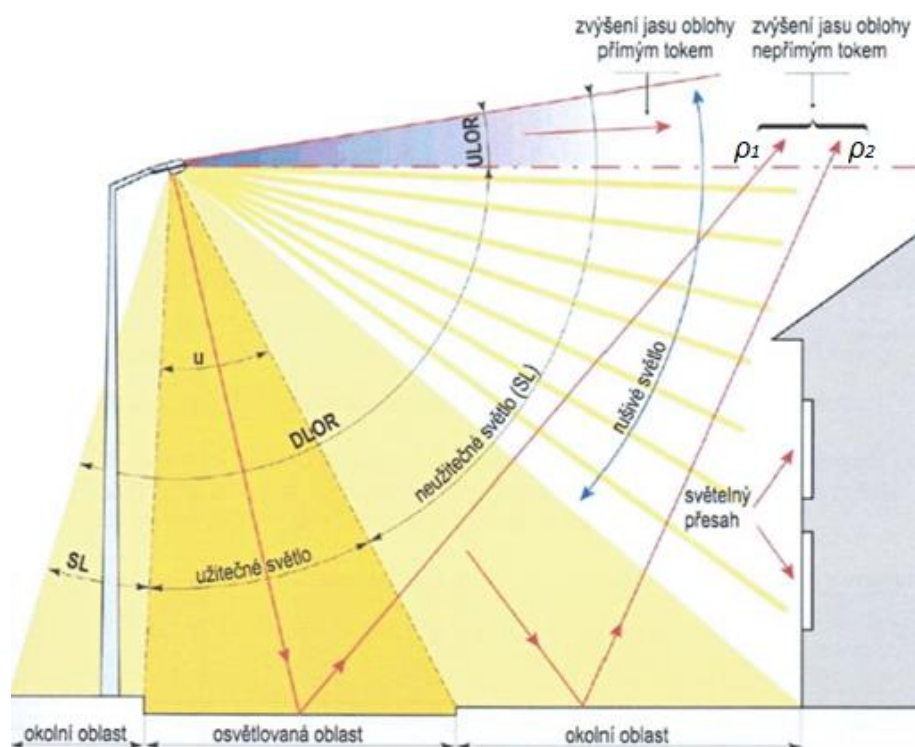
Významná část vyzařovaného světla se odráží nahoru, což vytváří ve městech takzvané "světelné kopule", které dosahují výšky až 60 km. Účinek zvětšení přírodního jasu oblohy se zesiluje ve vzduchu prachovými částicemi (aerosoly), navíc zde působí refrakční, reflexní a rozptylující se vyzařované světlo (zde je světelné znečištění doplněno tradičním znečištěním atmosféry, které je také nejvíce významné v oblastech metropolí). V důsledku toho si světelné znečištění získalo jiný název - "světelný smog". [7]

Rozvoj dopravní infrastruktury v České republice je jako v jedné z vyspělých zemí Evropské unie stěžejní pro propojení mezi jednotlivými regiony. S rostoucí délkou silnic roste spotřeba energie a zdrojů pro jejich údržbu, jelikož jednou z povinných součástí obsluhy silniční sítě je umělé osvětlení.

Při správném uplatňování principů navrhování umělého osvětlení může zvýšená viditelnost na silnicích zajistit sociální a ekonomické přínosy pro veřejnost včetně:

- snížení počtu havárií a usnadnění podmínek pro práci policie v noci;
- zlepšení dopravních podmínek;
- další příležitosti pro podnikání;
- zajištění podmínek pro komunikaci lidí;
- zajištění bezpečnějších podmínek pro pohyb chodců a cyklistů, zejména v kombinaci se speciálním silničním rozmístěním; [6]

Kromě výše uvedených výhod se musíme potýkat i se škodlivými faktory rozvoje umělého osvětlení.



Obrázek 1-1: Světlo vyzařované umělými světelnými zdroji patří do osvětlovací soustavy venkovního osvětlení a lze ho rozdělit na užitečné světlo a neužitečné světlo [8]

Legenda:

ULOR – hodnota světelného toku vyzařovaného nad horizontální hladinu (%)

DLOR – hodnota světelného toku vyzařovaného pod horizontální hladinu (%)

ρ_1 – činitel odrazu osvětlované oblasti (–)

ρ_2 – činitel odrazu okolní oblasti (–)

u – činitel použití světelného toku (–)

Pro výpočet hodnoty celkového světelného toku vyzařovaného do horního poloprostoru se používá následující rovnice:

$$ULR = \frac{LOR \cdot [ULOR + \rho_1 \cdot u + \rho_2 \cdot (DLOR - u)]}{100\%} \quad [\text{lm; lm; \% ; \%}] \quad (1.1)$$

kde LOR – celkový světelný tok vyzařovaný umělým světelným zdrojem (lm).

V závislosti na křivce svítivosti světelného zdroje a konstrukčních vlastnostech svítidel se představa vyzařovaného světla ukázaného na obrázku 1-1 bude lišit.

Pojem rušivého světla se objevuje v českých technických normách, které určují přípustné maximální hodnoty rušivého světla venkovního osvětlení (viz tab.1) a definují základní termíny stanovení požadavků osvětlení:

- ČSN EN 12665 (36 0001) – Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení;
- ČSN EN 12464-2 (36 0450) – Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 2: Venkovní pracovní prostory;
- ČSN EN 12193 (36 0454) – Světlo a osvětlení – Osvětlení sportovišť;
- ČSN EN 13032-2 (36 0456) – Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel – Část 2: Způsob uvádění údajů pro vnitřní a venkovní pracovní prostory.

Rušivé světlo venkovního osvětlení je částí neúčinného světla vyzařovaného osvětlovací soustavou, které nadměrné svítí mimo určené oblasti ve venkovním prostoru a omezuje schopnost očí vidět nejdůležitější informace. [2]

Dovolené maximální hodnoty rušivého světla ve venkovních osvětlovacích soustavách slouží ke snížení nežádoucích účinků na osoby a životní prostředí.

Tabulka 1-1: Limity rušivého světla pro venkovní osvětlení [9]

Environmentální zóna	Svislá osvětlenost na objektech		Svítivost svítidla v potenciálně rušivém směru		Podíl horního toku vyzařovaného nad horizont	Největší průměrný jas	
	E _v [lx]		I [cd]			ULR [%]	L _B [cd·m ⁻²]
	mimo τ _c	v τ _c	mimo τ _c	v τ _c	fasády budov		znaky
E1	2	0	2500	0	0	0	50
E2	5	1	7500	500	5	5	400
E3	10	2	10000	1000	15	10	800
E4	25	5	25000	2500	25	25	1000

τ_c – doba nočního klidu;
 ULR – V jiných zdrojích se můžete setkat s jiným označením, jako R_{UL};
 E_v – maximální hodnota osvětlenosti na objektech [lx];

Původně třídy environmentálních zón byly navrženy a definovány podle směrnice CIE 126:1997 (Guidelines for minimizing sky glow), která vznikla ve spolupráci mezi dvěma společnostmi, a to Mezinárodní astronomická unie (IAU) a Mezinárodní organizace pro temnou oblohu (IDA). Nyní tyto zóny popisuje také i jiná směrnice, která je určena pro limitování nežádoucích účinků rušivého světla venkovních osvětlovacích soustav CIE 150:2017 (Guide on the limitation of the effects of obtrusive light from outdoor lighting installations).

Tabulka 1-2: Rozdělení environmentální osvětlovacích zón [10]

Environmentální zóna	Okolí	Osvětlovací prostředí	Příklady
E0 ¹⁾²⁾	Chráněné	Skutečně tmavé oblasti (SQM > 20.5)	UNESCO Starlight Reserve, IDA dark-sky places
E1	Přírodní	Tmavé oblasti	Národní parky a chráněná území
E2	Venkovské	Málo světlé oblasti	Průmyslové a obytné venkovské oblasti
E3	Předměstské	Středně světlé oblasti	Průmyslová a obytná předměstí
E4	Městské	Velmi světlé oblasti	Městská centra a obchodní zóny

1) Zóna E0 byla určena v roce 2019 International Dark-Sky Association, ale zatím toto navržení nebylo zahrnuto v ČSN
 2) Zóna E0 musí být vždy obklopena zónou E1

V tabulce 1-3 jsou uvedena doporučení pro minimální kritickou vzdálenost mezi hranicemi environmentálních zón a referenčním bodem zóny.

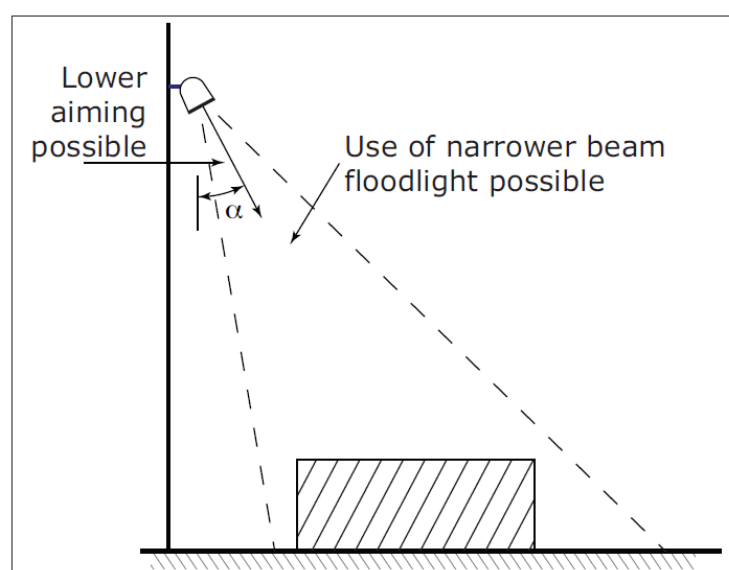
Tabulka 1-3: Minimální délka mezi hranicemi environmentální zóny [10]

Referenční bod environmentální zóny	Minimální délka mezi hranicemi zóny vztažená k referenčnímu bodu v zóně E1/E2/E3/E4		
	E1 – E2 [km]	E2 – E3 [km]	E3 – E4 [km]
E1	1	10	100
E2	-	1	10
E3	-	-	1
E4	Bez omezení		

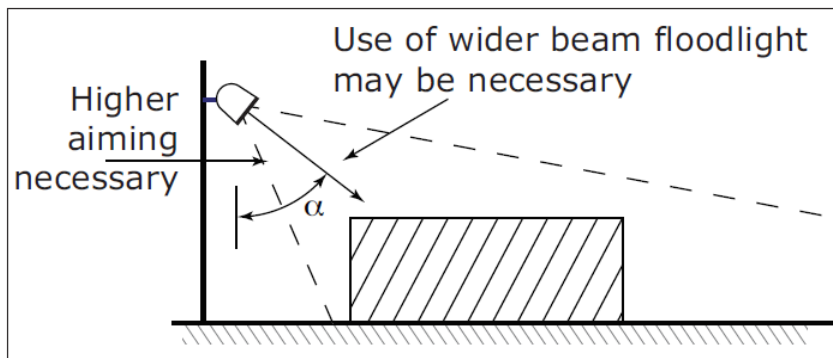
1.3 Doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí

Směrnice CIE 126:1997 a CIE 150:2017 uvádí několik důležitých pokynů pro instalaci osvětlovacích soustav a výběr vhodných vyzařovacích charakteristik zdrojů umělého osvětlení:

- I. Ve většině případů je správné instalovat osvětlovací soustavy na vhodnou montážní výšku, v důsledku čehož se dá: a) nasměrovat svítidla tak, aby úhel dopadu hlavního vyzařovacího paprsku umělého zdroje byl co nejmenší, b) použít svítidla s nejmenším možným vyzařovacím úhlem. (obr. 1-2 případ a)) [11]



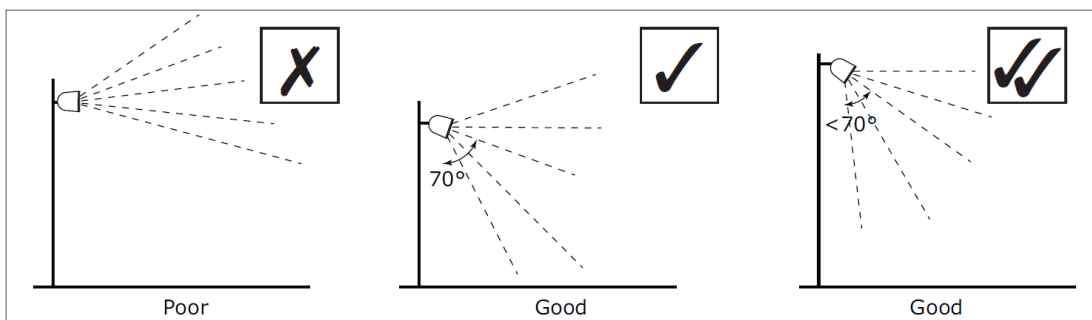
a)



b)

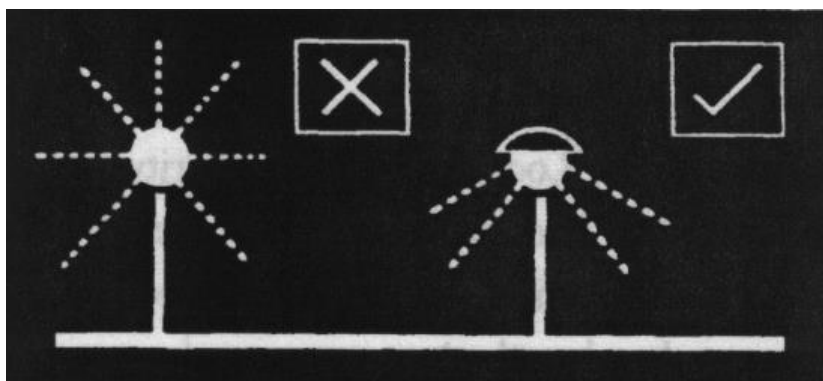
Obrázek 1-2: Vliv montážní výšky na omezení neúčinného světla a oslnění osvětlovací soustavy [11]

- II. Pro minimalizaci nežádoucích účinků, zejména oslnění potenciálního pozorovatele, se doporučuje, aby zaměření vyzařovacího úhlu nebylo větší než 70° [11]



Obrázek 1-3: Úhly zaměření osvětlovací soustavy [11]

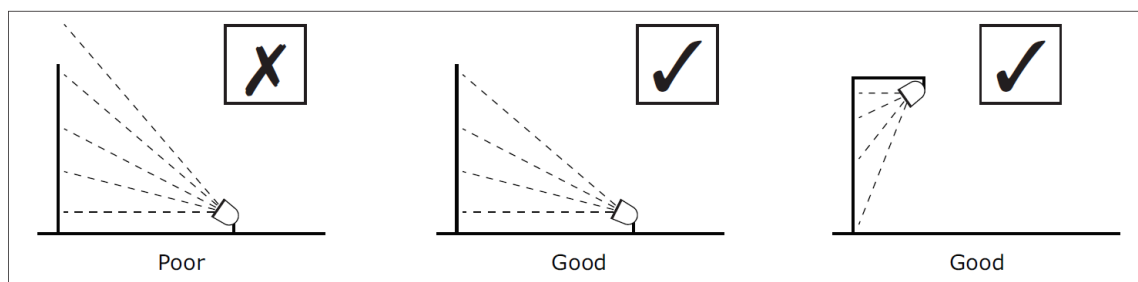
- III. Omezení světelného toku vyzařovaného osvětlovací soustavou do horního poloprostoru pomocí technických příslušenství jako stínidla, kryty, clony. [10]



Obrázek 1-4: Eliminace světelného toku [10]

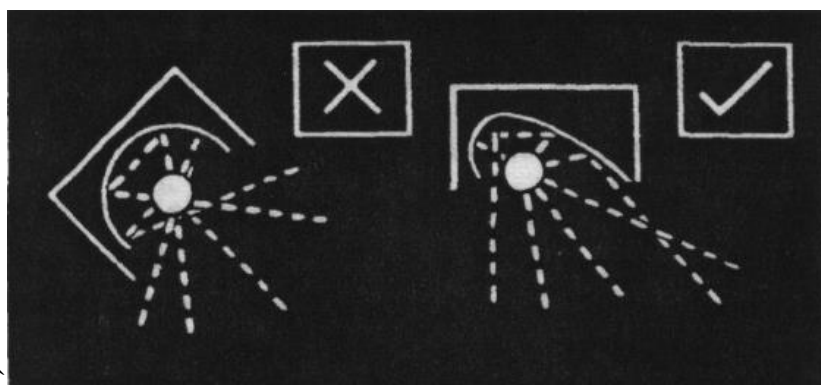
- IV. Pro osvětlení svislých ploch je potřeba navrhovat osvětlovací soustavy tak, aby nevzniklo neúčinné světlo, které svítí mimo potřebné oblasti. Pokud technicky

není možné použít světlo nasměřované přímo na požadovanou plochu, nabízí se použití krytů [11]



Obrázek 1-5: Osvětlení fasády a svislých ploch [11]

- V. Pro osvětlení objektů nepravidelného tvaru se doporučuje používat svítidla s asymetrickými křivkami svítivosti [10]



Obrázek 1-6: Užití asymetrických křivek svítivosti [10]

- VI. Pokud to není nutné, nedoporučuje se používat osvětlení nepřetržitě, zejména v noci, protože je to příčinou světelného znečištění a plýtvání peněz. [10]

2 Charakteristiky konvenčních i moderních světelných zdrojů využívaných ve venkovním osvětlení

2.1 Technické charakteristiky světelných zdrojů a svítidel

Detailní seznam definic pro LED zdroje uvádí česká technická norma ČSN EN 62504 (36 0701). Tato kapitola obsahuje základní definice a termíny pro různé světelné zdroje.

2.1.1 Světelný tok

Světelným tokem Φ se nazývá fotometrická fyzikální veličina, která charakterizuje vyzářené množství světelné energie zdrojem do okolí za časovou jednotku. V souladu s relativní spektrální citlivostí lidského oka je veličinou zářivého toku Φ_e a je vyjádřenou v lumenech, podle SI se označuje jako (lm). [12]

Zářivým tokem Φ_e se vyjadřuje množství světelného výkonu, které záření přeneso nebo vyzáří zdroj. Pokud záření není monochromatické (je spojité), zářivý tok lze určit jako: [12]

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \quad (2.1)$$

kde $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ – spektrální hustota zářivého toku Φ_e .

2.1.2 Svítivost

Svítivost I je jednou z hlavních světelných fyzikálních fotometrických veličin, která představuje distribuce množství světelné energie do prostoru v určitém směru za jednotku času. Kvantitativně udává hodnotu světelného toku vyzařovaného světelným zdrojem vztažnou na prostorový úhel. Podle soustavy SI jednotkou je kandela a označuje se jako (cd). [12]

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.2)$$

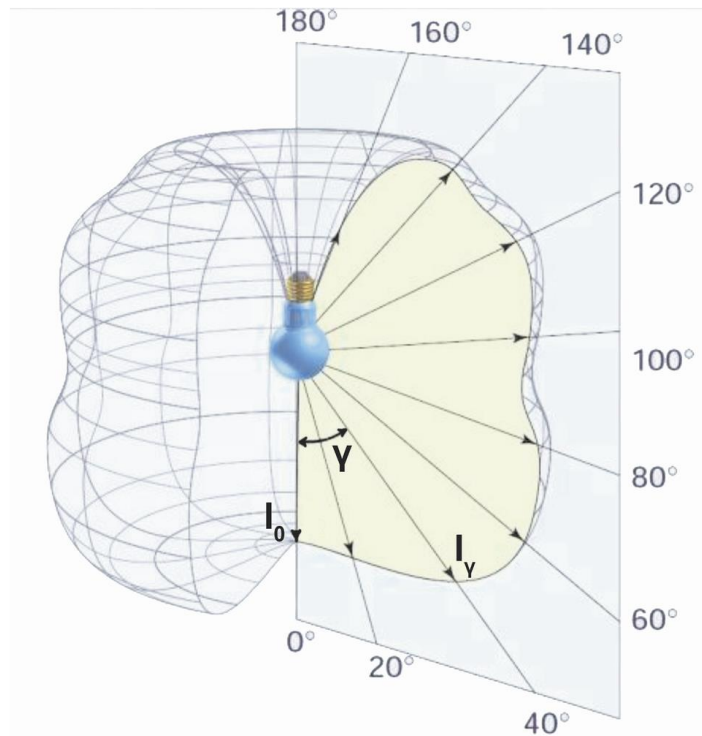
kde $d\Phi$ – světelný tok (lm),

$d\Omega$ – prostorový úhel, do kterého je vyzařován světelný tok zdroje (sr).

2.1.3 Křivky svítivosti

Křivky svítivosti jsou grafické znázornění rozložení svítivosti světelného zdroje v prostoru. V praxi se dá křivky svítivosti nahrát do výpočtových programu jako DIALux, Relux nebo softwaru pro 3D modelování jako 3DSMax a pak provést potřebné výpočty a udělat vizualizace virtuálních scén. [12]

Výrobce svítidel v technické dokumentaci velmi často ukazují poloroviny (řezy) světelných zdrojů v polárních souřadnicích. Řezy ukazují distribuci světelného toku. [12]



Obrázek 2-1: Křivka svítivosti svítidel v polárních souřadnicích [12]

Křivky svítivosti lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma) \quad (2.3)$$

kde I_0 – vztažná svítivost ve směru kolmo k hlavní vyzářovací ploše (cd),
 $f_I(\gamma)$ – matematický popis navrhované křivky svítivosti.

2.1.4 Index podání barev

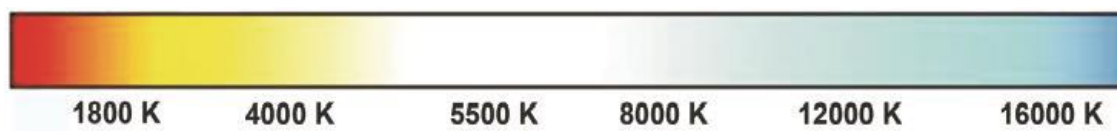
Index podání barev CRI nebo R_a je kvantitativní míra schopnosti světelného zdroje vyzářovat světlo hodnověrného barevného spektra. Při CRI = 0 není možné interpretovat barvy a naopak, při CRI = 100 je maximální možná schopnost rozeznávat barvy. [12]



Obrázek 2-2: Vnímání lidským okem různých úrovní CRI [13]

2.1.5 Teplota chromatičnosti

Teplota chromatičnosti T_c je fyzikální veličina, která charakterizuje barevné vlastnosti světla. Jednotkou podle soustavy SI je Kelvin (K). [12]



Obrázek 2-3: Škála teploty chromatičnosti [12]

V praxi, zejména pro LED světelné zdroje, se využívají tři kategorie teploty chromatičnosti:

- I. $T_c < 3300$ K – teplá bílá
- II. 3300 K $< T_c < 5000$ K – bílá
- III. $T_c > 5000$ K – denní

Tabulka 2-1: Příklad barevných teplot

Typ světelného zdroje	T_c (K)
Normalizované denní světlo	6500
Jasně polední světlo	6000
Povrchová teplota Slunce	5780
Normální denní světlo	5000
Studená bílá žárovka	4000
Žárovka, Slunce při východu	2700
Svíčka	1800

2.1.6 S/P

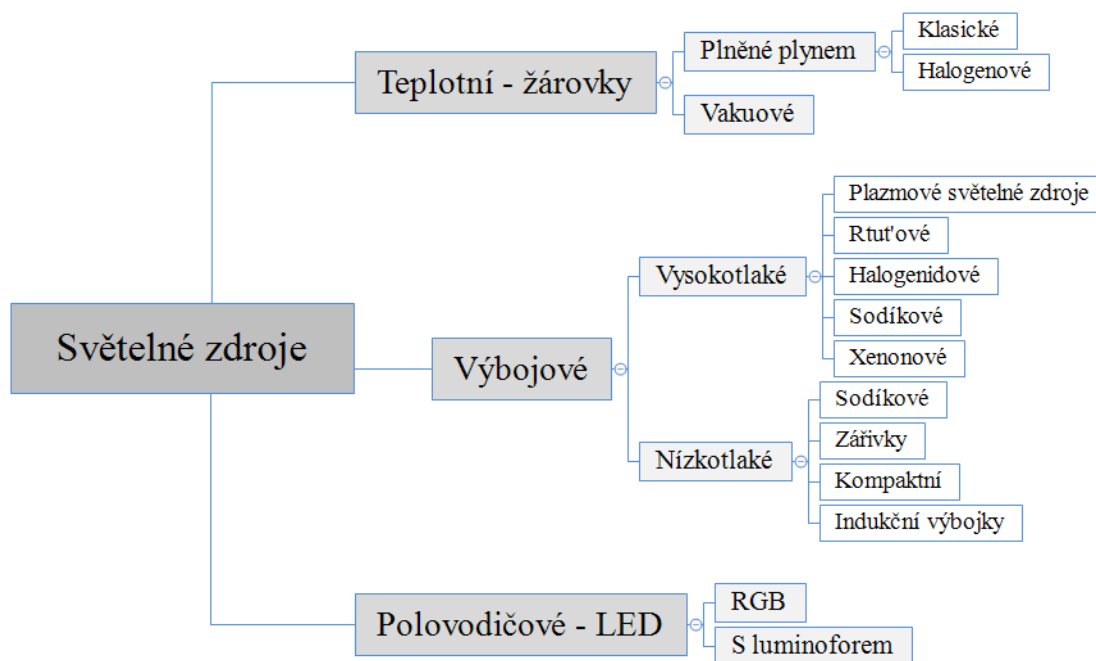
S/P je poměr světelného toku svítidla pro noční (skotopickou) a denní (fotopickou) citlivost oka. Světelné zdroje s vyšší hodnotou S/P mají větší obsah modré složky. [12]

2.1.7 Doba života světelných zdrojů

Doba života světelných zdrojů se udává v hodinách a poskytuje orientační údaje o tom, jak dlouho udrží daný světelný zdroj požadované hodnoty světelného toku. [12]

2.2 Typy světelných zdrojů

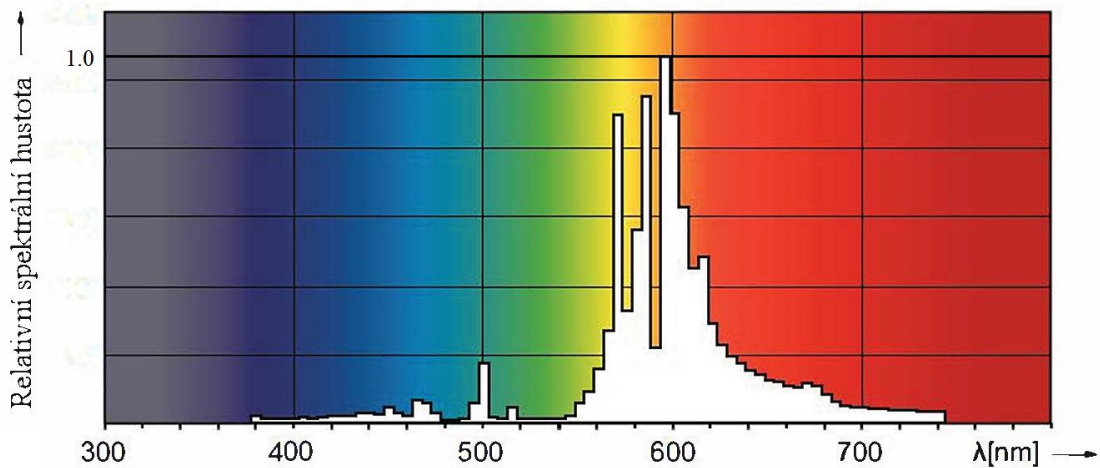
Obrázek 2-5 uvádí veškeré typy zdrojů umělého osvětlení, pro venkovní osvětlení se však používají jenom některé z nich.



Obrázek 2-4: Rozdělení světelných zdrojů na třídy. Adaptováno z [12]

2.2.1 Vysokotlaká sodíková výbojka

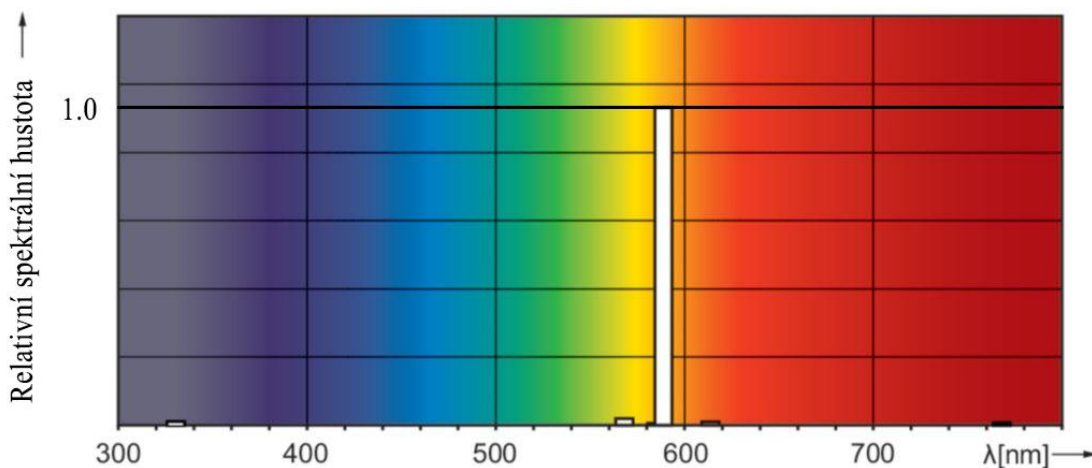
Vysokotlaké sodíkové výbojky jsou nepoužívanější zdroj v oblastech průmyslového, obchodního a venkovního osvětlení. Jejich výhodou je vysoký měrný výkon $150 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ s dlouhá doba života až 32000 hodin a teplota chromatičnosti $T = 2000 \text{ K}$ až 2500 K . Nevýhodou je snížená hodnota podání barev CRI 20 až 25. [14]



Obrázek 2-5: Spektrální charakteristika vysokotlaké sodíkové výbojky katalogů svítidel firmy Philips [15]

2.2.2 Nízkotlaká sodíková výbojka

Nízkotlaké sodíkové výbojky jsou světelným zdrojem s velmi vysokým měrným výkonem $200 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a s dobou života až 20 000 hodin. Nevýhodou, za prvé, je monochromatická spektrální charakteristika vyzařovaného světla s indexem podání barev $\text{CRI} = 0$. Za druhé, účinnost je velmi závislá na okolní teplotě. [16]

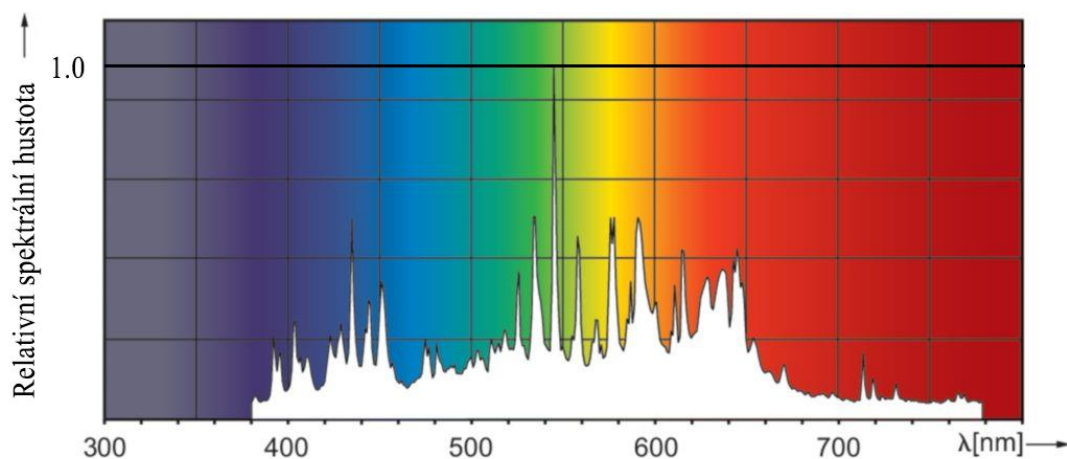


Obrázek 2-6: Spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky z katalogů svítidel firmy Philips [15]

2.2.3 Halogenidová výbojka

Halogenidové výbojky jsou typem vysokotlakých výbojek. Jejich světlo vzniká zářením produktů rozpadu halogenidových prvků a zářením rtuťových výparů. Halogenidové výbojky mají vysoký měrný výkon $110 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a kvalitní index podání barev

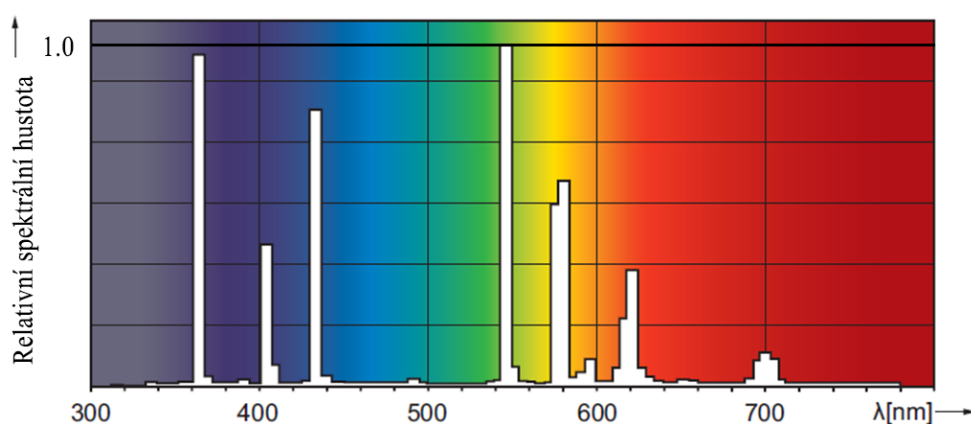
CRI > 80, proto jsou vhodné pro nasvícení míst s vysokým požadavkem indexu podání barev. Nevýhodami jsou vysoká cena ve srovnání s jinými typy světelných zdrojů a kratší doba života než u vysokotlakých sodíkových výbojek.



Obrázek 2-7: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s denní teplotou chromatičnosti >5000 K podle katalogů svítidel firmy Philips [15]

2.2.4 Vysokotlaká rtuťová výbojka

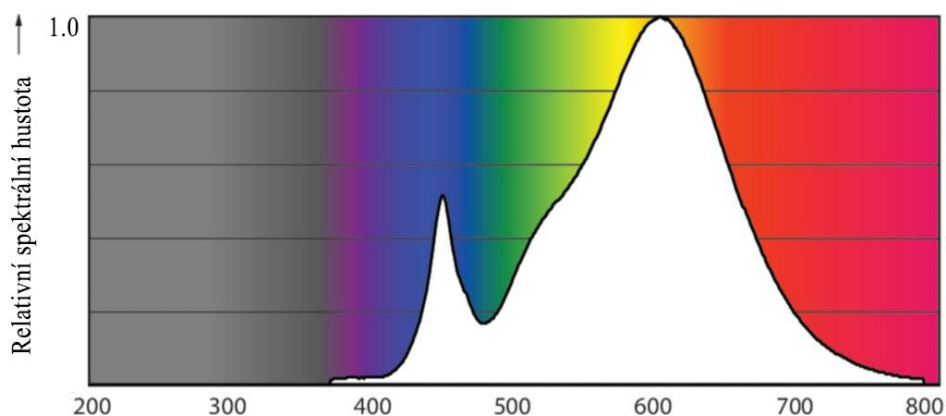
Spektrální charakteristika vysokotlakých rtuťových výbojek neobsahuje červenou složku, což vede k nejhoršímu vnímání barev lidským okem. Klasická rtuťová výbojka má měrný výkon $50 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}$ a doba života 12 000 až 16 000 hodin. V důsledku nízkého měrného výkonu, nevhodných barevných vlastností, a nemožnosti odkládat zničené výbojky do komunálního odpadu, byly od roku 2015 výbojky staženy z trhu.



Obrázek 2-8: Spektrální charakteristika vysokotlaké rtuťové výbojky katalogů svítidel firmy Philips [15]

2.2.5 LED světelné zdroje

Hlavní rozdíl mezi LED světelnými zdroji a konvenčními umělými světelnými zdroji je absence prvků rtuti. V současné době jsou LED svítidla zcela nezávislým světelným zařízením, které se skládá ze speciálně navrženého těla, zdroje světla (LED) a elektronického napájecího zdroje. Výhodami světelných zdrojů na bázi LED jsou dlouhá doba života, energetická úspornost, absence UV složky atd. Nevýhody modré složky vyzařovací charakteristiky budou popsány v kapitole 3.2.1. [12]



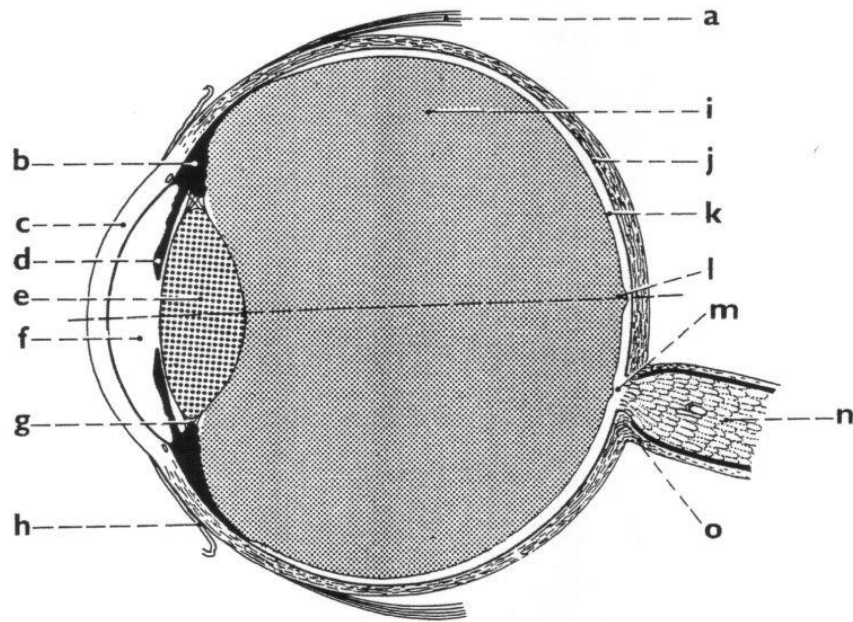
Obrázek 2-9: Spektrální charakteristika LED zdroje katalogů svítidel firmy Philips [15]

3 Vliv venkovních osvětlovacích soustav na okolní obyvatele, živočichy a rostliny

3.1 Průběhy spektrálních přijímacích charakteristik fotoreceptorů

3.1.1 Stavba a funkce orgánu zraku člověka

Oční koule je uložena v dutině očníce, kterou ohraničují kosti lebky. Velmi pohyblivý bulbus spočívá na tukovém polštáři, který zabraňuje poškození oka při nárazech na kostěný podklad. Vchod do očníce uzavírají víčka. [17]



Obrázek 3-1: Schéma stavby očního jablka a) okoohybný sval, b) řasnaté těleso, c) rohovka, d) duhovka, e) čočka, f) přední oční komora, g) závěsný aparát čočky, h) spojivka, i) sklivce, j) bělima, k) sítnice, l) osa vidění, m) slepá skvrna oka, n) zrakový nerv, o) obaly zrakového nervu [17]

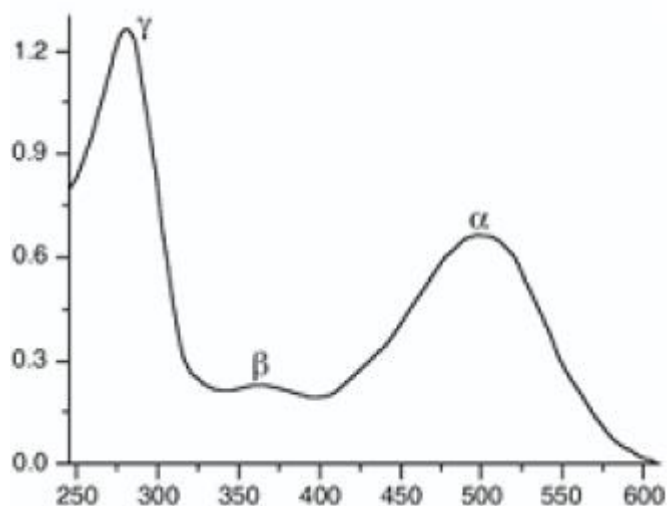
Oční koule se skládá ze tří obalů a jádra: vnější vrstva je bělima (sclera), střední vrstva je cévnatka (choroidea) a vnitřní vrstva je sítnice (retina) s receptory. [17]

- Bělima (sclera) – silná vazivová blána, tvořící pevný obal bulvu. V předním úseku přechází bělima do průhledné rohovky.
- Cévnatka – střední vrstva oční koule. Je velmi bohatá na cévy, které zásobují především zevní vrstvy sítnice. V cévnatce jsou buňky obsahující hnědý pigment, zabraňující rozptylu světelných paprsků uvnitř oka.
- Sítnice – vnitřní vrstva oka. Pouze v retině jsou uloženy receptory, schopné reagovat na světelné záření. Stavba sítnice je velmi složitá – skládá se z řady buněčných vrstev. Nejdůležitější fotoreceptorovou vrstvu tvoří tyčinky a čípky, které slouží pro vnímání světla a barvy. [17]

Tyčinky slouží pro vnímání světla a jejich počet se pohybuje kolem 120 milionů. Čípky jsou receptory barevného vidění, kterých je pouze 6 milionů. Tyčinky obsahují pigment rodopsin, těž rhodopsin, někdy zrakový purpur, který absorbuje světlo v celé oblasti

viditelného světla s maximem 498-505 nm [18]. Rodopsin objevil a popsal německý anatom Heinrich Müller v roce 1851. [19]

Rodopsin je hlavním zřakovým pigmentem v retinálních tyčinkách očí mořských bezobratlovců, ryb, téměř všech suchozemských obratlovců a lidí. [20]

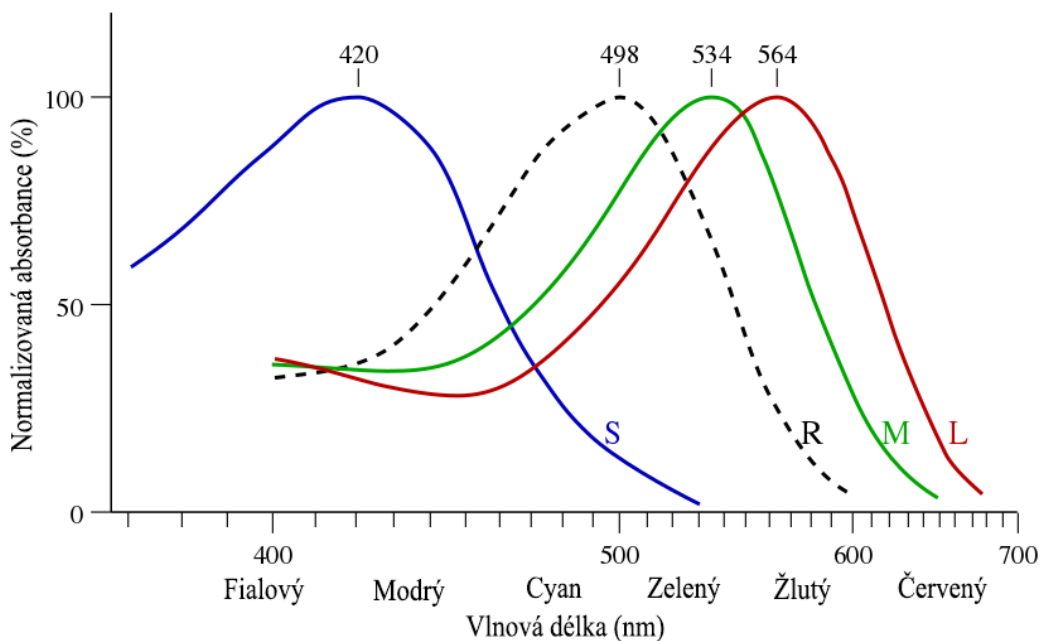


Obrázek 3-2: Spektrální charakteristika absorpce rodopsinu [29]

Specifické absorpční spektrum rodopsinu je určeno jak vlastnostmi chromoforu (γ) a opsinu (α), tak povahou chemické vazby mezi nimi [20]. Toto spektrum má dvě maxima – jedno v ultrafialové oblasti spektra 278 nm a druhé ve viditelné oblasti 500 nm.

V oku spolu s rozkladem zřakového pigmentu neustále probíhá proces jeho regenerace. S adaptací na tmu tento proces končí pouze tehdy, když veškerý volný opsin splyne s retinolem. Z absorpčních křivek charakteristiky rodopsinu je vidět, že redukovaný rodopsin je zodpovědný za noční vidění (skotopické vidění) a při denním vidění (fotopické vidění) se rozkládá a jeho maximální citlivost se posouvá do modré oblasti. [20]

V čípcích se našel pigment jodopsin, který zahrnuje pigment chlorolab, erytrolab a cynolab. Chlorolab je kódován OPN1MW genem, absorbuje paprsky odpovídající zelené části spektra 450-630 nm. Erytrolab (OPN1LW) – červená část spektra 450-630 nm, Cyanolab (OPN1SW) je pigmentem citlivým na modrou část spektra 400-500 nm. [21]



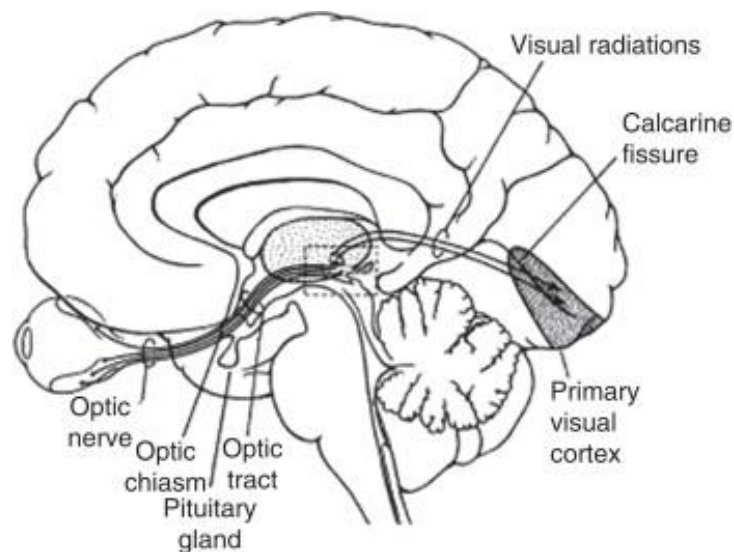
Obrázek 3-3 Absorpční křivky pro tři lidské jodopsiny (spektra absorpce krátkých (S) - cyanolab, středních (M) - chlorolab a dlouhovlnných (L) - erytrolab pigmentů) a pro rodopsin (R – čárkovaná černá křivka) [22]

Tyčinky a čípky jsou nervové buňky specializované na generování elektrických signálů, když na ně dopadne světlo. Úkolem zbytku sítnice a samotného mozku je použít tyto signály k získání biologicky užitečných informací. Výsledkem je vizuální obraz s veškerou složitostí tvaru, hloubky, pohybu, barvy a textury. Čípky jsou umístěny ve střední části sítnice a každá jejich skupina je přímo spojena s mozkiem prostřednictvím vnitřního povrchu sítnice a optického nervu. Také s těmito přímými spojeními existuje v sítnici nespočet místních cest. Světlo, které prochází sklivcem, prochází nejprve vrstvou sítnicové nervové tkáně a cév a teprve poté vstupuje do vrstvy tyčinek a čípků. [23]

V roce 2002 David Berson objevil v sítnici savců nový typ fotoreceptoru, který je zodpovědný za biologické účinky světla [24].

V roce 2007 F. H. Zaidi, R. G. Foster, G. C. Brainard, C. A. Czeisler a S. Lockley, při spolupráci s jinými vědci, zjistili, že u lidí ve vnitřní sítnici jsou analogické receptory jako jsou u některých jiných savců (ipRGC). K výzkumu byli přizváni pacienti se vzácnými nemocemi, které vylučují přítomnost klasických tyčinek a čípků, ale které měly fungující buňky ipRGC. Navzdory absenci tyčinek a čípků byly u pacientů zjištěny cirkadiánní fotozachycení, cirkadiánní behaviorální reakce a reakce zúžení zornice. [25]

Buňky ipRGC (intrinsically photosensitive retinal Ganglion Cell - vnitřní fotocitlivé buňky ganglia sítnice) jsou třetím druhem citlivých buněk, které se podílejí na cirkadiánních rytmech umístěných na vnitřní straně sítnice. Dokonce i při blokování klasických fotoreceptorů (tyčinky a čípky) nebo při použití farmakologické látky a při jejich oddělení od sítnice buňky ipRGC nadále reagovaly na záření. To znamená, že představují třetí třídu receptorů sítnice oka, které se vzruší pod vlivem záření. [26]

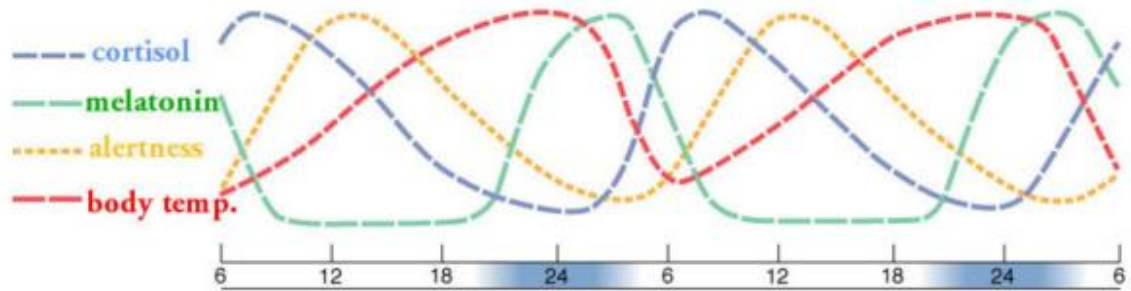


Obrázek 3-4: Nervové vazby mezi sítnicí oka s jeho tyčinkami a čípkami, a zrakovou kůrou [26]

Detekované fotoreceptorové buňky v sítnici oka ovládají nevizuální procesy. Když světlo dosáhne těchto buněk, dochází ke komplexu chemických reakcí (zde za účasti fotopigmentu melanopsinu), které dále vytváří elektrické impulzy. Tyto buňky mají "své" nervové sloučeniny, zejména suprachiasmatické jádro (Suprachiasmatic nucleus - SNC), které je biologickými hodinami mozku a epifyzy (nadvěsek mozkový). [27]

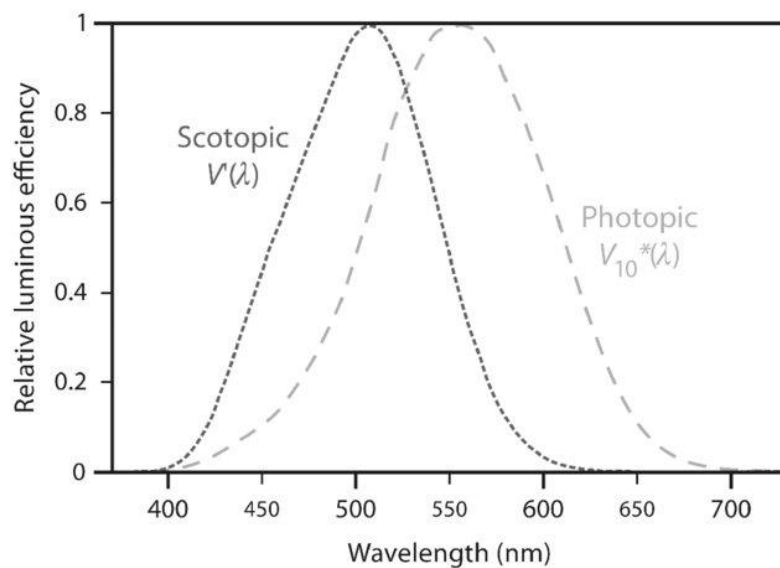
3.1.2 Světelné rytmy a biorytmy člověka

Světlo reguluje cirkadiánní (denní) a roční (sezónní) rytmy celé řady fyzických procesů.



Obrázek 3-5: Dvojitý harmonogram (2x24 hodin). Standardní denní rytmy tělesné teploty, melatoninu, kortizolu v lidském těle a pozornosti pro přirozený 24-hodinový cyklus den/noc [27]

Hormony kortizol ("hormon stresu") a melatonin ("hormon spánku") hrají důležitou roli při řízení pozornosti a spánku. Kortizol také zvyšuje hladinu cukru v krvi a posiluje imunitní systém. Nicméně, s vysokou hladinou kortizolu po dlouhou dobu, se organismus vyčerpá a stává se slabým. Hladina kortizolu se ráno zvyšuje a připravuje tělo na práci pro budoucí den. Zůstává na poměrně vysoké úrovni po celou světlou část dne a klesá na minimum do půlnoci. Hladina hormonu spánku melatoninu klesá ráno, což snižuje ospalost. Obvykle se znovu zvedá, když je tma, což poskytuje zdravý spánek (protože kortizol je na minimální úrovni). Pro normální zdraví je důležité, aby tyto rytmy nebyly narušeny. V případě poruchy rytmu pomáhá jasné světlo v dopoledních hodinách obnovit normální rytmus. [27]

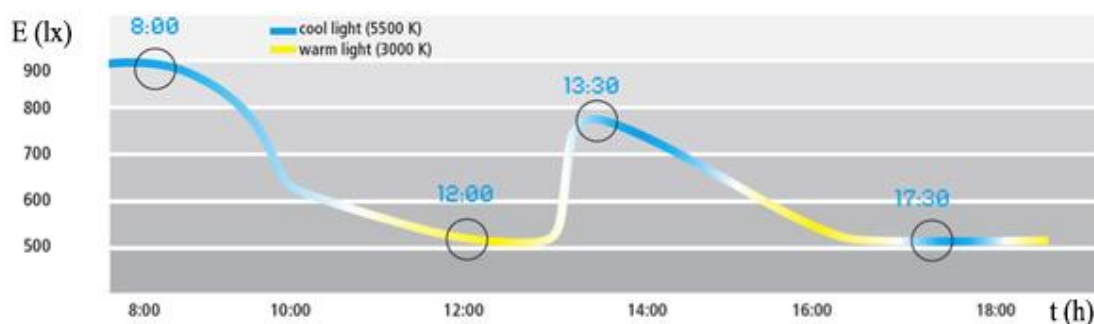


Obrázek 3-6: Fotopická a skotopická křivka spektrální citlivosti průměrného lidského oka [28]

V přirozeném prostředí, světlo, zejména ranní, synchronizuje vnitřní biologické hodiny s 24 hodinovým cyklem den/noc. Bez každodenního dopadu světla bude nesynchronizované období našeho cirkadiánního systému trvat déle než 24 hodin. V důsledku toho dojde ke stále větším odchylkám úrovně denní tělesné teploty, kortizolu a melatoninu od standardních denních rytmtů. Tato deharmonizace při absenci "normálního" rytmu dne/noci může vést k nesprávnému rytmu aktivity a ospalosti, což v konečném důsledku vede k aktivitě v temné době a ospalosti během dne. Ze stejného důvodu jsou stejné příznaky spojené s porušením biorytmů po cestování přes několik časových pásem. [27].

Studie provedené Brainardem v souvislosti s analýzou potlačení melatoninu ukázaly, že křivka spektrální cirkadiánní efektivity foto-biologického systému má maximum v rozmezí 446-477 nm. [29]

Pro dosažení maximálního účinku je třeba vytvořit vyšší úroveň osvětlení na pracovní ploše nebo použít zdroje osvětlení se zvýšeným podílem modrého záření v rozsahu vlnových délek 446-477 nm [Obr. 3-3]. Vyšší úrovně osvětlení také ovlivňují elektroencefalogram (EEG), člověk se stává ohleduplnějším a méně ospalým. Lze tedy využít každodenní dynamiku v osvětlení ke zvýšení produktivity práce, například změnou osvětlení a barevné teploty v závislosti na denní době [30]. Z hlediska chronobiologie by měly být podobné změny zavedeny v místnostech, ve kterých jsou lidé dlouhodobě ve dne nebo v noci. Biologický účinek světla by měl být použit tak, aby byla zajištěna stabilizace rytmu spánku a probuzení. To zahrnuje vytvoření vyšší úrovně osvětlenosti s větší modrou složkou v hloubce místností během dne. [31]



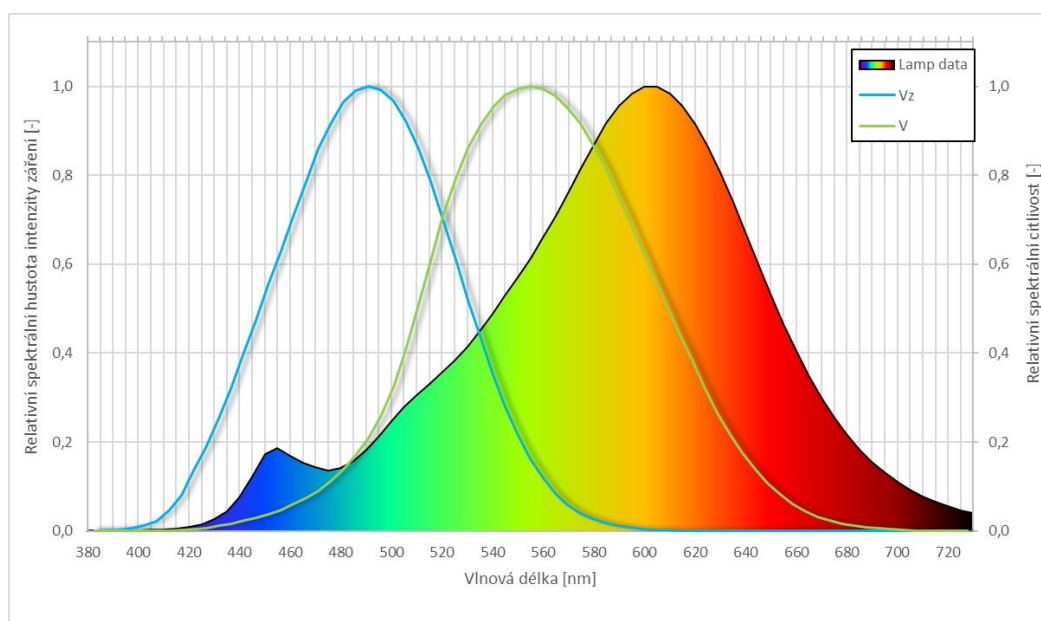
Obrázek 3-7: Simulace denního světla pomocí světelného spektra. 8:00 - Studené, čerstvé světlo zvýší úroveň energie u lidí, které přichází do práce a poskytne dobrý začátek dne. 12:00 - Krátký odpočinek nám pomůže znovu nabít baterie. Úroveň světla se sníží a teplé světlo usnadní relaxaci. 13:30 - Po obědě se obvykle cítíme ospalí. Úroveň světla se opět zvýší a změní se na studené světlo, aby čelilo "prudkému poklesu po obědě" [32]

3.1.3 Melanopický efekt a činitel cirkadiánní účinnosti

Jak již bylo uvedeno výše, cirkadiánní rytmus člověka může být ovlivněn světelnými zdroji.

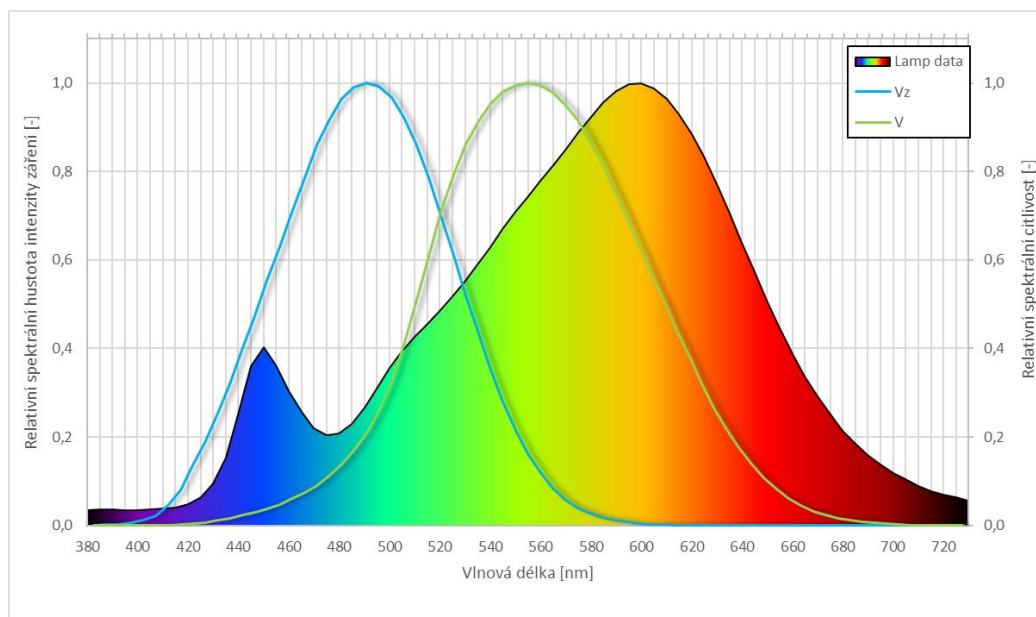
Norma DIN SPEC 67600:2013 - Biologically effective illumination doporučuje potřebné množství světla pro lidské oko během dne v určitých vnitřních prostorech. Například, k dosažení melanopického efektu stačí použít zářivku s teplotou chromatičnosti 8000 K a intenzitou osvětlení 250 lx ve vertikální rovině po dobu 15 minut [33]. Pouze za těchto podmínek nebo při vyšších hodnotách by byl patrný melanopický efekt, který má vliv na cirkadiánní rytmus. Česká technická norma ČSN EN 12464-2 stanovuje hodnoty minimální průměrné osvětlenosti, rovnoměrnosti, indexu CRI a maximální hodnotu oslnění. Při projektování venkovního osvětlení se často projektanti orientují na hodnoty uvedené v normě při výběru vhodných svítidel. Bohužel tato volba může vest k porušení cirkadiánního rytmu při chybné volbě teploty chromatičnosti světelného zdroje svítidel. Proto je nutné při projektování stanovit melanopický činitel, který po násobení intenzitou osvětlení definuje potřebnou osvětlenost na úrovni očí.

Pro grafické zobrazení spektrálních charakteristik jednotlivých světelných zdrojů byla naměřená data vlnových délek v rozsahu 380–720 nm vyjádřena jako poměrná hodnota k maximální dosažené intenzitě záření zdroje.



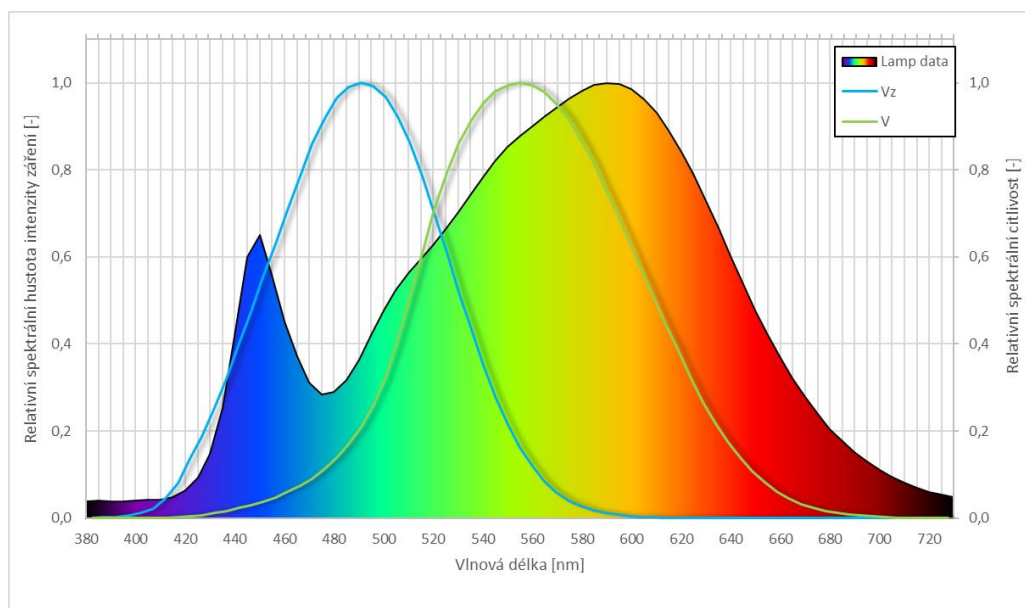
Obrázek 3-8: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3000 K. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fotopického (V) vidění.

Na Obr. 3-8 jsou zobrazena spektra LED zdroje s teplou bílou barvou 3000 K. Z grafu je patrné, že vrchol modré části spektra nedosahuje relativní spektrální hustoty 0,2. Jak bude ukázáno dále, podíl modré složky v oblasti citlivosti melanopsinu je minimální ve srovnání s jinými typy LED zdrojů. Poloha vrcholu modrého spektra se nachází ve vlnové délce 450-455 nm. Hlavní vrchol v oblasti 592–606 nm odpovídá žluto-oranžové části spektrální charakteristiky.



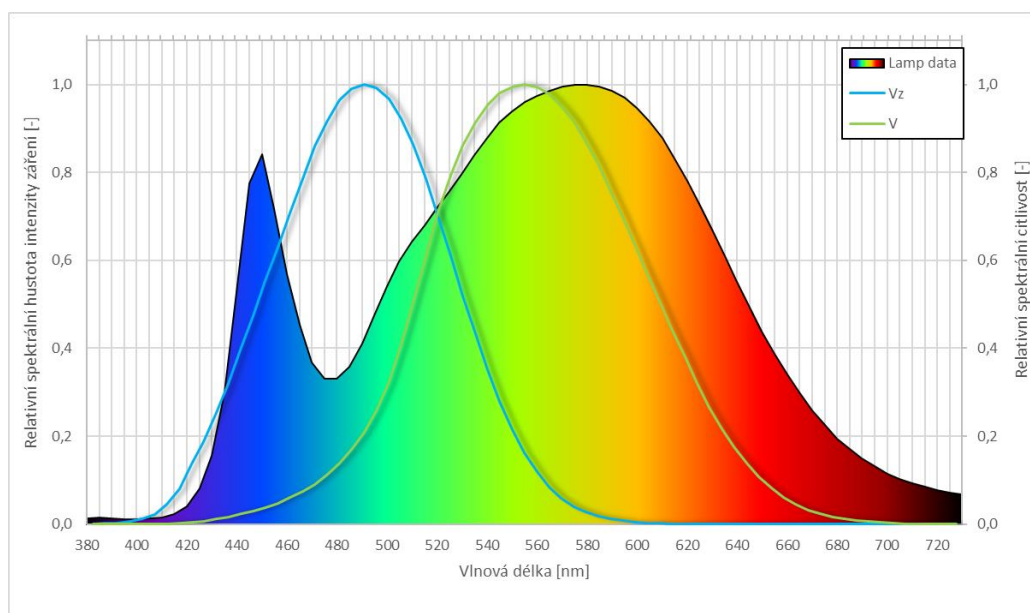
Obrázek 3-9: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3389 K. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fopického (V) vidění.

Na Obr. 3-9 je zobrazena spektrální charakteristika odpovídající teplotě 3389 K světelného LED zdroje. Spektrum se mírně rozšiřuje v oblasti zelené barvy 540-560 nm. V části spektrální citlivosti melanopického vidění vrchol modré složky dosahuje relativní hodnoty 0,4, což je 2krát větší než u zdroje s CCT 3000 K, a nachází se na vlnové délce 430-450 nm.



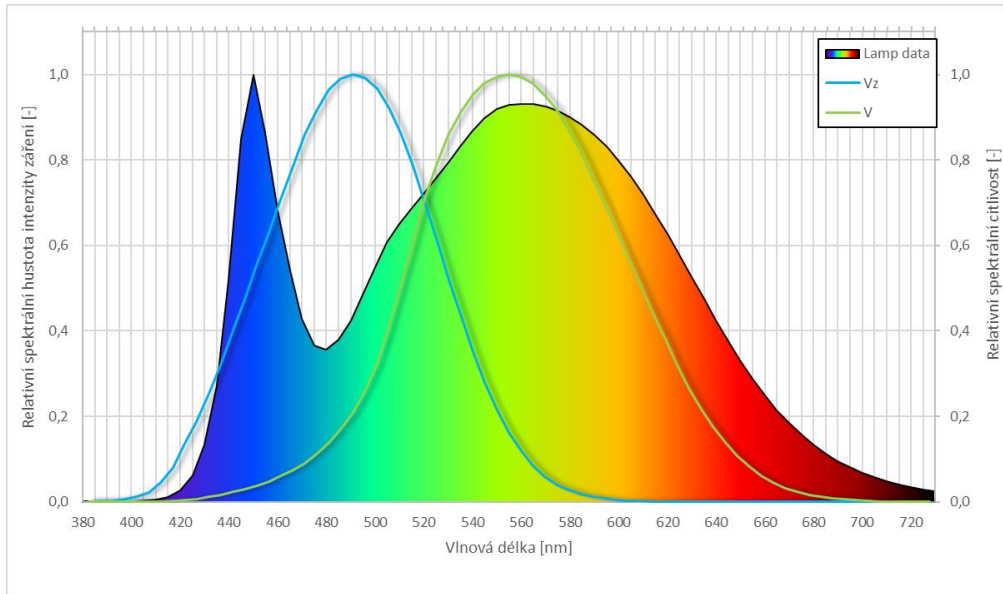
Obrázek 3-10: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3944 K. Spektrální citlivosti melanopického (V_z) a fotopického (V) vidění.

Obr. 3-10 ukazuje velmi výraznou modrou složku spektrální charakteristiky LED zdroje s teplotou chromatičnosti 3944 K. V oblasti spektrální citlivosti melanopického a fotopického vidění stoupá modrá složka spektra na vlnové délce 490–550 nm.



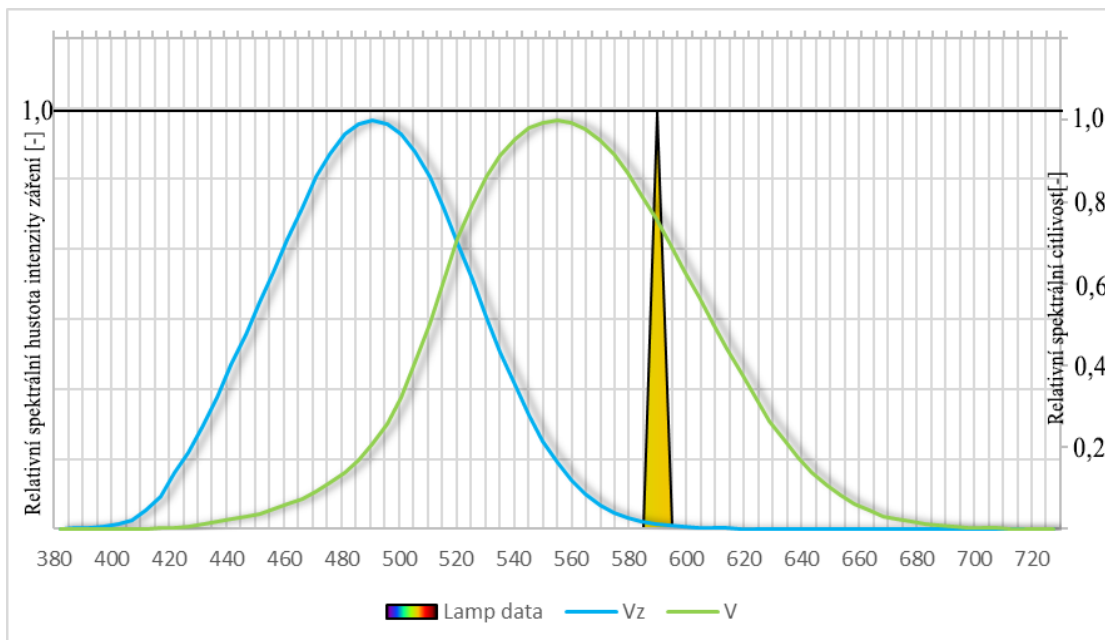
Obrázek 3-11: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 4500 K. Spektrální citlivosti melanopického (V_z) a fotopického (V) vidění.

Na Obr. 3-11 je představena spektrální charakteristika LED zdroje s CCT 4500 K s výrazně širokým vrcholem v efektivní části zeleno-červeného záření na vlnové délce 550-610 nm. Vrchol modrého spektra dosahuje hodnoty relativní spektrální intenzity 0,85.



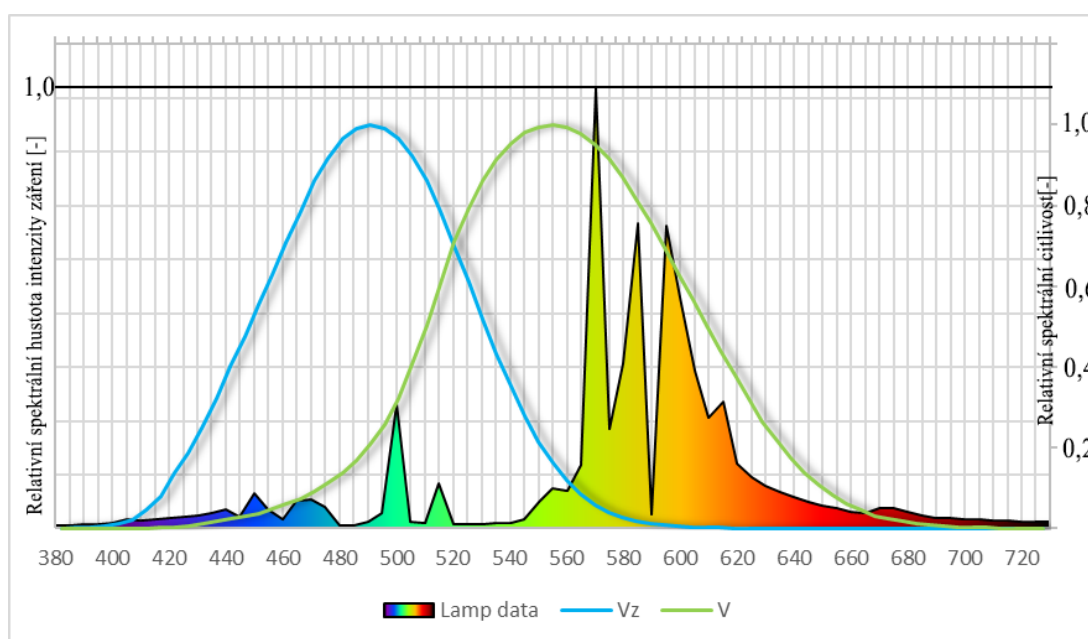
Obrázek 3-12: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 5000 K. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fotopického (V) vidění.

Spektrum na obrázku 3-12 má dva vrcholy s obdobnou relativní spektrální hustotou intenzity záření. První maximum se nachází v poloze modré části spektra na vlnové délce 450 nm a přesahuje druhé maximum. Vrchol druhé efektivní části spektra vypadá jinak, než u předchozích charakteristik a je posunutý v zeleném směru s maximem na 560 nm.



Obrázek 3-13: Spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fotopického (V) vidění.

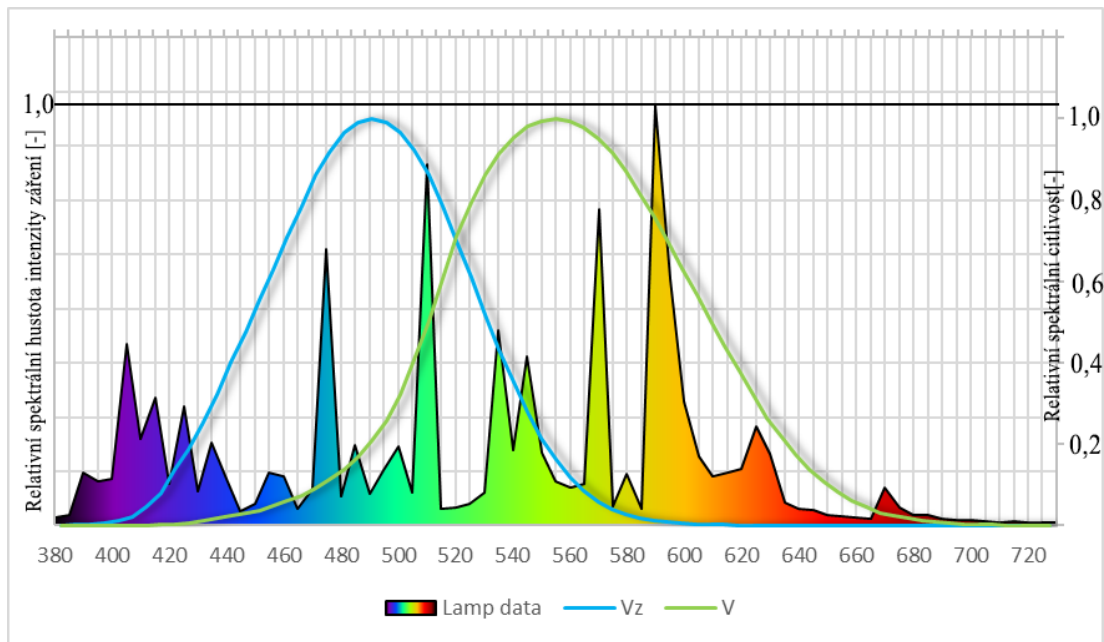
Na Obr. 3-13 je zobrazena spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky. Spektrum má výrazné vrcholy (vzdálenost mezi nimi není viditelná na obrázku) v oblasti 589-589,6 nm, tzv. sodíkový dublet. Spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky se zásadně liší od LED zdrojů. Jedná se o monochromatické spektrum s efektivním zářením pouze na vlnové délce 584-590 nm žluto-oranžové oblasti. Jak je patrné z grafu, nízkotlaká sodíková výbojka vůbec nemá žádnou modrou složku, proto nemá také vliv na potlačení melatoninu v organismu. Tato sodíková výbojka může být použita ve venkovním osvětlení kde na kvalitu barevného rozlišení není kladen velký důraz.



Obrázek 3-14: Spektrální charakteristika vysokotlaké sodíkové výbojky. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fopického (V) vidění.

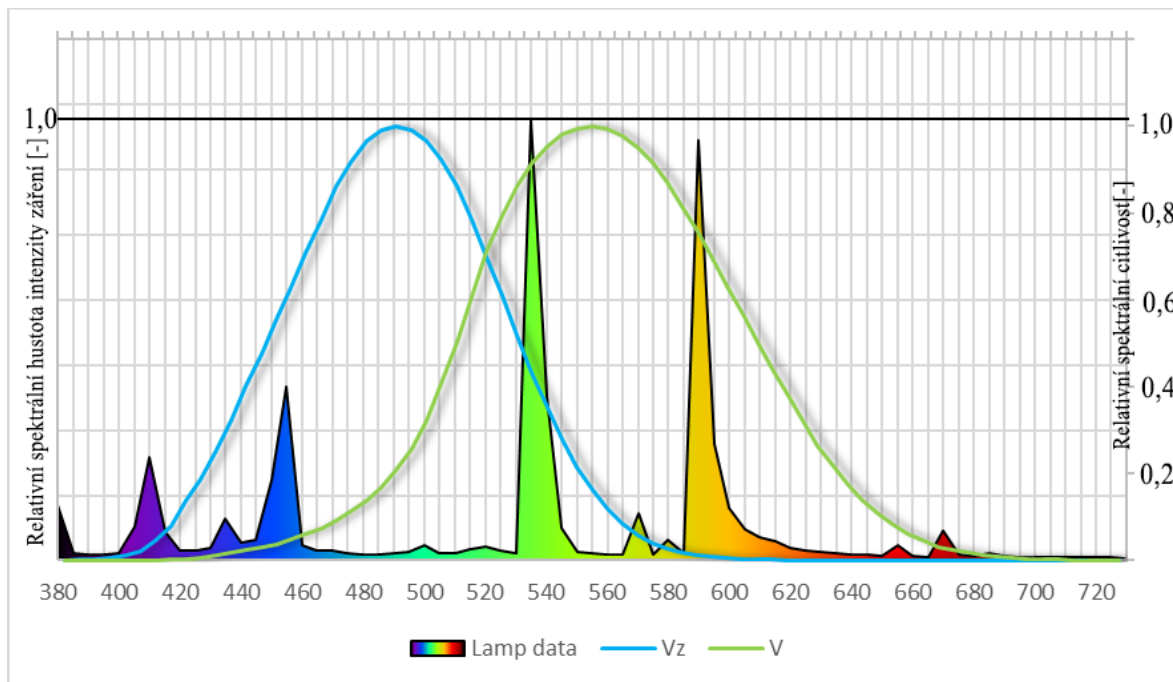
Na obrázku 3-14 je vidět, že světelný zdroj má tři vrcholy v zelené až oranžové oblasti spektra. Výsledné spektrum tedy není natolik monochromatické jako u LPS. Relativní spektrální hustota intenzity záření modré složky je poměrně malá ve srovnání se spektry na vlnových délkách 565 nm až 620 nm.

Index podání barev kvůli vyzařování v určitých spektrech je příliš malý, cca 15-20%.



Obrázek 3-15: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti > 5000 K. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fopického (V) vidění.

Poněkud zajímavější je obrázek 3-15, ze kterého je zřejmé, že charakteristika halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti > 5000 K je velice rozmanitá a má hodně maximálních hodnot v různých částech spektra, čímž dosahuje vysoký index podání barev ($> 80\%$).



Obrázek 3-16: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti > 4000 K. Spektrální citlivosti melanopického (Vz) a fopického (V) vidění.

Obrázek 3-16 ukazuje spektrální charakteristiku halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti > 4000 K. Na rozdíl od předchozího grafu zde můžeme vidět, že v oblasti spektra 460-520 nm světelný zdroj nemá vrcholy modro-zelené složky a má nízký podíl červené složky spektra na vlnové délce 620-640 nm. Index podání barev je vyšší než u HPS, ale zůstává na úrovni kolem 65%.

Na rozdíl od předchozích světelných zdrojů, halogenidové výbojky mají určitý podíl v ultrafialové oblasti spektra a používají se v soláriích a v polygrafii.

Na základě získaných spektrálních hodnot světelných zdrojů lze dále vypočítat účinky na cirkadiánní rytmus. Jedním z účinků je melanopický efekt.

Hodnota melanopického efektu se určí z rovnice 3.1 [33]:

$$a_{mel}\{X(\lambda)\} = \frac{\int_{380}^{720} X_{e,\lambda} V_Z(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{720} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \cdot k \quad (3.1)$$

kde $X_{e,\lambda}$ – relativní spektrální složení naměřených hodnot světelného zdroje

$V_Z(\lambda)$ – relativní spektrální citlivost melanopického vidění

$V(\lambda)$ – relativní spektrální citlivost fotopického vidění

k – konstanta 1,218 pro melanopické vidění

Tabulka 3-1: Porovnání melanopického efektu pro světelné zdroje

	Světelný zdroj	CCT [K]	CRI [%]	Melanopický efekt [-]	M / M _{LED} 3000 K	M / M _{LPS}
1	LED	3000	87	0,384	1 x	32 x
2	LED	3389	88	0,501	1,3 x	41,8 x
3	LED	3944	83	0,605	1,6 x	50,4 x
4	LED	4500	80	0,668	1,7 x	55,7 x
5	LED	5000	80	0,75	1,9 x	62,5 x
6	LPS	-	-	0,012	0,06 x	1 x
7	HPS	2057	15	0,271	0,7 x	22,6 x
8	MH-HQI-T	5500	80	0,795	2 x	66,3 x
9	MH-RVI	4100	65	0,575	1,5 x	47,92 x

Analýza spektrálních charakteristik světelných zdrojů, které se v současné době používají k osvětlení venkovních prostorů, venkovních pracovních míst a pozemních komunikací umožňuje dospět k závěru, že nejméně vhodné z hlediska narušení

cirkadiánního rytmu a s největším melanopickým efektem jsou světelné zdroje s výraznou modrou částí spektra. To jsou LED světelné zdroje s teplotou chromatičnosti 5000 K a halogenidové výbojky. Hodnota melanopického efektu halogenidové výbojky (HQI-T) činí 0,795, což je 2krát více v porovnání s LED zdrojem s nízkou teplotou chromatičnosti 3000 K, a 66,3 krát více proti nízkotlaké sodíkové výbojce, která vyzařuje pouze žluto-oranžové monochromatické spektrum.

Pro získání efektivního ozáření všech lidských jodopsinů (S-cone - cyanolab, M-cone – chlorolab, L-cone - erytrola), rodopsinu [Obr.3-3] a melanopsinu, byl použit program Toolbox α -opic.

Tabulka 3-2: Ozáření fotoreceptorů světelných zdrojů

	Světelný zdroj	CCT [K]	S-cone-opic	M-cone-opic	L-cone-opic	Rhodopic	Melanopic
1	LED	3000	0,112	0,939	1,379	0,542	0,384
2	LED	3389	0,2	1,04	1,429	0,67	0,501
3	LED	3944	0,283	1,074	1,377	0,77	0,605
4	LED	4500	0,334	1,095	1,346	0,831	0,668
5	LED	5000	0,398	1,128	1,327	0,909	0,75
6	LPS	-	0,005	0,19	0,815	0,027	0,012
7	HPS	2057	0,132	0,87	1,406	0,384	0,271
8	MH-HQI-T	5500	0,388	1,122	1,358	0,925	0,795
9	MH-RVI	4100	0,388	1,122	1,358	0,925	0,575

Dalším účinkem na cirkadiánní rytmus je činitel cirkadiánní účinnosti, který se dá vyjádřit pomocí koeficientu a_{cv} z rovnice 3.2 [33]

$$a_{cv}\{X(\lambda)\} = \frac{\int_{380}^{720} X_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{720} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \cdot k \quad (3.2)$$

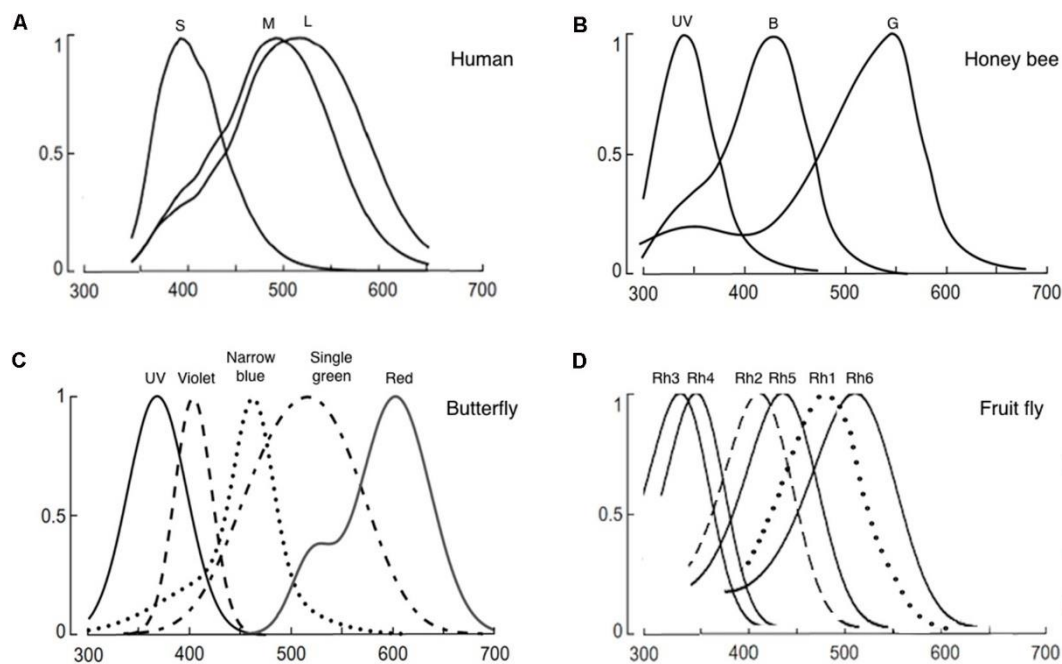
kde $X_{e,\lambda}$ – relativní spektrální složení získaných hodnot světelného zdroje

$C(\lambda)$ – relativní spektrální citlivost cirkadiánního vidění

$V(\lambda)$ – relativní spektrální citlivost fotopického vidění

Hlediskem LRC (Lighting Research Center of the Rensselaer Polytechnical Institute in Troy, New York) byla vytvořena webová kalkulačka pro výpočet hodnoty činitele a hodnoty cirkadiánní osvětlenosti. Podle LRC hodnota cirkadiánního činitele leží v rozmezí 0,1 (minimální vliv) až 0,7 (maximální vliv), za předpokladu, že doba ozáření 1 hodina. [33]

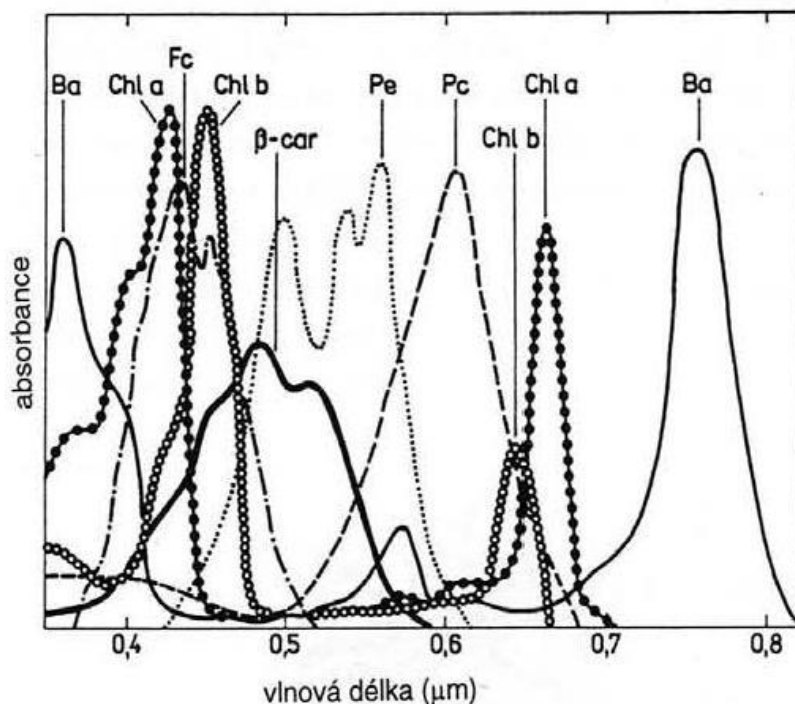
3.1.4 Charakteristiky fotoreceptorů živočichů a rostlin



Obrázek 3-17: Křivky spektrálních citlivostí zrakových pigmentů člověka a hmyzů. A – člověk; B – včela; C – motýl; D – octomyška [34]

Obrázek 3-17 ukazuje absorpční křivky pro zrakové pigmenty hmyzu. Z obrázku je patrné, že u různých druhů hmyzů se počet křivek výrazně liší od lidských. Vrcholy spektrální citlivosti opsínů se pohybují v rozmezí od 310 do 600 nm. Z grafu je také patrné, že hmyz má opsiny, které absorbují spektra v ultrafialové oblasti. Například zrakové pigmenty motýlů UV a Red absorbují více světelných paprsků produkovaných halogenidovou výbojkou než LED zdrojem. V hladině 300-450 nm UV budou čípky produkovat opsiny od světelných zdrojů s větší fialovo-modrou částí záření.

Rostlina absorbuje vlnové délky a energii záření v různých poměrech (viz Obr. 3-18). Pro zelené rostliny je nejdůležitějším spektrem záření tzv. fotosynteticky aktivní záření v rozmezí 380 až 760 nm. Zelená rostlina tak pro fotosyntézu využívá záření přibližně ve stejném rozsahu jako je viditelné světlo (tedy 400–750 nm).



Obrázek 3-18: Křivky spektrálních citlivostí fotosyntetických pigmentů rostlin. Pigmenty: Ba – bakteriochlorofyl, Chl a - chlorofyl a, Fc – fykoxantin, Chl b - chlorofyl b, β-car – β-karoten, Pe fykoerytrin, Pc – Fykocyani. [35]

Chlorofyly a některé další pigmenty, které se aktivně podílejí na procesu fotosyntézy absorbují různé barevné složky spektra slunečního záření v různém množství.

Obsah pigmentů je v různých rostlinách odlišný, nelze tedy stanovit univerzální závislost účinnosti fotosyntézy na vlnové délce (barevné složce) světla pro všechny druhy rostlin.

Například chlorofyl nejlépe absorbuje modrofialové a červené části spektra.

Chlorofyl se v procesu fotosyntézy považuje za nejdůležitější pigment a ostatní jsou jen pigmenty doplňkové, proto lze tvrdit, že nejvíce se na fotosyntéze podílí část spektra v modrofialové a červené oblasti (přibližně 400–500 nm a 600–700 nm). [35]

3.2 Vliv venkovních osvětlovacích soustav na lidské zdraví

Pod světelnou kopulí žije více než 80% světové populace a ve Spojených státech amerických společně s Evropskou unií tato hodnota zahrnuje 99% obyvatel. Podle počtu obyvatel má Singapur nejvíce znečištěnou oblohu na světě, následuje Kuvajt, Katar a Spojené arabské emiráty-všechny jsou hustě obydlené země. Naproti tomu Čadská republika patří do top 10 nejméně znečištěných zemí Afrického kontinentu. [36]

Polovina přebytečného osvětlení vzniká v důsledku fungování dopravních systémů. A to zase tím nejnegativnějším způsobem ovlivňuje rostlinný svět, živočišný svět a člověka.

Přesto se nemůžeme vzdát umělého osvětlení na silnicích, zato můžeme snížit jeho negativní dopad na bezprostřední okolí. [37]

Zvýšený jas oblohy ve městech je výsledkem rozptýlení umělého světla v atmosféře, které zastíňuje přirozené pozadí noční oblohy. Tento efekt je pro astronomy mimořádně škodlivý a také negativně ovlivňuje nervovou soustavu lidí [6].

Řada současných studií se věnuje přímému negativnímu vlivu umělého osvětlení na rostliny, zvířata i člověka, a odhaduje se, že od 35% do 50% světelného znečištění je způsobeno osvětlením vozovky. Nepřímý účinek světelného znečištění spočívá v tom, že neúčinný světelný tok způsobuje zbytečnou spotřebu elektrické energie, jejíž produkce způsobuje další znečištění životního prostředí. [6]

3.2.1 Vliv melatoninu na sebevědomí člověka

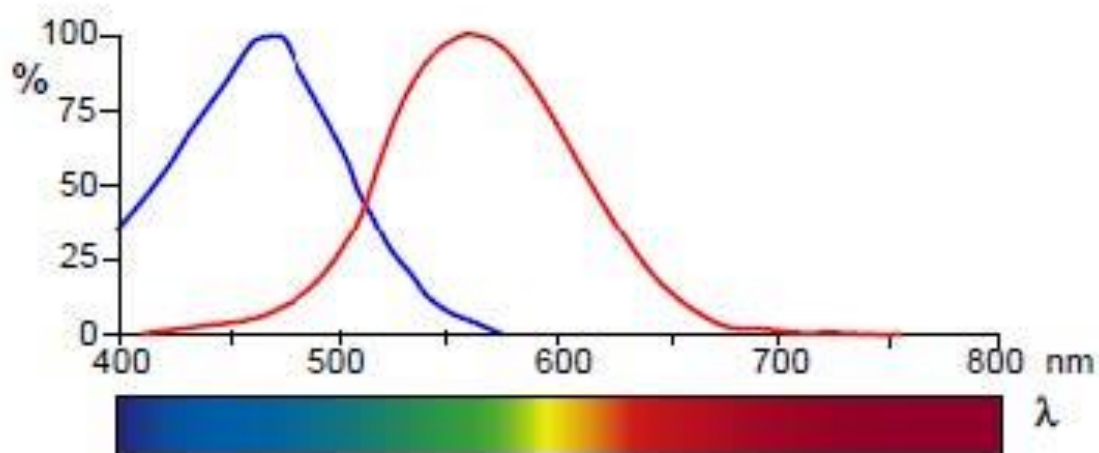
Na lidské sebevědomí podle některých výzkumů má vliv osvětlení již více než 1000 lx (sluneční paprsky v poledne na středních zeměpisných šířkách vytvářejí osvětlení v řádu 100000 lx, což je osvětlení na otevřeném místě v zataženém dni) přičemž i barevný ton je rovněž důležitý. V práci Brainarda G.C. se ukazuje, že optické záření v rozsahu 430-470 nm má přímý dopad na tvorbu melatoninu v lidském těle. [38]

I když účinek melatoninu v těle není zcela jasný, experimenty na zvířatech dávají důvod se domnívat, že posiluje funkci stimulující životnost organismu endokrinních žláz, jako jsou hypofýzy, nadledviny, pohlavní žlázy a slinivka břišní. Melatonin se navíc podílí na regulaci krevního tlaku, funkcí trávicího traktu, fungování mozkových buněk. Tento nejdůležitější hormon, který provádí antioxidační a imunomodulační funkci může být produkován pouze ve tmě. U dospělého člověka se v průměru za den syntetizuje 30 mg melatoninu, jeho koncentrace v krevním séru v noci je 30krát větší než ve dne, přičemž vrchol aktivity připadá na 2 h v noci, již v 9 h ráno jeho obsah v krvi klesá na minimální hodnoty. U člověka noční hodiny tvoří 70 % denní produkce melatoninu. [38]

Brainard G.C zjistil, že hladina melatoninu se u člověka snížila nejvíce, když byli dobrovolníci s rozšířenými zorničkami vystaveni působení monochromatického modrého světla s délkou vlny 464 nm po dobu 90 minut mezi 2:00 hodinou v noci a 3:30 ráno, při osvětlení oka (zornička) pouhých 0,1 lx, což je ekvivalentní osvětlení při měsíčním světle. Brainard navrhl "nový" fotoreceptor oddělený od tyčinek a čípek, kterým se následně ukázal melanopsin. [37]

Melanopsin je citlivý na foton pigment modrého světla a je v malém množství obsažen v buňkách ipRGC. Buňky ipRGC se nacházejí hluboko v sítnici oka. Tyto specializované buňky nejsou zrakové fotoreceptory jak, se myslelo dříve, ale lze usuzovat, že pouze přenášejí po nervu k mozku impulzy detekovaného světla rozpoznávaného melanopsinem. [37]

Citlivost ipRGC buněk se mění pro různé vlnové délky světla. Na základě biologického faktoru "potlačení melatoninu" byl Brainard (Brainard) již schopen určit spektrální křivku "biologického účinku"



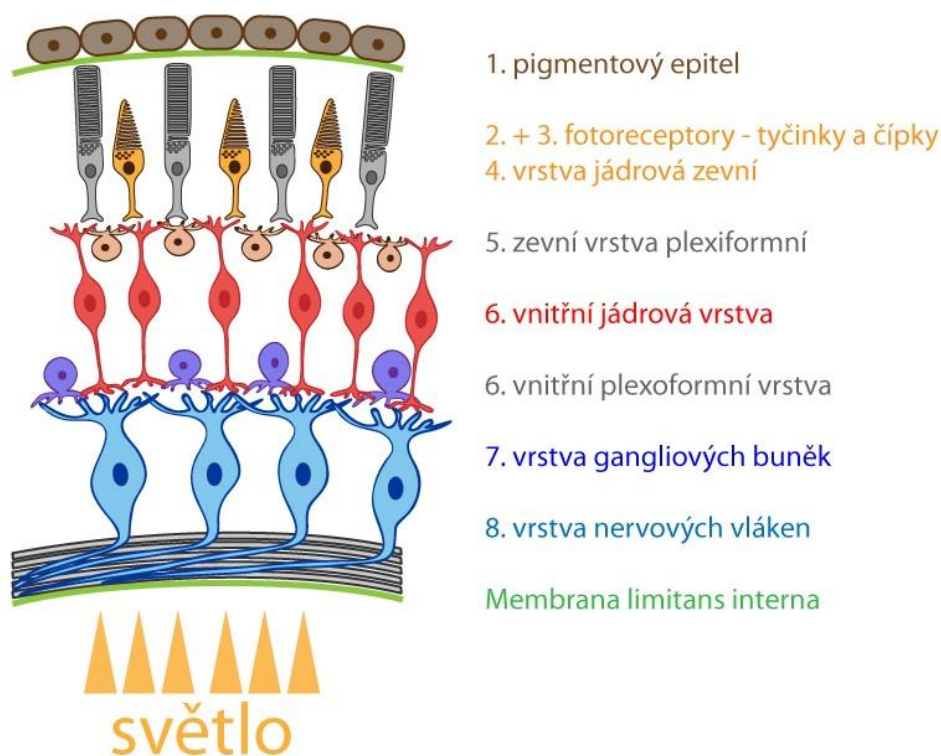
Obrázek 3-19: Relativní spektrální cirkadiánní účinnost (na základě potlačení melatoninu) - modrá křivka, relativní spektrální křivka citlivosti oka – červená křivka [27]

Při porovnávání dvou křivek je vidět, že křivka relativní spektrální cirkadiánní účinnosti je docela odlišná od relativní spektrální křivky citlivosti oka. Maximum spektrální citlivosti oka se nachází v rozmezí žluto-zelené vlnové délky - 555 nm, zatímco maximum spektrální cirkadiánní účinnosti leží v modré oblasti spektra na vlnových délkách mezi 460 a 464 nm. Tento jev je důležitý při vytváření zařízení, které poskytují pohodlnější podmínky pro člověka. [27]

Buňky ipRGC mají tři primární funkce:

1. Hrají hlavní roli při synchronizaci cirkadiánních rytmů během 24 hodin jednoho světelného / tmavého cyklu;
2. Přenášejí informace do jiných částí mozku, například do oblasti mozku ovládající zorničku a do oválného pretectálního jádra. Přispívají tak k regulaci velikosti zornice a dalším behaviorálním reakcím při změně okolního osvětlení;

3. Podílejí se na ochraně oka před zářením a na potlačení reakce na náhlé "ostré" osvětlení (přímé sluneční osvětlení, elektrosvařování, paprsek světlometu atd.) díky vylučování hormonálního melatoninu z epifýzy. [27]



Obrázek 3-20: Stavba sítnice [39]

Sítnice je tvořena vrstvou pigmentového epitelu a dále vrstvou nervových buněk. Světločivná část sítnice pokrývá většinu vnitřního povrchu oční koule. [17]

3.2.2 Onemocnění a poruchy způsobené poklesem melatoninu

Chronické poruchy cirkadiálního rytmu mohou mít potenciál vážně ovlivnit lidské zdraví. Například snížení hladiny melatoninu hraje důležitou roli při rozvoji chronických onemocnění a stavů, jako je rakovina [40] [41] [42], kardiovaskulární onemocnění [43], reprodukce [44], endometrióza [44], gastrointestinální a zažívací potíže [45], cukrovka [46], [47], obezita [48], deprese [49], deprivace spánku [50] a kognitivní porucha [51].

Obecně se usuzuje, že porušení cirkadiálního rytmu způsobuje zdravotní riziko u pracovníků v nočních směnách a u letušek, kteří potenciálně trpí prací v režimu jet-lag a noční směnou. Zatímco přítomnost okolního světla během nočního spánku souvisí

s cirkadiánními poruchami, snížené zdravotní riziko souvisí s dlouhou dobou spánku a u slepých žen [52]. Výsledky prospektivních kohortových studií dále důsledně naznačují, že u žen s nejnižší koncentrací hlavního metabolitu melatoninu sulfatoxymelatoninu je nejvyšší riziko rakoviny prsu [53], [54].

Podle výzkumu [55] provedeného vědci se ukázalo, že pacienti, kteří původně měli vysokou hladinu vlastního melatoninu a ti, kteří dostávali hormon ve formě léku, spolehlivě přežili resuscitaci. Melatonin zvyšoval šance na zotavení, a to jak u koronaviru, tak u jakékoli jiné infekce, která postihuje plíce.

V současné době četné studie potvrdily, že hlavní roli v mechanismu sezónních změn lidského těla mají změny v produkci melatoninu přísně sledující fotoperiodu. Přítomnost sezónního rytmu produkce melatoninu je nezbytnou podmínkou zdraví lidského organismu. [56] To potvrzují fakta o nárůstu depresivních stavů a alkoholismu u osob s narušeným sezónním rytmem sekrece melatoninu při přesunu ze středních zeměpisných šířek do práce na Dálném severu a také fakt, že u pacientů s maligními novotvary chybí sezónní rytmus produkce melatoninu [56].

Melatonin je tedy hormon s unikátními adaptivními schopnostmi. Porušení jeho produkce, kvantitativně i rytmicky, je výchozím bodem vedoucím v počátečních stádiích k desynchronóze, po níž následuje vznik organické patologie. V důsledku toho samotná skutečnost porušení produkce melatoninu může být příčinou různých onemocnění.

Funkce melatoninu jako regulátoru sezónní reprodukce u zvířat a lidí se nyní považuje za očividnou [56]. Porodní bolesti se častěji objevují v noci a porod ráno [56]. Mechanismus, který určuje dobu porodu, není stále zcela jasný, existují však práce potvrzující závislost doby porodu na denní fotoperiodicitě u lidí [56]. Dlouhodobé vystavení tmě nebo pulzaci světla může u mladých lidí zkrátit i prodloužit dobu porodu [56]. Význam fotoperiodicity jako faktoru řídícího dobu porodnu začíná být zjevný. Jak víte, právě melatonin, syntetizovaný v epifýze matky, přenáší informace o fotoperiodě a délce dne plodu. Maximum melatoninu v těle matky bylo nalezeno mezi 24:00 a 05:00 h [56], což se shoduje s vrcholy melatoninu v plodové vodě a v děloze a tato hladina v době porodu ještě stoupá. Dlouhotrvající poruchy mohou těhotenství náhle ukončit.

ZÁVĚR

Tato práce se zabývala zkoumáním nežádoucích účinků venkovního osvětlení na okolní prostředí. Na základě literární rešerše byl zpracován přehled požadavků technických norem a doporučení k zamezení nežádoucího vlivu venkovních osvětlovacích soustav na okolní prostředí. Informace v této části byla vypracovaná dle technických norem a doporučení pro projektování venkovního osvětlení a omezení nežádoucích účinků rušivého světla.

Dále byli popsány charakteristiky konvenčních i moderních světelných zdrojů využívaných ve venkovním osvětlení.

Na základě získaných dat spektrálních charakteristik světelných zdrojů byli vypočteny grafy spektrálních charakteristik světelných zdrojů. Byli vypočteny účinky, které působí na cirkadiánní rytmus a potlačují melatonin v organismu člověka. Bylo provedeno porovnávání spektrálních křivek citlivosti zrakových pigmentů člověka a hmyzu. Byli zjištěny křivky spektrální citlivosti fotosyntetických pigmentu rostlin.

V poslední části diplomové práce byl posouzen vliv melatoninu na sebevědomí člověka a popsána problematika onemocnění a poruch způsobených poklesem melatoninu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CIE – Commission International De L'éclairage

ČSN – původně znamenala Československá státní norma, nyní je chráněné označení českých technických norem

ULOR – Upward Light Output Ratio

DLOR – Downward Light Output Ratio

LOR – Light Output Ratio

ULR – Upward Light Ratio

SI – Mezinárodní systém jednotek

CRI – color rendering index

SEZNAM LITERATURY

- [1] *SBÍRKA ZÁKONŮ*: Zákon, kterým se mění zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší), ve znění zákona č. 521/2002 Sb [online]. 2004. Dostupné také z: <https://www.sagit.cz/info/sb04092>
- [2] ČSN EN 12665 (36 001): Světlo a osvětlení - Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [3] Oxford English Dictionary. 7th edition. Oxford: Oxford University Press, 2013. ISBN 0199640947.
- [4] MAIXNER, Tomáš a Jaroslav KOTEK. Světlo v zákoně o ovzduší aneb „Nekonečný příběh“. SVĚTLO [online]. 2004(01) [cit. 2021-05-13]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetlo-v-zakone-o-ovzdusi-aneb-nekonecny-pribeh--16545>
- [5] MAIXNER, Tomáš. Rušivé světlo Část 1. – Názvosloví a legislativa. SVĚTLO [online]. 2005(05) [cit. 2021-04-13]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/rusive-svetlo-cast-1-nazvoslovi-a-legislativa-16484>
- [6] SHAFLIK, Carl. Light pollution. Environmental effects of roadway lighting [online]. University of British Columbia. Department of Civil Engineering, 1995 [cit. 2021-06-13]. Dostupné z: <http://www.shaflik.com/documents/LIGHT%20POLLUTION%20TECHNICAL%20PAPER.pdf>
- [7] LUGINBUHL, Christian B., Paul A. BOLEY a Donald R. DAVIS. *The impact of light source spectral power distribution on sky glow*. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer [online]. 2014, **139**, 21-26 [cit. 2021-04-13]. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004
- [8] ŽÁK, P. a J. HABEL. *Veřejné osvětlení Prahy: Základní analýza pro MHMP*. 2015.
- [9] ČSN EN 12464-2 (36 0450): Světlo a osvětlení — *Osvětlení pracovních prostorů — Část 2: Venkovní pracovní prostory*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [10] *CIE 126:1997 Technical report: Guidelines for minimizing sky glow*. 1997. ISBN 3900734836.
- [11] *CIE 150:2017 Technical report: Guide on the Limitation of the Effects of Obtrusive Light, 2nd Edition*. 2017. ISBN 978-3-902842-48-0.
- [12] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Marek BÁLSKÝ. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [13] MARC, Od. Color Rendering Index LED Lights: Bulb, Strip, Downlight, Fixtures, Panel, Tube - <https://lednews.lighting>. Lednews [online]. Dostupné také z: <https://lednews.lighting/topic/2192-color-rendering-index-led-lights-%E2%80%A2-bulb-strip-downlight-fixtures-panel-tube/>
- [14] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světlo: Světelné zdroje – vysokotlaké sodíkové výbojky [online]. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-nizkotlake-sodikove-vybojky--15758>
- [15] Philips: Katalog výrobků [online]. 2021. Dostupné také z: <https://www.lighting.philips.cz/prof>

- [16] DVORŤÁČEK, Vladimír. Světlo: Světelné zdroje – nízkotlaké sodíkové výbojky [online]. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetelne-zdroje-nizkotlake-sodikove-vybojky--15758>
- [17] DYLEVSKÝ, Ivan a Petr JEŽEK. *Základy funkční anatomie člověka* [online]. 2012 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://vos.palestra.cz/skripta/anatomie/15a2a5>
- [18] *Velký lékařský slovník: rhodopsin* [online]. 1998–2021 [cit. 2021-05-17].
- [19] Островский, М.А. Глаз и Солнце, или Фотохимия зрения. *Химия и жизнь*. 2008, (2), 4-9.
- [20] HUBBARD, R., D. BOWNDS a T. YOSHIZAWA. The Chemistry of *Visual* Photoreception. Cold Spring Harbor Symposia on *Quantitative Biology* [online]. 1965, **30**(0), 301-315 [cit. 2021-11-13]. ISSN 0091-7451. Dostupné z: doi:10.1101/SQB.1965.030.01.032
- [21] NATHANS, J, D THOMAS a D. HOGNESS. Molecular genetics of human color vision: the genes encoding blue, green, and red pigments. *Science*. 1986, **232**(4747), 193-202. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.2937147
- [22] BOWMAKER, J K a H J DARTNALL. Visual pigments of rods and cones in a human retina. *The Journal of Physiology*. 1980, **298**(1), 501-511. ISSN 00223751. Dostupné z: doi:10.1113/jphysiol.1980.sp013097
- [23] HUBEL, David H. *Eye, Brain, and Vision*. 1st ed. New York: W H Freeman & Co, 1988. ISBN 978-0716750208.
- [24] LIESEGANG, Thomas J. *Phototransduction* by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Berson D, *E-mail: David_Berson@brown.edu Dunn FA, Takao M. *Science* 2002;295. *American Journal of Ophthalmology*. 2002, **134**(1). ISSN 00029394. Dostupné z: doi:10.1016/S0002-9394(02)01551-9
- [25] ARKHANGELSKIY, D.V. a V.Yu. SNETKOV. *Light influence on human circadian rhythms: researches of the visual efficiency and the relative fatigue of asthenopia*. Вестник МЭИ. Moscow: Moscow Power Engineering Institute (MPEI), 2012, (6). ISSN 1993-6982.
- [26] KEDAR, S. Optic Chiasm and Tract. *Encyclopedia of the Neurological Sciences*. Elsevier, 2014, , 669-671. ISBN 9780123851581. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-385157-4.00147-0
- [27] VAN BOMMEL, WJM a GJ VAN DEN BELD. Lighting for work: a review of visual and biological effects. 2004, **36**(4), 255-266. ISSN 1477-1535. Dostupné z: doi:10.1191/1365782804li122oa
- [28] VERHOEVEN, Geert J J a Efstratios STYLIANIDIS, ed., Fabio REMONDINO. *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage: Basics of photography for cultural heritage imaging* [online]. Whittles Publishing, 2016.
- [29] BRAINARD, George C., John P. HANIFIN, Jeffrey M. GREESON, Brenda BYRNE, Gena GLICKMAN, Edward GERNER a Mark D. ROLLAG. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience* [online]. 2001, **21**(16), 6405-6412 [cit. 2021-06-01]. ISSN 0270-6474. Dostupné z: doi:10.1523/JNEUROSCI.21-16-06405.2001
- [30] ZHANG, Rongpeng, Carolina CAMPANELLA, Sara ARISTIZABAL, Anja JAMROZIK, Jie ZHAO, Paige PORTER, Shaun LY a Brent A. BAUER. Impacts of Dynamic LED Lighting on the Well-

Being and Experience of Office Occupants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020, 17(19). ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph17197217

- [31] WOJTYSIAK, Andreas a Liu JIANPING. *Биологическое действие освещения – традиционного и светодиодами. Светотехника*. Moscow, 2013, (2), 17-19. ISSN 2587-8662.
- [32] MELOVÁ, Soňa. Vliv osvětlení na fungování biologických hodin. FREYA LED: Úsporné LED osvětlení a svítidla [online]. Dostupné také z: <https://freyaled.com/cs/blog/vliv-osvetleni-na-fungovani-biologickyh-hodin>
- [33] VAN DER STEEN, Marcel. How effective is light on the circadian rhythm of humans?. *Olino. Renewable energy* [online]. Dostupné také z: <https://www.olino.org/blog/us/articles/2018/04/06/how-effective-is-light-on-the-circadian-rhythm-of-humans-use-the-cs>
- [34] SONG, Bo-Mi a Chi-Hon LEE. Toward a Mechanistic Understanding of Color Vision in Insects. *Frontiers in Neural Circuits* [online]. 2018, 12(16), 9. ISSN 1662-5110. Dostupné z: doi:10.3389/fncir.2018.00016
- [35] PROCHÁZKA, Stanislav. *Fyziologie rostlin* [online]. Praha: Academia, 1998. ISBN 80-200-0586-2.
- [36] FALCHI, Fabio, Pierantonio CINZANO, Dan DURISCOE et al. The new world *atlas of artificial night sky brightness*. *Science Advances* [online]. 2016, 2(6) [cit. 2021-04-13]. ISSN 2375-2548. Dostupné z: doi:10.1126/sciadv.1600377
- [37] PAULEY, Stephen M. Lighting for the human circadian clock: recent research indicates that *lighting* has become a public health issue. *Medical Hypotheses*. 2004, 63(4), 588-596. ISSN 03069877. Dostupné z: doi:10.1016/j.mehy.2004.03.020
- [38] BRAINARD, G.C. Photoreception for *regulation of melatonin and the circadian systems in humans*. *Fifth International LRO lighting research symposium*. Orlando, 2002.
- [39] FONTANA, Josef. *Funkce buněk a lidského těla: Multimediální skripta se cvičebnicí Josef Fontana*. Praha: 3rd Faculty of Medicine, Charles University, 2014.
- [40] YOUNG, Martin E. a Molly S. BRAY. Potential role for peripheral circadian clock *dysynchrony in the pathogenesis of cardiovascular dysfunction*. *Sleep Medicine*. 2007, 8(6), 656-667. ISSN 13899457. Dostupné z: doi:10.1016/j.sleep.2006.12.010
- [41] POOLE, Elizabeth M., Eva S. SCHERNHAMMER a Shelley S. TWOROGER. Rotating Night Shift Work and Risk of *Ovarian Cancer*. 2011, 20(5), 934-938. ISSN 1055-9965. Dostupné z: doi:10.1158/1055-9965.EPI-11-0138
- [42] KVASKOFF, Marina a Philip WEINSTEIN. Are some melanomas caused by artificial light?. *Medical Hypotheses*. 2010, 75(3), 305-311. ISSN 03069877. Dostupné z: doi:10.1016/j.mehy.2010.03.010
- [43] HAUS, Erhard a Michael SMOLENSKY. Biological Clocks and Shift Work: Circadian Dysregulation and Potential Long-term Effects. 2006, 17(4), 489-500. ISSN 0957-5243. Dostupné z: doi:10.1007/s10552-005-9015-4

- [44] MAHONEY, Megan M. Shift Work, Jet Lag, and Female Reproduction. *International Journal of Endocrinology*. 2010, 2010, 1-9. ISSN 1687-8337. Dostupné z: doi:10.1155/2010/813764
- [45] CODONER-FRANCH, Pilar a Marie GOMBERT. Circadian rhythms in the pathogenesis of gastrointestinal diseases. *World Journal of Gastroenterology*. **2018**, 24(38), 4297-4303. ISSN 1007-9327. Dostupné z: doi:10.3748/wjg.v24.i38.4297
- [46] CERMAKIAN, N. a D. B. BOIVIN. The regulation of central and peripheral circadian clocks in humans. *Obesity Reviews*. 2009, 10, 25-36. ISSN 14677881. Dostupné z: doi:10.1111/j.1467-789X.2009.00660.x
- [47] KREIER, Felix, Andries KALSBECK, Hans P. SAUERWEIN, Eric FLIERS, Johannes A. ROMIJN a Ruud M. BUIJS. "Diabetes of the elderly" and type 2 diabetes in younger patients: Possible role of the biological clock. *Experimental Gerontology*. 2007, **42**(1-2), 22-27. ISSN 05315565. Dostupné z: doi:10.1016/j.exger.2006.07.004
- [48] BASS, J. a J. S. TAKAHASHI. Circadian Integration of Metabolism and Energetics. *Science*. 2010, 330(6009), 1349-1354. ISSN 0036-8075. Dostupné z: doi:10.1126/science.1195027
- [49] BOYCE, Philip a Erin BARRIBALL. Circadian rhythms and depression. *Clinical. Australian Family Physician*, 2010, (395), 307-310.
- [50] RANA, Sobia a Saqib MAHMOOD. Circadian rhythm and its role in malignancy. *Journal of Circadian Rhythms*. 2014, 8(0). ISSN 1740-3391. Dostupné z: doi:10.1186/1740-3391-8-3
- [51] STEVENS, Richard G., David E. BLASK, George C. BRAINARD, Johnni HANSEN, Steven W. LOCKLEY, Ignacio PROVENCIO, Mark S. REA a Leslie REINLIB. Meeting Report: The Role of Environmental Lighting and Circadian Disruption in Cancer and Other Diseases. *Environmental Health Perspectives*. 2007, 115(9), 1357-1362. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.10200
- [52] STEVENS, R. G. Light-at-night, circadian disruption and breast cancer: assessment of existing evidence. *International Journal of Epidemiology*. 2009, **38**(4), 963-970. ISSN 0300-5771. Dostupné z: doi:10.1093/ije/dyp178
- [53] TRAVIS, R. C., D. S. ALLEN, I. S. FENTIMAN a T. J. KEY. Melatonin and Breast Cancer: A Prospective Study. *JNCI Journal of the National Cancer Institute*. 2004, 96(6), 475-482. ISSN 0027-8874. Dostupné z: doi:10.1093/jnci/djh077
- [54] SCHERNHAMMER, Eva S. a Susan E. HANKINSON. Urinary Melatonin Levels and Postmenopausal Breast Cancer Risk in the Nurses' Health Study Cohort. 2009, 18(1), 74-79. ISSN 1055-9965. Dostupné z: doi:10.1158/1055-9965.EPI-08-0637
- [55] RAMLALL, Vijendra, Jason ZUCKER a Nicholas TATONETTI. Melatonin is significantly associated with survival of intubated COVID-19 patients [online]. Dostupné z: doi:10.1101/2020.10.15.20213546
- [56] Беспятых, А.Ю., В.Я. Бродский, О.В. Бурлакова, В.А. Голиченков, Л.А. Вознесенская, Д.Б. Колесников, А.Ю. Молчанов а С.И. Рапопорт. *МЕЛАТОНИН: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА* [online]. Москва, 2009. ISBN 978-5-98803. Dostupné také z: https://istina.msu.ru/media/publications/books/ef9/555/2567982/Melatonin__teoriya_i_praktika.pdf

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1-1: Limity rušivého světla pro venkovní osvětlení.....	6
Tabulka 1-2: Rozdělení environmentální osvětlovacích zón.....	6
Tabulka 1-3: Minimální délka mezi hranicemi environmentální zóny.....	7
Tabulka 2-1: Příklad barevných teplot.....	12
Tabulka 3-1: Porovnání melanopického efektu pro světelné zdroje.....	29
Tabulka 3-2: Ozáření fotoreceptorů světelných zdrojů.....	30

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1: Světlo vyzařované umělými světelnými zdroji patří do osvětlovací soustavy venkovního osvětlení a lze ho rozdělit na užitečné světlo a neužitečné světlo.....	4
Obrázek 1-2: Vliv montážní výšky na omezení neužitečného světla a oslnění osvětlovací soustavy ..	8
Obrázek 1-3: Úhly zaměření osvětlovací soustavy.....	8
Obrázek 1-4: Eliminace světelného toku.....	8
Obrázek 1-5: Osvětlení fasády a svislých ploch.....	9
Obrázek 1-6: Užití asymetrických křivek svítivosti.....	9
Obrázek 2-1: Křivka svítivosti svítidel v polárních souřadnicích.....	11
Obrázek 2-2: Vnímání lidským okem různých úrovní CRI.....	11
Obrázek 2-3: Škála teploty chromatičnosti.....	12
Obrázek 2-4: Rozdělení světelných zdrojů na třídy.....	13
Obrázek 2-5: Spektrální charakteristika vysokotlaké sodíkové výbojky.....	14
Obrázek 2-6: Spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky.....	14
Obrázek 2-7: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s denní teplotou chromatičnosti	15
Obrázek 2-8: Spektrální charakteristika vysokotlaké rtuťové výbojky.....	15
Obrázek 2-9: Spektrální charakteristika LED zdroje.....	16
Obrázek 3-1: Schéma stavby očního jablka.....	17
Obrázek 3-2: Spektrální charakteristika absorpce rodopsinu.....	18
Obrázek 3-3: Absorpční křivky pro tři lidské jodopsiny.....	19
Obrázek 3-4: Nervové vazby mezi sítnicí oka s jeho tyčinkami a čípkami, a zrakovou kůrou.....	20
Obrázek 3-5: Dvojitý harmonogram (2x24 hodin).	21
Obrázek 3-6: Fotopická a skotopická křivky spektrální citlivosti průměrného lidského oka.....	21
Obrázek 3-7: Simulace denního světla pomocí světelného spektra.....	22
Obrázek 3-8: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3000 K.....	23
Obrázek 3-9: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3389 K.....	24
Obrázek 3-10: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 3944 K.....	25
Obrázek 3-11: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 4500 K.....	25
Obrázek 3-12: Spektrální charakteristika LED s teplotou chromatičnosti 5000 K.....	26
Obrázek 3-13: Spektrální charakteristika nízkotlaké sodíkové výbojky.....	26
Obrázek 3-14: Spektrální charakteristika vysokotlaké sodíkové výbojky.....	27
Obrázek 3-15: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti >5000 K.....	28
Obrázek 3-16: Spektrální charakteristika halogenidové výbojky s neutrální bílou teplotou chromatičnosti >4000 K.....	28
Obrázek 3-17: Křivky spektrálních citlivostí zrakových pigmentů člověka a hmyzů.....	31
Obrázek 3-18: Křivky spektrálních citlivostí fotosyntetických pigmentů rostlin.....	32
Obrázek 3-19: Relativní spektrální cirkadiánní účinnost.....	34
Obrázek 3-20: Stavba sítnice.....	35