



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VLIV MODRÉHO SVĚTLA NA LIDSKÝ ORGANISMUS

THE EFFECT OF THE BLUE LIGHT ON THE HUMAN BODY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Dvořák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Štěpánek

BRNO 2016

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Petr Dvořák

ID: 151999

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Vliv modrého světla na lidský organismus

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte literární rešerši znalostí vztahu lidského těla a modrého světla.
2. Popište světelné zdroje a zaměřte se na obsah modrého světla v jejich spektru.
3. Realizujte praktické měření vybraných svítidel a zdrojů v laboratoři světelné techniky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Štěpánek

Konzultant bakalářské práce:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Bibliografická citace práce:

DVOŘÁK, P. Vliv modrého světla na lidský organismus. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 78 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Štěpánek.

Jako autor uvedené diplomové (bakalářské) práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky**

Bakalářská práce

Vliv modrého světla na lidský organismus

Petr Dvořák

vedoucí: Ing. Jaroslav Štěpánek

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2016

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

The effect of the blue light on the human body

by

Petr Dvořák

Supervisor: Ing. Jaroslav Štěpánek

Brno University of Technology, 2016

Brno

ABSTRAKT

Tato práce vysvětluje pojem „modré světlo“. Zabývá se zdroji modrého světla a účinky tohoto typu elektromagnetického záření na lidský organismus. Pozornost je věnována především problémům, které může modré světlo způsobit. Největším nebezpečím je desynchronizace cirkadiánního rytmu a fotochemické poškození sítnice – fotoretinitida („blue light hazard“). Jsou zde popsány základní principy fungování biologických pochodů a zrakového systému, které jsou řízeny vlastnostmi dopadajícího světla na sítnici lidského oka. Ve druhé polovině práce jsou sepsány základní informace o umělých zdrojích modrého světla běžně se vyskytujících v domácnostech a v průmyslu. Po změření těchto zdrojů a následném zpracování jsou na konci práce uvedena jejich elektromagnetická spektra a jsou zde porovnány z hlediska cirkadiánních účinků.

KLÍČOVÁ SLOVA: modré světlo; elektromagnetické záření; cirkadiánní rytmus; blue light hazard; gangliové buňky; světelné zdroje

ABSTRACT

This thesis explains the term „blue light“. It deals with the sources of blue light and the effects of this type of electromagnetic radiance on human body. The focus is concentrate especially on problems, which are evocated of blue light. The biggest danger is the desynchronization of circadian rhythm and photochemical damage of retina – photoreinitis („blue light hazard“). The basic principles of biological processes and the visual system are described here. These processes are controlled by properties of incident light onto the retina of eye. The basic information about artificial sources of blue light commonly used in households and in industry are mentioned in the second half of work. These light sources were measured and elaborated. The electromagnetic spectrums of sources are portrayed and there is a comparison of sources due circadian effect too.

KEY WORDS: blue light; electromagnetic radiation; circadian rhythm; blue light hazard; ganglion cells; light sources

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	14
2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ	15
2.1 NEIONIZUJÍCÍ ZÁŘENÍ.....	16
2.2 OPTICKÉ ZÁŘENÍ.....	16
2.3 SLUNEČNÍ ZÁŘENÍ	17
2.4 ULTRAFIALOVÉ ZÁŘENÍ.....	18
2.5 INFRAČERVENÉ ZÁŘENÍ.....	19
3 MODRÉ SVĚTLO A LIDSKÝ ORGANISMUS.....	20
3.1 CIRKADIÁNNÍ RYTMUS.....	20
3.2 POČÁTKY ZKOUMÁNÍ SVĚTELNÝCH ÚČINKŮ NA BIOLOGICKÉ HODINY	21
3.3 ZRAKOVÝ SYSTÉM	22
3.4 STAVBA LIDSKÉHO OKA.....	22
3.5 GANGLIOVÉ BUŇKY	23
3.6 VLIV MODRÉHO SVĚTLA NA CIRKADIÁNNÍ RYTMUS.....	24
3.6.1 MODRÉ SVĚTLO JAKO LÉK	25
3.6.2 MODRÉ SVĚTLO JAKO HROZBA	25
3.6.3 OCHRANA PROTI ÚČINKŮM MODRÉHO SVĚTLA	26
3.7 CITLIVOST CIRKADIÁNNÍHO SYSTÉMU	28
3.8 FOTOCHEMICKÉ POŠKOZENÍ SÍTNICE MODRÝM SVĚTLEM	31
4 UMĚLÉ ZDROJE MODRÉHO SVĚTLA.....	34
4.1 ELEKTROLUMINISCENČNÍ ZDROJE	34
4.1.1 PRINCIP FUNKCE	34
4.1.2 SPEKTRUM LED	36
4.1.3 BÍLÁ LED.....	36
4.2 VÝBOJOVÉ ZDROJE	39
4.2.1 ZÁŘIVKA	39
4.2.2 VYSOKOTLAKÉ VÝBOJOVÉ ZDROJE	42
4.3 TEPLOTNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE	44
4.3.1 ŽÁROVKY	45
4.4 LCD OBRAZOVKY	46
4.4.1 LCD OBRAZOVKY A MODRÉ SVĚTLO	47
4.5 BIODYNAMICKÉ OSVĚTLENÍ.....	49
5 POROVNÁVÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PODLE VLIVU NA CIRKADIÁNNÍ RYTMUS	50
5.1 VÝPOČET CIRKADIÁNNÍCH ÚČINKŮ ZÁŘENÍ	52

5.1.1 ČINITEL CIRKADIÁNNÍ ÚČINNOSTI	52
5.1.2 MELANOPICKÉ OSVĚTLENÍ	55
5.1.3 METODA A – OSVĚTLENÍ	56
5.1.4 RSE FAKTOR	57
6 MĚŘENÍ	60
6.1 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	62
6.2 SROVNÁNÍ ZMĚŘENÝCH SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	65
6.3 ZMĚŘENÁ SPEKTRA SVĚTELNÝCH ZDROJŮ	69
7 ZÁVĚR	74
POUŽITÁ LITERATURA	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Barevné spektrum	15
Obr. 2-2 Spektrum elektromagnetického záření (převzato z [15]).....	16
Obr. 2-3 Spektrální složení záření dopadajícího na zemi (převzato z [27])	18
Obr. 3-1 Stavba lidského oka (převzato z [20])	22
Obr. 3-2 Spektrální citlivost světločivných buněk na sítnici lidského oka (modifikováno z [33]) ..	24
Obr. 3-3 Tvorba melatoninu během noci při různých podmínkách (modifikováno z [12])	26
Obr. 3-4 Tvorba melatoninu u zcela zdravého člověka během dne, lidé s rozhozeným cirkadiánním cyklem mají vrcholové hodnoty melatoninu podstatně nižší (modifikováno z [26])	27
Obr. 3-5 Závislost citlivosti visuálního a cirkadiánního systému na fotonické osvětlenosti (převzato z [4]).....	28
Obr. 3-6 Světelné zdroje se stejnou cirkadiánní stimulací (převzato z [4]).....	29
Obr. 3-7 Brainardova a Thapanova $C(\lambda)$ křivka (převzato z [36]).....	30
Obr. 3-8 $C(\lambda)$ křivka vzniklá zprůměrováním výsledků Brainarda a Thapana (převzato z [7]) ...	30
Obr. 3-9 Relativní citlivost sítnice na vznik fotoretinitidy („blue light hazard“), (převzato z [35])	32
Obr. 4-1 Zapojení PN přechodu v propustném směru (převzato z [3])	35
Obr. 4-2 Zapojení PN přechodu v závěrném směru (převzato z [3])	35
Obr. 4-3 Emisní spektrum modré, zelené, žluté, červené a bílé LED (převzato z [3]).....	36
Obr. 4-4 Míšení barev využívané v RGB systému (převzato z [9])	37
Obr. 4-5 Spektrum bílé LED – fosforový luminofor buzený modrým světlem (převzato z [3]).....	37
Obr. 4-6 Typická spektra bílých LED s různou teplotou chromatičnosti (převzato z [9]).....	38
Obr. 4-7 Zářivka T5 HE 14W/865 chladně bílá (převzato z [31]).....	41
Obr. 4-8 Zářivka T5 HE 14W/840 neutrálně bílá (převzato z [31])	41
Obr. 4-9 Zářivka T5 HE 14 W/830 teple bílá (převzato z [31]).....	42
Obr. 4-10 Spektrum rtuťové výbojky HQL SUPER DL 80 W E27 (převzato z [31]).....	43
Obr. 4-11 Spektrum halogenidové výbojky POWERBALL HCI – T 35 W/830 WDL PB (převzato z [31]).....	43
Obr. 4-12 Spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky VIALOX NAV-E 50 W SUPER 4Y (převzato z [31]).....	44
Obr. 4-13 Spektrum halogenové žárovky HAL CL A 77 W 230 V E27 (převzato z [31])	46
Obr. 4-14 Potlačení melatoninu v závislosti na jasu LCD a na jeho vzdálenosti od spektrofotometru v tmavé místnosti (převzato z [12])	48
Obr. 4-15 Potlačení melatoninu v závislosti na jasu LCD a na jeho vzdálenosti od spektrofotometru v osvětlené místnosti (převzato z [12]).....	48

Obr. 5-1 Rozložení činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} v prostoru (převzato z [6]).....	51
Obr. 5-2 Hodnoty činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} v barevném prostoru CIE 1931 (převzato z [6]).....	53
Obr. 5-3 Poměrné spektrální složení standardizovaného denního světla (převzato z [20]).....	54
Obr. 5-4 Spektrální citlivosti fotopického $V(\lambda)$, skotopického $V'(\lambda)$, melanopického $V^z(\lambda)$ a cirkadiánního vidění $C(\lambda)$, které jsou normalizovány na jednotnou vrcholovou hodnotu, (převzato z [1]).....	55
Obr. 5-5 Světelná účinnost fotopického $K(\lambda)$, skotopického $K'(\lambda)$ a melanopického vidění $K^z(\lambda)$, (převzato z [1]).....	56
Obr. 5-6 Spektrální citlivosti jednotlivých fotoreceptorů, (plocha pod každou křivkou je stejně velká), (převzato z [1]).....	57
Obr. 6-1 Náhled na měřicí pracoviště před měřením vysokotlaké sodíkové výbojky.....	61
Obr. 6-2 Zapojení světelného zdroje	61
Obr. 6-3 Závislost činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} na teplotě chromatičnosti T_c změřených světelných zdrojů	64
Obr. 6-4 Změřená spektra žárovek.....	69
Obr. 6-5 Změřená spektra barevných LED	69
Obr. 6-6 Změřená spektra bílých LED s různou teplotou chromatičnosti T_c	70
Obr. 6-7 Změřená spektra lineárních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c	70
Obr. 6-8 Změřená spektra lineárních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c	71
Obr. 6-9 Spektrum červené kompaktní zářivky	71
Obr. 6-10 Spektrum fialové kompaktní zářivky a rtuťové výbojky	72
Obr. 6-11 Spektra sodíkových výbojek	72
Obr. 6-12 Spektra halogenidových výbojek	73
Obr. 6-13 Spektra kompaktních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c	73

SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Nejvýznamnější tělesné pochody během jednoho cirkadiánního cyklu (převzato z [33])	21
Tab. 3-2 Hodnoty $C(\lambda)$ křivky (převzato z [7])	31
Tab. 4-1 Hodnoty vážené záře L_B LCD obrazovek v závislosti na teplotě chromatičnosti [35]	47
Tab. 5-1 Fotometrické veličiny (převzato z [18])	50
Tab. 5-2 Radiometrické veličiny (převzato z [18])	51
Tab. 5-3 Hodnoty indexu A_c u vybraných světelných zdrojů (modifikováno z [5])	54
Tab. 5-4 Označení fotoreceptorů	56
Tab. 5-5 Hodnoty RSE faktoru a ekvivalentní osvětlenosti ipRGC u vybraných světelných zdrojů (převzato z [1])	59
Tab. 6-1 Seznam změřených světelných zdrojů	60
Tab. 6-2 Seznam změřených světelných zdrojů	62
Tab. 6-3 Seřazené změřené zdroje podle velikosti cirkadiánních účinků	65
Tab. 6-4 Porovnání cirkadiánních účinků světelných zdrojů pomocí fotopické osvětlenosti E_v (lx), (1. část tabulky)	66
Tab. 6-5 Porovnání cirkadiánních účinků světelných zdrojů pomocí fotopické osvětlenosti E_v (lx), (2. část tabulky 6-4)	67

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol (zkratka)	Název
LED	Dioda emitující světlo
RSE	Relativní spektrální účinnost
LCD	Display z tekutých krystalů
V (λ)	Spektrální citlivost oka pro danou vlnovou délku
UV	Ultrafialové záření
IR	Infračervené záření
SAR	Specifická míra absorpce
AM	Faktor masy vzduchu
SCN	Suprachiasmatická jádra
ipRGCs	Vnitřní fotosensitivní sítnicové gangliové buňky
SAD	Sezónní afektivní porucha
C (λ)	Spektrální citlivost cirkadiánního čidla pro danou vlnovou délku
PN	Polovodič typu P, N
W	Chemická značka wolframu
a_{cv}	Činitel cirkadiánní účinnosti
A_c	Cirkadiánní aktivační účinek
CIE	Mezinárodní komise pro osvětlování
CRT	Zobrazovací katodová trubice
CCFL	Fluorescenční výbojka se studenou katodou
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
FL	Zářivka
CFL	Kompaktní zářivka
E_{ec1}	Cirkadiánní ozáření v původní měřené vzdálenosti r_1 od světelného zdroje ($W.m^{-2}$)
E_{ec2}	Cirkadiánní ozáření ve vzdálenosti r_2 , ve které světelný zdroj produkuje fotopickou osvětlenost 500 lx ($W.m^{-2}$)
E_v	Fotopická osvětlenost (lx)
E_{cL2}	Cirkadiánní (melanopická) osvětlenost ($m-lx$)

1 ÚVOD

V dřívějších dobách lidé byli zvyklí pouze na přirozené světlo. Také jejich aktivita v průběhu dne a ročního období se odvíjela na základě intenzity slunečního záření. V noci jedinými světelnými zdroji byl měsíc, který odráží sluneční svit, a otevřený oheň. Tyto zdroje však produkují jen velmi malý světelný tok. Od ohně a svíček se postupně přešlo k olejovým a plynovým lampám, které měli lepší světelné parametry, a proto se také hojně využívaly k nočnímu osvětlení v domácnostech, na veřejných místech a v prvních továrnách. Největší dopad na společnost, co se týče rozvoje světelné techniky, byl až vynález žárovky T. A. Edisonem v roce 1879. Toto období elektrifikace a motorizace, které je nazýváno druhou průmyslovou revolucí, umožnilo rozsáhlejší dělbu práce a vedlo k masové výrobě v různých továrnách. Lidé byli nuceni pracovat v nočních hodinách a celkově jejich noční život s postupným vývojem umělého osvětlení začal být mnohem bohatší. Stále více si zvykali být vzhůru dlouho do noci a tím porušovat přirozené biologické pochody v organismu. V našem těle totiž máme biologické hodiny, které řídí funkci jednotlivých orgánů a pokud tyto hodiny přetočíme, můžou nastat zdravotní komplikace. Na tento problém se přišlo až o mnoho let později a teprve v několika posledních desetiletích proběhlo a ještě probíhají intenzivní výzkumy. Během 20. století se objevily další nové světelné zdroje, které se začaly umisťovat do svítidel. Na základě požadovaných světelných parametrů a výchozích podmínek se pro daný prostor navrhuje nejvhodnější rozmístění, počet a typ svítidla. Při tomto návrhu osvětlovacích soustav se však až do dnešní doby hledí převážně na potřebný zrakový výkon při prováděné činnosti a zapomíná se, že by se také mělo zvlášť zohledňovat biologické působení zdroje. Proto také vznikla tato práce, aby připomněla, že světlo má i jinou roli v lidském organismu než jen vyvolat zrakový vjem. Světlo ovlivňuje délku a kvalitu spánku (řídí biologické hodiny), zmírňuje sezónní deprese, má také vliv na výkonnost pracovníků a na výskyt některých vážných onemocnění. [23, 38]

Senzitivita zrakového systému je dána křivkou $V(\lambda)$, spektrální citlivostí lidského oka. Ta nám říká, že oko je nejvíce citlivé na zelenou barvu. Cirkadiánní (z lat. circa – okolo, dies – den) biorytmus však reaguje na světlo odlišně. Největší vliv představuje záření o vlnové délce 430 – 500 nm, což odpovídá světlu modré barvy. Modré světlo je vysokoenergetické a při přímém působení na sítnici může poškodit světločivné buňky a tím zničit zrak. Těmto nebezpečím a celkovému působení modrého světla na lidský organismus a jeho zdrojům je věnována tato práce.

2 ELEKTROMAGNETICKÉ ZÁŘENÍ

Světlo je jedním z druhů elektromagnetického vlnění. Elektromagnetickým vlněním je nazýván děj, při kterém dochází k přesunu elektrického a magnetického pole v prostoru. Elektrické pole je určeno vektorem intenzity **E** a magnetické pole vektorem magnetické indukce **B**. Tyto vektory jsou si navzájem kolmé a zároveň jsou kolmé také ke směru, kterým se záření šíří. Rychlost světla ve vakuu je $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Skládá se z vln o délce 390 nm až 790 nm. Jeho frekvenci můžeme vyjádřit a určit ze známého vztahu:

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ (m)} \quad (2.1)$$

kde: λ – vlnová délka

c – rychlost světla ve vakuu (m.s^{-1})

f – frekvence (Hz)

Vlnový interval mezi 390 nm a 790 nm vyznačuje část elektromagnetického spektra, kterému říkáme barevné spektrum. Pouze toto záření je schopné zpracovat náš zrakový systém. Každá vlnová délka vyvolá u člověka různý vjem, který charakterizujeme jako barva světla. Nejkratší délky vnímáme jako fialové světlo, naopak nejdelší jako světlo červené. Modré barvě odpovídá vlnová délka v rozmezí 430 nm až 500 nm. Elektromagnetické záření o jedné vlnové délce je nazýváno monochromatickým zářením.



Obr. 2-1 Barevné spektrum

Každý světelný zdroj vyzařuje elektromagnetické vlny v kvantech. Tyto kvanta energie označujeme jako fotony. Fotony jsou zvláštním typem částic, projevují totiž částicové i vlnové vlastnosti (např. odraz, lom). Energie fotonů je přímo úměrná frekvenci záření:

$$E = h \cdot f \text{ (eV)} \quad (2.2)$$

kde: E – energie záření

f – frekvence (Hz)

h – Planckova konstanta ($h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$)

Z viditelného spektra v sobě největší energii obsahuje záření odpovídající fialové a modré barvě. [29]

Barevné spektrum je pouze malou částí z celkového elektromagnetického spektra, které zahrnuje všechny možné vlnové délky záření. Jak můžeme vidět na obrázku, spektrum viditelného záření směrem ke kratším vlnovým délkám sousedí se zářením ultrafialovým a na druhé straně s infračerveným zářením. Jednotlivé úseky záření jsou rozděleny nejenom podle frekvence, ale také podle původu záření. Z tohoto důvodu se můžou jednotlivé segmenty v některých vlnových oblastech navzájem překrývat. [15]



Obr. 2-2 Spektrum elektromagnetického záření (převzato z [15])

2.1 Neionizující záření

Neionizující záření je šíření elektromagnetických vln delších než 1 nm. Nemá dostatečnou energii k odtržení elektronu z atomového obalu – nedokáže elektricky nabit neutrální částici. Patří sem ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlny a radiové vlny s nejnižší energií. Lidský organismus je schopen svými smysly vnímat pouze některé z těchto druhů záření. Zrakový systém zpracovává viditelné světlo, termoreceptory v kůži zaznamenávají infračervené záření a ultrafialové záření se projeví pigmentací kůže. Ale přítomnost mikrovln nebo radiových vln člověk nezaregistruje. [8]

2.2 Optické záření

Pokud ze spektra neionizujícího záření odstraníme vlny radiové a mikrovlnné dostaneme spektrum optického záření. Sem řadíme kromě viditelného světla také UV a IR záření, které mají podobné vlastnosti. Těmto vlastnostem jako je například vznik, šíření nebo detekce optického záření se věnuje vědní obor optika. Největším zdrojem optického záření je slunce. Lidské tělo je přizpůsobené slunečnímu svitu a ve vhodné míře ho potřebuje ke správné funkci tělesných pochodů. Při nadměrných dávkách, ale optické záření je vysoce rizikové. Zejména jsou ohroženy povrchové orgány oko a pokožka. Čočka společně se sklivcem tvoří ochranu zrakového systému. Čočka nepropouští většinu spektra UV záření obsažené ve slunečním svitu a sklivec zachytí IR záření a vzniklé teplo odvede krevním systémem. Účinky působení na lidskou tkáň lze rozdělit na fotochemické a tepelné. Fotochemické důsledky způsobené chemickými reakcemi po dopadu elektromagnetických vln se projeví spíše při déle trvajícím ozáření. Zatímco tepelné poškození je výsledkem zaostřeného světla o vysoké intenzitě a projeví se okamžitě. Všeobecně optické záření při interakci s lidskou tkání je částečně odraženo, částečně pohlceno a některé pronikne skrz tkáň. Toto rozdělení je závislé jak na veličinách charakterizujících záření, tak na biologických vlastnostech tkáně. Záleží především na intenzitě a vlnové délce záření. Absorbance (míra absorpce záření) je také výrazně závislá na velikosti zasažené tkáně. Celkové biologické účinky elektromagnetického záření na lidský organismus jsou nejčastěji definované pomocí specifické míry absorpce SAR (Specific Absorption Rate). [8, 29]

$$SAR = \frac{d(\Delta W)}{dt(\Delta m)} = \frac{d}{dt} \cdot \frac{(\Delta W)}{(\rho \Delta V)} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \text{ (W.kg}^{-1}\text{)} \quad (2.3)$$

kde: ΔW – přírůstek energie (W)

Δm – přírůstek hmotnosti (kg)

ΔV – element objemu tkáně (m^3)

ρ – hustota elementu tkáně ($kg.m^{-3}$)

E – efektivní hodnota intenzity elektrického pole v tkáni ($V.m^{-1}$)

σ – elektrická vodivost tkáně (S)

Elektrická vodivost tkání lidského těla je různá. Záleží na typu tkáně. Proto se hodnoty SAR liší v závislosti na orgánu, na který záření zrovna působí. Specifická míra absorpce se jako vyjádření působení elektromagnetického pole na lidský organismus využívá hlavně pro pole radiových a mikrovlnných vln (pro frekvenční rozsah 100 kHz – 10 GHz). [8]

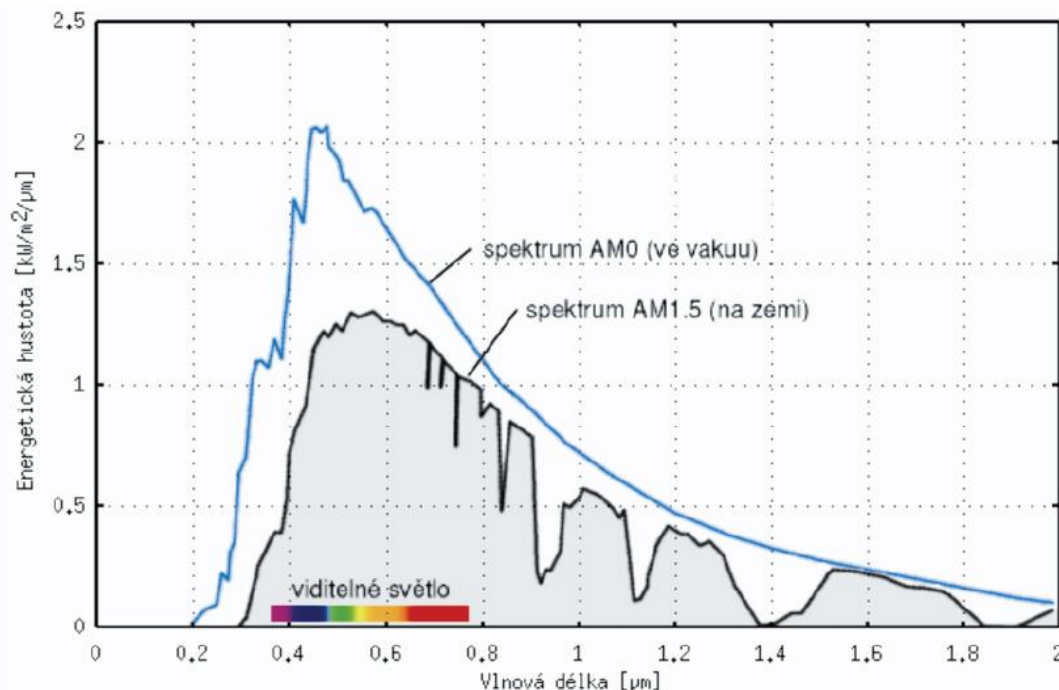
2.3 Sluneční záření

Největším zdrojem viditelných elektromagnetických vln je slunce. Slunce, nejbližší hvězda vzdálená 150 milionů kilometrů, je složena ze 75 % z vodíku a z 25 % z hélia. Uvolňuje obrovské množství energie ve formě elektromagnetické radiace. Tato energie vzniká jako produkt termojaderných reakcí probíhajících na slunci, při kterých dochází k přeměně vodíku na hélium. Celková vyzářená energie slunce činí $3,8 \cdot 10^{26} \text{ J}$ za sekundu. Povrch země, ale přijme pouze malou část. Energii působící na zemi lze vyjádřit pomocí tzv. sluneční konstanty. Sluneční konstanta má hodnotu $1,37 \text{ kW.m}^{-2}$ a udává nám velikost zářivého toku dopadajícího na zemský povrch o velikosti 1 m^2 . Tato hodnota, ale nezahrnuje vliv zemské atmosféry, která intenzitu sluneční radiace výrazně snižuje. Především je pohlcováno UV záření ozonovou vrstvou. Míra potlačení slunečních paprsků je dána stavem atmosféry, zeměpisnou šířkou, nadmořskou výškou a sklonem zemské osy ke slunci. Nejvíce tedy záleží na šířce atmosféry, kterou musí kvanta energie překonat. Z tohoto důvodu byl odvozen faktor AM (Air Mass factor), který udává násobek optické šířky atmosféry.

$$AM = \frac{1}{\sin \varphi} \text{ (-)} \quad (2.4)$$

kde: φ – úhel výšky slunce nad horizontem ($^\circ$)

Čím níže je slunce nad horizontem, tím záření musí překonat větší vzdálenost napříč plynným obalem země a výsledné spektrum je chudší (obrázek 2-3). Nejčastěji se během výpočtů uvažuje s $AM = 1,5$ což odpovídá úhlu dopadu slunečních paprsků $41,75^\circ$. [30]



Obr. 2-3 Spektrální složení záření dopadajícího na zemi (převzato z [27])

Z celkového vyzařovaného polychromatického spektra se tedy dostane na zemský povrch jen část. Tuto část tvoří 47 % světlo, 46 % infračervené záření a 7 % záření ultrafialové. Sluneční radiace je z 20 % zachycena v zemské atmosféře a dalších 30 % je atmosférou odraženo. [8]

2.4 Ultrafialové záření

Ultrafialové (UV - UltraViolet) záření je záření s vlnovou délkou o pár nanometrů kratší než vlny modrého a fialového světla. Jeho spektrum je od 400 nm až do 1 nm, kde začíná už oblast rentgenového záření. Zdrojem je hlavně slunce, rtuťové výbojky nebo elektrický oblouk. UV záření obdobně jako modré světlo je zdravotně rizikové, ale také pouze v některých případech. Menší dávky vyvolají v buňkách tvorbu vitamínu D a pozitivně působí na další biologické procesy. Při delším působení na organismus už ale převažují negativní účinky tohoto záření, které mohou vyústit až ve vznik zhoubného nádoru na kůži, v oku nebo v jiném orgánu. Hrozí zde také nevratné poškození sítnice případně úplné oslepnutí. Před UV zářením obsaženým ve sluneční radiaci nás chrání ozónová vrstva, která ho pohlcuje a umožňuje tak existenci života na zemském povrchu.

Spektrální rozsah UV záření lze dále rozdělit do tří oblastí:

- UV – A (315 až 400 nm)
- UV – B (280 až 315 nm)
- UV – C (100 až 280 nm)

UV – A záření se hojně využívá v průmyslových odvětvích pro svou schopnost urychlit chemické reakce při různých procesech jako je např. fotoanalýza nebo izomerace. Dále dokáže vyvolat luminiscenci, samovolné vyzařování některých látek. Toho se využívá u zářivek. Elektrický výboj v plynu vyzařuje UV záření na vrstvu látky zvanou luminofor. Teprve ten přemění toto záření na světlo. Princip luminiscence je užíván také ve fluorescenční analýze. Procesu, při kterém pomocí UV ozáření daného materiálu je lidské oko schopno rozeznat více barevných odstínů. Fluorescenční analýza je aplikována i v zemědělství např. k výběru obilí pro setbu.

Na UV – B záření si musíme dávat pozor při opalování. Kůže je na tento typ záření nejvíce citlivá. Při nadměrném vystavení se záření UV – B dochází v pokožce k rozšíření cév projevující se vznikem zánětů a puchýřů. Pro opalování je nejvhodnější UV záření o vlnové délce okolo 340 nm. Pigmentace kůže je nejintenzivnější a vydrží nejdéle.

UV – C záření (zejména vlnové délky okolo 265 nm a 254 nm) má germicidní účinky. Dokáže usmrtit bakterie, viry a další mikroorganismy. Využívá se ve zdravotnictví, potravinářství a všude, kde je potřeba udržovat sterilní prostředí. [9]

2.5 Infračervené záření

„Infra“ v latině znamená pod. Takže už podle názvu je patrné, že infračervené záření leží v elektromagnetickém spektru pod červenou barvou. Vlnová délka tohoto záření je tedy od 780 nm až do 1 mm. Obdobně jako u UV záření ji můžeme rozdělit do tří oblastí: [9]

- IR – A (780 až 1400 nm)
- IR – B (1400 až 3000 nm)
- IR – C (3000 nm až 1 mm)

Zdrojem infračerveného záření je slunce, elektrický oblouk, speciální zdroje umělého osvětlení a také každé zahřáté těleso. I Země vysílá do vesmíru infračervené záření, které se částečně odrazí zpět nebo se absorbuje ve vodních parách v atmosféře a tím vzniká skleníkový efekt. Ten otepluje zemský povrch o několik stupňů celsia. Z tohoto důvodu IR radiace jako zdroj tepla hraje významnou roli pro chod života na Zemi. [8]

IR záření má díky své schopnosti přenášet teplo velké využití. Například se užívá v laserech, při infrafotografii, ve sledovací technice (např. v infradalekohledech) a zejména v lékařství. Lékaři ho využívají k urychlení rehabilitace pacientů. Záření IR – A proniká hluboko do kůže a rozšiřuje v ní cévy, poraněným místem protéká více krve a tím se urychluje hojivý proces. [9]

Větší koncentrace IR – A záření způsobuje újmu na sítnici, IR – B a IR – C záření na rohovce. Absorpcí tepla může dojít k popálení, v případě rohovky i ke vzniku zákalu. Když záření dopadne na kůži, riziko není tak vysoké, protože pokožka obsahuje na rozdíl od oka tepelné receptory, které nás včas varují. [30]

3 MODRÉ SVĚTLO A LIDSKÝ ORGANISMUS

Lidský organismus je řízen biologickými hodinami. Biologickými hodinami nazýváme dva shluky mozkových buněk nacházejících se v prostoru křížení dvou zrakových nervů, které přenášejí informace o světle ze sítnice do zrakového centra v mozku. Podle umístění se tyto buňky někdy označují také jako suprachiasmatická jádra (SCN).

Podle biologických hodin probíhají pravidelně opakující se děje v našem organismu tzv. biorytmy. Biorytmy řídí funkci jednotlivých orgánů a další změny v našem těle. Ovlivňují úroveň fyzických a duševních zdatností, kterých je naše tělo v daný okamžik schopno dosáhnout. Můžeme je rozdělit podle periody trvání:

- Ultradiánní (perioda pod 20 hodin)
 - srdeční tep, dýchání
- Cirkadiánní (perioda 20 až 28 hodin)
 - spánek a bdění
- Infradiánní (perioda nad 28 hodin)
 - lunární (perioda 4 týdny)
 - menstruační cyklus
 - cirkanuální (perioda 1 rok)
 - denní aktivita během roku

Působení modrého světla ovlivňuje především produkci hormonu melatoninu, který se také nazývá hormon spánku a jelikož pravidelné střídání spánku a bdění patří do cirkadiánního biorytmu, tak se tato práce soustředí hlavně na tento cirkadiánní – jednodenní cyklus. [32]

3.1 Cirkadiánní rytmus

Ze suprachiasmatických jader je signál o světle veden do endokrinní žlázy epifýzy. Ta kromě spousta dalších biologických látek vylučuje do organismu hlavně hormony melatonin a serotonin v závislosti na intenzitě osvětlení sítnice. Produkce melatoninu a serotoninu synchronizuje cirkadiánní rytmus. U člověka, jehož denní aktivita je synchronizována se střídáním dne a noci, trvá jeden cyklus v rozsahu 23,9 – 24,5 hodin. Taková osoba vlivem kolísání hladiny melatoninu během roku pozná délku dne a její organismus se lépe připraví na změnu ročního období. Vystavuje – li se ale v pozdních hodinách prudkému zdroji světla, celý biorytmus se zpozdí. Naopak pokud si přivstane a přisvíí si, dojde k předběhnutí. Převažuje – li výrazně osvětlování umělým světlem nad slunečním zářením je úroveň tvorby melatoninu během roku neměnná.

Lidský organismus se lépe dokáže vypořádat se zpožděním celého cyklu než s jeho předběhnutím. Důkazem toho je pásmová nemoc (jet lag). Při rychlém přesunu přes několik časových pásem lidé pocítují nevolnost, bolesti hlavy a únavu celého těla. Tyto problémy jsou závažnější při letu směrem na východ, protože předbíháme zaběhlý cirkadiánní rytmus. [32]

Nejvýznamnější tělesné pochody cyklicky se opakující každý den (během jednoho cirkadiánního rytmu) u zdravého člověka jsou uvedeny v tabulce 3-1

Tab. 3-1 Nejvýznamnější tělesné pochody během jednoho cirkadiánního cyklu (převzato z [33])

2:00	nejhlubší spánek
6:00	nejnižší tělesná teplota
8:00	končí sekrece melatoninu
13:00	největší bdělost
17:00	největší svalová síla a nejvyšší kardiovaskulární činnost
22:00	nejvyšší tělesná teplota
22:30	potlačení pohybu střev

3.2 Počátky zkoumání světelných účinků na biologické hodiny

V roce 1958 se testovali schopnosti odlišných vlnových světelných délek. Už tehdy byl zaznamenán vliv světelného záření na jednobuněčnou mořskou řasu *Gonyaulax polyedra*. Byla objevena závislost mezi měnicími se parametry světelného zdroje a chováním tohoto jednoduchého organismu. Ale tehdy ještě nikoho nenapadla spojitost tohoto objevu s biologickým rytmem člověka. Teprve v roce 1970 byl proveden pokus o nalezení nových poznatků vlivu umělého světla na vnitřní hodiny našeho organismu. Experimentátoři vybudovali podzemní bunkr izolovaný od denního světla. Dokonce kolem něj ovinuli měděné dráty sloužící k zábraně průchodu vnějších elektromagnetických sil, které během dne mění svou velikost. Do bunkru byli umístěni lidé a byl sledován jejich bio – cyklus v závislosti na intenzitě a délce umělého osvětlení. Výsledky byly ale nejednoznačné a k novým závěrům se nedošlo.

V osmdesátých letech Alfred Lewy publikoval práci, v níž demonstroval účinky vysoko – intenzivního světla na lidský organismus. Pokud je člověk vystaven delší dobu zdroji o světelné intenzitě 2500 luxů a více, je v jeho těle potlačena tvorba hormonu melatoninu. Ten připravuje tělo ke spánku, snižuje tělní teplotu a zpomaluje pochody v organismu. Jeho hladina je během roku různá. Práce A. Lewyho přispěla k rozvoji využití světla jako léku proti depresím a jiným psychickým problémům.

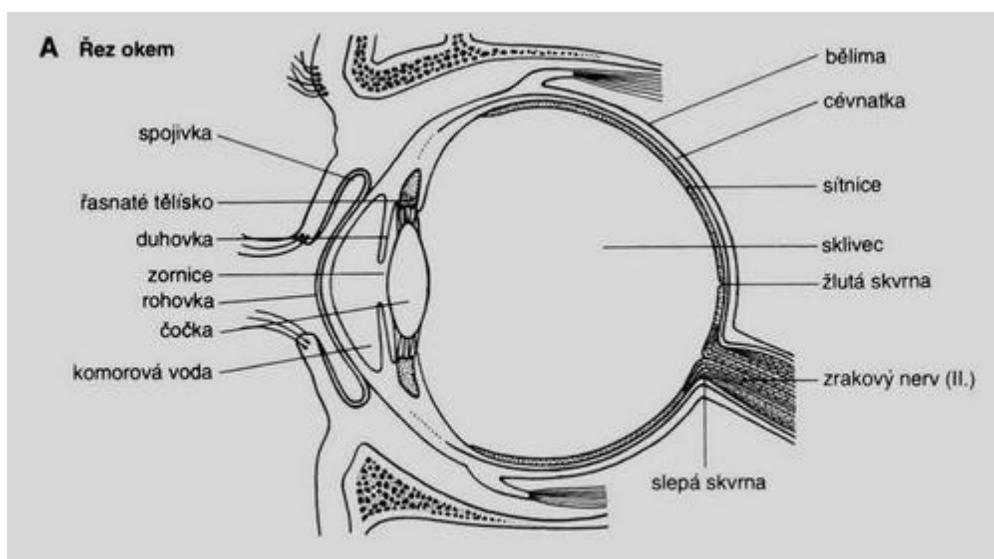
Následně probíhaly další pokusy týkající se cirkadiánních rytmů. V roce 1986 bylo zjištěno, že tyto biorytmy u člověka lze snadno časově posunout. Např. pokud se budeme pravidelně po určitý čas vystavovat světlu o vysoké intenzitě v pozdních nočních hodinách, naše opakovaně probíhající mechanismy v těle se posunou. V devadesátých letech proběhli první testy na nevidomých lidech. Testy vedl americký lékař Charles Czeisler. Nechal působit prudké světlo na lidi bez zraku, kterým byly oči kompletně odstraněny, a sledoval důsledky na jejich cirkadiánní rytmus. Výsledek nebyl ničím překvapující. Prudké světlo nemělo žádný vliv na jejich organismus. Poté to samé Czeisler vyzkoušel s lidmi, kteří rovněž přišli o svůj zrak, ale jejich oči zůstali nedotčeny. A právě zde byla objevena nová zásadní informace, které nikdo zpočátku nemohl uvěřit. Těmto lidem totiž byl rozhozen jejich cirkadiánní rytmus vlivem silného světla, přestože žádné světlo nemohli vidět. Toto vypátrání bylo počátkem objevu třetích světlo – citlivých buněk na sítnici lidského oka gangliových buněk. [10]

3.3 Zrakový systém

Základním prvkem zrakové soustavy je lidské oko. Oko bývá často srovnáváno s fotoaparátem či kamerou. Přes veškerý technický pokrok se však současné fotoaparáty lidskému oku ani zdaleka nepřibližují. Rozsah dynamiky vidění, vyvážení bílé barvy nebo ostření, v tom všem je oko jedinečné a techniku překonává. Lidské oko má jednoduchý objektiv o dvou členech. Tím vnějším je rohovka, vnitřním čočka. Zbarvená duhovka pak jako clona fotoaparátu redukuje množství světla vstupujícího do oka. Světelné paprsky poté dopadnou na světločivné buňky na sítnici, ve kterých vlivem složitých biochemických reakcí dojde ke vzniku nervového vzruchu a ten je zrakovými nervy přenesen do zrakového centra v mozku, kde je vytvořen obraz. Sítnici tvoří 130 milionů tyčinek pro citlivost vidění a 7 milionů čípků pro barevné vidění. Největší koncentrace čípků je v takzvané žluté skvrně, tedy v místě nejostřejšího vidění. [11]

3.4 Stavba lidského oka

Lidské oko je složitý párový orgán, který je velice důležitý, neboť pomocí něho získáváme až 80 % informací z našeho okolí. Základní části oka můžeme vidět na obrázku 3-1.



Obr. 3-1 Stavba lidského oka (převzato z [20])

Oční koule (bulbus oculi) - Je uložena v očníci pomocí šesti okohybných svalů. Oční koule je kulovitého tvaru, který udržuje díky nitroočnímu tlaku. Vstupuje do ní tepna, která přivádí krev a vystupuje z ní zrakový nerv a žíly.

Bělma (sclera) - Bělma je bílá, tuhá, vazivová blána tvořící až 80 % povrchu oka. V přední části přehází do rohovky. Ve stáří vlivem nahromadění tuku může mírně nažloutnout.

Rohovka (cornea) - Rohovka je průhledná kopulovitě zakřivená vrstva pokrývající přední část oční koule. Je složena z několika vrstev, které ovlivňují směr šíření světelných paprsků v optickém aparátu oka.

Duhovka (iris) - Duhovka je silně pigmentová. Její barva se považuje za barvu očí. Hlavní funkcí je ohraničení přední a zadní oční komory. Uprostřed duhovky se nachází otvor zvaný zornice. Stahováním nebo rozšiřováním zornice si oko řídí množství vstupujícího světla.

Čočka (lens crystallina) - Čočka je průhledná struktura v oku, která podobně jako rohovka láme světelné paprsky, aby mohly být zaměřeny na sítnici. Hlavní funkcí čočky je akomodace (zaostření oka na různě vzdálené předměty).

Sítnice (retina) - Sítnice je vnitřní tenká vrstva oka. Obsahuje fotoreceptory, které přijímáním světelných a barevných podnětů umožňují vidění.

Sklivec (corpus vitreum) - Sklivec je průhledné, bezbarvé, rosolovité těleso s řídkou vláknitou strukturou, která vyplňuje 2/3 vnitřního prostoru oční koule.

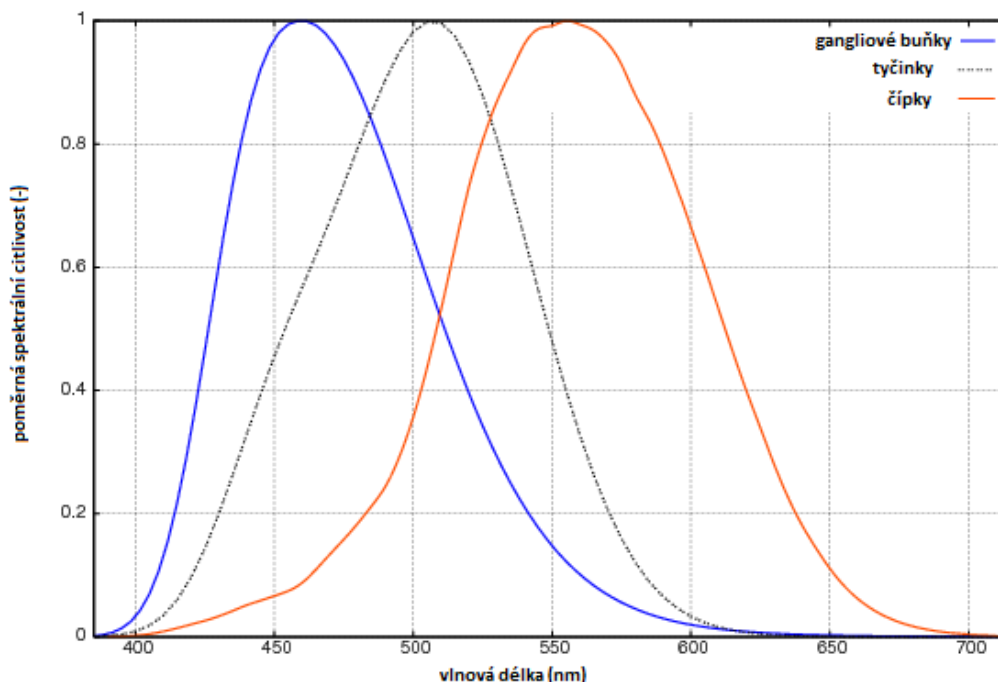
Zrakový nerv (nervus opticus) - Zrakový nerv je párový hlavový nerv, který přenáší zrakovou informaci z oční sítnice do zrakových center v mozkové kůře.

Cévnatka (choroidea) - Cévnatka je střední vrstvou stěny oční koule. Skládá se převážně z cév a představuje tak nejvíce prokrvené tkáň tělesa. Hlavní funkcí je výživa sítnice. [28]

3.5 Gangliové buňky

Gangliové buňky byly u člověka potvrzeny až roce 2007. Do té doby byly známy pouze dva typy fotoreceptorů na sítnici – tyčinky a čípky. Všechny typy těchto buněk zpracovávají dopadající světelné paprsky na sítnici. Informace o dopadajícím světle jsou zrakovým nervem přenášeny do mozku. Gangliové buňky obsahují barvivo melanopsin, který reaguje na různé délky dopadajícího záření jinak než tyčinky a čípky. Čípky se vyskytují na sítnici ve třech různých podobách. Každá z těchto podob umožňuje zpracovat jiné vlnové délky, a proto jsme schopni rozeznat barvy. Čípky jsou nejvíce citlivé na záření o vlnách dlouhých 555 nm, což odpovídá zelenému světlu. Tyčinky, citlivější buňky jsou zastoupeny na sítnici sice v hojnějším počtu, ale nejsou schopny rozpoznat světlo odlišných vlnových délek. Vrchol citlivosti mají ve vlnové délce 507 nm. Gangliové buňky jsou nejcitlivější v oblasti vlnových délek 450 až 480 nm – tedy záření odpovídající modrému světlu. Tyto buňky předávají signály biologickým hodinám, za které jsou považována suprachiasmatická jádra (SCN) umístěné v centrální nervové soustavě pod křížením zrakovým nervů. Z tohoto důvodu se také gangliovým buňkám říká cirkadiánní čidla. V již zmiňovaném pokusu s nevidomými lidmi jedna pacientka ačkoli měla zničené veškeré tyčinky a čípky, tak po ozáření intenzivním modrým světlem zpozorovala malý záblesk. Dopadnuvší světlo zaznamenali gangliové buňky a poslaly impuls nejenom do cirkadiánního centra – suprachiasmatických jader, ale také do zrakového centra v mozkové kůře. Zdá se, že vzhledem i k dalším pokusům na myších, gangliovými buňkami jsme schopni rozpoznat jasnost pozadí světa kolem nás, ale celková světelná citlivost těchto buněk výrazně zaostává za citlivostí tyčinek a čípků. Vlivem nízké citlivosti naše biologické hodiny nejsou tak náchylné na krátkodobou změnu osvětlení jako například nastává během dne při náhlém zamračení oblohy, ale reagují až na večerní stmívání.

Gangliové buňky obsahující melanopsin se v anglické literatuře objevují pod zkratkou ipRGCs (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells – vnitřní fotosensitivní sítnicové gangliové buňky). [5, 24, 25]



Obr. 3-2 Spektrální citlivost světločivných buněk na sítnici lidského oka (modifikováno z [33])

3.6 Vliv modrého světla na cirkadiánní rytmus

V devadesátých letech minulého století se uskutečňovalo mnoho výzkumů zabývajících se výjimečností modrého světla. Například se srovnávalo potlačení produkce melatoninu po ozáření člověka světlem o vlnové délce 460 nm a světlem zeleným, na které je zrakový systém nejcitlivější (vlnová délka 555 nm). Výsledkem měření bylo dvojnásobné potlačení melatoninu po ozáření světlem modré barvy než světlem zeleným. Potlačení melatoninu v organismu vede k mnohým změnám v těle např. je dosaženo zvýšené bdělosti, zvýší se tělesná teplota a srdeční tep a všeobecně lidský organismus je schopen podat lepší, soustředěnější výkon.

Zda modrá složka barevného spektra škodí nebo naopak prospívá, záleží na čase, v kterém na organismus působí. Vystavujeme – li se záření v pozdních nočních hodinách, tak se lidské tělo začne chovat jako ve dne, kdy je vystaveno dennímu slunečnímu svitu a celý cirkadiánní cyklus je rozhozen. Naopak posvítíme – li si do očí monochromatickým modrým světlem během chvíle, kdy potřebujeme podat maximální fyzický či duševní výkon, modré světlo nás nabudí a pomůže k lepším výsledkům. Nastává pokles tvorby melatoninu, naopak roste produkce hormonu kortizolu, který organismus připraví na zvýšený stres a vyšší zátěž.

Úkolem světelných projektantů tedy je nastavit umělé osvětlení, tak aby obsah modré složky v jejich spektru odpovídal vykonávané aktivitě. A právě dosáhnout tohoto cíle není vždy úplně snadné. Například navrhnout takové umělé osvětlení pro zaměstnance pracujících v noci. Na světelné zdroje jsou zde totiž kladeny dva protichůdné požadavky. Prvním je snaha o co největší bezpečnost a nejlepší pracovní výkon ze strany pracovníků, čehož dosáhneme působením modrého světla. Na straně druhé je zde požadavek, o to aby těmto lidem nebyly zásadním způsobem rozhozeny biologické hodiny a nedošlo u nich ke vzniku nádorových onemocnění. Toho naopak dosáhneme působením světelných zdrojů vyzařujících vlnové délky v oblasti červené a oranžové barvy.

V posledních letech probíhá mohutný rozvoj v oblasti světelné techniky, zejména se vyvíjí elektroluminiscenční diody (LED – Light – Emitting Diode) a právě při tomto rozmachu bychom kromě důrazu na velkou účinnost a další elektrické a fotometrické parametry neměli také zapomínat na nové poznatky z chronobiologie (věda zabývající se periodickými rytmy v organismech). Cílem současných a budoucích experimentů tedy je nastavit nové osvětlovací soustavy, tak aby byly v souladu s požadavky živých organismů.

Dalším experimentům s modrým světlem se věnovali odborníci na problémy se spánkem a psychologové v čele s Alfredem Lewym. V posledních letech přibývá počet lidí mající tyto problémy – jednoduše nemůžou usnout. Jenom v Americe se jejich počet odhaduje na 50 až 70 miliónů. Týká se to mužů a žen všech věkových kategorií. Tento problém je přičítán rozmachu tabletů a dalších elektronických zařízení, na kterých si lidé čtou nebo pracují v nočních hodinách. I tato zařízení jsou totiž zdrojem modrého světla. Svou roli zde může hrát i veřejné osvětlení ve velkoměstech, které je významným zdrojem umělého světla. Veřejné svítidlo může rušit obyvatele při spánku, kdy svou nesprávně navrženou konstrukcí může směřovat světelný tok tam, kam není zapotřebí – např. do oken budov. A je – li ve svítidle umístěn světelný zdroj se spektrem, ve kterém převažují kratší vlnové délky, jedná se významný rušič cirkadiálního cyklu. V ČR je jako nejčastější zdroj ve veřejném osvětlení využívána vysokotlaká sodíková výbojka pro svoji vysokou světelnou účinnost, která prakticky žádné modré světlo nevyzařuje, takže tato záležitost se nás prozatím netýká. [10]

3.6.1 Modré světlo jako lék

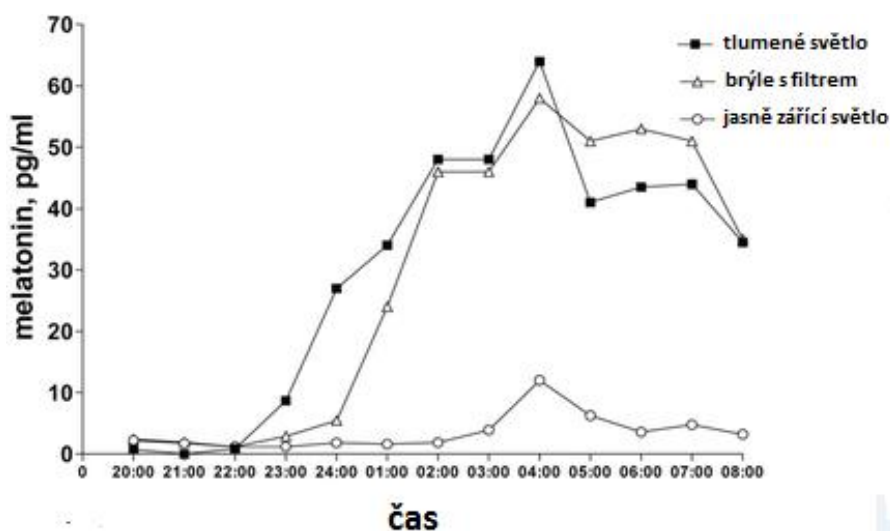
Dále se lékaři snažili pomocí jasně zářícího světla léčit psychické problémy a další podobné choroby jako je např. SAD (Seasonal Affective Disorder – sezónní afektivní porucha). SAD je psychická porucha vyskytující se u lidí převážně v podzimních a zimních krátkých dnech, kdy lidé pociťují nedostatek energie, trpí depresemi, jsou unavení, podráždění a zmatení. V současné době stále vychází nové odborné články a probíhají studie věnující se této problematice – světloléčbě. A pořád není úplně zřejmé, zda a o kolik je modré světlo efektivnější v léčbě těchto chorob než jasné bílé světlo obsahující většinu vlnových délek barevného spektra. [33]

3.6.2 Modré světlo jako hrozba

Rizikovým faktorem zde není ani tak samotné modré světlo, ale spíše až jeho důsledek působení na lidský organismus – desynchronizace biologického rytmu člověka. Ta může vyvolat závažné zdravotní potíže jako například deprese, zvýšený výskyt rakoviny a poruchy kardiovaskulárního systému. Nejvíce ohroženi jsou lidé pracující pravidelně celou noc. Mnohými výzkumy byl prokázán zvýšený výskyt rakoviny prsu u žen pracujících v nočních hodinách. Vzhledem k tomu světová zdravotnická organizace v roce 2007 vydala směrnici, podle které je práce na noční směnu považována za zdravotně rizikovější. Spousta odborníků zabývajících se problémy se spánkem, depresemi a dalšími zdravotními problémy se stále více zaměřuje na tuto problematiku a nachází zde velká rizika. V současnosti – v době rozmachu LED osvětlení do domácností nacházíme zvýšený zájem o rozhození biorytmu vlivem modrého světla i mezi novináři. Jedná se totiž o záležitost, která se týká všech lidí žijících v moderním technicky vyspělém světě.[10]

3.6.3 Ochrana proti účinkům modrého světla

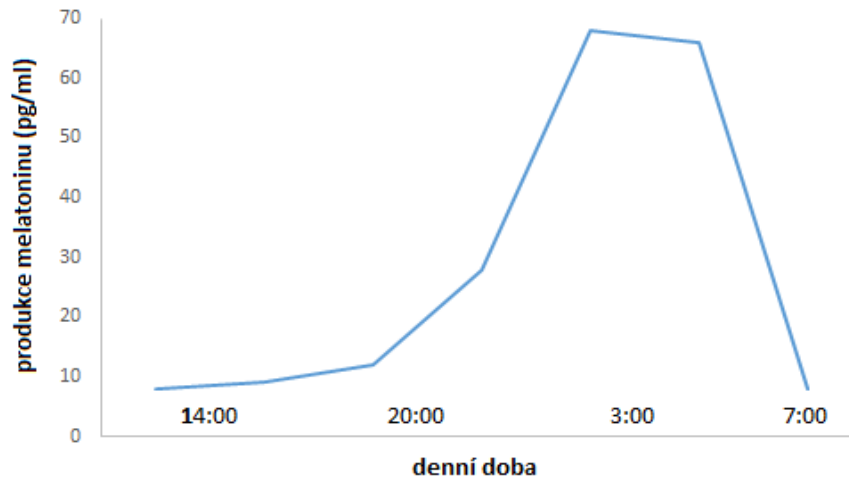
V současnosti uskutečňované pokusy se snaží přijít na to, jak zabránit zdravotním rizikům hrozícím lidem zaměstnaných na noční službu nebo jak tyto rizika alespoň snížit. Cílem je dosáhnout toho, aby těmto lidem nebyla příliš potlačena tvorba melatoninu, a zároveň aby neklesla jejich produktivita práce. Toho se snažili docílit výzkumníci dvěma způsoby. Prvním z nich pomocí brýlí se speciálním filtrem. Tento filtr nepropouštěl vlnové délky kratší než 530 nm a přitom zachoval relativně dobrý index podání barev (R_a). Druhý způsob se snažil udržet dostatečnou tvorbu melatoninu výrazným snížením intenzity světelného zdroje. Pokus byl proveden na dobrovolnících, u kterých byla měřena hladina melatoninu během noci při třech různých stavech. Poprvé při jasně zářícím zdroji ($E = 800 \text{ lx}$) bez filtru, poté se stejnou intenzitou osvětlení, ale s brýlemi obsahujícími filtr a nakonec byla intenzita zdroje snížena na pouhých 5 lx bez použití filtru. Dobrovolníci byli pečlivě vybíráni. Všichni zájemci museli podstoupit podrobné zdravotnické testy a museli splňovat určitá kritéria. Bylo testováno, jestli netrpí nebo v minulosti netrpěli nádorovým onemocněním, depresemi, spánkovými poruchami, očními vadami a podobně. Nakonec z celkových 42 bylo vybráno pouhých 19 lidí, 11 mužů a 8 žen s věkovým průměrem kolem 25 let. Uspěli ti nejzdravější a ti, kteří nejvíce dbali na spánkovou hygienu. U žen se také muselo předejít nepřesnosti výsledků z důvodu menstruačního cyklu, proto byly vybrány pouze ty, které braly antikoncepční pilulky. Výsledky studie vidíme na obrázku 3-2. Použitím filtru nebo utlumením světelného zdroje se dosáhne značného navýšení tvorby melatoninu a cirkadiánní rytmus je tak méně rozhozen. Vliv filtru v brýlích je tedy zhruba stejný jako zeslabení intenzity zdroje.[13]



Obr. 3-3 Tvorba melatoninu během noci při různých podmínkách (modifikováno z [12])

Dále byla sledována výkonnost pracovníků v souvislosti s množstvím melatoninu v jejich těle. Už předešlé výzkumy sledující vliv externě podávaného melatoninu uváděly, že tento hormon sám o sobě nepřivodí zpožděné reakce, nesníží koordinaci pohybů atd. I v této studii se při aplikaci brýlí s filtrem a snížením intenzity světelného zdroje nenašel žádný výrazný dopad na pracovní výkon. U lidí dělajících v noci opakovaně a po delší dobu už ale nacházíme patrné známky únavy, snížené bdělosti a další tělesné stavy vedoucí k častějšímu výskytu nehod na pracovišti a ke snížení produktivity. Toto je zapříčiněno neustálým posouváním času, ve kterém tito lidé chodívají spát nebo jsou naopak vzhůru. Kdyby byli aktivní každou noc v celém týdnu a v posteli strávili dostatečný počet hodin a vždy ve stejnou dobu, tak by se u nich pravděpodobně rozvinulo pouze

několikahodinové posunutí cirkadiánního rytmu a nevznikala by žádná zdravotní rizika. Jenže lidé ve svých volných dnech jsou nuceni z různých důvodů (společenské zvyklosti, různé další závazky) k aktivitě za denního světla, a proto jejich spánek přes den nemůže být kvalitní. Opakované posouvání a omezování spánku vede k vyrovnané tvorbě melatoninu během celého 24 – hodinového cyklu a to je ta hlavní příčina spánkových poruch a následného slabšího výkonu v práci.[13]

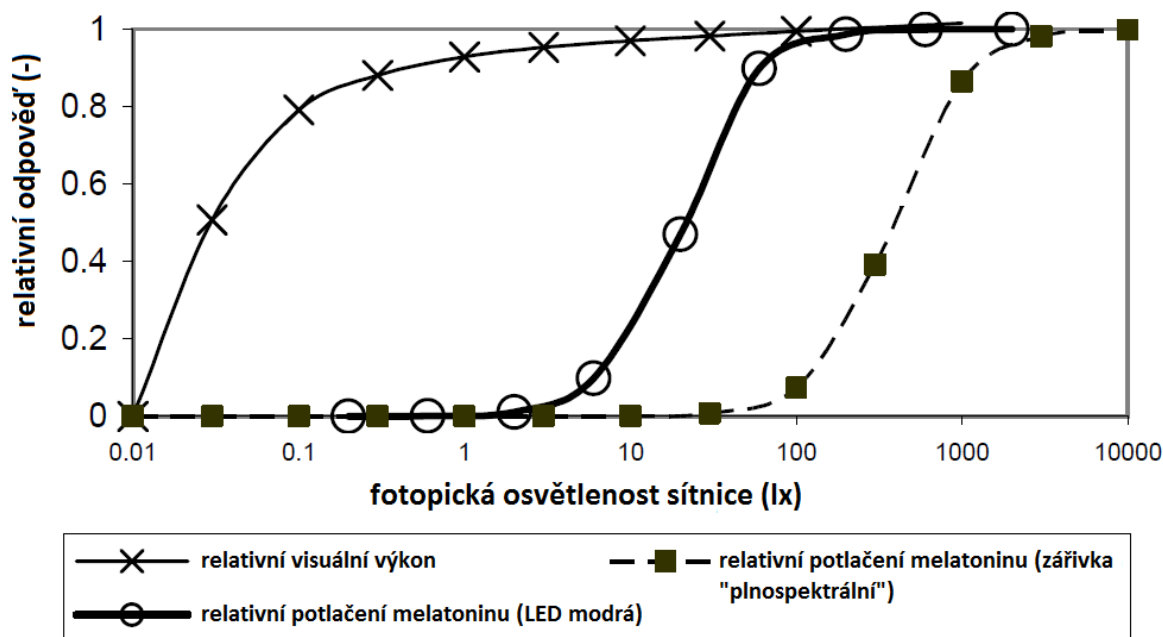


Obr. 3-4 Tvorba melatoninu u zcela zdravého člověka během dne, lidé s rozhozeným cirkadiánním cyklem mají vrcholové hodnoty melatoninu podstatně nižší (modifikováno z [26])

3.7 Citlivost cirkadiánního systému

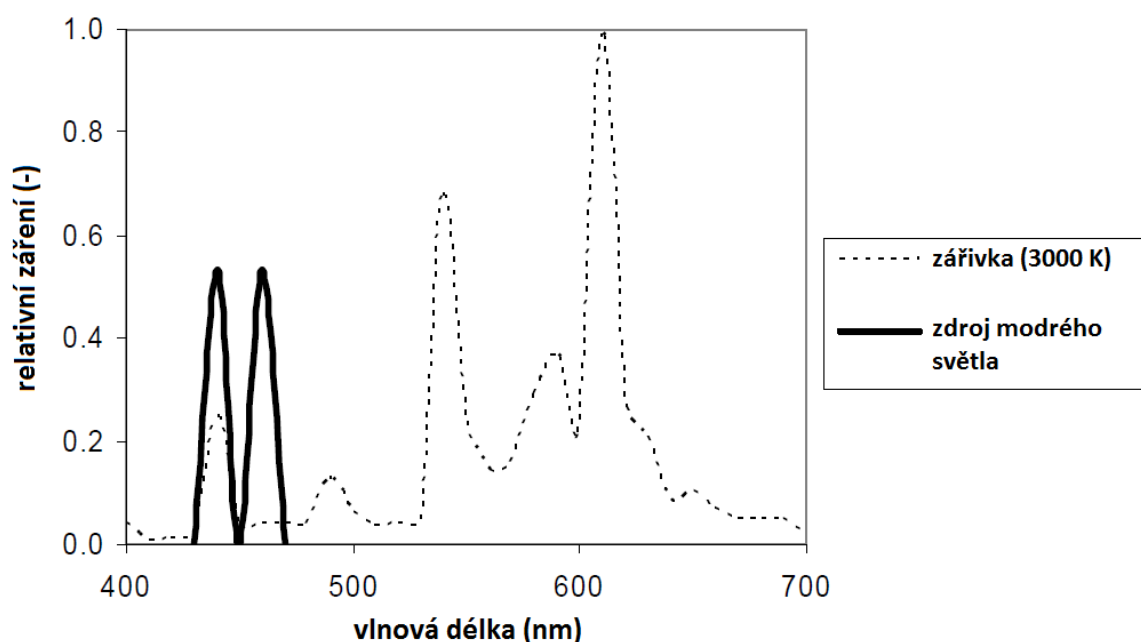
Pravděpodobně ještě chybí spousta informací k úplnému pochopení vlivu světla na cirkadiánní systém. Vzhledem k velkému vlivu krátkovlnného světla na spoustu dějů v lidském organismu a následnému využití ve zdravotnictví, je ale třeba se nadále intenzivně zabývat touto problematikou. Dalším krokem k většímu pochopení je pokusit se porozumět tomu, jaký vliv mají různé vlastnosti světla.

Intenzita osvětlení E (osvětlenost) zásadním způsobem ovlivňuje cirkadiánní systém. K pochopení je nejlepší porovnání s vlivem intenzity na zrakový výkon. Obrázek 3-5 nám udává tři křivky. První z nich popisuje vztah relativního vizuálního výkonu a osvětlenosti sítnice a zbylé dvě udávají relativní potlačení melatoninu v těle při stejných hodnotách intenzity. Je zde názorně ukázáno, že člověk je schopen vnímat předměty svým zrakem už při hodnotách osvětlení kolem 1 lx a nižší, samozřejmě ale za cenu zvýšeného nepohodlí, a také že běžné hodnoty v kancelářích a podobných prostorech (500 lx) jsou už více než dostačující pro rozlišení jakékoliv alfanumerické informace. Když zaměříme pozornost na melatoninové křivky, které odpovídají podráždění cirkadiánního systému, všimneme si, že reagují až při vyšších intenzitách. Jejich citlivost je tedy mnohem menší než citlivost vizuálního systému. [4]



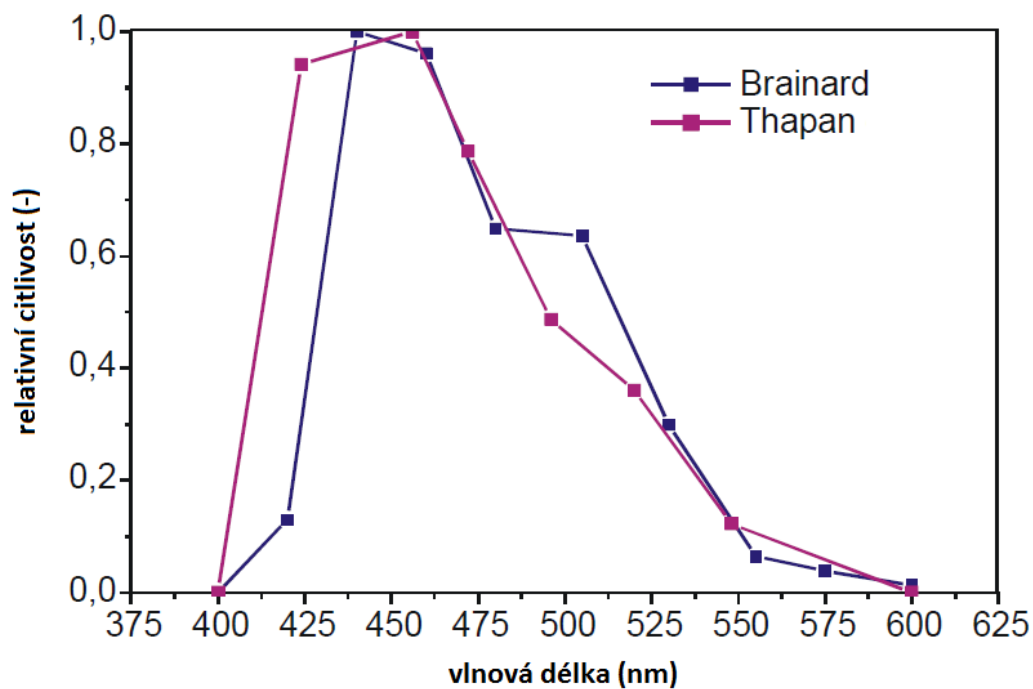
Obr. 3-5 Závislost citlivosti vizuálního a cirkadiánního systému na fotopické osvětlenosti (převzato z [4])

Rozdílné potlačení melatoninu LED a zářivkou je způsobeno jejich odlišným spektrem. Modrá LED vyzařuje spoustu energie v oblasti kratších vlnových délek, kde se nachází vrchol citlivosti cirkadiánního čidla, a proto pokles melatoninu nastává už při desítkách nebo dokonce jednotkách luxů. Spektrum je tedy další významnou vlastností, která se podílí na výsledném řízení biologických hodin. Na obrázku 3-6 máme spektrum dvou rozdílných zdrojů. Prvním z nich je modré světlo s celkovým fotopickým osvětlením 8 lx a druhým je zářivka (3000 K) s fotopickým osvětlením 490 lx . I přes tyto odlišné parametry tyto světelné zdroje stimulují cirkadiánní systém naprosto stejně. [4]

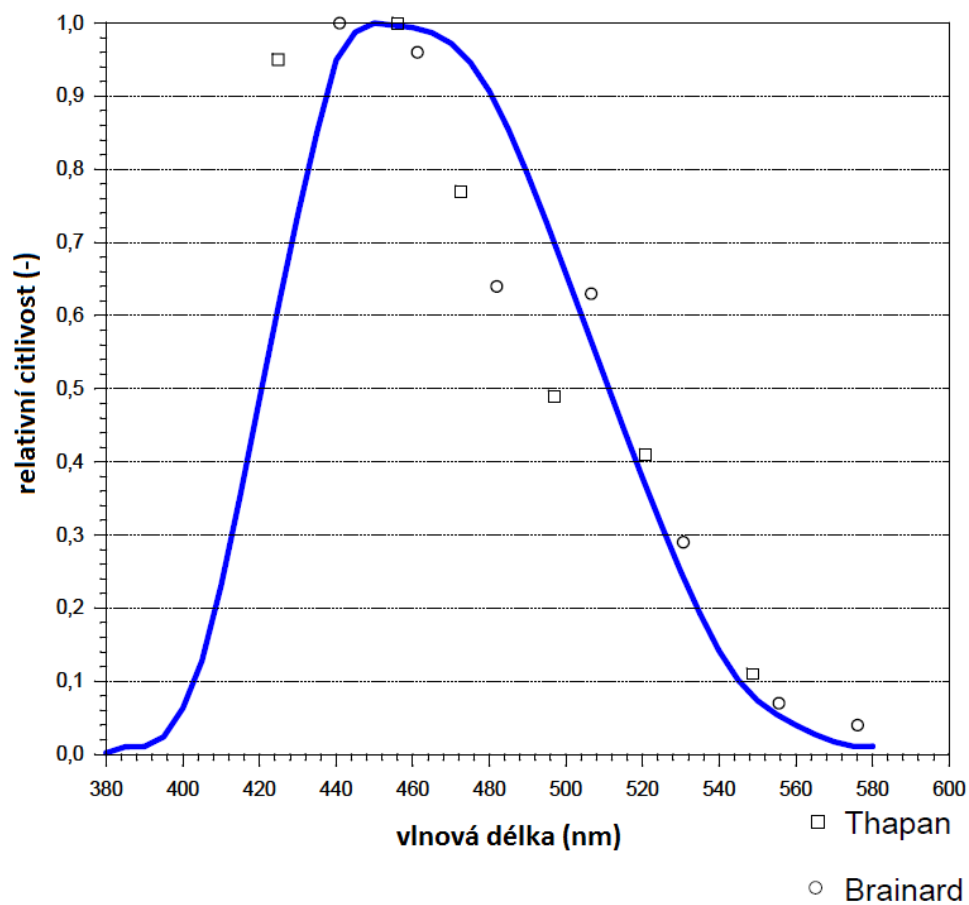


Obr. 3-6 Světelné zdroje se stejnou cirkadiánní stimulací (převzato z [4])

K přesnému vyjádření cirkadiánních účinků světelného zdroje je potřeba znát spektrální citlivost cirkadiánního čidla na sítnici lidského oka. Po prvních studiích byla za vrchol této citlivosti považována vlnová oblast kolem 500 nm a předpokládalo se, že velkou roli zde hrají tyčinky. Po následujících výzkumech se ale ukázalo, že spektrální citlivost cirkadiánního systému dosahuje nejvyšších hodnot při vlnových délkách kolem 450 nm. Což je oblast docela vzdálená od vlnových délek, ve kterých se vyskytují vrcholy světločivných buněk na sítnici. Nejvíce se přibližuje spektrální citlivosti gangliových buněk ipRGCs, ale je zcela jasné, že melanopsin nebude jediným fotopigmentem korigující biorytmus. Mluví se také o dalších jako například peropsin nebo kryptochromy, ale tyto proteiny byly nalezeny prozatím pouze u rostlin nebo u hmyzu. Pravděpodobně se bude jednat o kombinaci ipRGCs a tradičních fotoreceptorů (zejména tyčinek a S – čípků). Mechanismu obsaženému ve spektrální citlivosti cirkadiánního čidla není ještě zcela porozuměno a bude potřeba pokračovat v dalších výzkumech. Zatím za nejmarkantnější pokrok v této oblasti jsou považovány práce Brainarda a Thapana. Tito vědci v roce 2001 sestrojili, každý zvlášť, svou citlivostní funkci $C(\lambda)$ vyjadřující míru potlačení melatoninu (obrázek 3-7). Tyto dvě funkce $C_1(\lambda)$ a $C_2(\lambda)$ byly zprůměrovány a vznikla výsledná $C(\lambda)$ křivka (obrázek 3-8), která je prozatím považována za základ pro většinu dalších úvah o cirkadiánním rytmu. [4]



Obr. 3-7 Brainardova a Thapanova $C(\lambda)$ křivka (převzato z [36])



Obr. 3-8 $C(\lambda)$ křivka vzniklá zprůměrováním výsledků Brainarda a Thapana (převzato z [7])

Přesné hodnoty této výsledné $C(\lambda)$ křivky jsou uvedeny v tabulce 3-2.

Tab. 3-2 Hodnoty $C(\lambda)$ křivky (převzato z [7])

λ (nm)	$c(\lambda)$	λ (nm)	$c(\lambda)$	λ (nm)	$c(\lambda)$	λ (nm)	$c(\lambda)$
380	0,002	435	0,850	490	0,793	545	0,101
385	0,004	440	0,949	495	0,727	550	0,073
390	0,011	445	0,987	500	0,658	555	0,055
395	0,024	450	1,000	505	0,588	560	0,040
400	0,063	455	0,997	510	0,517	565	0,027
405	0,128	460	0,994	515	0,447	570	0,017
410	0,231	465	0,987	520	0,378	575	0,011
415	0,355	470	0,972	525	0,312	580	0,007
420	0,486	475	0,946	530	0,249		
425	0,615	480	0,907	535	0,192		
430	0,737	485	0,854	540	0,142		

Dalšími dvěma vlastnostmi světla, na které cirkadiánní systém reaguje odlišně od systému vizuálního, jsou

- Doba trvání – zatímco k aktivaci zrakového ústrojí stačí méně než 1 sekunda, tak k měřitelnému potlačení melatoninu v krvi je zapotřebí se vystavit světlu alespoň 10 minut
- Prostorové rozložení – k pohodlnému a jasnému vidění je potřeba správně nasměrovat světelné paprsky na pozorovaný předmět, u cirkadiánního systému nezáleží na prostorové distribuci paprsků ze světelného zdroje, ale pouze na celkovém množství světla, které dorazí na sítnici [4]

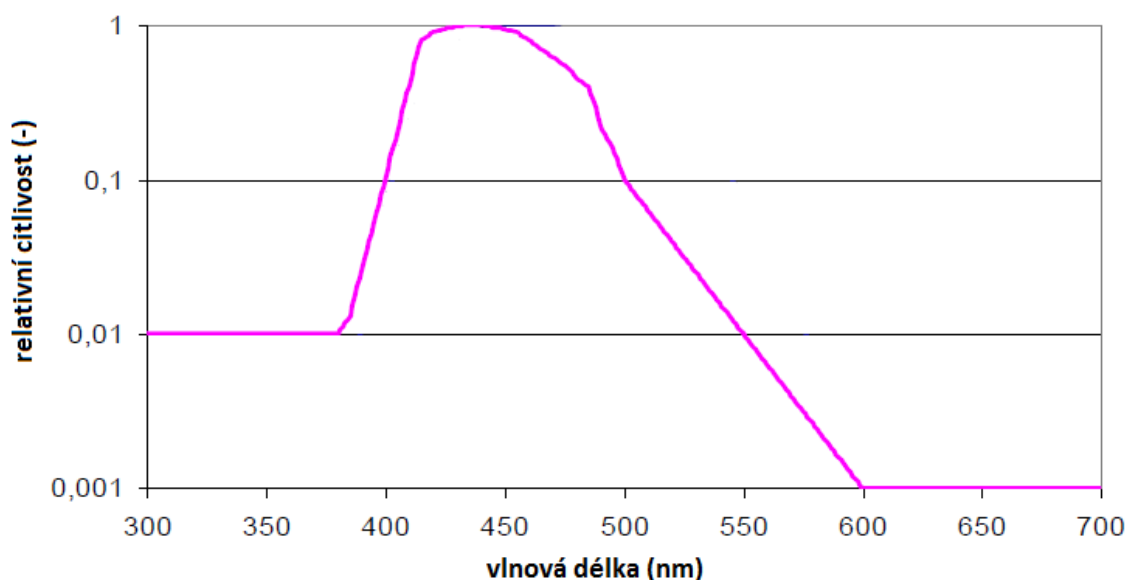
3.8 Fotochemické poškození sítnice modrým světlem

Veškeré optické záření působí na lidský organismus tepelně nebo fotochemicky (netepelně). Nejvíce jsou zasaženy povrchové orgány pokožka a oko. Míra biologických reakcí závisí kromě parametrů záření především na velikosti absorpce. Ta je v oku daná jednotlivými tkáněmi. Každá tkáň je schopna absorbovat určitý druh záření. Rohovka blokuje veškeré záření pod 295 nm, což je veškeré UV – C a částečně UV – B, čočka pokryje UV – A, a také zbylé množství UV – B záření a sklivce pohltí IR záření. Lidské oko tak obsahuje jakýsi filtrační mechanismus, ve kterém se každá vlnová délka absorbuje v jiné části. Na sítnici tedy proniká zejména radiace viditelných vln.

Poškození zrakového ústrojí nastává v případě, kdy záření pronikne na sítnici ve větší energetické míře než je potřeba k vyvolání nervového vzruchu a následnému zpracování v mozku. Intenzita záření je tak velká, že jednotlivé oční tkáně ho nedokáží zcela absorbovat a na sítnici tak může částečně proniknout i například UV záření. Nejvíce nebezpečné jsou ale krátké viditelné vlny modré barvy, které dosáhnou na sítnici v obrovském množství. Jejich energie vyvolá

fotochemické procesy a ty pak způsobí degeneraci fotoreceptorů. Toto nebezpečí poškození zraku se nazývá fotoretinitida a v anglické literatuře bývá také označováno jako „blue light hazard“. U starších lidí je větší pravděpodobnost výskytu fotoretinitidy, protože jejich čočka a sítnice neobsahují ochranný pigment, který dokáže absorbovat trochu nadbytečné energie a následně ji rozptýlit bez způsobení jakékoliv škody. Symptomy se objevují zhruba po 12 hodinách po ozáření, které musí být delšího charakteru (více než 10 sekund). Na sítnici se v místě nejvíce zasaženém světelnými paprsky vytvoří slepá skvrna. Rozsah ztráty zraku závisí právě na tom, kde se toto místo nachází. Nejhorší příznaky nastávají v centrální oblasti vidění v tzv. žluté skvrně. Záleží také na intenzitě ozáření a na době trvání. Když člověk přijme slabší dávku, poškození zraku nemusí být trvalé, sítnice se dokáže po určitém čase zregenerovat.

Čím více energie sítnice přijme, tím více hrozí vznik fotoretinitidy. Nejvíce jsou tedy nebezpečné krátké vlny v oblasti 400 – 500 nm. Celkovou relativní citlivost sítnice na tento druh poškození vidíme na obrázku 3-9. [14, 33]



Obr. 3-9 Relativní citlivost sítnice na vznik fotoretinitidy („blue light hazard“), (převzato z [35])

Na základě pozorování lidí, kteří se dívali z nějakého důvodu přímo do slunce delší dobu, než je zdravo, byly odvozeny hraniční meze ozáření. Ty nám říkají, jaké maximální hodnoty energie sítnice snese, aniž by se to na ni negativně projevilo. Hodnoty ozáření jsou platné pro většinu zdravých lidí, ale najdou se i citlivější jedinci, které mohou ohrozit i menší dávky. K těmto hraničním mezím tak musíme přistupovat s určitým odstupem. Navíc jejich přesné stanovení a následné použití ovlivňuje spousta specifických faktorů jako například průměr zornice pozorovatele nebo úhlové rozpětí měřeného zdroje.

Hraniční meze ozáření modrým světlem jsou vyjádřeny jako zář L_B , která je vztažena k váhové funkci $B(\lambda)$ popisující nebezpečí modrého světla. Pro čas $t \leq 10^4$ platí vzorec.

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \leq 10^6 \text{ (J.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}) \quad (3.1)$$

Pro čas $t > 10^4$ s platí vzorec.

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} L_{\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta\lambda \cdot \Delta t \leq 100 \text{ (J.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}) \quad (3.2)$$

kde: $L_{\lambda}(\lambda)$ – spektrální intenzita ozařování ($\text{W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}\text{.nm}^{-1}$)

$B(\lambda)$ – váhová funkce nebezpečí modrého světla (obrázek 3-9)

$\Delta\lambda$ – šířka pásma (nm)

V případě, kdy je překročen čas 10^4 s a také hodnota $100 \text{ W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}$, se maximální doba ozáření vypočte podle vzorce.

$$t_{\max} \leq \frac{10^6}{L_B} \text{ (s)} \quad (3.3)$$

kde: L_B – zář vztažená k váhové funkci $B(\lambda)$, ($\text{W.m}^{-2}\text{.sr}^{-1}$)

$t_{\max}$ – maximální doba ozáření [14, 33]

Vedle fotoretinitidy řadíme mezi zdravotní problémy vyvolané fotochemickými procesy i fotodermatózy. Jsou to kožní nemoci vznikající působením slunečního záření v součinnosti s některými chemickými a kosmetickými látkami, které zvyšují citlivost kůže. Objevují se převážně u citlivějších jedinců v jarním období, kdy je kůže poprvé vystavena vysokoenergetickému UV a modrému záření. Mezi typické symptomy patří tvorba puchýřů a zarudnutí. Fotodermatózám lze poměrně snadno předcházet používáním opalovacích přípravků s ochrannými faktory nebo omezením sluneční expozice. V souvislosti s tímto typem kožních nemocí se mluví hlavně o působení slunečního záření. Fotodermatózy vyvolané umělými světelnými zdroji zatím nebyly potvrzeny. [16]

4 UMĚLÉ ZDROJE MODRÉHO SVĚTLA

Umělé světelné zdroje se rozdělují na tři základní typy – luminiscenční, výbojové a teplotní.

4.1 Elektroluminiscenční zdroje

Elektroluminiscenční světelné zdroje jsou založeny na vyzařování optického záření při průchodu elektrického proudu vhodným polovodičovým materiálem. Mezi tyto zdroje řadíme světelnou diodu, laserové diody a elektroluminiscenční panely. Elektroluminiscence byla poprvé zpozorována už v roce 1907 Henry Roundem, který si všiml emitujícího světla při průchodu proudu některými látkami. První elektroluminiscenční zdroj použitelný v praxi, však byl zhotoven až v roce 1962 Nickem Holonyakem. Byla to světelná dioda LED (Light – Emitting Diode) vyrobená z materiálu GaAsP vyzařující monochromatické červené světlo. Tento materiál se spolu s dalšími fosfidy a arzenidy galia, india a hliníku používá dodnes k výrobě červených, oranžových a žlutých LED. U modrých, fialových a zelených se dává přednost nitridům a selenidům zinku a galia. Objev těchto ostatních barevných LED zdrojů, ale probíhal postupně. Nejdříve byli pro své slabé světelné parametry využívány jenom jako signalizační a kontrolní prvky. Až se snižujícími se náklady na výrobu a novými kvalitnějšími technologickými postupy se začaly uplatňovat jako plnohodnotné světelné zdroje. Největší rozmach nastal v devadesátých letech minulého století po prvním zkonstruování LED vyzařující modrou barvu. To se povedlo japonskému vědci Shujimu Nakamurovi v roce 1993. Do této doby nebylo možné vytvořit luminiscenci bílé světlo. Postupným vývojem tedy bylo dosaženo plného barevného spektra, zvyšovala se účinnost, spolehlivost, prodlužovala se doba života a zvyšovaly se světelné parametry. Tento mohutný pokrok pokračuje i v současnosti, kdy je financováno mnoho výzkumů zabývajících se dalším navyšováním světelného toku a měrného výkonu. V této oblasti se totiž nachází velký potenciál. Běžně vyráběné LED už dosahují na hranici 100 lm/W a více. Americké firmě CREE se dokonce už podařilo ve světelné laboratoři sestavit diodu o měrném výkonu 303 lm/W. Těmito parametry už přesahuje většinu ostatních světelných zdrojů a stává se tak velice významným prvkem ve světelné technice. [3, 9]

4.1.1 Princip funkce

Optické záření je emitováno průchodem elektrického proudu přes polovodičový PN přechod. Ten je složen ze dvou typů polovodičů. Každý reálný polovodič obsahuje příměsi, díky kterým zvyšuje svou elektrickou vodivost. Nebýt těchto cizích příměsí polovodič by se projevoval jako izolant. Podle typu příměsí rozlišujeme:

- Polovodič typu N

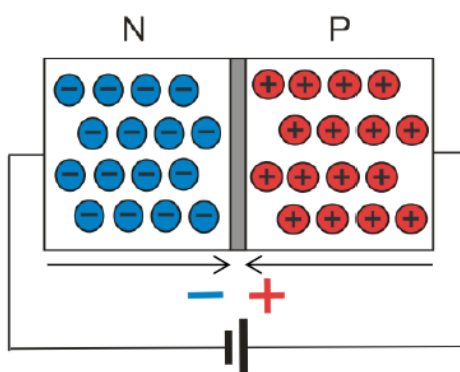
Příměsemi, nazývanými donory, jsou prvky obsahující o jeden elektron víc ve valenční vrstvě než čistý polovodičový prvek, který dotujeme. Přidáme – li do křemíku se čtyřmi valenčními elektrony například pětimocný fosfor, tak se jeho čtyři valenční elektrony podílejí na vytvoření vazby se sousedními atomy a pátý elektron zůstane volný a může lehce přeskóčit do vodivostního pásu. Elektrony jsou majoritními nosiči náboje.

- Polovodič typu P

Příměsemi, nazývanými akceptory, jsou prvky obsahující o jeden elektron méně ve valenční vrstvě než dotovaný polovodičový prvek. Při dotaci křemíku třímocným borem chybí jeden elektron k vytvoření úplné vazby. Proto k doplnění této vazby musí přeskóčit jeden elektron ze sousední vazby a ve valenčním pásu se vytvoří kladná díra.

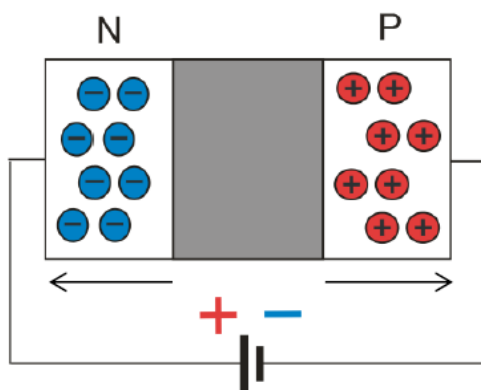
Příměsi – akceptory přijmou (akceptují) elektrony z valenčního pásu. Majoritními nosiči náboje jsou díry. [3]

Po mikroskopickém umístění těchto dvou typů polovodičů vedle sebe vznikne PN přechod. Začne docházet k difúzi majoritních elektronů z oblasti N do oblasti P, kde dojde k jejich rekombinaci. To samé začnou provádět díry v opačném směru. Při těchto rekombinacích se uvolňuje energie v podobě tepla do polovodičového krystalu nebo se vyzáří v podobě fotonů. Tento samovolný přesun nábojů pomocí difúze však po chvíli ustane a PN přechod přestane vysílat optické záření. Abychom udrželi neustálou rekombinaci nábojů a následný vznik světla je potřeba PN přechod připojit ke stejnosměrnému zdroji elektrické energie. Energie ze zdroje musí překonat sílu hradlové vrstvy. Hradlová vrstva je elektrické pole, které se zrodí na rozhraní oblastí N a P vlivem nevykompenzovaných iontů akceptorů a donorů. Připojíme – li kladný pól zdroje k oblasti P a záporný pól k oblasti N dojde ke snížení odporu hradlové vrstvy a obvodem začne téci elektrický proud (obrázek 4-1). [3]



Obr. 4-1 Zapojení PN přechodu v propustném směru (převzato z [3])

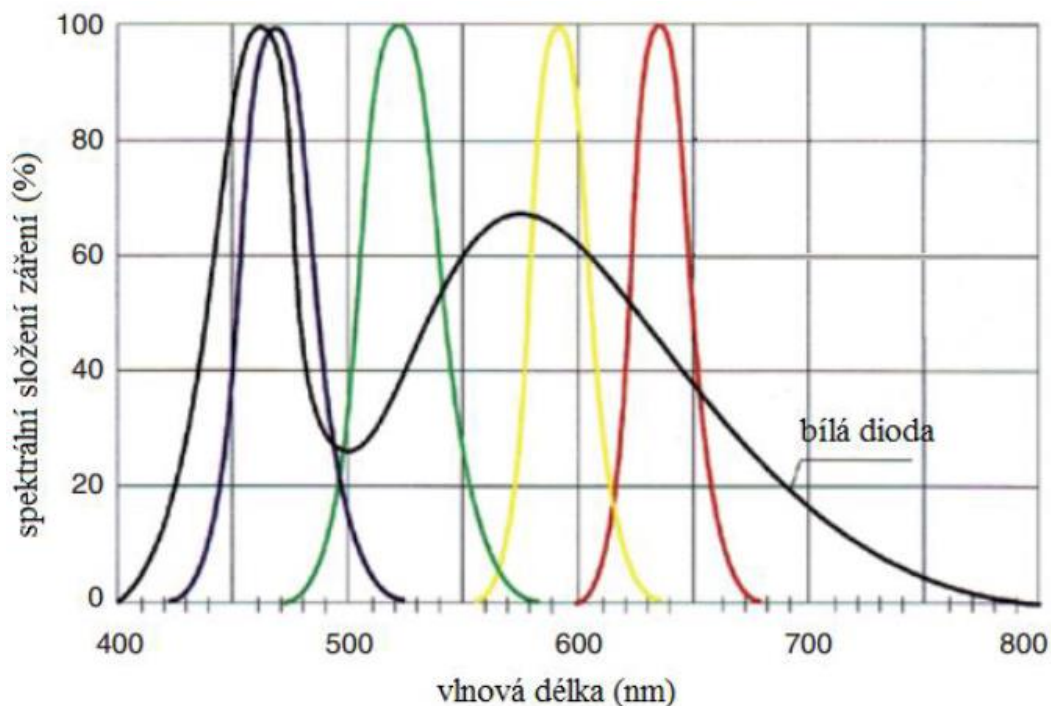
Elektrony z oblasti N jsou přitahovány ke kladnému pólu zdroje a díry z oblasti P k zápornému pólu. Takto je PN přechod zapojen v propustném směru, volné náboje rekombinují a vyzáří se energie. Vlnová délka emitovaného záření (barva světla) je závislá na velikosti zakázaného pásu. Zakázaný pás nám udává míru energie, kterou musí překonat elektron při přesunu z valenčního do vodivostního pásu. Intenzita záření je závislá přímo úměrně na šířce tohoto pásu. Přepojíme – li PN přechod do závěrného směru (kladný pól zdroje k oblasti N a záporný pól k oblasti P), tak se tloušťka hradlové vrstvy zvětší a obvodem nemůže procházet proud. Elektrické pole vyvolané zdrojem totiž působí ve stejném směru jako elektrické pole v hradlové vrstvě (obrázek 4-2). [3]



Obr. 4-2 Zapojení PN přechodu v závěrném směru (převzato z (3))

4.1.2 Spektrum LED

PN přechod je zdrojem monochromatického světla. Na obrázku 4-3 vidíme, že spektrální křivky jednotlivých barevných LED jsou velmi úzké. U laserových diod je dokonce vyzářený interval vlnových délek krátký jen několik jednotek nanometrů. [9]



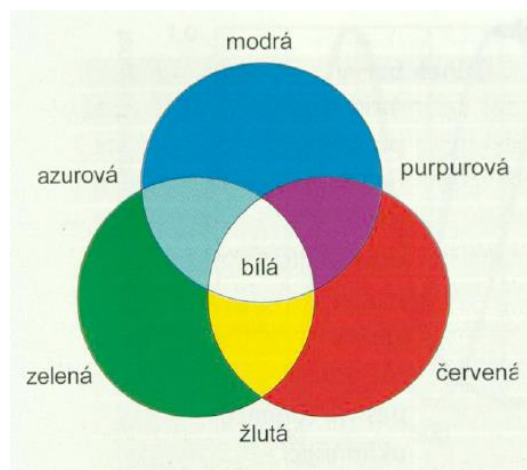
Obr. 4-3 Emisní spektrum modré, zelené, žluté, červené a bílé LED (převzato z [3])

4.1.3 Bílá LED

Bílá LED jako jediná vysílá vlnové délky v celé šíři viditelného spektra. Z principu funkce světelných diod totiž nelze přímo získat bílé světlo. Existují dva způsoby k vytvoření bílého světla:

4.1.3.1 RGB systém

Je založen na míšení tří základních barev – červené, zelené a modré. Smíšením dvou monochromatických zdrojů získáme dichromatický světelný zdroj o odlišných fotometrických vlastnostech, především se změní barva světla. Čím více monochromatického vlnového záření spojíme, tím lepší bude výsledný barevný vjem – zvýší se index barevného podání R_a . Smícháme – li ve vhodném poměru všechny tři základní barvy trichromatické soustavy, dostaneme barvu bílou (obrázek 4-4). [30]



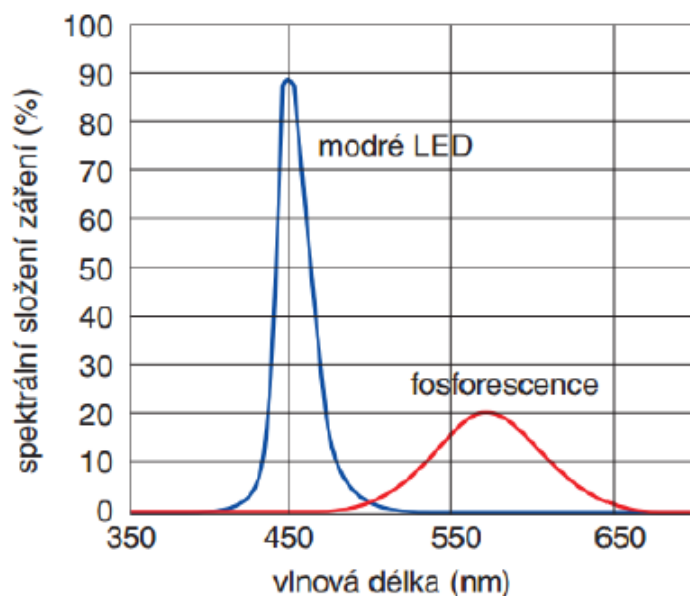
Obr. 4-4 Míšení barev využívané v RGB systému (převzato z [9])

Tento princip vzniku světla má nevýhodu v tom, že překrývání barev není vždy úplně dokonalé a navíc vlivem odlišného stárnutí polovodičových materiálů v jednotlivých čipech může dojít ke změně ve výsledném spektru. [3]

4.1.3.2 Konverze vlnových délek pomocí luminoforu

Při tomto způsobu dochází k přeměně části vlnových délek vyzařovaného monochromatického záření. Podle tohoto původního záření rozdělujeme tento princip vzniku bílého světla na dva typy.

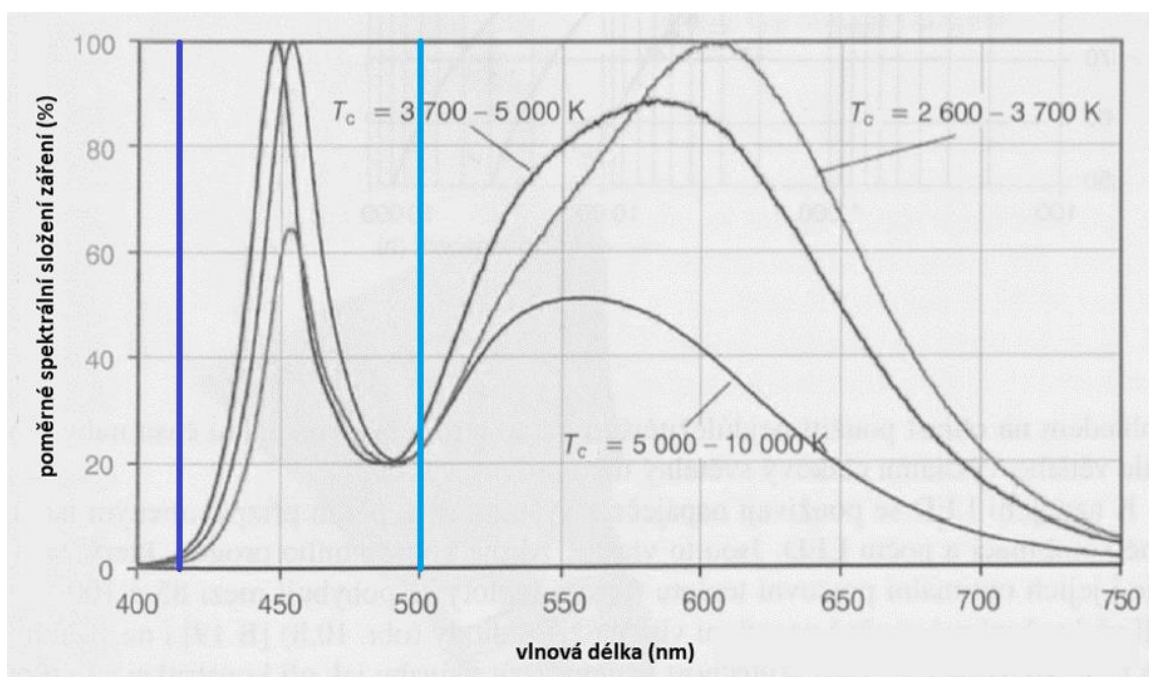
První typ obsahuje ve svém spektru pouze modrou složku světla. Část záření je propuštěna a část absorbována ve fosforovém luminoforu a následně vyzářena o delší vlnové délce (zejména v oblasti žluté barvy). Tato metoda je velmi účinná, ale výsledný index podání barev R_a není příliš vysoký pro chybějící vlnové délky v zelené a červené oblasti. Naopak je velmi výrazná modrá složka záření (obrázek 4-5). [30]



Obr. 4-5 Spektrum bílé LED – fosforový luminofor buzený modrým světlem (převzato z [3])

V druhém případě PN přechod emituje pouze ultrafialové záření. To je pomocí třípásmového luminoforu zcela přetransformováno do viditelné oblasti různých délek. Na obdobném principu vzniká světlo i v žárvkách. [9]

Konverze kratších vlnových délek na delší je závislá na složení luminoforu. Luminofor je látka obsahující kovy vzácných zemin a ovlivňuje výsledné spektrum. Čím více je záření přeneseno luminoforem do oblasti delších vln, tím klesá náhradní teplota chromatičnosti T_c a naopak se zvětšuje index podání barev R_a . Různá spektra bílých LED vidíme na obrázku 4-6. Světelné diody s vysokou teplotou chromatičnosti (LED chladnějších odstínů) vyzařují velké množství modrého světla a patří jednoznačně mezi umělé zdroje, které nejvíce dokáží rozhodit přirozený biorytmus lidského organismu. [30]



Obr. 4-6 Typická spektra bílých LED s různou teplotou chromatičnosti (převzato z [9])

Vedle velkého měrného výkonu LED zdroje nabízejí spoustu dalších předností. Vyznačují se malými rozměry, díky kterým je lze umístit do svítidel různých tvarů a velikostí, a také velkou mechanickou odolností. Konstrukce LED je prováděna tak, aby byly schopné nahradit žárovky v již existujících svítidlech. Například zachovávají stávající obrysové rozměry a tvar patice typických pro starší světelné zdroje.

Další výhodou LED je jejich spolehlivost a obrovská délka života (60 000 – 100 000 hodin), která neklesá ani při častém a rychlém vypínání a zapínání. Umí tedy pracovat v impulsním režimu, lze je snadno dynamicky regulovat a korigovat jejich jas. Pro své úzké monochromatické spektrum se barevné diody vyznačují jasnými nezaměnitelnými barvami, lze také vytvořit libovolný barevný odstín o vysoké čistotě, což je vlastnost, která je předurčuje k využití v signálních zařízeních.

Mezi slabší stránky LED patří jejich malý jednotkový výkon. Pro dosažení větších hodnot světelného toku je potřeba zapojit více LED do série, což je finančně náročné. Druhou nevýhodou je závislost světelných parametrů na teplotě okolí. Z oblasti PN přechodů je třeba odvádět teplo, aby nedocházelo ke snižování světelného toku a životnosti LED. [9]

4.2 Výbojové zdroje

Ve výbojových zdrojích se uplatňují převážně dva principy vzniku světla. Prvním z nich, jak už název napovídá, je hořící elektrický výboj v plynech a parách pevných látek (především kovů), který přímo vyzařuje viditelné záření. Nejčastěji se využívají kovové prvky rtuť a sodík nebo různé halogenidy, které jsou rozptýleny ve výbojové trubici společně se vzácnými plyny (např. neon, argon). Druhým principem je fotoluminiscence pevných látek nanesených na vnitřní straně výbojové trubice, kdy generované UV záření z výboje je přetransformováno do viditelné oblasti. [9]

Výboj vzniká mezi elektrodami umístěnými na obou koncích skleněné trubice. Při průchodu proudu přes elektrodová vlákna, dochází k uvolňování elektronů vlivem tepelné emise. Při jejich následném pohybu dochází ke srážkám s parami kovů. Kinetická energie způsobí vybuzení atomů, atom kovu přejde do vyšší energetické hladiny, ve které ale setrvá pouze několik nanosekund, a následně se navrátí do své základní polohy, přičemž uvolní získanou energii v podobě fotonů v příslušných spektrálních čarách. Spektrum tedy není spojité, ale obsahuje určité navzájem oddělené čáry – čárové spektrum. [2, 33]

Pro zapálení výboje je potřebné výrazně zvýšit napětí mezi elektrodami. K tomu se využívají různé specializované prvky, které jsou vestavěné přímo ve výbojce nebo se připojují externě. Další typickou vlastností je že, oproti světelným tepelným zdrojům déle trvá, než se dosáhne maxima vyzařovaného světelného toku.

Existuje spousta typů výbojových světelných zdrojů, které se mohou třídit podle různých hledisek – podle typu výboje, podle místa vzniku záření nebo podle tlaku pracovní náplně. Nejčastěji používané dělení je posledně jmenované – podle velikosti tlaku, při kterém probíhá výboj, protože právě tlak zásadním způsobem ovlivňuje konstrukci a provozní parametry zdroje. [9]

4.2.1 Zářivka

Zářivka je nejvýznamnějším světelným výbojovým zdrojem. Jedná se o nízkotlakovou rtuťovou výbojku využívající se hlavně ve vnitřních prostorech v průmyslu, v domácnostech, v administrativních budovách atd.

Výboj v parách rtuti emituje zejména UV záření. To je pomocí několika vrstev luminoforu přeneseno do oblasti delších viditelných vln. Každá z těchto vrstev přenáší záření na jinou vlnovou délku, takže čím je luminofor rozvrstvenější, tím je výsledný index podání barev R_a větší. [9]

Po zažehnutí výboje dojde k poklesu napětí mezi elektrodami a následnému zvyšování proudu, tak jak to udává nelineární klesající $V - A$ charakteristika elektrického oblouku. Pro stabilizaci oblouku je třeba proud řídit. To se v současné době provádí pomocí elektronických obvodů obsažených v elektronickém předřadníku. Tento prvek slouží v zářivkách nejenom k řízení napájení, ale především k zapálení samotného výboje zvýšením napětí mezi elektrodami. Před rozvojem této řídicí elektroniky, které lépe optimalizují podmínky hoření výboje, se využíval ke startování zářivek indukční předřadník. [2]

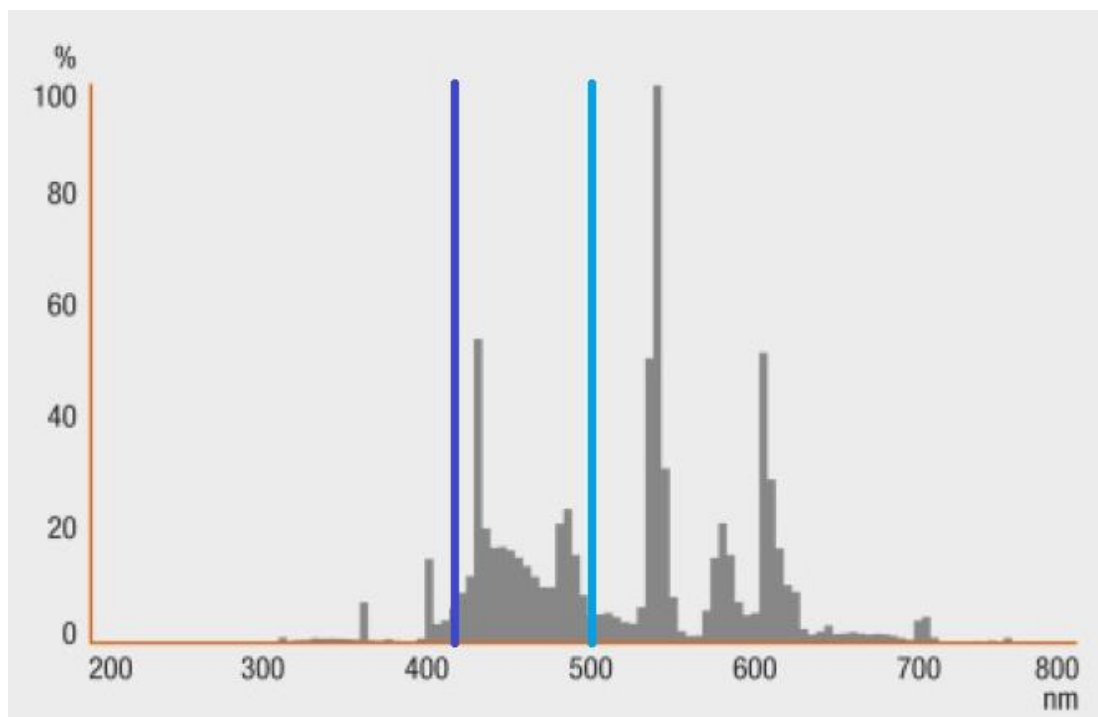
Sortiment zářivek je obrovský. Vyrábějí se v různých tvarech a také o různých elektrických a světelných – technických parametrech. Nejzákladnější je rozdělení podle tvaru výbojového prostoru – lineární, kruhové, spirálové a kompaktní. Lineární zářivkové trubice mají na každém svém konci patičky s kolíky, přes které se zapojují do elektrického obvodu. Pro svůj dlouhý tvar, ale toto zapojení není příliš vhodné, proto byly vyvinuty kompaktní zářivky. Ty se zapojují do obvodu

skrz jednu patici. To je možné vzhledem ke konstrukci trubice, která je stočena. Kompaktní zářivky s integrovaným elektronickým předřadníkem a paticí s Edisonovým závitem E27 se blíží geometrickými rozměry a kvalitou barevného podání klasickým žárovkám a postupně je také nahrazují v osvětlovacích soustavách z důvodu lepší energetické účinnosti a delší životnosti.

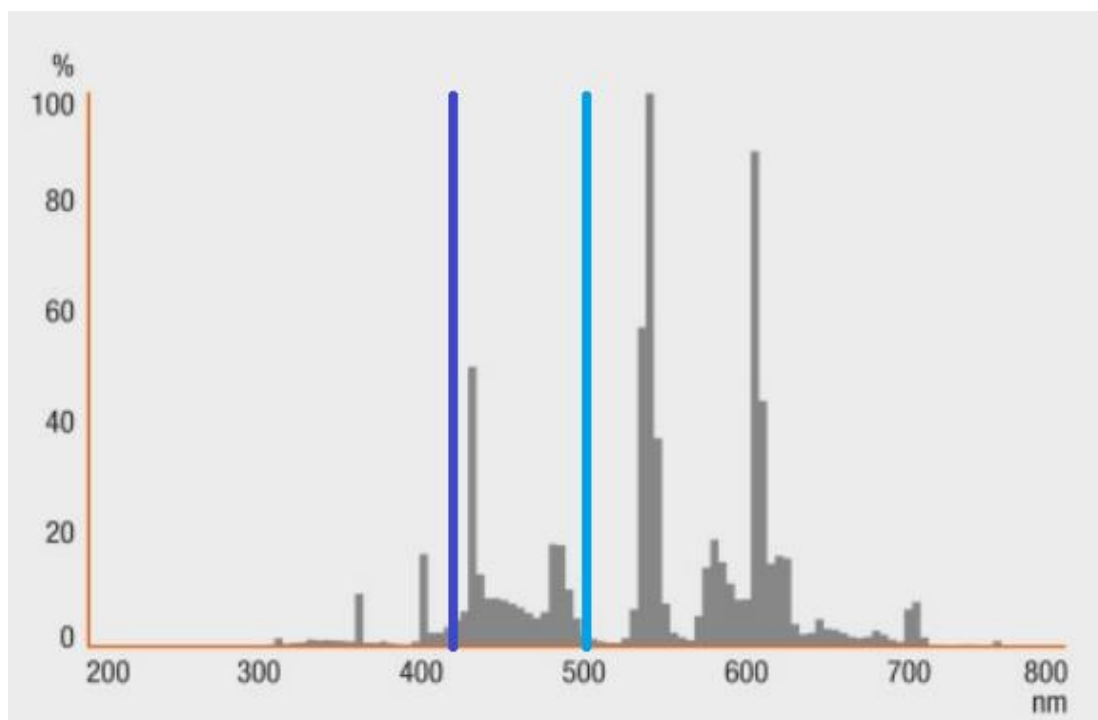
Doba života zářivek je závislá na typu předřadníku a na stylu provozu. Při častějším zapínání se zkracuje. Další nevýhodou je závislost světelného toku na okolní teplotě, kterou se výrobci snaží odstranit používáním některých vhodných amalgámů. Tyto slitiny rtuti a kovů dokáží udržet maximální účinnost ve větším teplotním rozmezí.

Právě celková světelná účinnost zářivek se navýšila hlavně díky vysokofrekvenčnímu napájení přes elektronické předřadníky, novým luminoforům a také spojením více výbojových prostorů do jednoho celku až na hodnotu 104 lm/W . [9]

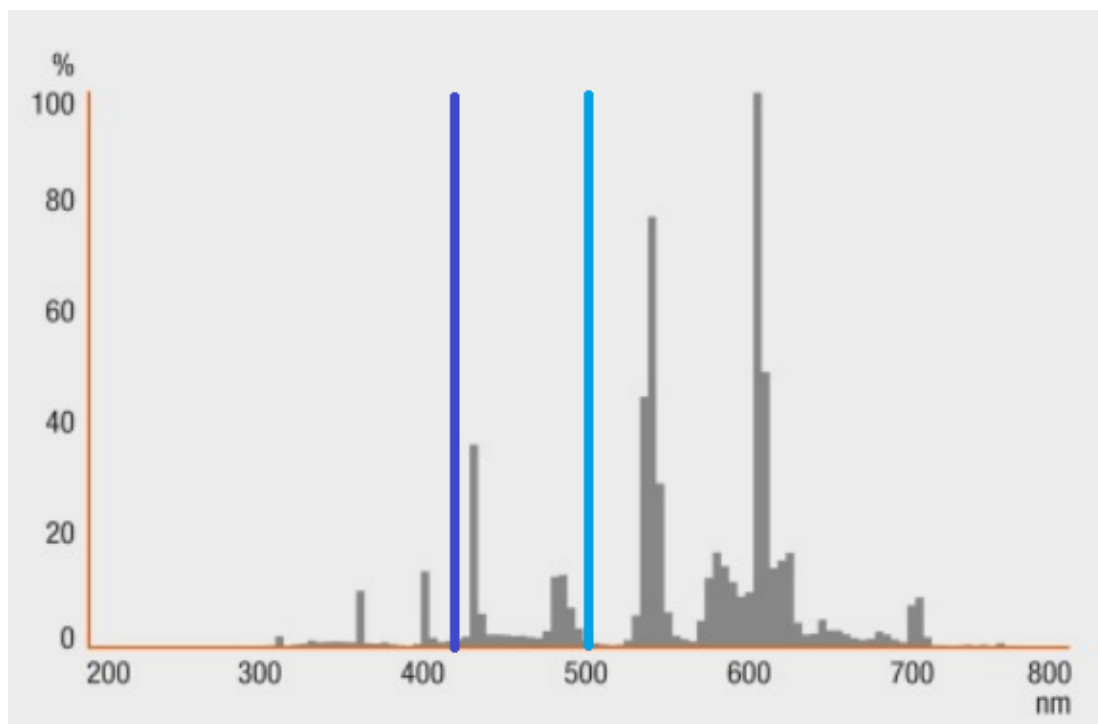
Existuje také spousta specializovaných typů zářivek využívaných k různým účelům. Různé barevné, s upraveným spektrem určeným k pěstování rostlin nebo například UV lampy. Nejznámější z nich jsou germicidní zářiče, které slouží v lékařství a potravinářství ke sterilizaci prostředí. Jedná se o zářivky, které neobsahují žádný luminofor a vyzařují pouze v oblasti UV – C. Největší germicidní účinek má vlnová délka 254 nm . Mezi UV lampy dále řadíme také zdroje tzv. černého světla, za které je považována zářivka produkující pouze UV – A záření. Trubice je vyrobena z Woodova skla, které blokuje krátkovlnné UV a viditelné záření a propouští pouze rozsah vlnových délek od 300 do 400 nm . Tento typ zářiče je využíván k různým kontrolním účelům (např. v testech bankovek, kde se využívá luminiscence některých látek vyvolané UV zářením) nebo k různým divadelním a reklamním efektům. Další specializovaná zářivka je označovaná pod názvem Skywhite a vyznačuje se vysokou teplotou chromatičnosti. Uplatňuje se v prostorech, do kterých v průběhu dne nepronikne příliš slunečního svitu. Barevných odstínů vyzařovaného světla lze vytvořit nekonečně mnoho. Příklady spekter vybraných typů zářivek podle katalogu Osram lze vidět na následujících obrázcích. První číslice v označení zdroje za jmenovitým výkonem uvádí velikost indexu podání barev R_a v desítkách (např. číslice 8 představuje R_a v rozmezí $80 - 89$) a následující dvojčíslí sděluje hodnotu náhradní teplotní chromatičnosti ve stovkách Kelvinů (např. dvojčíslí 65 představuje $T_c = 6500 \text{ K}$). [2, 9, 21, 33]



Obr. 4-7 Zářivka T5 HE 14W/865 chladně bílá (převzato z [31])



Obr. 4-8 Zářivka T5 HE 14W/840 neutrálně bílá (převzato z [31])

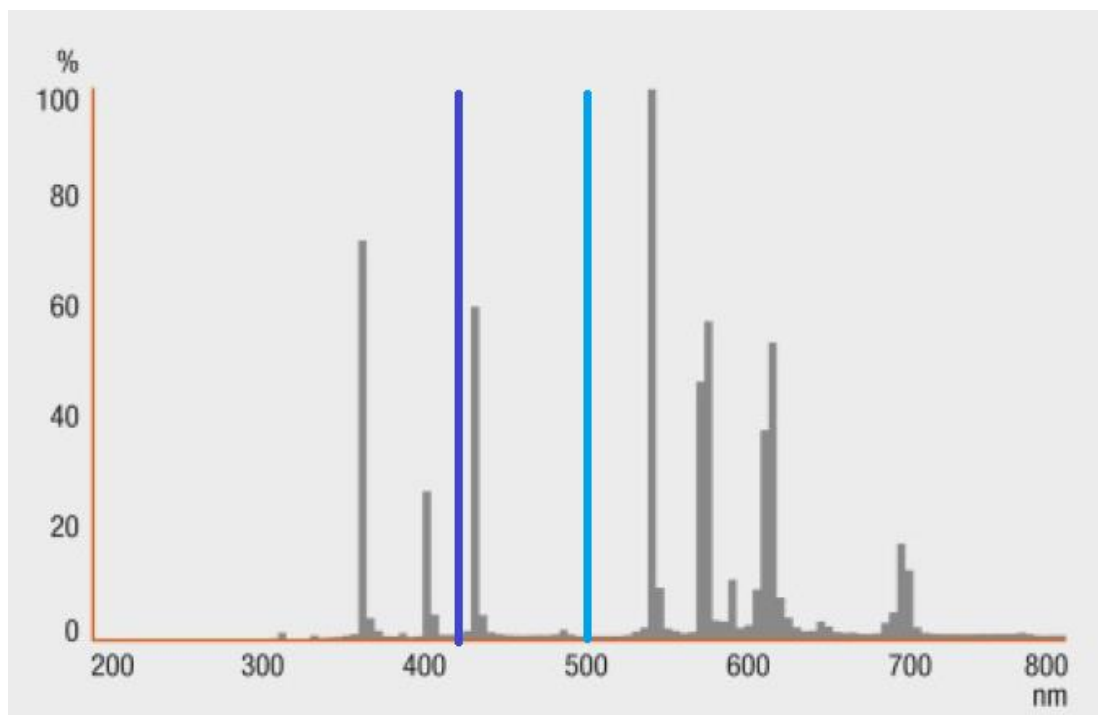


Obr. 4-9 Zářivka T5 HE 14 W/830 teple bílá (převzato z [31])

4.2.2 Vysokotlaké výbojové zdroje

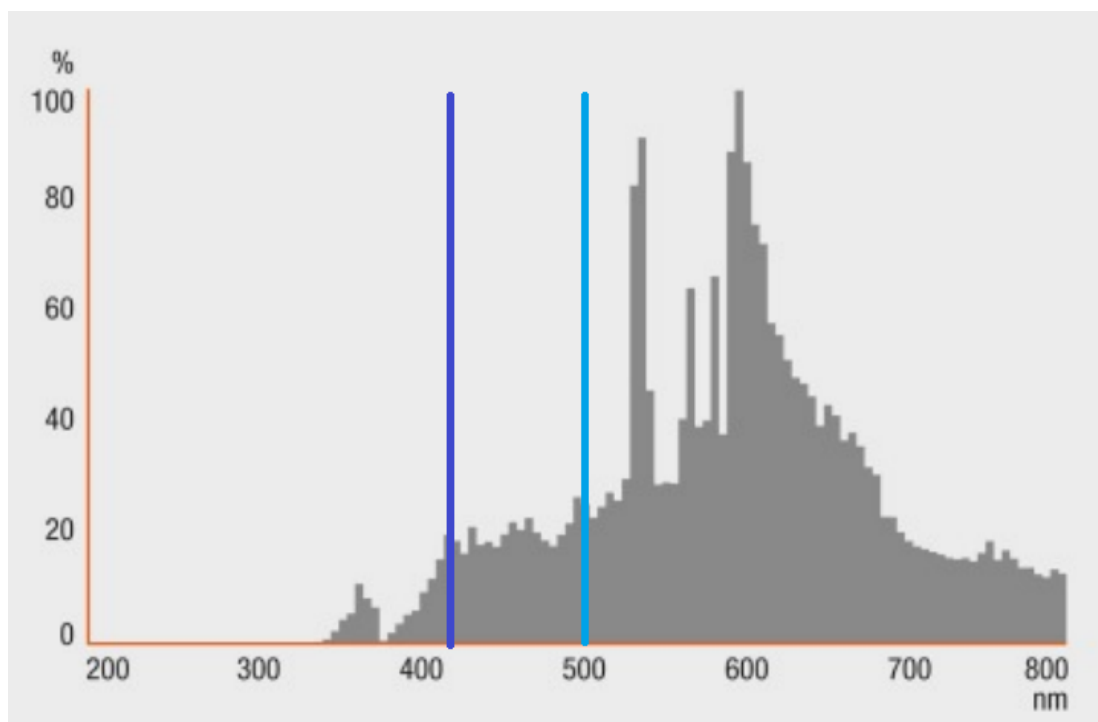
Vysokotlaké výbojové světelné zdroje pracují při vyšší pracovní teplotě, vyšším tlaku (stovky kPa) a vyšší proudové hustotě než zářivky. Na výrobní materiály jsou z tohoto důvodu kladeny značné nároky. Radíme mezi ně především rtuťovou, halogenidovou a sodíkovou výbojku.

U vysokotlaké rtuťové výbojky je výbojový prostor (hořák) konstruován z teplotně odolného křemenného skla, do kterého jsou zataveny dvě hlavní a jedna pomocná elektroda. Díky ní není zapotřebí žádných předřadných zapalovacích obvodů. Do elektrického obvodu se zapojují pouze přes tlumivku. Směsové výbojky (kombinace rtuťové výbojky a žárovky) dokonce nevyžadují ani tuto předřadnou tlumivku. Rtuťové páry vyzařují velkou část energie v ultrafialové oblasti, která musí být luminoforem přetransformována na delší vlny, zejména do červeného pásma. Ve spektru jsou dále významné vlny o délce 404 – 407, 436, 546 a 577 nm (obrázek 4-11). Kvůli sníženému podílu červeného světla (nižší R_a) a malému měrnému výkonu (50 - 60 $lm.W^{-1}$) výroba a využití těchto zdrojů stagnuje. [2, 9]



Obr. 4-10 Spektrum rtuťové výbojky HQL SUPER DL 80 W E27 (převzato z [31])

Halogenová vysokotlaká výbojka odstraňuje zmiňované nevýhody rtuťové výbojky. Spektrální čáry rtuťových par lze doplnit zářením dalších chemických prvků, které vhodně (podle konkrétních požadavků) doplní spektrum a zvýší světelně – technické parametry. Technologie a konstrukce je velice obdobná. Největší rozdíl spočívá ve výbojovém prostoru, který je doplněn směsí halogenových sloučenin určujících výsledné spektrum.



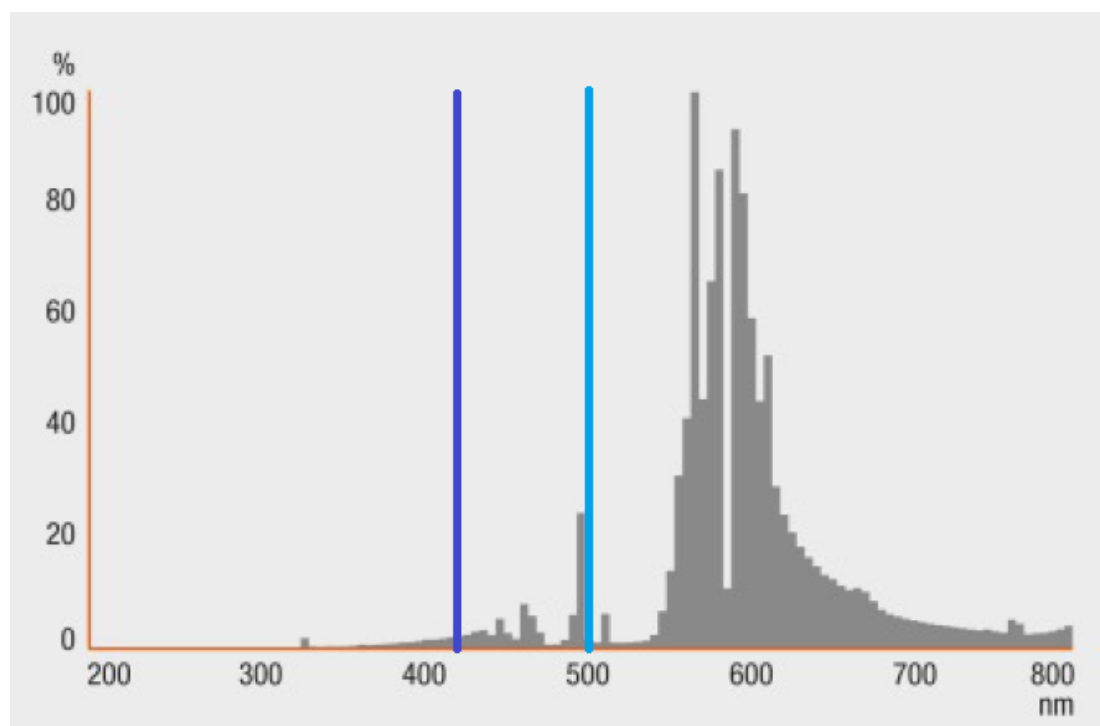
Obr. 4-11 Spektrum halogenidové výbojky POWERBALL HCI – T 35 W/830 WDL PB (převzato z [31])

Halogenidové výbojky dosahují díky svému bohatému spektru vysokých hodnot indexu barevného podání (zejména výbojky s keramickým hořákem) při udržení vysokého měrného výkonu. Jsou hojně instalovány na sportovních stadionech, v obchodních domech, v galeriích a někde i ve veřejném osvětlení. Při doplnění hořáku vhodnými prvky může vzniknout záření v modro – fialové oblasti, využívající se v polygrafickém průmyslu nebo v soláriích. [9]

Nejúčinnějšími vysokotlakými světelnými zdroji jsou sodíkové výbojky s měrným výkonem mezi 45 – 150 lm/W. Tato hodnota je závislá na tlaku ve výbojové trubici. Při vyšším tlaku je část záření plynem absorbována a znovu vyzářena v jiných vlnových délkách, což vede ke zvýšení indexu barevného podání na úkor světelné účinnosti. Výsledné spektrum není tedy tak monochromatické jako u nízkotlakových sodíkových výbojek.

Vzhledem k chování sodíku při vysokých teplotách a tlacích musí být hořák zhotoven z oxidu hlinitého, který splňuje potřebné fyzikálně – chemické vlastnosti.

Sodíkové výbojky nacházejí využití především ve veřejném osvětlování v místech nenáročných na kvalitu barevného podání. Někde jsou nahrazovány halogenovými výbojkami.



Obr. 4-12 Spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky VIALOX NAV-E 50 W SUPER 4Y (převzato z [31])

4.3 Teplotní světelné zdroje

Světlo u tohoto typu zdrojů je způsobeno tepelným zářením zahřátého tělesa. Každá hmota o určité teplotě emituje do svého okolí záření. Celková intenzita vyzařování je výrazně závislá na termodynamické teplotě. Čím je teplota vyšší, tím těleso vydává kratší vlnové délky o vyšší energii. K těmto zdrojům řadíme plameny ohně, svíček, olejových lamp a především žárovky. Kromě viditelného světla vyzařují hlavně v infračervené oblasti, takže jsou také výrazným zdrojem tepla, což se projevuje na jejich celkové světelné účinnosti. Spektrum teplotních zdrojů je spojitě. [9, 33]

4.3.1 Žárovky

Objevení principu vzniku světla v žárovce sahá až do počátků 19. století, kdy se pomocí elektrického proudu žhavily různé materiály. Platina, uhlík, tantal až se postupně přešlo k wolframového vlákna s teplotou tání 3300°C . Největší revoluci, která vedla k počátku sériové výroby, však způsobil až Edison v roce 1879. V tomto období také nastal výrazný pokrok v celkové elektrifikaci – vznikali první elektrárny a první rozvody elektrické energie. Dále se už prováděly jenom menší změny (rovné vlákno bylo stočeno do spirály, vakuum v baňce bylo nahrazeno plynovými náplněmi), které vedly k dalšímu navýšení účinnosti a stability světelných parametrů.

Klasické žárovky jsou z celosvětového hlediska stále nejpoužívanějšími světelnými zdroji, zejména pro svoji levnou a vysoce automatizovanou výrobu. Nejvýkonnější linky jsou schopny vyprodukovat až 1 milion baněk denně. [2]

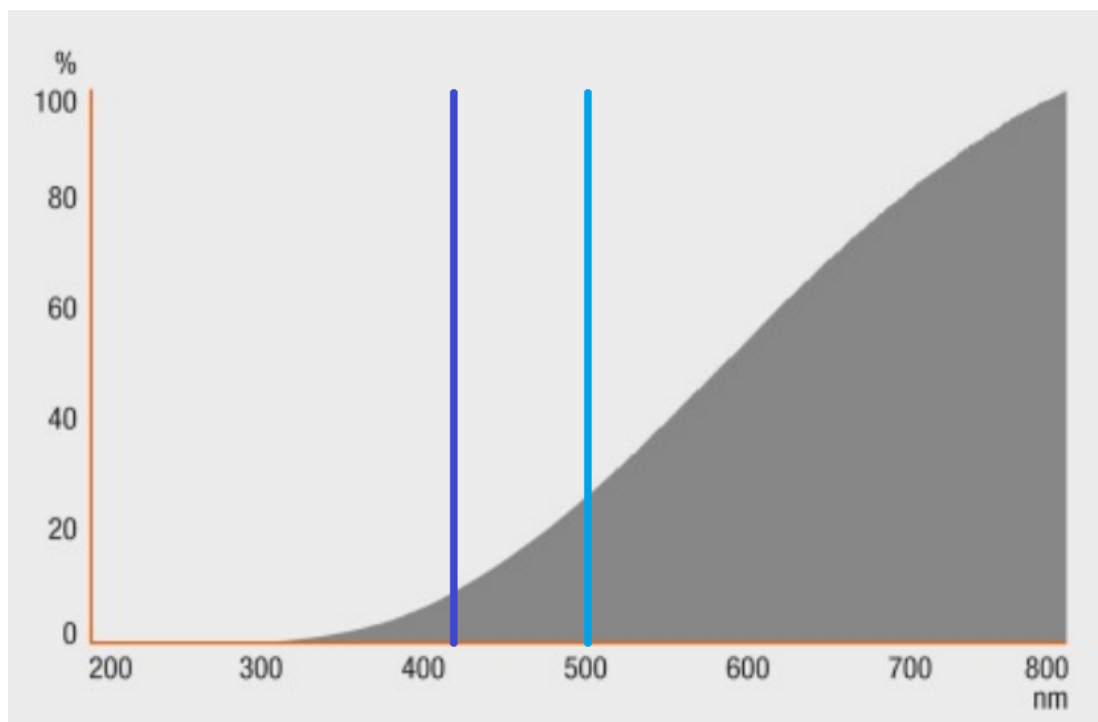
Základem každé žárovky je tedy tenké wolframové vlákno stočeno do jednoduché nebo dvojité šroubovice o průměru $10\text{ }\mu\text{m}$ až $120\text{ }\mu\text{m}$. To je drženo ve stabilní poloze molybdenovým háčkem a přívodními dráty, které jsou složeny z více částí. Vnější část je připojena k patici a v případě přetavení vlákna slouží jako pojistka. Vnitřní část je složena z železo – niklové slitiny a mědi, jejichž celková délková roztažnost je stejná jako sklo. To umožňuje perfektní těsnost a udržení plynů v baňce žárovky po celou dobu života. Plynou náplň tvoří vzácné plyny argon nebo krypton společně s dusíkem, které plní řadu funkcí. Slouží zejména ke snížení množství vypařeného wolframu, což umožňuje navýšit teplotu vlákna a tím i celkovou účinnost. Plyny jsou drženy v měkké sodno – vápenaté skleněné baňce pod tlakem $80 - 100\text{ kPa}$. Baňky se vyrábějí různého tvaru a v různém povrchovém zpracování (čiré, matné, barevné).

Měrný výkon žárovky by teoreticky mohl dosáhnout hodnot až kolem 50 lm/W při teplotě blízké 3300°C (teplota tání W). V takovém případě by ale její život byl velmi krátký a navíc rychle vypařený wolfram způsobí zčernání baňky a tím by došlo k rapidnímu snížení světelného toku. Obvyčejné žárovky jsou tedy optimalizovány na rozumnou rychlost odpařování při teplotě mezi 2700°C až 2900°C . To odpovídá měrnému výkonu $10 - 18\text{ lm}$. Vedle relativně krátké doby života a malé účinnosti další slabším místem těchto zdrojů je vysoká závislost světelně technických parametrů na napájecím napětí.

Naopak mezi kladné vlastnosti patří zejména spojitě spektrum (obrázek 4-14) s vynikajícím podáním barev ($R_a = 100$). Oproti běžným zářivkám s indukčním předřadníkem neblíkají a nehrozí vznik stroboskopického efektu díky tepelné setrvačnosti vlákna. Jsou jednoduché z konstrukčního hlediska a také se snadno zapojují do elektrorozvodné sítě (není potřeba předřadných obvodů). [9]

Speciálním typem žárovek jsou halogenové žárovky. Jejich plynná náplň je kromě inertních plynů tvořena také sloučeninami halogenů, které způsobují wolfram – halogenový cyklus. Jedná se o regenerační cyklus, během kterého se vypařený wolfram sloučí s halogeny a následně se vlivem difúze přesune zpátky k vláknu. Zde dojde k rozpadu příslušného halogenidu. Wolfram se tedy navrátí zpět na vlákno a volný halogen se opět účastní reakce. Tento proces netrvá věčně, ale zásadním způsobem prodlouží život žárovky při stejném nebo vyšším světelném toku. Z důvodu větší teploty a pracovního tlaku plynné náplně je baňka provedena z křemičitého skla. To představuje problém při manipulaci, kdy při dotyku soli obsažené v lidském potu reagují se sklem, což může vést až k prasknutí baňky. [9, 33]

Halogenové žárovky našly uplatnění zejména v automobilovém průmyslu.



Obr. 4-13 Spektrum halogenové žárovky HAL CL A 77 W 230 V E27 (převzato z [31])

4.4 LCD obrazovky

V dnešní době stále více lidí tráví spoustu času sledováním obrazovek různých zařízení – počítačů, televizí, telefonů, tabletů a dalších mobilních promítacích přístrojů a to jak z důvodu pracovních, tak i volnočasových. K zobrazení dat na obrazovkách jsou využívány různé technologie. Klasické obrazovky CRT nahradila plazmová technologie a zejména také LCD (Liquid Crystal Display).

I přestože zajímavé optické vlastnosti tekutých krystalů byly pozorovány už v 19. století, tak první LCD byl vytvořen až v roce 1968 výzkumníkem Georgem Heilmaierem a byl užíván v digitálních hodinkách. Ve větším množství se ale začaly vyrábět až na počátku 90. let společně s masivním rozvojem výroby projektorů a plochých monitorů.

Princip LCD spočívá v natočení molekul tekutého krystalu pomocí elektrického pole. Přes tyto molekuly prochází polarizované světlo, jehož vlastnosti jsou dány právě polohou těchto částic. Každý obrazový bod na monitoru (pixel) obsahuje barevný filtr, který rozloží světlo na tři základní složky – modrou, červenou a zelenou. Tranzistorem řízené napětí na elektrodách reguluje výsledný stav tekutých krystalů. Při těchto stavech vznikají různé barevné odstíny, kterých může být až několik miliónů. [17]

Pro správnou funkci LCD displeje je potřeba za tekuté krystaly umístit světelný zdroj. V minulosti se nejčastěji využívaly zářivky se studenou katodou (CCFL – Cold Cathode Fluorescent Lamp). Jedná se o obyčejné miniaturní zářivky, ve kterých výboj hořící mezi „studenými“ elektrodami ve rtuťových parách, produkuje UV záření, které je následně luminoforem přetransformováno na světlo. Elektrody nejsou ve skutečnosti studené, mohou dosahovat velmi vysokých teplot. Jsou tak pouze označovány z toho důvodu, že emitované elektrony se uvolňují nikoliv tepelnou emisí, ale jenom vlivem přiloženého vysokého napětí. Nedochozí tak k postupnému opotřebení elektrodového materiálu, světelný zdroj má větší životnost a je vhodný pro užití v LCD. [37]

Dnes se k podsvícení LCD využívají převážně LED. Mezi největší výhody oproti technologii CCFL patří menší spotřeba elektrické energie a s tím spojené menší zahřívání monitoru a také lepší podání barev a lepší kontrast. Existují dvě provedení – Direct LED a Edge LED. U technologie Direct jsou LED rovnoměrně rozprostřeny po celé ploše a je možné u nich jednotlivě regulovat jas. Technologie Edge obsahuje pouze několik pásků LED na okraji, do středu displeje je světlo dopraveno pomocí speciálních optických prvků. Celkové podsvícení není tak rovnoměrné, ale přesto je tento způsob rozšířenější, protože umožňuje zmenšit tloušťku obrazovky. [35]

LCD se provádí ve více technologiích (TN, MVA, PVA, S-IPS a organické elektroluminiscenční diody – OLED). Nejrozšířenější a zároveň nejstarší je TN (Twisted Nematic). Tyto metody se od sebe odlišují například v rychlosti odezvy, ve velikosti pozorovacích úhlů, v podání barev, ve složitosti výrobního postupu a podobně. [17, 35]

4.4.1 LCD obrazovky a modré světlo

LCD obrazovky jsou kvůli světelným zdrojům, které obsahují, významným producentem modrého světla. Česká norma ČSN EN 62471 uvádí bezpečnostní hranice pro ohrožení živých tkání různým typem záření a rozděluje světelné zdroje do čtyř skupin:

- a) skupina bezpečných světelných zdrojů,
- b) skupina nízkého nebezpečí,
- c) skupina středního nebezpečí,
- d) skupina vysokého nebezpečí. [33]

Vzhledem k tomu, že LCD nevyzařují UV a IR záření zajímají nás pouze limity popisující míru rizika vzniku fotoretinitidy („blue light hazard“). Ty jsou popsány rovnicemi 3.1 a 3.2 v kapitole o fotochemickém poškození sítnice. Meze ozáření jsou uvedeny pro takovou pozici od světelného zdroje, ve které je osvětlení $E = 500 \text{ lx}$. Toto místo, ale nesmí být blíže než 200 mm . Z mnoha dosud provedených výzkumů vyplývá, že modré světlo z displejů různých elektronických zařízení nemá dostatečnou energii a nepředstavuje tak žádné riziko pro oční sítnici. Jedno z takových typů měření bylo provedeno na dvou typech monitorů

- Fujitsu (20“) DISPLAY L20T-4 (Edge LED),
- NEC (19“) MultiSync 195VXM+, (CCFL).

Výsledky záře L_B vztažené k váhové funkci $B(\lambda)$ spočtené podle rovnice 3.2 pro oba typy LCD jsou zapsány v tabulce 6-1. Je zde vidět, že hodnoty jsou srovnatelné a velmi nízké. [35]

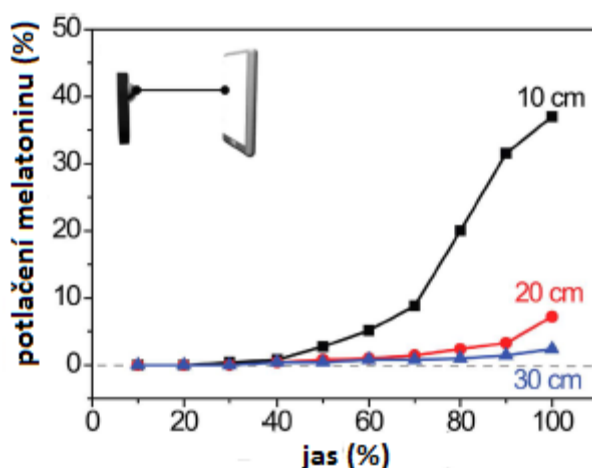
Tab. 4-1 Hodnoty vážené záře L_B LCD obrazovek v závislosti na teplotě chromatičnosti [35]

	CCFL	LED
T_c	L_B	L_B
[K]	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}]$
1900	0,4613	0,4376
2700	0,9998	1,7656
3400	1,8513	2,7093
4200	2,7531	3,7150
5000	3,6362	4,6655
6500	4,6466	5,2283
9300	6,7428	6,2438

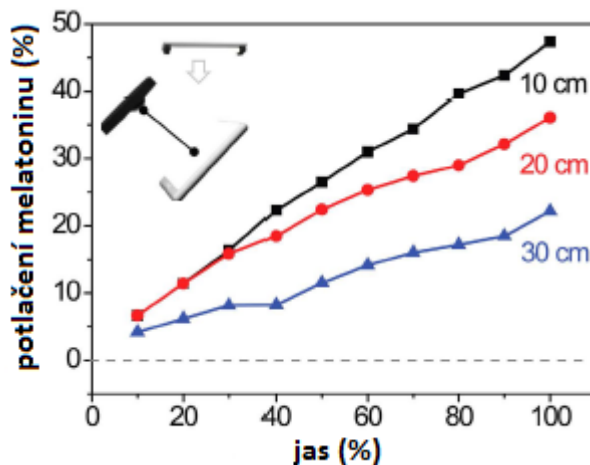
Co se týče vlivu modrého světla z monitorů, televizí a dalších různých displejů na cirkadiánní rytmus, zde nemáme žádné přesně definované hranice nebezpečnosti vzhledem k lidskému organismu jako je to v případě fotochemického poškození sítnice. Dokonce do dnešního dne nebylo provedeno příliš kvalitních výzkumů, které by dostatečně zanalyzovaly vliv častého používání LCD v pozdních hodinách na biologické pochody v těle. Při návrzích a nastavování displejů se myslí často především na barevné podání a na zrakovou pohodu uživatele, ale zapomíná se na nevizuální účinky světla i přesto, že někteří odborníci na to upozorňují.

V jednom z výzkumů byly testovány tři LCD různých „chytrých“ telefonů. Pomocí spektrofotometru bylo měřeno a následně vyhodnocováno záření z displejů během různých činností (prohlížení webových stránek, pozorování videa). Určovala se fotopická osvětlenost, barevný gamut a hlavně cirkadiánní osvětlenost v závislosti na určitých podmínkách. Například v závislosti na vzdálenosti obrazovky a fotodetektoru, na jas displeje nebo na tom zda se zkoušené zařízení nachází v tmavé nebo osvětlené místnosti.

V elektromagnetickém spektru každého LCD byl vidět výrazný úzký výstupek v oblasti krátkovlnného modrého záření. Cílem projektu byla snaha o upravení spektrálního rozložení, tak aby se snížil vliv záření na cirkadiánní rytmus a naopak aby nebyla dotčena kvalita barevného podání a fotopické osvětlenosti.



Obr. 4-14 Potlačení melatoninu v závislosti na jas LCD a na jeho vzdálenosti od spektrofotometru v tmavé místnosti (převzato z [12])



Obr. 4-15 Potlačení melatoninu v závislosti na jas LCD a na jeho vzdálenosti od spektrofotometru v osvětlené místnosti (převzato z [12])

Některé z výsledků výzkumu jsou vidět na obrázcích. Podle očekávání hladina melatoninu v těle klesá se zvyšujícím se jasnem displeje a se zmenšující se vzdáleností od zdroje záření. Zajímavé je zjištění, že při poklesu jasu ze 100 % na 80 % dosáhneme výrazného snížení poklesu melatoninu zejména v tmavých prostorech (obr. 6-1). Jedná se tak o způsob, kterým můžeme dosáhnout požadovaného cíle – snížit vliv na cirkadiánní systém. Toto ale nelze provést v místnosti s dalším světelným zdrojem, protože výsledný efekt je mnohem menší (obr. 6-2).

Další variantou pomocí níž lze dosáhnout snížení negativních účinků modrého světla je úprava spektrálního složení záření doplněním modré LED fialovou. Tyto fialové (modro - fialové) LED vyzařují v oblasti mezi 422 – 450 nm, což je těsně pod vrcholem $C(\lambda)$ – křivky. Jejich použitím se může dosáhnout snížení cirkadiánní osvětlenosti až o 18 %, přičemž nedojde k výraznějšímu omezení dosažitelné oblasti barev (0,2 %) ani k úbytku fotopické osvětlenosti (0,3 %). [12]

4.5 Biodynamické osvětlení

Biodynamické osvětlení umožňuje osvětlovací soustava, u které lze regulovat intenzitu, teplotu chromatičnosti a směrové vlastnosti světla. Tyto světelné parametry by se měli měnit v závislosti na času a prostoru podle venkovního osvětlení. Hlavním účelem je zachovat běžný biologický rytmus u lidského organismu nevystavujícího se přirozenému světlu. To znamená, že například v poledne by intenzita měla být nejvyšší a barevný tón nejchladnější. V ranních a večerních hodinách naopak. Tyto změny jsou předem naprogramovány v řídicím systému a jsou prováděny na základě venkovních světelných podmínek nebo podle času. Lze je také nastavit ručně podle momentální situace. Kromě denního cyklu zde hraje roli i střídání ročních období a zeměpisná poloha.

Biodynamické osvětlení je vhodné zejména pro bezokenní místnosti, ve kterých probíhá řízení (dispečinky, velíny) chemických továren, elektráren a dalších podobných objektů. Cílem je navodit takové světelné prostředí, ve kterém se pracovníci budou cítit jako ve venkovních prostorech.

Patří sem také problematika monitorů a displejů různých zařízení, které dokáží uživateli ve večerních hodinách narušit denní cyklus. Proto už vznikají taková zařízení umožňující pomocí softwaru nastavovat nejen jas, ale také vyzařené spektrum, tak aby nebyl narušen cirkadiánní rytmus. [19, 38]

5 POROVNÁVÁNÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ PODLE VLIVU NA CIRKADIÁNNÍ RYTMUS

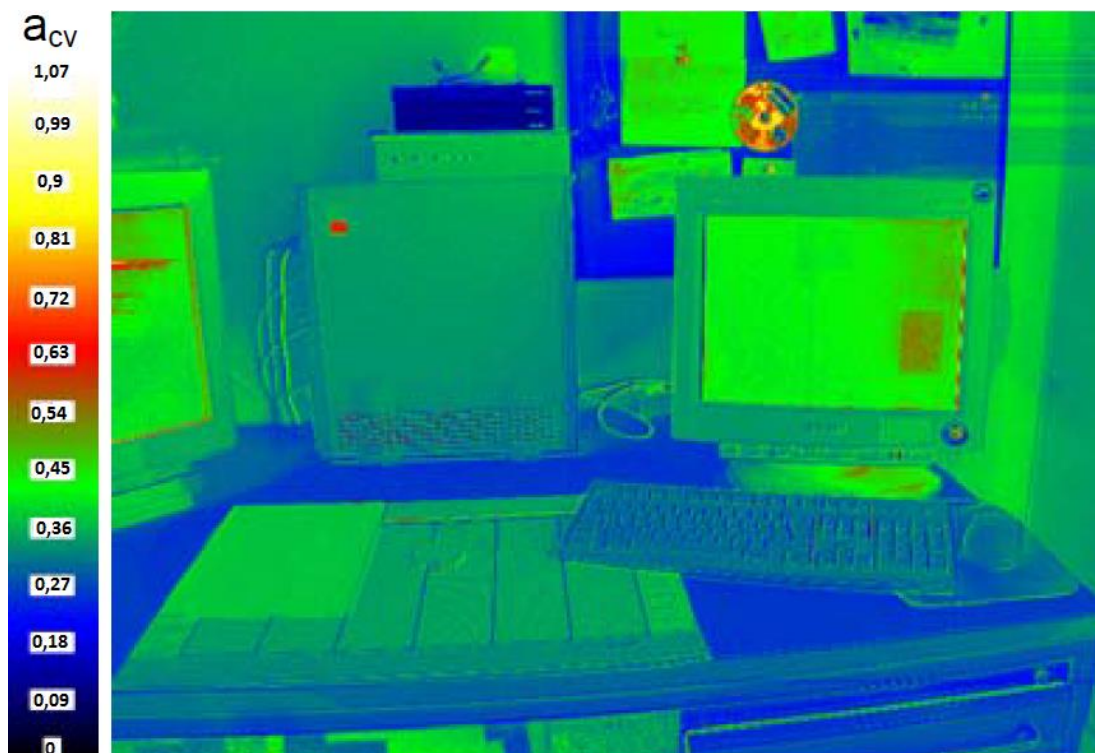
Porovnáváním účinků světla na zrakový systém člověka se zabývá věda zvaná fotometrie. Fotometrie popisuje viditelné elektromagnetické záření pomocí fotometrických veličin vztažených k normalizovanému pozorovateli. Tomuto pozorovateli museli být za základě zprůměrování lidí stanoveny standartní spektrální citlivosti jednotlivých světločivných buněk na sítnici. Velikost fotometrických veličin se stanovuje ale jenom vzhledem k fotopickému vidění. Fotopické vidění je citlivost oka na různé barvy světla, takže odpovídá spektrální citlivosti čípků. Spektrální citlivost čípků je považována za spektrální citlivost celého lidského oka a značí se $V(\lambda)$. Mezi fotometrické veličiny patří:

Tab. 5-1 Fotometrické veličiny (převzato z [18])

Název	Značka	Jednotka
Světelný tok	Φ	lm
Svítivost	I	cd
Osvětlení	E	lx
Světlení	M	lm.m ⁻²
Jas	L	cd.m ⁻²
Osvit	H	lx.s

Tyto veličiny ovšem nemusí mít vždy spojitost pouze s křivkou $V(\lambda)$, ale lze je vztáhnout i ke křivce $C(\lambda)$. Křivka $C(\lambda)$ vyjadřuje cirkadiánní spektrální citlivost na různé vlnové délky. Vychází z výsledků měření Brainarda a Thapana v roce 2001, kteří sledovali potlačení melatoninu v lidském těle. Vzhledem k novému popisu této závislosti můžeme pracovat s novými pojmy jako například cirkadiánní osvětlenost, která nám udává schopnost světelného zdroje ovlivňovat náš cirkadiánní rytmus. Můžeme ji měřit: [5]

- luxmetrem upraveným na poměrnou spektrální citlivost podle křivky $C(\lambda)$
- trichromatickým kolorimetrem
 - Spektrální citlivost fotočlánku měřicího velikost trichromatické složky Z (modrá barva) je přibližně stejná jako křivka $C(\lambda)$, trichromatická složka Y (zelená barva) odpovídá křivce $V(\lambda)$.
- kamerami se speciálními filtry adaptovanými na citlivost cirkadiánních čidel
 - umožňují měřit činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} a podle velikosti ho rozložit do prostoru



Obr. 5-1 Rozložení činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} v prostoru (převzato z [6])

- cirkadiánním dozimetrem
 - zařízení vyvinuto pouze pro účely zkoumání vlivu světla na cirkadiánní rytmus během výzkumných experimentů
 - malý přístroj připevněný za uchem, po celý den zaznamenávající parametry dopadajícího světla

Fotometrické veličiny popisují energii pouze té části elektromagnetického spektra, kterou je schopen zpracovat náš zrakový systém. K vyhodnocení veškeré energie všech vyzařujících elektromagnetických vln je zapotřebí použít radiometrické veličiny. Mezi ně patří:

Tab. 5-2 Radiometrické veličiny (převzato z [18])

Název	Značka	Jednotka
Zářivý tok	ϕ_e	W
Zářivost	I_e	$W \cdot sr^{-1}$
Ozáření	E_e	$W \cdot m^{-2}$
Intenzita ozáření	M_e	$W \cdot m^{-2}$
Zář	L_e	$W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$
Expozice	H_e	$W \cdot s \cdot m^{-2}$

5.1 Výpočet cirkadiánních účinků záření

Účinky na cirkadiánní rytmus u jednotlivých světelných zdrojů lze také získat výpočtem. Existuje spousta výpočtových metod, kterými lze vyjádřit působivost spektra daného zdroje na nevisuální systém lidského oka. Čtyři nejběžněji se vyskytující jsou uvedeny níže.

5.1.1 Činitel cirkadiánní účinnosti

Prvním z nich je vyjádření pomocí přepočtového koeficientu a_{cv} , který je označován jako činitel cirkadiánní účinnosti. Hodnotu a_{cv} určíme z rovnice 5-1. [5, 27]

$$a_{cv}\{X(\lambda)\} = \frac{\int_{380}^{780} X_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \quad (-) \quad (5.1)$$

kde: $X_{e,\lambda}$ – poměrné spektrální složení zkoumaného světelného zdroje (-)

$C(\lambda)$ – poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla na sítnici (-)

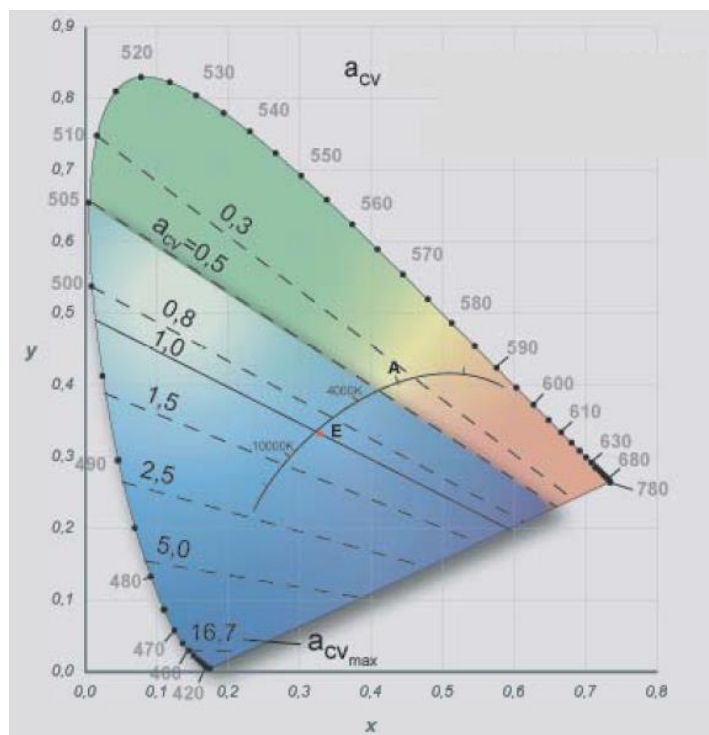
$V(\lambda)$ – poměrná spektrální citlivost lidského oka (-)

Provedeme – li úpravu s poměrným spektrálním složením $X_e(\lambda)$ podle rovnice 5.2, dostaneme efektivní cirkadiánní hodnotu daného zdroje.

$$X_{e,c} = \int X_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda \quad (-) \quad (5.2)$$

kde $X_{e,\lambda}$ můžeme nahradit jakoukoliv radiometrickou veličinou z tabulky 5-2. Například dosadíme – li ozáření $E_{e,\lambda}$, ve výsledku dostaneme ozáření $E_{e,c}$ vztažené ke křivce $C(\lambda)$, tedy novou veličinu, kterou můžeme nazvat cirkadiánní osvětlenost.

Hodnoty činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} zobrazené v diagramu CIE 1931 můžeme vidět na obrázku 5-2. Činitel a_{cv} je nejvyšší v oblasti modré barvy, nejnižší v oblasti oranžové a červené. Chromatický diagram CIE 1931 byl definován mezinárodní kolorimetrickou organizací v roce 1931. Popisuje možné kombinace barev vnímatelné lidským okem pomocí dvou souřadnic x a y , které reprezentují všechny trichromatické složky X , Y a Z . V tomto dvojrozměrném diagramu ale není zahrnuta intenzita barvy. K tomu by bylo nutné sestavit diagram v 3D modelu.

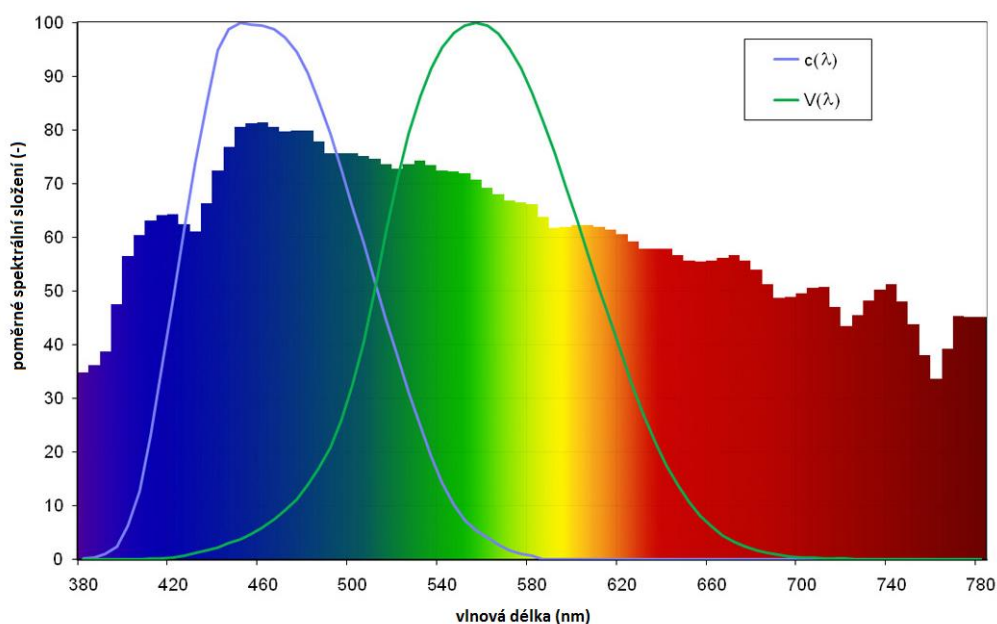


Obr. 5-2 Hodnoty činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} v barevném prostoru CIE 1931 (převzato z [6])

Hodnoty funkce cirkadiánní účinnosti $C(\lambda)$ nejsou přesně známy a lze očekávat v budoucnu jejich změnu. Aby v současnosti vypočtené výsledky byly kompatibilní s budoucími je potřeba činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} vynásobit koeficientem. Po této operaci obdržíme index cirkadiánního aktivačního účinku A_c . Koeficient je navržen, tak aby index A_c pro denní světlo vycházel 100. A_c vypočteme podle rovnice 5.3. [3]

$$A_c\{X(\lambda)\} = 100 \cdot \frac{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda)C(\lambda)d\lambda} \cdot a_{cv}\{X(\lambda)\} \approx 106,25 \cdot a_{cv}\{X(\lambda)\} \quad (5.3)$$

kde: $X_{D65}(\lambda)$ – poměrné spektrální složení standardizovaného denního světla (-) [5]



Obr. 5-3 Poměrné spektrální složení standardizovaného denního světla (převzato z [20])

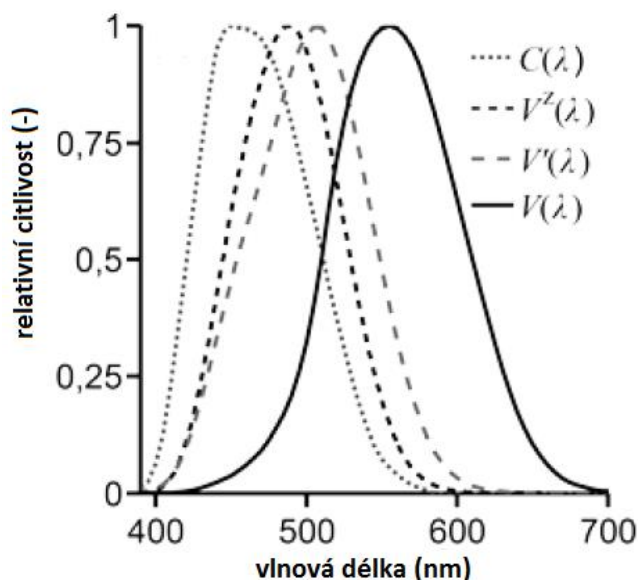
Pomocí indexu cirkadiánního aktivačního účinku A_c lze tedy jednoduše srovnávat světelné zdroje. Některé příklady hodnot indexu A_c jsou uvedeny v tabulce 5-3.

Tab. 5-3 Hodnoty indexu A_c u vybraných světelných zdrojů (modifikováno z [5])

Světelný zdroj		Specifikace zdroje	A_c (-)
Denní světlo		6500 K	100
Žárovka	Obyčejná	2800 K	36
	Halogenová	2900 K	40
Zářivka	Teple bílá	2700 K	27
	Neutrálně bílá	4000 K	55
	Chladně bílá (denní)	6500 K	95 až 105
	Modrá	Philips TL-D Blue	740
LED	Teple bílá	2850 K	36
	Chladně bílá (denní)	6800 K	90
	Modrá	450 nm	875
	Zelená	520 nm	52
	Červená	630 nm	0,4
Výbojka	Sodíková	Vysokotlaká	8 až 13
		Nízkotlaká	0,2
	Halogenidová	4200 K	69

5.1.2 Melanopické osvětlení

Druhý způsob, kterým lze vyjádřit cirkadiánní účinky, je pomocí melanopsinu. Melanopsin je barvivo obsažené v některých gangliových buňkách. Jeho spektrální citlivost je dána funkcí $V^z(\lambda)$, která je zobrazena na obrázku 5-4. [1]



Obr. 5-4 Spektrální citlivosti fotopického $V(\lambda)$, skotopického $V'(\lambda)$, melanopického $V^z(\lambda)$ a cirkadiánního vidění $C(\lambda)$, které jsou normalizovány na jednotnou vrcholovou hodnotu, (převzato z [1])

Funkce $V^z(\lambda)$ se mírně liší od křivky $C(\lambda)$, protože melanopsin není jediným světlo vnímajícím barvivem obsaženým v gangliových buňkách. V očních fotoreceptorech se vyskytují pravděpodobně další fotopigmenty podílejících se na řízení biorytmu. Mezi nejvýznamnější patří peropsin nebo třeba kryptochromy. Ale tyto proteiny byly prozatím nalezeny pouze u rostlin nebo u hmyzu. To, zda se vyskytují i u lidí a dalších savců a nějakým způsobem ovlivňují cirkadiánní rytmus, není jasné. Navíc nemůžeme zcela vyloučit ani vliv fotopického vidění na tvorbu melatoninu v lidské těle, na základě čehož je sestrojena křivka $C(\lambda)$. Je sice prokázáno, že fotopický systém nehraje hlavní roli v řízení cirkadiánní regulace, (potlačení melatoninu je mnohem nižší při vrcholu $V(\lambda)$ křivky než při vlnové délce 460 nm), to ale neznamená, že nehraje roli žádnou. [1]

Upravíme – li celkové dopadající ozáření $E_{e,\lambda}$ podle rovnice 5.4, ve výsledku obdržíme osvětlení vztažené k melanopické spektrální citlivosti.

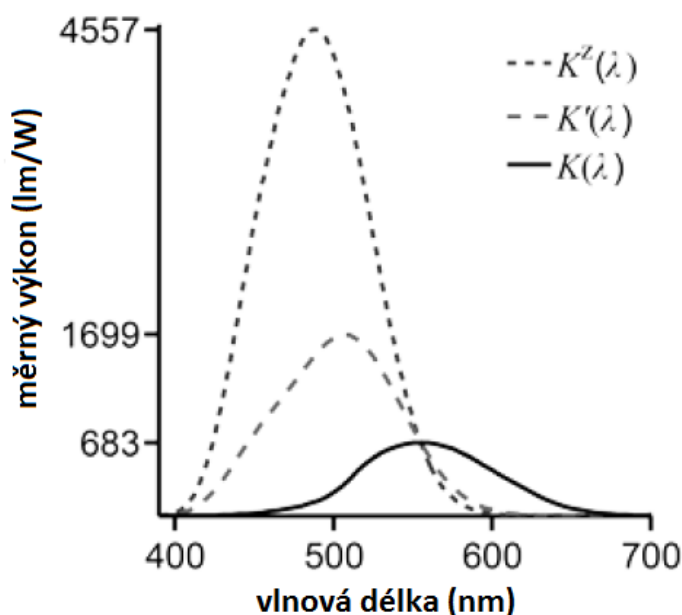
$$E_{v,z} = \int E_{e,\lambda} K^z(\lambda) d\lambda = K_m^z \int E_{e,\lambda} V^z(\lambda) d\lambda \quad (\text{W.m}^{-2}) \quad (5.4)$$

kde: $E_{e,\lambda}$ – celkové ozáření (W.m^{-2})

$K^z(\lambda)$ – světelná účinnost melanopického vidění (lm.W^{-1})

K_m^z – konstanta 4557 lm.W^{-1} , jedná se o nejvyšší světelnou účinnost pro melanopické vidění, které leží na vlnové délce 490 nm. Celkově měrný

výkon tohoto typu vidění dosahuje mnohem vyšších hodnot než u skotopického a fotopického vidění (obrázek 5-5).



Obr. 5-5 Světelná účinnost fotopického $K(\lambda)$, skotopického $K'(\lambda)$ a melanopického vidění $K^2(\lambda)$, (převzato z [1])

Tento princip odvození melanopického osvětlení, vyjadřujícího cirkadiánní účinky světelného zdroje vychází ze stanovení fotometrických veličin z veličin radiometrických pomocí světelné účinnosti. [1]

5.1.3 Metoda α – osvětlení

Třetím postupem sloužícím k podrobnějšímu vysvětlení účinků dopadajícího záření na sítnici lidského oka je metoda α – osvětlení. Tento způsob vyjadřuje míru působení daného světelného zdroje na jednotlivé druhy fotoreceptorů (α). Písmeno α slouží jako popisek k odlišení fotoreceptorů. [1]

Tab. 5-4 Označení fotoreceptorů

Fotoreceptor	α (označení)
ipRGCs (melanopsin)	z
L – čípky	lc
M – čípky	mc
S – čípky	sc
Tyčinky	r

Osvětlení daného typu fotoreceptoru získáme podle rovnice 5.5.

$$E_{\alpha} = K_N \int E_{e,\lambda} N_{\alpha}(\lambda) d\lambda \quad (\alpha\text{-lx}) \quad (5.5)$$

kde: E_{α} – osvětlení daného typu fotoreceptoru

$K_N = 72\,983,25 \alpha\text{-lm.W}^{-1}$, konstanta vypočtena z rovnice 5.6

$$K_N = \int K(\lambda) d\lambda \quad (\text{lm.W}^{-1}) \quad (5.6)$$

$E_{e,\lambda}$ – celkové ozáření (W.m^{-2})

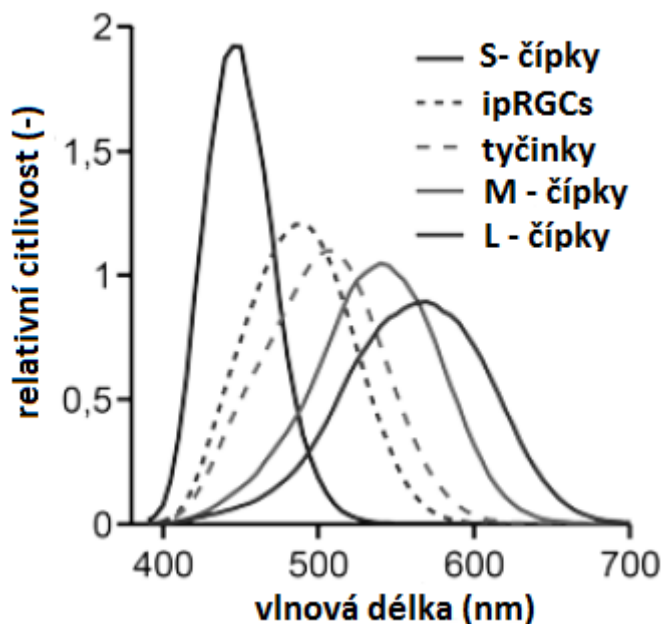
$N_\alpha(\lambda)$ – spektrální citlivost fotoreceptoru α (-)

Podle výpočtu konstanty K_N (rovnice 5.6) můžeme zpozorovat, že výsledné hodnoty osvětlení E_α jsou vztaženy ke světelné fotopické účinnosti $K(\lambda)$, tedy i ke křivce $V(\lambda)$. Hodnota K_N nemění svou velikost s typem fotoreceptoru, je stálá.

Ve výsledku této metody můžeme obdržet například osvětlení E_z gangliových buněk obsahujících melanopsin (ipRGCs) v jednotkách z-lx . Což nám udává, do jaké míry světelný zdroj ovlivňuje (osvětluje) cirkadiánní čidlo na sítnici. [1]

5.1.4 RSE faktor

RSE faktor η (RSE – z anglického Relative Spectral Effectiveness – relativní spektrální účinnost) je dalším výpočtovým postupem, jak vyjádřit spektrální působivost světelných zdrojů na fotoreceptory na sítnici. Vychází se zde z křivek sestavených na obrázku 5-6. Oblasti pod těmito jednotlivými křivkami mají stejnou velikost. To znamená, že světelné záření jasně bílého světla dopadne se stejnou pravděpodobností na jednotlivé fotoreceptory. Je zde také brán zřetel na to, že míra podráždění světločivných buněk je závislá také na intenzitě záření. Například chemické látky obsažené v tyčinkách reagují na světlo už při nižších intenzitách než M a L čípky. [1]



Obr. 5-6 Spektrální citlivosti jednotlivých fotoreceptorů, (plocha pod každou křivkou je stejně velká), (převzato z [1])

Srovnáme – li s křivkami z obrázku 5-4 – křivka pro ipRGCs odpovídá křivce V^z , křivka V' odpovídá křivce pro tyčinky a složením funkcí pro S, M a L čípky dostaneme křivku fotopického vidění $V(\lambda)$. Spektrální citlivosti uvedené v obrázcích jsou zobrazeny pouze v rozsahu vlnových délek 390 nm až 700 nm i přesto, že lidské oko je citlivější. Ale citlivost na vlny menší než 390 nm

a větší než 700 nm je malá a při výpočtu RSE faktoru η ji můžeme zanedbat. RSE faktor η získáme obdobně jako činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} podle rovnic 5.7 a 5.8. [1]

$$\eta_{v,i} = \frac{\int_{390}^{700} E_{e,\lambda} S_i(\lambda) d\lambda}{\int_{390}^{700} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} \cdot K_v (-) \quad (5.7)$$

$$\eta_{e,i} = \frac{\int_{390}^{700} E_{e,\lambda} S_i(\lambda) d\lambda}{\int_{390}^{700} E_{e,\lambda} d\lambda} \cdot K_e (-) \quad (5.8)$$

kde: $\eta_{v,i}$ – RSE faktor vztažený k fotopickému vidění
 $\eta_{e,i}$ – RSE faktor vztažený k celkovému ozáření světelného zdroje
 $E_{e,\lambda}$ – celkové ozáření ($W \cdot m^{-2}$)
 $V(\lambda)$ – spektrální citlivost fotopického vidění
 $S_i(\lambda)$ – spektrální citlivost jednotlivých fotoreceptorů (i) podle obrázku 5-6

$$\int S_i(\lambda) d\lambda = 1 (-) \quad (5.9)$$

K_v – velikost plochy, kterou ohraničuje křivka $V(\lambda)$, získáme ze vztahu:

$$K_v = \int V(\lambda) d\lambda = 106 (-) \quad (5.10)$$

K_e – velikost rozsahu vlnových délek mezi 390 nm a 700 nm, $K_e = 310$

Hodnota RSE faktoru η je užitečná při porovnávání osvětlenosti světelných zdrojů na jednotlivé fotoreceptory obdobně jako metoda α – osvětlování. Například pokud požadujeme u daného cíleného zdroje, aby působil na oční světelná čidla ve stejném poměru jako nějaký vybraný referenční zdroj, můžeme použít ekvivalentní osvětlenost, která je definována vztahem 5.11. Daný cílený zdroj tedy i přes odlišnou celkovou hodnotu fotopického osvětlení E_v bude dráždit světločivné buňky ve stejném poměru. [1]

$$E_{v,i}^{eq} = E_v \cdot r_{v,i} = E_v \cdot \frac{\eta_{v,i}^{ref}}{\eta_{v,i}^{tar}} (lx) \quad (5.11)$$

kde: $E_{v,i}^{eq}$ – ekvivalentní osvětlenost fotoreceptoru i
 E_v – fotopické osvětlení daného cíleného zdroje (lx)

$r_{v,i}$ – poměr RSE faktorů referenčního zdroje $\eta_{v,i}^{ref}$ a daného cíleného zdroje $\eta_{v,i}^{tar}$ (-)

Velkou výhodou výpočtu ekvivalentní osvětlenosti přes RSE faktor η je, že výsledné množství světla dopadajícího na fotoreceptor je uvedeno v luxech a nikoliv v α – luxech jako u metody α – osvětlení. α – luxy nelze přímo aplikovat, musí se nejdříve převést na klasické luxy. [1]

Podobně jako ekvivalentní osvětlenost lze vyjádřit i ekvivalentní ozáření $E_{e,i}^{eq}$ podle následující rovnice 5.12.

$$E_{e,i}^{eq} = E_e \cdot r_{e,i} = E_e \cdot \frac{\eta_{e,i}^{ref}}{\eta_{e,i}^{tar}} (W \cdot m^{-2}) \quad (5.12)$$

kde: $E_{e,i}^{eq}$ – ekvivalentní ozáření fotoreceptoru i

E_e – celkové ozáření daného cíleného zdroje ($W \cdot m^{-2}$)

$r_{e,i}$ – poměr RSE faktorů referenčního zdroje $\eta_{e,i}^{ref}$ a daného cíleného zdroje $\eta_{e,i}^{tar}$ (-)

Pro ilustraci v tabulce 5-5 jsou uvedeny hodnoty RSE faktoru $\eta_{v,ipRGC}$ a hodnoty ekvivalentní osvětlenosti ipRGC $E_{v,ipRGC}^{eq}$ pro vybrané světelné zdroje. Zdroje jsou v tabulce seřazeny od nejnižších RSE faktorů po nejvyšší. Můžeme zde vidět, že výsledky jsou v souladu s ostatními metodami. Například hodnoty indexu cirkadiánního aktivačního účinku A_c v tabulce 5-3 jsou poměrově podobné. Obě tyto metody potvrzují nejvyšší účinky na cirkadiánní čidla u modrých LED a naopak nejnižší u žárovek.

Ekvivalentní osvětlenost je vztažena k referenčnímu zdroji podle CIE E. Jedná se o teoretický zdroj, který má konstantní spektrální citlivost po celou délku viditelného spektra. Takže například hodnota 186 lx v prvním řádku tabulky značí množství světla, které musí žárovka vyprodukovat, aby dráždila ipRGC stejně účinně jako 76 lx modré diody. [1]

Tab. 5-5 Hodnoty RSE faktoru a ekvivalentní osvětlenosti ipRGC u vybraných světelných zdrojů (převzato z [1])

Světelný zdroj	$\eta_{v,ipRGC}$ (-)	$E_{v,ipRGC}^{eq}$ (lx)
Žárovka 2856 K (CIE A)	0,54	186
Třípásmová zářivka 4000K (CIE F11)	0,62	161
LED bílá (6500 K)	0,90	112
CIE E – referenční zdroj	1,00	100
Širokopásmová zářivka 6500 K (CIE F7)	1,02	98
LED modrá	1,32	76

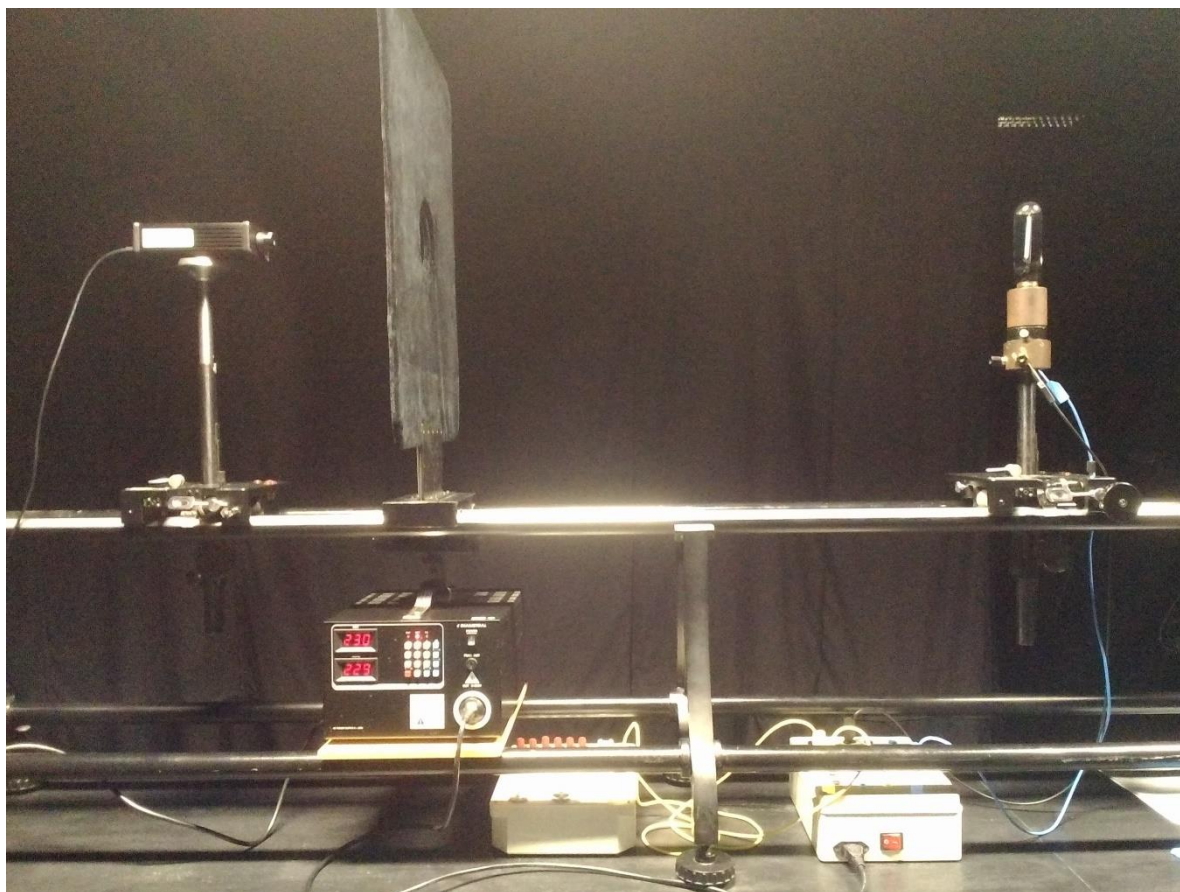
6 MĚŘENÍ

Praktickou část práce tvoří měření vybraných světelných zdrojů v laboratoři. Cílem měření bylo změřit a vyhodnotit obsah modrého světla v celkovém vyzařovaném elektromagnetickém spektru. Snahou bylo také změřená spektra co nejlépe a co nejsrozumitelněji navzájem porovnat a také si ověřit zda výsledky budou v souladu s údaji uváděnými v předcházející kapitole.

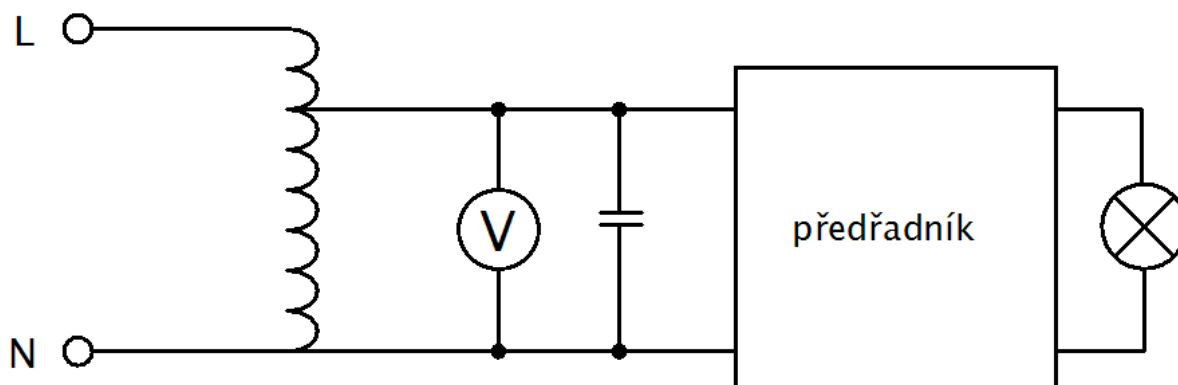
Měřicí pracoviště sestavené ve světelné laboratoři tvořil světelný zdroj umístěn na posuvném stojanu. Konstantní napájecí napětí 230 V bylo zajišťováno pomocí zdroje střídavého napětí 0 – 255 V DIAMETRAL typu AC250K2D. Do obvodu mezi tyto dva prvky byl zařazen univerzální předřadník s tlumivkou odpovídající výkonu světelného zdroje. Ten v případě měření s vysokotlakou sodíkovou výbojkou (obr. 6.1) sloužil především k zapálení výboje mezi elektrodami. V případě světelných zdrojů s integrovaným startérem byl tento laboratorní přípravek odpojen. K měření vyzařovaného optického spektra byl použit spektrofotometr JETI Specbos 1211 UV, který byl umístěn do takové polohy, aby jeho pomocný laserový zaměřovač mířil přímo doprostřed světelného zdroje. Přes USB rozhraní byl měřič spektra propojen s PC, na kterém bylo zaznamenáno měření. K výpočtům byly použity hodnoty, změřené až po ustálení světelných parametrů. Seznam veškerých proměřených světelných zdrojů udává tabulka 6.1.

Tab. 6-1 Seznam změřených světelných zdrojů

Typ zdroje	Výrobce	Druh	Příkon [W]	T [K]
LED	Panasonic	Nostalgic Clear 827	6,4	2692
	LED Bulb Light	Natural White 842	9	4047
	Emos	LED Premium Glass 865	8	6629
	Livarno	RGB LED E27 White col.	3	6559
		RGB LED E27 Blue col.	1	-
		RGB LED E27 Green col.	1	-
		RGB LED E27 Red col.	1	-
Lineární zářivka	Osram	Lumilux T8 827	36	2926
	Philips	TL5 HE 842	28	4123
	Osram	Lumilux T8 865	36	6579
	Osram	Lumilux T8 880	36	8169
Kompaktní zářivka	Tesla	DZS fialová	9	-
	Tesla	DZS červená	11	1345
	Philips	Economy 2700	8	2700
	Philips	Economy 6500	8	6500
Klasická žárovka	Philips	A55	60	2625
Halogenová žárovka	Philips	EcoClassic	42	2778
Sodíková výbojka	Osram	vysokotlaká SON-T	70	1873
	Philips	nízkotlaká SOX	66	1800
Rtuťová výbojka	Tesla	RVL - X	80	4773
Halogenidová výbojka	Osram	HQI-E s křemenným hořákem	150	3737
	Philips	CDM-T s keramickým hořákem	70	2806



Obr. 6-1 Náhled na měřicí pracoviště před měřením vysokotlaké sodíkové výbojky



Obr. 6-2 Zapojení světelného zdroje

6.1 Zpracování výsledků měření

Tab. 6-2 Seznam změřených světelných zdrojů

		r_1 (cm)	E_1 (lx)	E_{ec1} ($W \cdot m^{-2}$)	T_c (K)	E_2 (lx)	r_2 (cm)	E_{ec2} ($W \cdot m^{-2}$)	a_{cv} (-)	E_{cl2} (m-lx)
žárovky	klasická	65	139,5	0,066	2625	500	34,3	0,237	0,320	1080
	halogenová	81,2	80,4	0,042	2778	500	32,7	0,261	0,357	1191
zářivky	FL 2700	47,5	1773,0	0,955	2926	500	89,4	0,269	0,366	1228
	FL 4200	207,2	1496,0	1,118	4123	500	358,4	0,374	0,511	1703
	FL 6500	47,5	1751,0	2,122	6579	500	88,9	0,606	0,835	2762
	FL 8000	47,5	1627,0	2,460	8169	500	85,7	0,756	1,028	3444
	CFL fialová	38,8	245,7	0,594	0	500	27,2	1,209	1,628	5509
	CFL červená	38,7	401,1	0,113	1344	500	34,7	0,141	0,192	641
	CFL 2700	80,3	68,5	0,030	2701	500	29,7	0,216	0,295	984
	CFL 6500	80,7	67,5	0,082	6376	500	29,7	0,609	0,833	2777
LED	LED 2700	61,5	381,4	0,174	2692	500	53,7	0,228	0,311	1038
	LED 4200	62	452,4	0,305	4047	500	59,0	0,337	0,460	1535
	LED 6500	63	107,0	0,135	6629	500	29,1	0,632	0,865	2882
	LED modrá	15	26,2	0,340	0	500	3,4	6,486	8,860	29556
	LED zelená	15	274,6	0,206	0	500	11,1	0,374	0,511	1706
	LED červená	15	96,2	0,000	841	500	6,6	0,000	0,000	0
výbojky	vys. sod.	109,5	377,4	0,049	1873	500	95,1	0,065	0,089	297
	níz. sod	40	10354,4	0,030	1800	500	182,0	0,001	0,002	7
	hal. křem.	108,6	979,3	0,768	3737	500	152,0	0,392	0,534	1786
	hal. ker.	62,3	772,2	0,398	2806	500	77,4	0,258	0,351	1173
	rtuťová	107,8	274,9	0,192	4773	500	79,9	0,349	0,474	1592

Příklad výpočtu 1. řádku tabulky 6-2 (výpočet pro klasickou žárovku)

Z měření jsou známé hodnoty ozáření E_e ve vzdálenosti r_1 od světelného zdroje pro každou vlnovou délku λ . Podle rovnice 6.1 se spočte cirkadiánní ozáření E_{ec1} ve vzdálenosti r_1 .

$$E_{ec1} = \int_{380}^{580} E_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda = 0,066 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2}\text{)} \quad (6.1)$$

Při této hodnotě cirkadiánního ozáření $E_{ec1} = 0,066 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ má klasická žárovka fotopickou osvětlenost $E_1 = 139,5 \text{ lx}$. Aby se mohla posoudit velikost tohoto poměru a porovnat s ostatními světelnými zdroji je zapotřebí stejný světelný tok u všech zdrojů. Jelikož, ale u každého zdroje byl spektrofotometrem naměřen různý počet luxů, bylo potřeba výsledky měření převést na předem stanovenou konstantní hodnotu osvětlení $E_2 = 500 \text{ lx}$. Toho se dosáhlo pomocí rovnice 6.2, která popisuje vztah mezi intenzitou záření E a vzdáleností r .

$$E_1 \cdot r_1^2 = E_2 \cdot r_2^2 \quad (6.2)$$

Nejdříve se provedl výpočet vzdálenosti r_2 , ve které klasická žárovka dosahuje 500 lx podle rovnice 6.3.

$$r_2 = \sqrt{\frac{E_1 \cdot r_1^2}{E_2}} = \sqrt{\frac{139,5 \cdot 65^2}{500}} = 34,3 \text{ cm} \quad (6.3)$$

Nyní lze spočítat cirkadiánní ozáření E_{ec2} ve vzdálenosti r_2 od klasické žárovky podle rovnice 6.4. Pomocí této hodnoty už je možno jednoduše porovnávat cirkadiánní účinky.

$$E_{ec2} = \frac{E_{ec1} \cdot r_1^2}{r_2^2} = \frac{0,066 \cdot 65^2}{34,3^2} = 0,237 \text{ W.m}^{-2} \quad (6.4)$$

Vztáhneme - li cirkadiánní ozáření E_{ec1} k fotopickému ozáření podle vzorce 6.5, dostaneme činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} . Tento koeficient je nezávislý na vzdálenosti od zdroje.

$$a_{cv} = \frac{\int_{380}^{580} E_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} = \frac{E_{ec1}}{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda} = \frac{0,066}{0,206} = 0,32 \quad (6.5)$$

Výpočet cirkadiánního osvětlení E_{cl2}

Vedle cirkadiánního ozáření E_{ec2} a činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} je v tabulce uveden další číselný výstup, kterým lze vyjádřit obsah modrého světla a tím je cirkadiánní (melanopické) osvětlení E_{cl2} . Výpočet této hodnoty vychází z výpočtu fotopické osvětlenosti z celkového ozáření E_e pomocí světelné účinnosti K podle rovnice 6.6.

$$E_v = K_m \cdot \int_{380}^{780} E_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \text{ (lx)} \quad (6.6)$$

kde: E_v – fotopická osvětlenost

K_m – maximální světelná účinnost fotopického vidění $K(\lambda)$,

$K_m = 683 \text{ lm.W}^{-1}$

$E_{e,\lambda}$ – celkové ozáření (W.m^{-2})

$V(\lambda)$ – poměrná spektrální citlivost fotopického vidění (-)

K hodnotě E_{cL2} pro klasickou žárovku se lze tedy dostat pomocí následujícího vzorce:

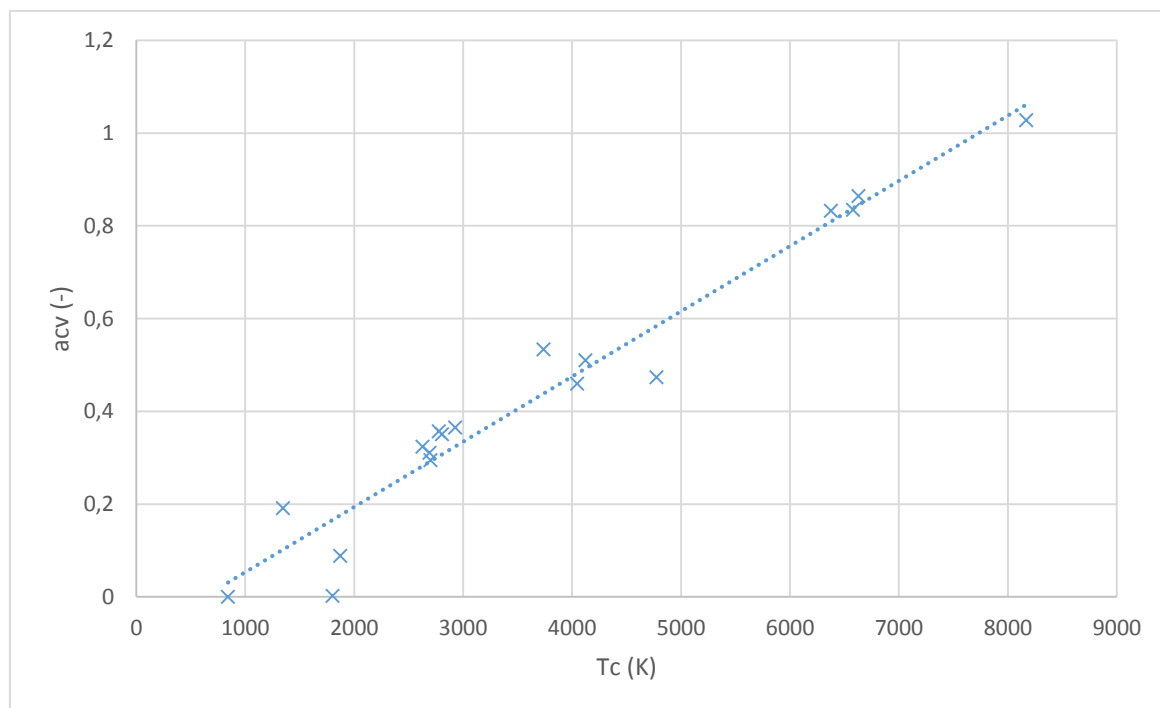
$$E_{cL2} = K_m^Z \cdot \int_{380}^{580} E_{e,\lambda} C(\lambda) d\lambda \quad (6.7)$$

kde: K_m^Z – maximální světelná účinnost melanopického vidění $K^Z(\lambda)$,
(již zmíněno v kapitole 5.1.2. o melanopickém osvětlení). $K_m^Z = 4557 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Výpočet osvětlení E_{cL2} vztaženého k melanopickému vidění ve vzdálenosti $r_2 = 34,3 \text{ cm}$ pro klasickou žárovku:

$$E_{cL2} = K_m^Z \cdot E_{ec2} = 4557 \cdot 0,237 = 1080 \text{ m-lx} \quad (6.8)$$

U většiny změřených zdrojů lze vyzářené světlo charakterizovat teplotou chromatičnosti T_c . Do grafu (obr. 6-3) byla vynesena závislost mezi touto teplotou v kelvinech a činitelem cirkadiánní účinnosti a_{cv} .



Obr. 6-3 Závislost činitele cirkadiánní účinnosti a_{cv} na teplotě chromatičnosti T_c změřených světelných zdrojů

6.2 Srovnání změřených světelných zdrojů

V tabulce 7-3 jsou seřazeny světelné zdroje podle velikosti cirkadiánního ozáření E_{ec2} ve vzdálenosti r_2 , ve které daný zdroj dosahuje fotopické osvětlenosti 500 lx.

Tab. 6-3 Seřazené změřené zdroje podle velikosti cirkadiánních účinků

světelný zdroj	E_{ec2} (W.m ⁻²)
LED BLUE	6,486
CFL fialová	1,209
FL 8000	0,756
LED 6500	0,632
CFL 6500	0,609
FL 6500	0,606
výbojka hal. (křemenný hořák)	0,392
FL 4200	0,374
LED GREEN	0,374
výbojka rtuťová	0,349
LED 4200	0,337
FL 2700	0,269
žárovka halogenová	0,261
výbojka hal. (keramický hořák)	0,258
žárovka klasická	0,237
LED 2700	0,228
CFL 2700	0,216
CFL červená	0,141
výbojka vysokotlaká sodíková	0,065
výbojka nízkotlaká sodíková	0,001
LED RED	0,000

Tab. 6-4 Porovnání cirkadiánních účinků světelných zdrojů pomocí fotopické osvětlenosti E_v (lx), (1. část tabulky)

		žárovky		zářivky							
		klasická	halogenová	CFL 2700	CFL 6500	CFL červená	CFL fialová	FL 2700	FL 4200	FL 6500	FL 8000
žárovky	klasická	500,0	551,7	455,4	1286,0	296,9	2550,8	568,4	788,7	1278,8	1594,9
	halogenová	453,2	500,0	412,8	1165,5	269,1	2311,8	515,2	714,8	1159,0	1445,5
zářivky	CFL 2700	548,9	605,7	500,0	1411,8	326,0	2800,3	624,0	865,9	1403,9	1750,9
	CFL 6500	194,4	214,5	177,1	500,0	115,4	991,8	221,0	306,7	497,2	620,1
	CFL červená	842,0	929,0	767,0	2165,6	500,0	4295,4	957,2	1328,2	2153,4	2685,8
	CFL fialová	98,0	108,1	89,3	252,1	58,2	500,0	111,4	154,6	250,7	312,6
	FL 2700	439,8	485,3	400,6	1131,2	261,2	2243,8	500,0	693,8	1124,9	1403,0
	FL 4200	317,0	349,7	288,7	815,2	188,2	1617,0	360,3	500,0	810,7	1011,1
	FL 6500	195,5	215,7	178,1	502,8	116,1	997,3	222,2	308,4	500,0	623,6
	FL 8000	156,7	173,0	142,8	403,2	93,1	799,7	178,2	247,3	400,9	500,0
LED	LED 2700	520,2	574,0	473,9	1338,0	308,9	2653,9	591,4	820,6	1330,5	1659,4
	LED 4200	351,8	388,1	320,4	904,8	208,9	1794,6	399,9	554,9	899,7	1122,1
	LED 6500	187,3	206,7	170,6	481,8	111,2	955,7	213,0	295,5	479,1	597,5
	LED BLUE	1,7	1,9	1,6	4,5	1,0	8,9	2,0	2,8	4,5	5,6
	LED GREEN	316,5	349,2	288,3	814,0	187,9	1614,6	359,8	499,2	809,4	1009,5
	LED RED	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
výbojky	vys. sod.	1820,2	2008,4	1658,0	4681,6	1080,9	9285,9	2069,2	2871,3	4655,4	5806,2
	níz. sod	80708,8	89052,6	73517,5	207583,5	47928,4	411744,5	91751,8	127317,5	206421,4	257449,1
	hal. křem.	302,3	333,6	275,4	777,6	179,5	1542,3	343,7	476,9	773,2	964,4
	hal. ker.	460,1	507,7	419,1	1183,4	273,2	2347,2	523,0	725,8	1176,7	1467,6
	rtuťová	339,2	374,3	309,0	872,5	201,5	1730,6	385,6	535,1	867,6	1082,1

Tab. 6-5 Porovnání cirkadiánních účinků světelných zdrojů pomocí fotopické osvětlenosti E_v (lx), (2. část tabulky 6-4)

		LED						výbojky				
		LED 2700	LED 4200	LED 6500	LED BLUE	LED GREEN	LED RED	vys. sod.	níz. sod.	hal. křem.	hal. ker.	rtuťová
žárovky	klasická	480,6	710,7	1334,6	13685,5	789,9	-	137,3	3,1	826,9	543,4	737,0
	halogenová	435,5	644,1	1209,5	12403,3	715,9	-	124,5	2,8	749,5	492,5	667,9
zářivky	CFL 2700	527,6	780,2	1465,1	15024,2	867,2	-	150,8	3,4	907,8	596,5	809,0
	CFL 6500	186,8	276,3	518,9	5321,0	307,1	-	53,4	1,2	321,5	211,3	286,5
	CFL červená	809,3	1196,7	2247,3	23045,7	1330,2	-	231,3	5,2	1392,5	915,0	1241,0
	CFL fialová	94,2	139,3	261,6	2682,6	154,8	-	26,9	0,6	162,1	106,5	144,5
	FL 2700	422,7	625,1	1173,9	12038,4	694,9	-	120,8	2,7	727,4	478,0	648,3
	FL 4200	304,6	450,5	846,0	8675,5	500,8	-	87,1	2,0	524,2	344,4	467,2
	FL 6500	187,9	277,9	521,8	5350,9	308,9	-	53,7	1,2	323,3	212,5	288,1
	FL 8000	150,7	222,8	418,4	4290,3	247,6	-	43,1	1,0	259,2	170,3	231,0
LED	LED 2700	500,0	739,4	1388,5	14238,7	821,9	-	142,9	3,2	860,4	565,3	766,7
	LED 4200	338,1	500,0	938,9	9628,6	555,8	-	96,6	2,2	581,8	382,3	518,5
	LED 6500	180,0	266,3	500,0	5127,4	296,0	-	51,5	1,2	309,8	203,6	276,1
	LED BLUE	1,7	2,5	4,7	500,0	2,8	-	0,5	0,0	2,9	1,9	2,6
	LED GREEN	304,2	449,8	844,7	8662,4	500,0	-	86,9	2,0	523,4	343,9	466,5
	LED RED	-	-	-	-	-	500,0	-	-	-	-	-
výbojky	vys. sod.	1749,5	2587,1	4858,3	49820,7	2875,7	-	500,0	11,3	3010,4	1978,1	2682,8
	níz. sod.	77573,2	114714,7	215421,5	2209084,1	127510,4	-	22170,3	500,0	133483,0	87708,5	118958,2
	hal. křem.	290,6	429,7	806,9	8274,8	477,6	-	83,0	1,9	500,0	328,5	445,6
	hal. ker.	442,2	654,0	1228,1	12593,3	726,9	-	126,4	2,9	760,9	500,0	678,1
	rtuťová	326,1	482,2	905,5	9285,1	535,9	-	93,2	2,1	561,0	368,7	500,0

Pravděpodobně nejsnadnějším způsobem, kterým lze porovnat světelné zdroje navzájem podle velikosti podílu modrého světla je tabulka 6-4. Jsou zde uvedeny hodnoty v luxech. Tyto hodnoty fotopické osvětlenosti jsou zvoleny z důvodu snadného změření pomocí obyčejného luxmetru. Není třeba žádného dalšího speciálního zařízení. K porovnání cirkadiánních účinků dvou nebo více zdrojů nám stačí pouze tato tabulka. Hodnoty uvedené v 1. řádku tabulky nám říkají, kolik luxů by musela vyprodukovat klasická žárovka, aby působila na biologické hodiny stejně intenzivně jako 500 lx daného světelného zdroje. Hodnoty uvedené v 1. sloupci tabulky nám říkají, kolik luxů daného světelného zdroje způsobí stejný cirkadiánní efekt jako 500 lx klasické žárovky. [34]

Příklad výpočtu tabulky 6-4 (pro klasickou žárovku - 1. řádek, 2. sloupec):

1. Způsob výpočtu

$$E_{v,z-h} = \frac{E_2 \cdot r_{2,z-k}^2}{r_{2,z-h}^2} = \frac{500 \cdot 34,3^2}{32,7^2} \doteq 551,7 \text{ lx} \quad (6.9)$$

- kde: $E_{v,z-h}$ – fotopická osvětlenost klasické žárovky, při které má stejné cirkadiánní účinky jako 500 lx halogenové žárovky
 E_2 – fotopická osvětlenost 500 lx
 $r_{2,z-k}$ – vzdálenost, ve které klasická žárovka dosahuje fotopické osvětlenosti 500 lx (cm)
 $r_{2,z-h}$ – vzdálenost, ve které halogenová žárovka dosahuje fotopické osvětlenosti 500 lx (cm)

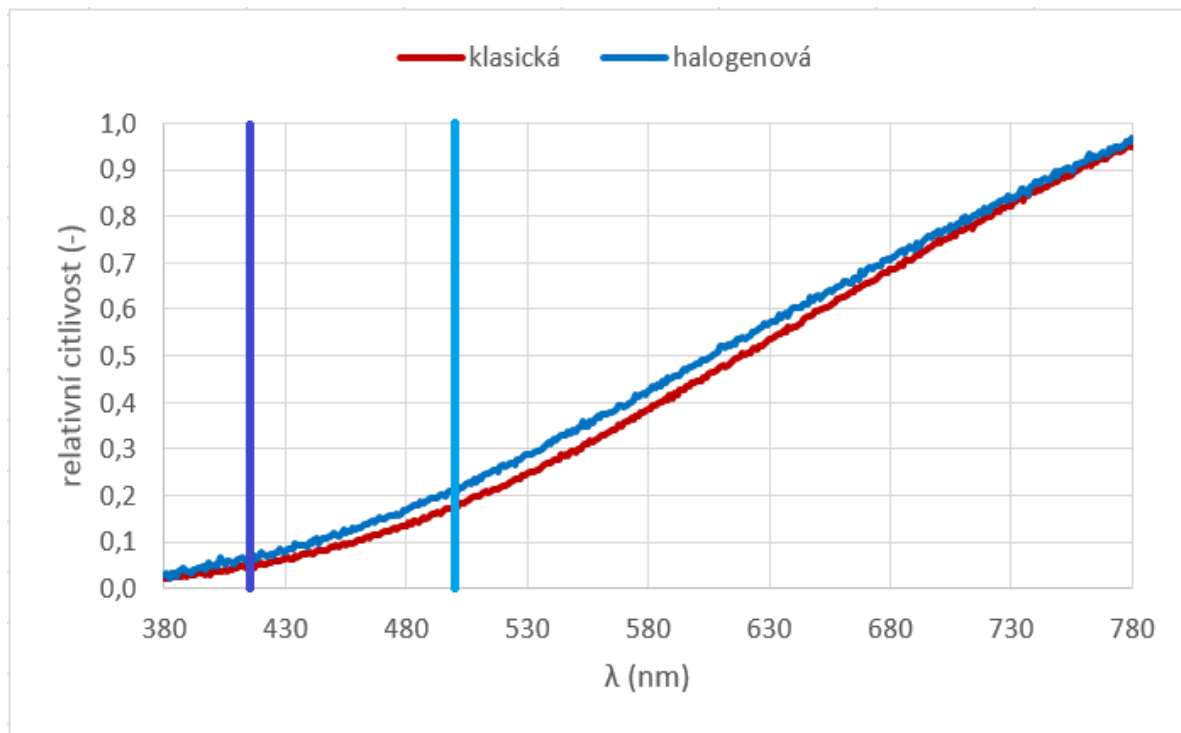
2. Způsob výpočtu

$$E_{v,z-h} = E_2 \cdot \frac{a_{cv,z-h}}{a_{cv,z-k}} = E_2 \cdot \frac{\frac{E_{c1,z-h}}{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda,z-h} \cdot V(\lambda) d\lambda}}{\frac{E_{c1,z-k}}{\int_{380}^{780} E_{e,\lambda,z-k} \cdot V(\lambda) d\lambda}} = 500 \cdot \frac{\frac{0,042}{0,118}}{\frac{0,066}{0,206}} = 500 \cdot \frac{0,357}{0,324} \doteq 551,7 \text{ lx} \quad (6.10)$$

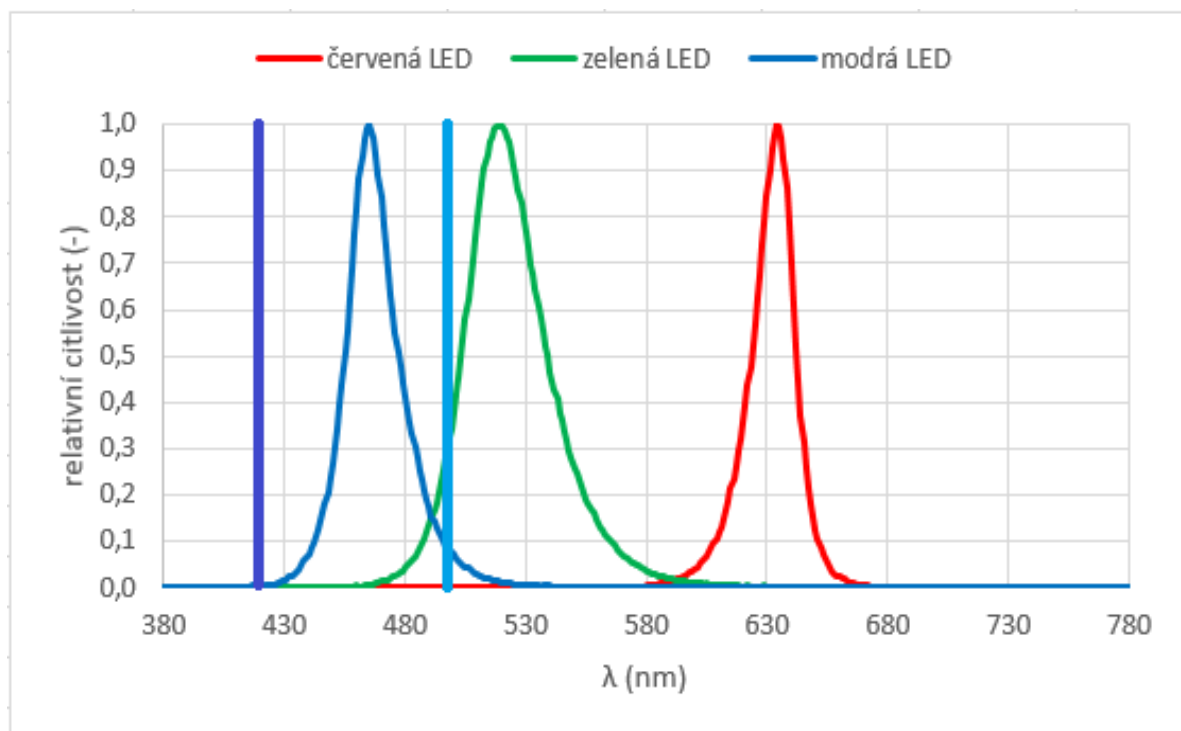
- kde: $a_{cv,z-h}$ – činitel cirkadiánní účinnosti halogenové žárovky (-)
 $a_{cv,z-k}$ – činitel cirkadiánní účinnosti klasické žárovky (-)
 $E_{c1,z-h}$ – cirkadiánní ozáření halogenové žárovky ve vzdálenosti r_1 ($W \cdot m^{-2}$)
 $E_{c1,z-k}$ – cirkadiánní ozáření klasické žárovky ve vzdálenosti r_1 ($W \cdot m^{-2}$)
 $E_{e,\lambda,z-h}$ – celkové změřené ozáření halogenové žárovky ($W \cdot m^{-2}$)
 $E_{e,\lambda,z-k}$ – celkové změřené ozáření klasické žárovky ($W \cdot m^{-2}$)

6.3 Změřená spektra světelných zdrojů

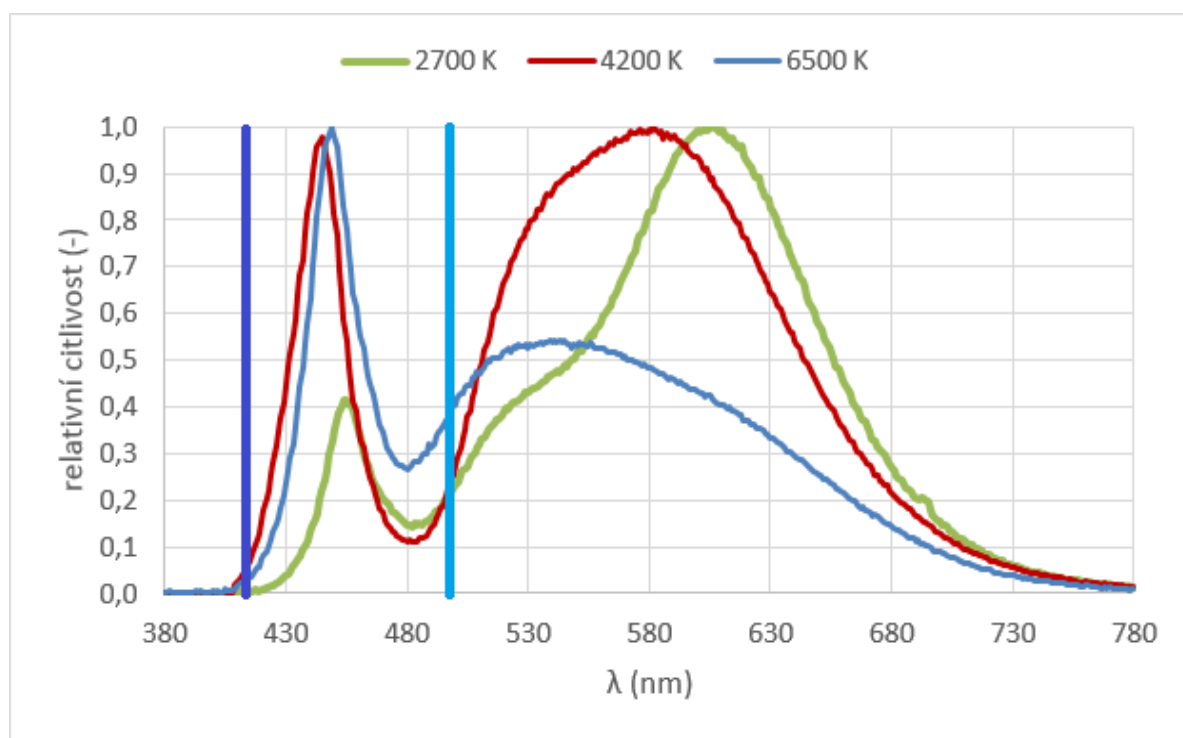
Změřené hodnoty záření jednotlivých zdrojů jsou také zpracovány v grafické podobě, která nám neposkytuje tak přesné výsledky, ale slouží k rychlému vizuálnímu porovnání. K vynesným spektrům zdrojů jsou v grafech dokresleny modré křivky vyznačující rozpětí vlnových délek, na které je cirkadiánní čidlo nejvíce citlivé.



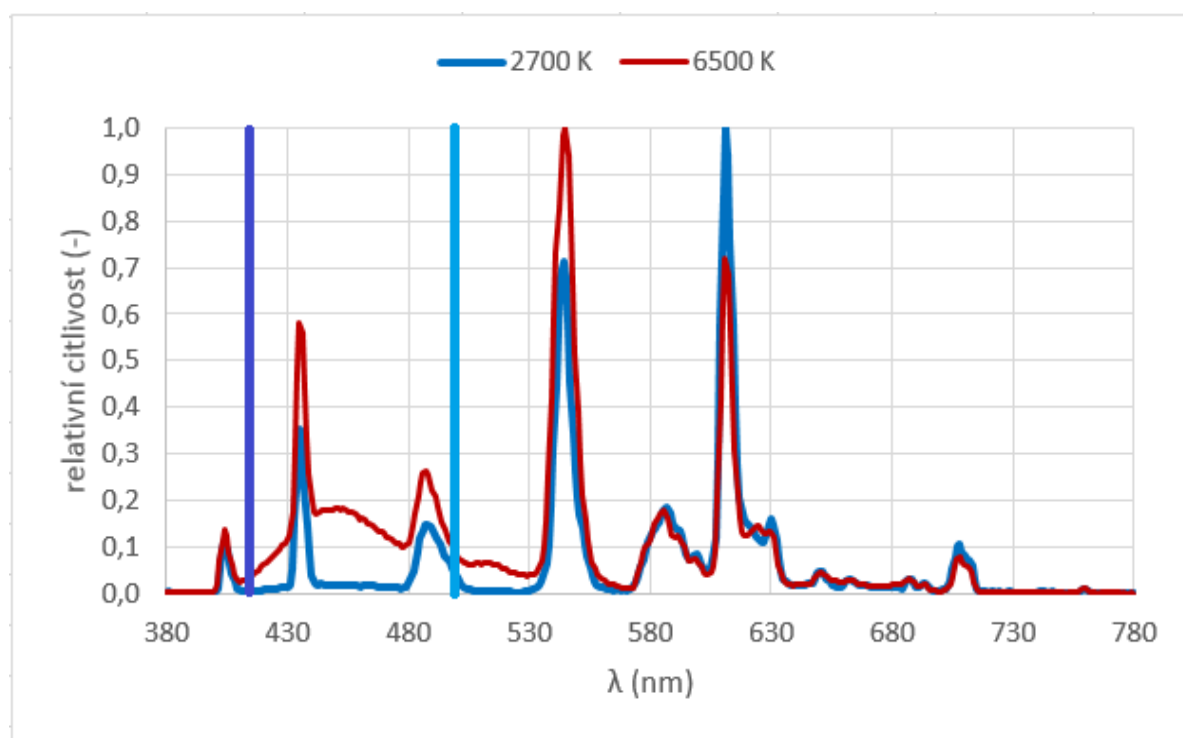
Obr. 6-4 Změřená spektra žárovek



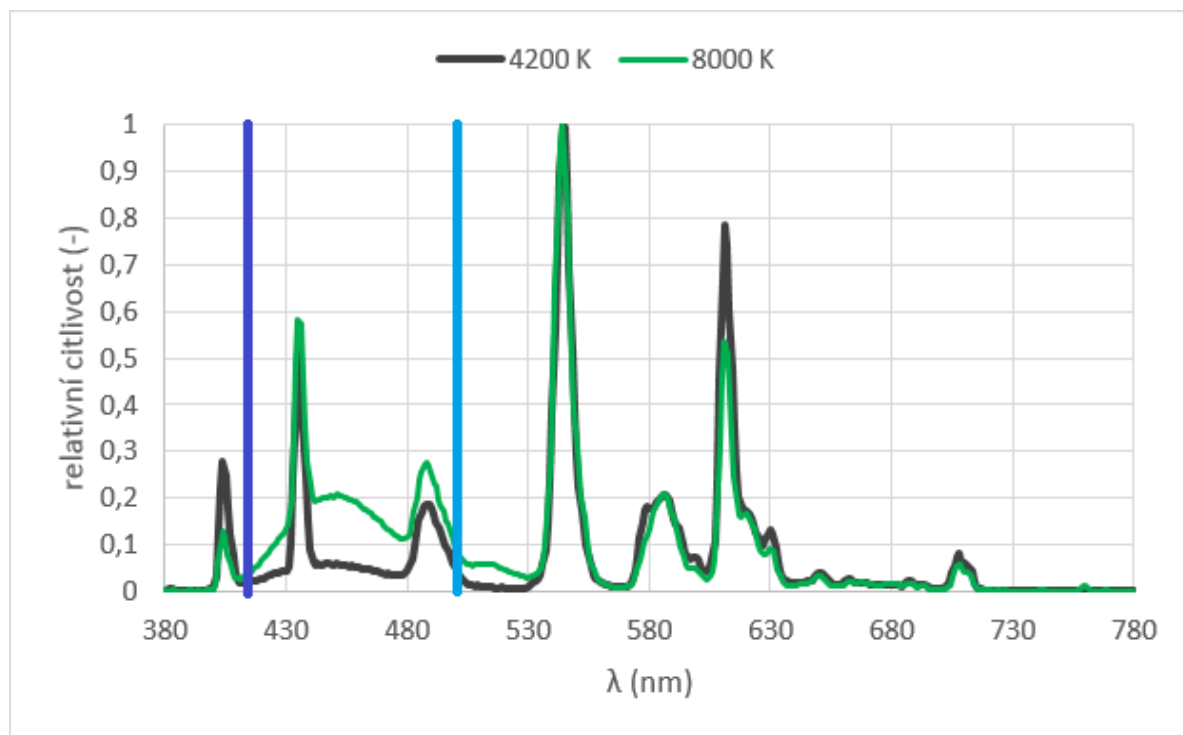
Obr. 6-5 Změřená spektra barevných LED



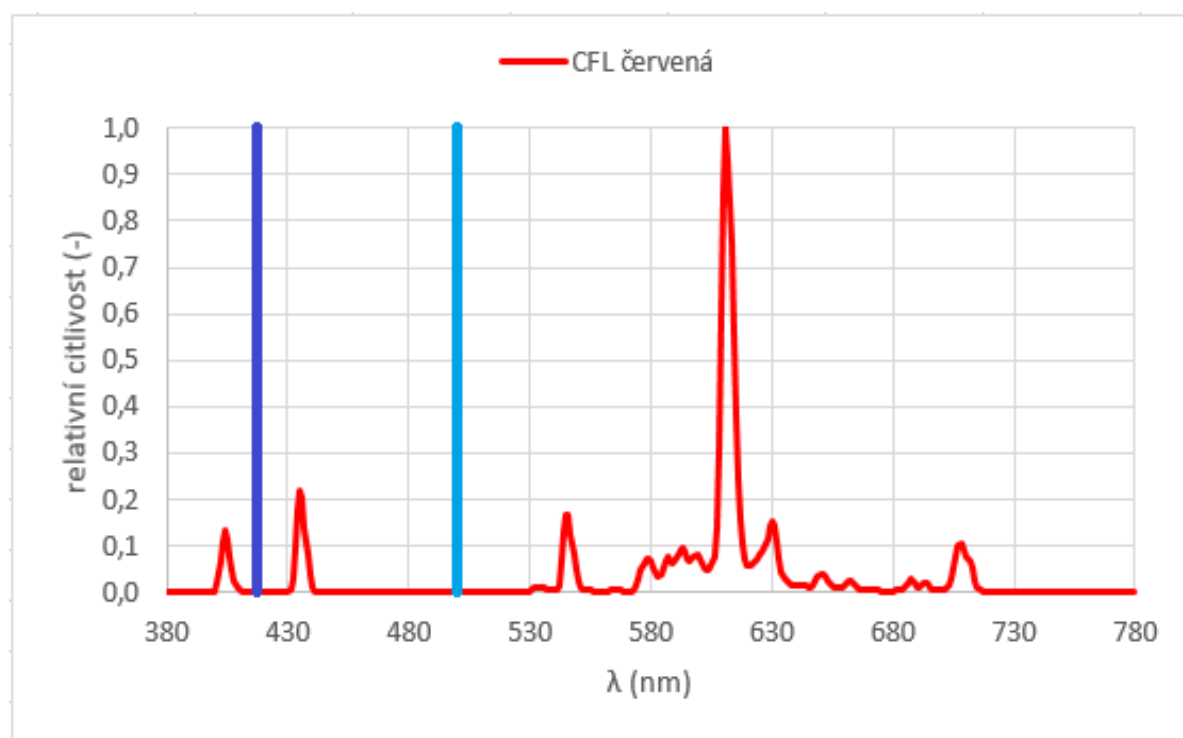
Obr. 6-6 Změřená spektra bílých LED s různou teplotou chromatičnosti T_c



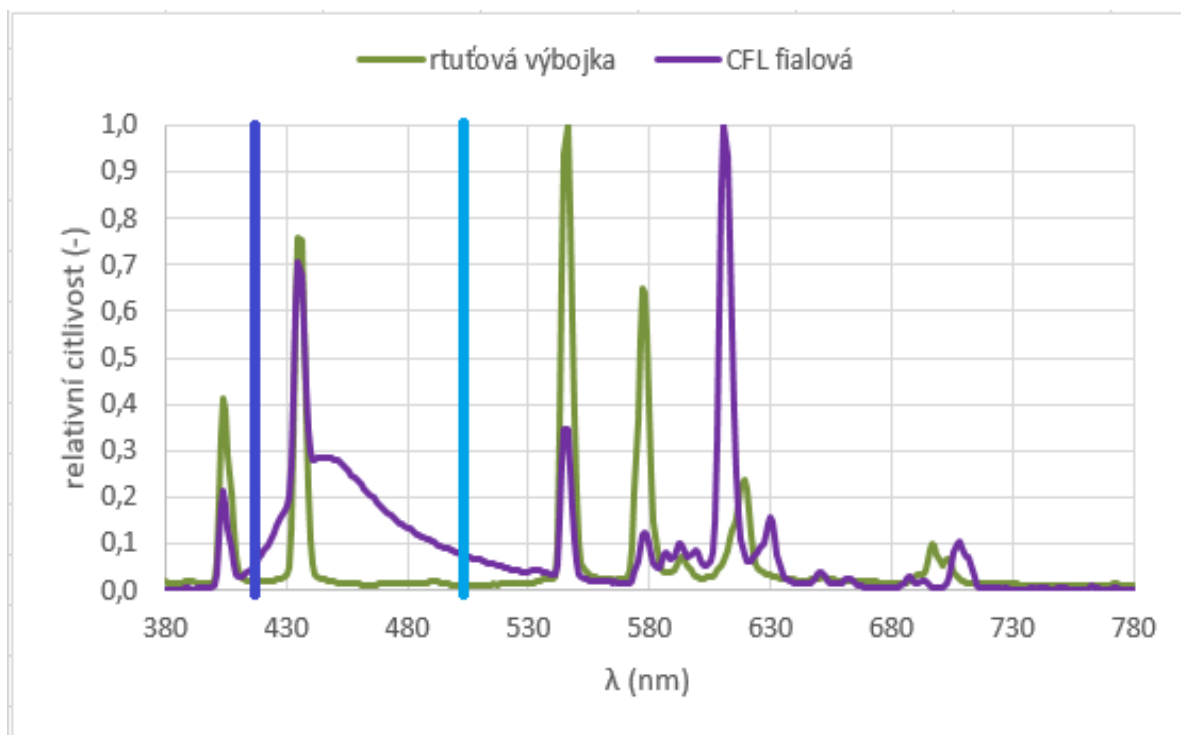
Obr. 6-7 Změřená spektra lineárních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c



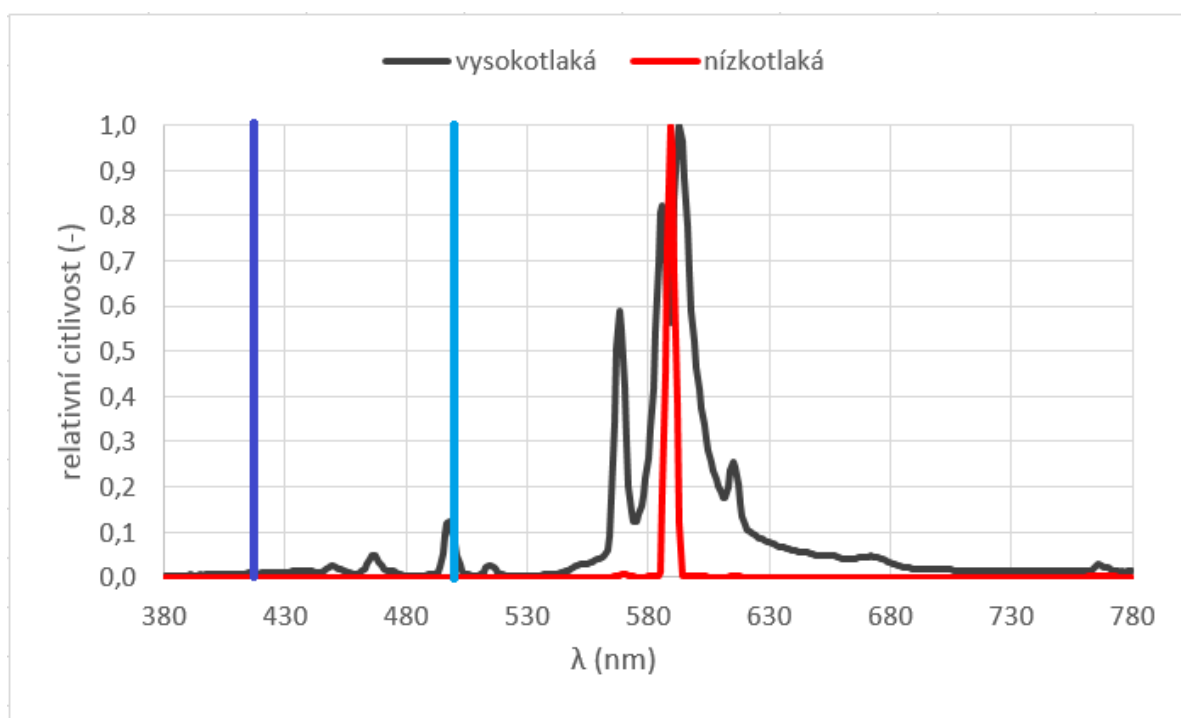
Obr. 6-8 Změřená spektra lineárních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c



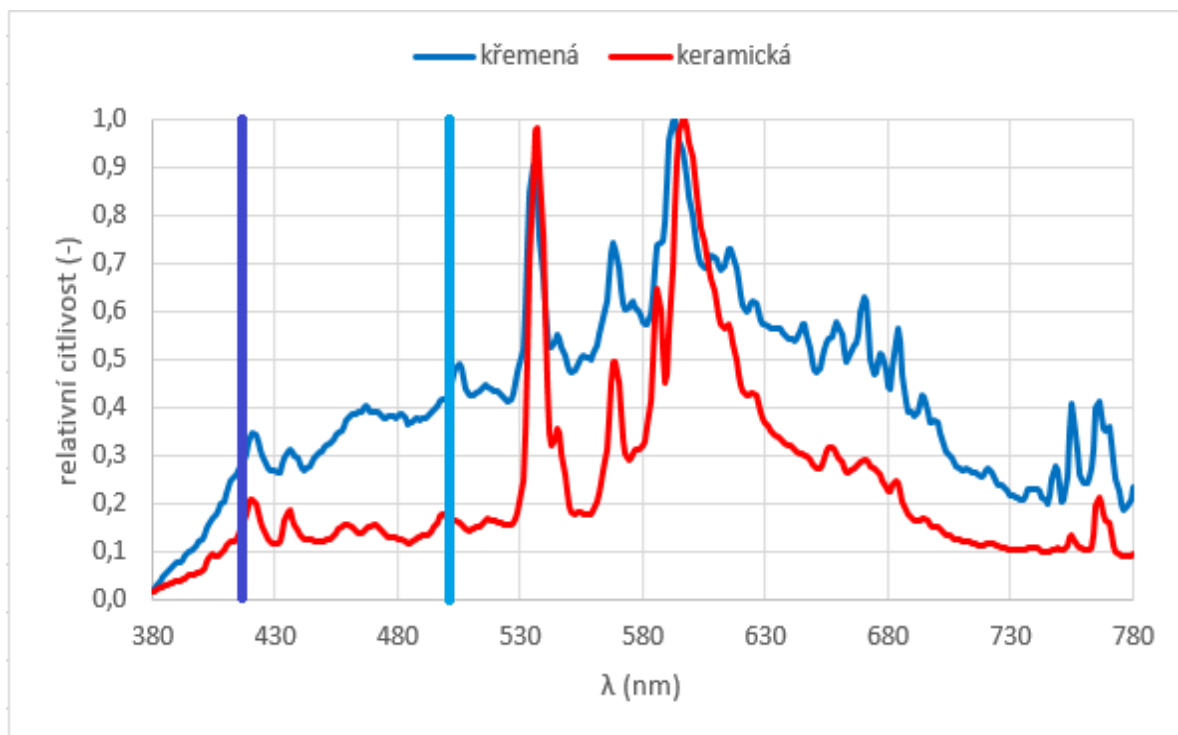
Obr. 6-9 Spektrum červené kompaktní zářivky



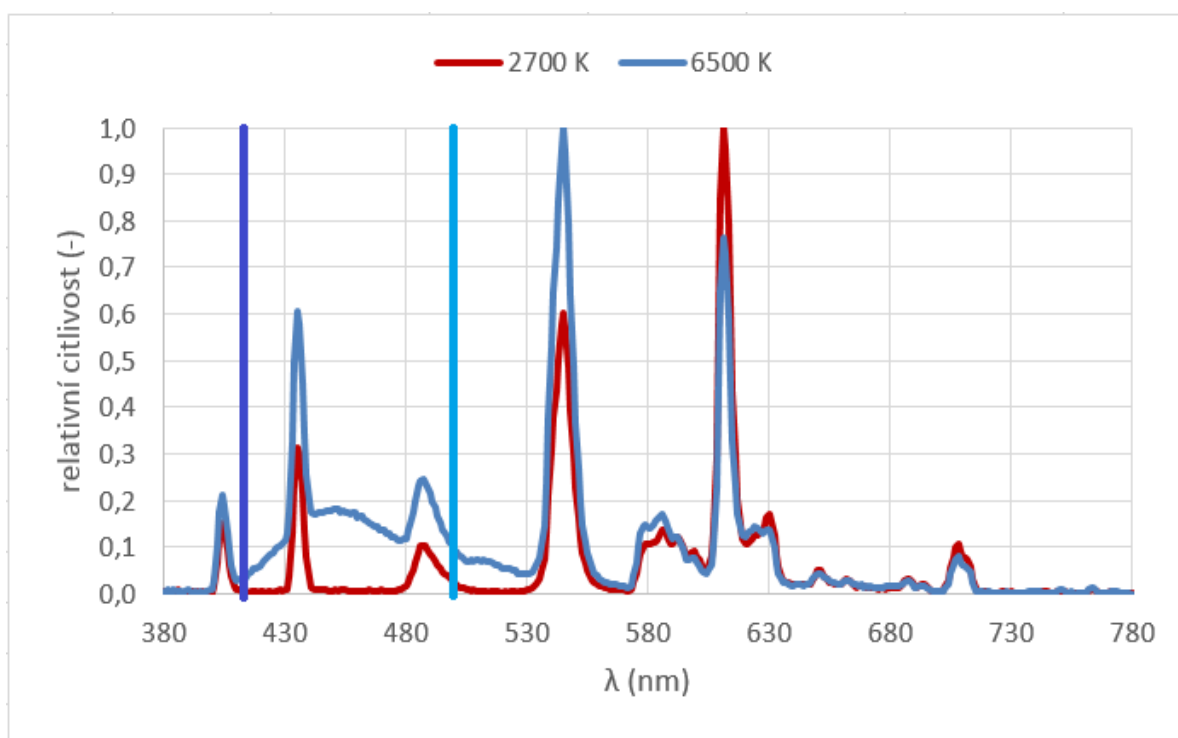
Obr. 6-10 Spektrum fialové kompaktní zářivky a rtuťové výbojky



Obr. 6-11 Spektra sodíkových výbojek



Obr. 6-12 Spektra halogenidových výbojek



Obr. 6-13 Spektra kompaktních zářivek s různou teplotou chromatičnosti T_c

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce nazvaná „Vliv modrého světla na lidský organismus“ je tvořena z teoretické části, která obsahuje literární rešerši, jejíž cílem bylo sepsat a setřídít dosud známé informace o modrém světle, jeho zdrojích a účincích na lidské tělo. Na teoretickou část navazuje praktická část práce, kterou tvoří měření vybraných světelných zdrojů.

Práce je rozdělena do pěti částí, v první z nich je čtenář seznámen s pojmem „modré světlo“. To je zde popsáno jako záření o vlnové délce 430 – 500 nm a je také vyznačeno v celkovém elektromagnetickém spektru. Jedná se o neionizující optické záření, jehož nejvýznamnějším zdrojem je slunce. Celkové barevné spektrum (viditelná oblast záření) pokrývá vlnové délky v rozsahu od 390 do 790 nm. Do optického záření řadíme vedle světla také ultrafialovou a infračervenou radiaci. Souhrnné dopady na lidské tělo závisí především na intenzitě, vlnové délce a na velikosti zasažené tkáně. Nejvíce ohroženy jsou pokožka a zrakové ústrojí.

V druhé části práce je popisován vztah modrého světla a lidského organismu. Pozornost je zaměřena hlavně na pravidelně se opakující pochody probíhající v těle každý den, na tzv. cirkadiánní biorytmus a na zrakovou soustavu, skrz kterou je tento rytmus řízen. Vliv světelných účinků na biologické jevy je zkoumán od roku 1958, ale na zásadnější posun se přišlo až teprve před pár lety objevem třetích fotoreceptorů obsažených na sítnici. K tyčinkám a čípkům přibýly gangliové buňky obsahující barvivo melanopsin. Ty se pravděpodobně nijak výrazně nepodílí na vytváření zrakového vjemu, ale posílají signály o intenzitě světla cirkadiánnímu centru, a proto jsou považovány za hlavní čidla biologických hodin. Mechanismu obsaženému ve spektrální citlivosti těchto čidel není ještě zcela porozuměno a bude potřeba pokračovat v dalších výzkumech. Zatím za nejmarkantnější pokrok v této oblasti jsou považovány práce Brainarda a Thapana, jejichž výsledkem je křivka C (λ).

Kromě popisu vzniku a rizik vyvolaných desynchronizací biologických hodin se druhá kapitola zabývá také dalším velkým nebezpečím modrého světla fotoretinitidou (v angličtině známou jako „blue light hazard“). Jedná se o fotochemické poškození sítnice, které může vést při překročení určitých mezí k trvalému poškození zraku.

V další kapitole následuje přehled a základní informace o umělých světelných zdrojích, které produkují modré světlo. Pro každý typ zdroje je zobrazeno jejich vyzařované elektromagnetické spektrum, ve kterém je vyznačena oblast modrého záření. Nejvíce spektrálních čar v této oblasti je obsaženo v elektroluminiscenčních diodách, v zářivkách s chladně bílým odstínem a ve vysokotlakých halogenových výbojkách. Vzhledem ke světelným vlastnostem by se při vývoji nových osvětlovacích soustav s těmito světelnými zdroji měli zvláště zohledňovat kritéria na zrakové funkce a zvláště na funkce biologické. To se děje prozatím pouze v systémech tzv. biodynamického osvětlení, které jsou vhodným doplňkem k dennímu osvětlení a pravděpodobně tvoří budoucnost umělého osvětlení.

Způsoby, kterými lze určit přesný efekt na cirkadiánní biorytmus jednotlivých světelných zdrojů, jsou uvedeny v předposlední čtvrté kapitole. Na tu navazuje praktická část práce, jejímž úkolem bylo realizovat měření vybraných světelných zdrojů v laboratoři světelné techniky, zpracovat a vyhodnotit vyzařovaná elektromagnetická spektra a porovnat navzájem z hlediska velikosti podílu modrého světla. To lze provést jednoduše pomocí grafických výsledků. Domyslíme – li si do každého grafu k jednotlivým spektrům vrchol C (λ) křivky mezi vyznačenými modrými čarami, ihned poznáme míru ohrožení lidského organismu modrým světlem u každého zdroje. Nejvyšší riziko podle očekávání představují světelné diody a výbojové zdroje o vysoké

náhradní teplotě chromatičnosti T_c . Už jenom velikost tohoto základního světelného parametru (T_c) popisující barevné vlastnosti, nám udává vcelku dobré informace o poměru nebezpečného krátkovlnného záření v celkovém vyzářeném spektru (obr. 6-3).

Nejvyšší činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} z měřených zdrojů vychází u modré LED ($a_{cv} = 8,86$); druhý nejvyšší u fialové kompaktní zářivky ($a_{cv} = 1,628$) a naopak nejnižší u sodíkových výbojek ($a_{cv} = 0,065$; $a_{cv} = 0,001$) a u červené LED ($a_{cv} = 0$). Pod těmito číselnými hodnotami si však člověk nedokáže příliš mnoho představit, proto považuji za hlavní přínos praktické části práce výsledky měření zpracované v tabulce 6-4 (6-5). Uvedené hodnoty fotopické osvětlenosti v luxech totiž udávají nejlepší představu o rozdílech mezi jednotlivými světelnými zdroji.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AMUNDADOTTIR, M.L.; LOCKLEY S.W.; ANDERSEN M. A unified framework for evaluating non – visual spectral effectiveness of ocular light exposure: key concepts [online]. In: *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL), Lausanne, SWITZERLAND, Harvard Medical School, Boston, MA, USA* [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: http://infoscience.epfl.ch/record/208817/files/Amundadottir_Unified_framework_CIE2015_fullpaper.pdf
- [2] BAXANT, P. Světelná technika, Elektronický text č. EEN608, Přednášky a cvičení. Brno: 2006. s. 1-82.
- [3] DOLEŽAL, P. *Příčiny poruch a selhání LED při provozu*. Bakalářská práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2015, 52 stran
- [4] FIGUEIRO, M. G.; BULLOUGH J. D.; REA M. S. Spectral Sensitivity of the Circadian System. [online]. In: *Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180*. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/lightHealth/pdf/spectralSensitivity.pdf>
- [5] FUKSA, A. Světlo a biologické hodiny. *Časopis světlo* [online]. 2010 [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42567.pdf>
- [6] GALL, D.; BIESKE, K. Definition and measurement of circadian radiometric quantities. In: *Technische Universität Ilmenau* [online]. 2004 [cit. 2015-10-21]. Dostupné z: http://www.db-thueringen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-8659/CIELuH2004_GB.pdf
- [7] GALL, D.; VANDAHL, C.; BIESKE, K.; SCHMIDT, A.; HERRMANN, R.; BLANKENHAGEN, C. Die Ermittlung von Licht- und Farbfeldgrößen zur Bestimmung der spektralen Wirkung des Lichtes [online]. In: *Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik*. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <https://www.tuilmenu.de/fileadmin/public/lichttechnik/Publikationen/2004/Farbfeldgroessen.pdf>
- [8] GOTTVALLD, M. *Ionizující a neionizující záření ze zdravotního hlediska*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
- [9] HABEL, J. A KOL. *Světelná technika a osvětlování*. FCC Public, Praha 1995, 448 stran, ISBN 80-901985-0-3
- [10] HOLZMAN, D. What in a Color? The Unique Human Health Effects of Blue Light [online]. *National Institute of Environmental Health Sciences*, 2010 [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: http://www.jstor.org/stable/30249892?seq=2#page_scan_tab_contents
- [11] JANDA, M. Jak pracuje: Lidské oko. In: *Časopis 21. Století*. [online]. 2006 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/2006/02/17/jak-pracuje-lidske-oko/>
- [12] JI HYE OH, HEEYEON YOO, HOO KEUN PARK, YOUNG RAG. Do Analysis of circadian properties and healthy levels of blue light from smartphones at night. *Scientific reports* [online]. 2015 [cit. 2016-02-27]. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/srep11325>
- [13] KAYUMOV, L. A KOL. Blocking Low-Wavelength Light Prevents Nocturnal Melatonin Suppression with No Adverse Effect on Performance during Simulated Shift Work. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*. [online]. 2013 [cit. 2015-10-11]. Dostupné z: <http://press.endocrine.org/doi/abs/10.1210/jc.2004-2062>, ISSN 1945-7197

- [14] KOLEKTIV AUTORŮ. Blue light hazard for the human eye. [online]. *Olino renewable energy*. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: <<http://www.olino.org/us/articles/2011/09/13/blue-light-hazard-for-the-human-eye>>
- [15] KOLEKTIV AUTORŮ. Elektromagnetické spektrum. *Gymnázium F. X. Šaldy* [online]. 2006 [cit. 2015-10-26]. Dostupné z: <http://jan.gfxs.cz/studium/files/optika/spektrum.pdf>
- [16] KOLEKTIV AUTORŮ. Fotodermatóza. [online]. *Institut Galenus* [citováno 6.12.2015] Dostupné z: <http://galenus.cz/clanky/rejstrik/fotodermatoza>
- [17] KOLEKTIV AUTORŮ. Hardware: Technologie LCD panelů v kostce. *Grafika.cz* [online]. 2005 [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: <http://www.grafika.cz/rubriky/hardware/technologie-lcd-panelu-v-kostce-133429cz>
- [18] KOLEKTIV AUTORŮ. Radiometrie, fotometrie [online]. In: *CVUT, fakulta biomedicínského inženýrství*. [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: [https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Radiometrie%20\(cistopis\).pdf](https://www.fbmi.cvut.cz/files/predmety/30/public/Radiometrie%20(cistopis).pdf)
- [19] KOŽDOŇ, J. *Světelný zdroj s nastavitelnou intenzitou osvětlení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 66 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
- [20] LANG, D. Energy efficient lighting for the biological clock. *Spie* [online]. 2011 [cit. 2015-10-16]. Dostupné z: <http://spie.org/x44515.xml>
- [21] LIBRA, M. "Černé" světlo [online]. *Česká zemědělská univerzita v Praze* [cit. 2015-12-06]. Dostupné z: <http://tf.czu.cz/~libra/black.htm>
- [22] NOVOTNÝ, I.; HRUŠKA, M. *Biologie člověka pro gymnázia: učebnice pro gymnázia a další střední školy*. 1. vyd. Praha: Fortuna, 1995, 136 s. ISBN 80-716-8234-9.
- [23] PAGÁČ, M. Co znamená čtvrtá průmyslová revoluce? [online]. 2015 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.konstrukter.cz/2015/10/29/co-znamená-ctvrta-prumyslova-revoluce/>
- [24] PETR, J. Nejnovější výzkum Co vidí v oku třetí buňky? *Časopis 21. století* [online]. 2011 [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/2011/11/18/nejnovejsi-vyzkum-co-vidi-v-oku-treti-bunky/>
- [25] PETR, J. Polámané biologické hodiny. *Zdravotnictví a medicína* [online]. 2009 [cit. 2015-10-09]. Dostupné z: <http://zdravi.e15.cz/clanek/mlada-fronta-zdravotnicke-noviny-zdn/polamane-biologicke-hodiny-414204>
- [26] PRAŠKO, J. Melatonin a léčba nespavosti. [online]. 2011 [cit. 2015-10-11]. Dostupné z: <http://naposledy.blog.cz/1111/melatonin-a-lecba-nespavosti-doc-mudr-jan-prasko-csc>
- [27] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. Fotometrické veličiny. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/535-fotometricke-veliciny>
- [28] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. Stavba oka. *Encyklopedie fyziky*. [online]. [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/486-stavba-oka>
- [29] REICHL, J.; VŠETIČKA, M. Světlo jako elektromagnetické vlnění. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2015-10-13]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/index.php/main.article/view/434-svetlo-jako-elektromagneticke-vlneni>
- [30] SOKANSKÝ, K. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.

- [31] SPOLEČNOST OSRAM. Produkty – Světelné zdroje. [online]. *Technický list výrobku*. [cit. 2015-11-20] Dostupné z: http://www.osram.cz/osram_cz/
- [32] ŠPÉROVÁ, L. *Cirkadiánní rytmy u člověka*. Brno, 2008, 62 l. Bakalářská práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce RNDr. Miroslav Králík, Ph.D.
- [33] ŠTĚPÁNEK, J. *Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a osvětlovacích soustav*. Diplomová práce. Brno: Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, 2014, 72 stran.
- [34] ŠTĚPÁNEK, J.; ŠKODA, J.; KRBAL, M.; WASSERBAUER, V. Comparison of Light Sources for Household Use due Circadian Effect. CVVOZE. Brno, University of Technology. [cit. 2016-04-23].
- [35] ŠTĚPÁNEK, J.; ŠKODA, J. Photobiological safety of LCD screens. In: *Proceedings of CIE 2015 conference*. 2015. s. 1244-1251. ISBN: 978-3-902842-55- 8.
- [36] WEBER, M.; SCHULMEISTER, K. Application of the melatonin suppression action spectra for lighting. In: *Seibersdorf Labor GmbH, Seibersdorf, Austria*. [online]. 2010 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <https://laser-led-lampen-sicherheit.seibersdorf-laboratories.at/downloads/poster>
- [37] Wikipedia. Fluorescent lamp. [online]. [cit. 2016-02-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp#Cold-cathode_fluorescent_lamps
- [38] ŽÁK, P. Biodynamické systémy osvětlení. In: *Časopis Světlo* [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/biodynamicke-systemy-osvetleni--16384>