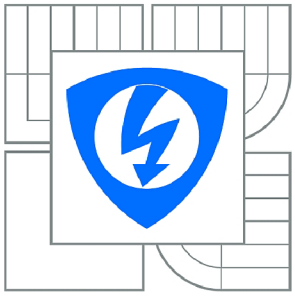
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

SVĚTELNÝ ZDROJ S NASTAVITELNOU INTENZITOU OSVĚTLENÍ

A LIGHT SOURCE WITH VARIABLE INTENSITY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

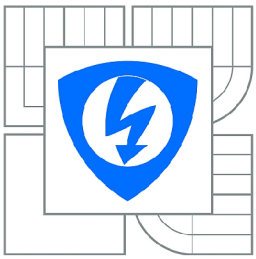
AUTOR PRÁCE — Bc. JAKUB KOŽDOŇ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — prof. Ing. JAROSLAV BOUŠEK, CSc.

SUPERVISOR

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student:	Bc. Jakub Koždoň	***ID:***	125498
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Světelný zdroj s nastavitelnou intenzitou osvětlení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte, jak provozní parametry ovlivňují životnost struktury LED a uveďte, jak jsou tyto problémy řešeny pro standardní osvětlovací zařízení.
Na základě získaných poznatků navrhněte světelný zdroj s nastavitelnou spektrální charakteristikou a s regulovatelnou intenzitou osvětlení.
Navržený zdroj realizujte a zhodnoťe jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání:	10.2.2014	***Termín odevzdání:***	29.5.2014

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.
Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

Abstrakt

Práce se zabývá popisem vlivu světla na člověka, popisem světelných zdrojů, návrhem a realizací světelného zdroje s proměnnou teplotou chromatičnosti a světelným tokem. V úvodu je zmíněn proces vidění a vliv světla na člověka. Navazuje popis důležitých parametrů světelných zdrojů a nejpoužívanějších zdrojů samotných. Jsou rozebrány jejich vlastnosti a konstrukce, přínosy a nevýhody. Důležitou součástí je obsáhlejší popis luminiscenčních diod LED společně s jejich provozními parametry. Poslední dvě části práce se zabývají návrhem a měřením parametrů vytvořeného světelného zdroje s proměnnou teplotou chromatičnosti a světelným tokem a vyhodnocením změřených hodnot.

Abstract

This work is focused on description how the light impact human live, description of light sources and finally design and construction of light source with adjustable colour temperature and luminous flux. In introduction is mentioned the process of vision and how the light impact humans. In next part is characterization of currently used light sources, their construction, properties, benefits and drawback with their main parameters. Important part of this chapter is more extensive description of light emitting diodes with their operational parameters. The last two parts is focused on design and measuring the parameters of created light source with adjustable colour temperature and luminous flux and evaluating the results.

Klíčová slova:

vidění, osvětlení, světelný zdroj, životnost, fotoreceptor, biodynamické osvětlení, elektroluminiscenční dioda, LED, napájení LED

Keywords:

vision, lighting, light source, lifetime, photoreceptor, algorithmic lighting, light emitting diode, LED, LED driving

Bibliografická citace díla

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..

Prohlášení autora o původnosti díla

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Světelný zdroj s nastavitelnou intenzitou osvětlení“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29.5.2014

.....

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za cenné připomínky a ochotu při řešení této práce.

Děkuji Ing. Janu Škodovi, Ph.D. za asistenci a ochotu při měření a za cenné připomínky při řešení této práce.

Obsah

Úvod 7

1 Zrak a vidění 8
1.1 Zrakové ústrojí 8
1.2 Akomodace oka 11
1.3 Adaptace oka 12
1.4 Zraková pohoda 12
1.5 Biodynamické osvětlení 13

2 Světelné parametry 15
2.1 Světelný tok 15
2.2 Teplota chromatičnosti 16
2.3 Podání barev 18

3 Světelné zdroje 20
3.1 Parametry světelných zdrojů 20
3.2 Obyčejné žárovky 20
3.3 Halogenové žárovky 21
3.4 Sodíkové výbojky 23
3.5 Lineární a kompaktní zářivky 24
3.6 Indukční výbojky 26
3.7 Vysokotlaké rtuťové výbojky 26
3.8 Halogenidové výbojky 27
3.9 Světelné diody 28

4 Provozní parametry LED 32
4.1 Napájení LED 32
4.2 Chlazení 34
4.3 Životnost LED 35

5 Návrh řešení 37
5.1 Koncept napájení 37
5.2 Diody LED 38
5.3 Napájecí a řídící část 39
5.4 Rozsah nastavení 40

6 Měření 42
6.1 Měření oteplení 42
6.2 Měření spotřeby ve vypnutém stavu 43
6.3 Měření světelně technických parametrů 44

7 Zhodnocení výsledků 51

8 Závěr 53

9 Seznam literatury 54

10 Seznamy symbolů, veličin a zkratek 58

11 Seznam příloh 59

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Zjednodušené schéma zrakového systému [28] 9
Obr. 1.2: Schématický vodorovný řez pravou oční bulvou dospělého člověka [28] 10
Obr. 1.3: Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [29] ..11
Obr. 2.1: Průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření [28] 16
Obr. 2.2: Diagram chromatičnosti CIE 1976 s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti (K) [37] 17
Obr. 2.3: Orientační barevné znázornění teplot chromatičnosti [2] 17
Obr. 2.4: Kruithoffův diagram [32] 18
Obr. 3.1: Konstrukce žárovky [18] 21
Obr. 3.2: Konstrukce halogenové žárovky [13] 22
Obr. 3.3: Zjednodušené schéma halogenového cyklu [13] 23
Obr. 3.4: Závislost měrného výkonu na tlaku sodíkových par [22] 23
Obr. 3.5: Konstrukce lineární zářivky [16] 24
Obr. 3.6: Závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí [16] 25
Obr. 3.7: Konstrukce indukční výbojky Endura [14] 26
Obr. 3.8: Vysokotlaké rtuťové výbojky [21] 27
Obr. 3.9: Konstrukce základních typů halogenidových výbojek s křemenným hořákem [11] 28
Obr. 3.10: Zvyšování měrného výkonu LED v průběhu času [19] 29
Obr. 3.11: Příklad konstrukce výkonové SMD LED [41] 29
Obr. 3.12: Způsoby montáže a kontaktování čipu [34] 30
Obr. 3.13: Příklad výkonových LED k přímé montáži na chladič 30
Obr. 3.14: Objímka pro LED k přímé montáži na chladič [35] 31
Obr. 3.15: Luminofor – vliv na výsledné světlo LED [34] 31
Obr. 4.1: Maximální parametry [42] 32
Obr. 4.2: Závislost parametrů na pracovních podmínkách [42] 33
Obr. 4.3: Řez výkonovou LED [8] 35
Obr. 4.4: Příklad změřených hodnot světelného toku v průběhu času [50] 36
Obr. 5.1: Koncept napájení a řízení osvětlení 37
Obr. 5.2: Schéma zapojení 39
Obr. 6.1: Místo měření teploty chladiče 42

Seznam grafů

Graf 5.1: Návrhy regulace náhradní teploty chromatičnosti Tn 40
Graf 5.2: Závislost parametrů světla na odporu potenciometrů 41
Graf 6.1: Závislost oteplení chladiče na čase 43
Graf 6.2: Závislost spotřeby svítidla ve vypnutém stavu na napájecím napětí 44
Graf 6.3: Závislost světelného toku na oteplení při Tn = 3 000 K 45
Graf 6.4: Změna trichromatických souřadnic x a y a náhradní teploty chromatičnosti Tn v závislosti na oteplení svítidel 46
Graf 6.5: Závislost poměrného spektrálního složení při různém nastavení náhradní teploty chromatičnosti pro svítidlo 1 po ohřátí 47
Graf 6.6: Spektrální prostorová a plošná hustota zářivého toku Leλ pro svítidlo 1 48
Graf 6.7: Hodnoty všeobecného a speciálních indexů podání barev pro svítidlo 1 50

Úvod

Umělé osvětlení je jedna z každodenních součástí života. Snad každý člověk se s ním nějakým způsobem setkal. Ať už to bylo z důvodu pracovní potřeby nebo rekreace. Umělé osvětlení má nahradit či doplnit světlo přirozené, sluneční. A to buď z důvodu časového, kdy sluneční světlo není dostupné, geografického například při polární noci, či v uzavřených prostorech. Z těchto a dalších důvodů se člověk snaží nahradit či doplnit osvětlení přirozené. Nejčastěji pro umělé osvětlení používáme jako zdroj elektrickou energii. Díky tomuto směřování je práce zaměřena na světelné zdroje napájené elektrickou energií. Zejména pak na světelné zdroje s diodami LED.

Právě světelné zdroje s diodami LED se v současné době rychle prosazují právě z důvodů jejich příznivých parametrů, které jsou neustále zlepšovány, jejich přijatelné ceny a provozních nákladů. Velice bouřlivý vývoj v této oblasti činí světelné zdroje s LED stále zajímavějšími a můžeme očekávat, že mnoho současných světelných zdrojů bude těmito nahrazeno.

Diody LED jsou vyráběny v mnoha variantách a to umožňuje jejich nasazení v mnoha oblastech. Zajímavou oblastí je možnost použít luminiscenční diody pro vytvoření různého spektrálního složení světla. To je možné využít, jak pro vytváření různých barev a mnoha jejich kombinací například ve velkoformátových barevných displejích, tak i pro biodynamické osvětlení.

Kvůli tomu je v první části práce popsán proces vidění. Důraz je kladen na jeho popis z pohledu světelně technických parametrů, ale také na vliv světla na denní cyklus člověka. Jsou zmíněny spektrální citlivosti jednotlivých fotoreceptorů, což je využito v dalším textu a zejména v části řešení práce.

Následuje popis některých světelných parametrů zdrojů světla, zvláště jejich souvislostí se spektrem a jejich vnímáním. Na tuto část navazuje popis světelných zdrojů a jejich vlastností. Je zmíněna většina současných zdrojů světla, jejich základní principy a konstrukce. Větší důraz je kladen na popis diod LED a jejich provozní parametry jsou popsány v jedné z kapitol.

Práce pokračuje návrhem řešení, které uvažuje použití světelných zdrojů v soustavě osvětlení. Navrhovaný světelný zdroj má pak proměnnou teplotu chromatičnosti, což lze využít právě u biodynamického osvětlení. Na návrh navazuje poslední část práce, která si klade za cíl ověřit navrhované vlastnosti.

1 Zrak a vidění

Při návrhu světelné techniky je vhodné aby ti, kteří se v této oblasti pohybují, měli povědomí o tom, jakým způsobem vznikají zrakové počitky a vjemy. Zrak je velice důležitý smyslový orgán a umožňuje nám získat velké množství informací o okolním prostředí. Proto následuje stručné shrnutí procesu vidění nejen z pohledu vzniku zrakového vjemu, ale i z hlediska vlivu na denní cyklus člověka.

1.1 Zrakové ústrojí

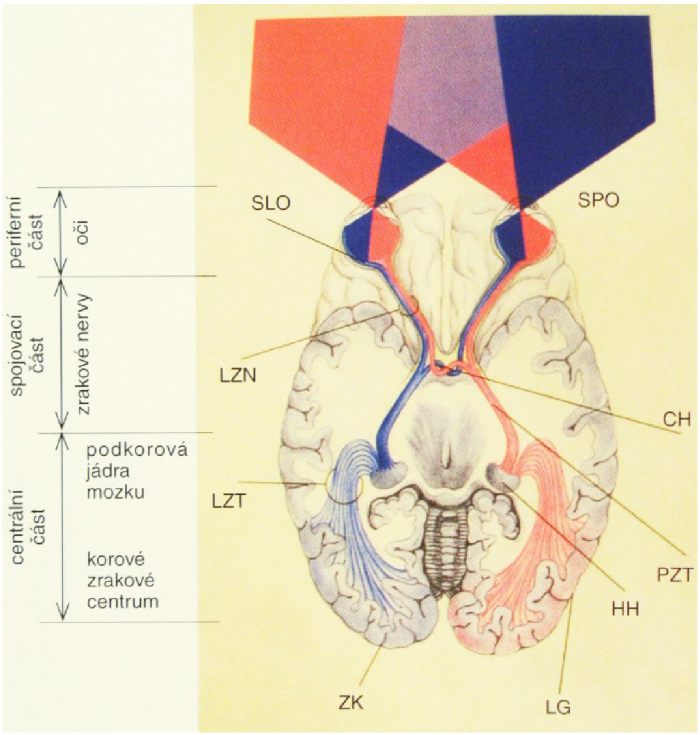
Zrakové ústrojí člověka je velice složitá struktura mnoha orgánů, která zajišťuje příjem informace přinášené světelným podnětem, její přenos a zpracování s výsledkem zrakového vjemu. Popis činností a funkcí zrakového ústrojí se v polovině devadesátých let 20. století značně rozšířil o mnoho důležitých poznatků. Díky tomu je vidění chápáno jako komplexní sled procesů, které vedou od příjmu informace do oka až po její zpracování do zrakového počitku.

Zrakové ústrojí člověka je složeno (obr. 1.1) ze tří hlavních částí: periferní (oči), spojovací (zrakové nervy) a centrální (podkorové a korové části mozku). Informaci o vnějším prostředí, která je přenášena světlem, zprostředkovává smyslový orgán oko (obr. 1.2). Oči jsou symetricky uloženy v tzv. očnicích, mají přibližně kulový tvar pro snadné a rychlé otáčení.

V zadní části oka tvoří stěnu tři vrstvy a to bělima (sklera), cévnatka (chorioidea) a sítnice (retina). Bělima je neprůhledná, bílá tkáň, která přechází v přední části oka v průhledný pevný obal zvaný rohovka (kornea). Cévnatka je tvořena krevními cévami a vlásečnicemi a vyživuje sítnici, od které je oddělena tenkou elastickou blánou. Ta přechází v přední části oka jednak v tzv. řasnaté tělísko (corpus ciliare), na které je zavěšena oční čočka a jednak v duhovku (iris). Prostor (přední komora) mezi rohovkou a duhovkou je vyplněn vnitrooční tekutinou. Uprostřed duhovky je přibližně kruhový otvor – zornice (pupila), kterou vstupuje do oka světlo. V závislosti na smrštění či uvolnění hladkých svalů duhovky se průměr zornice mění a tím je upravována hodnota světelného toku vstupujícího do oka. Vnitřní prostor (zadní komora) je vyplněn průhlednou, čirou, bezbarvou, bezbuněčnou rosolovitou a pružnou hmotou – sklivcem. Z oka vystupuje zrakový nerv v zadní části a spojuje sítnici oka s vyššími zrakovými centry v mozku. V tomto prostoru nejsou žádné nervové buňky ani fotoreceptory a proto se uvedené místo nazývá slepá skvrna. Uprostřed sítnice je tzv. žlutá skvrna, jejíž střední prohloubená část o průměru asi 1,5 mm se nazývá centrální jamka (fovea). [28]

Pokud neuvažujeme cévní zásobení oka a obalu oka, je možné říct, že má oko dvě soustavy – optickou a nervovou. Optická soustava je tvořena rohovkou, přední komorou, duhovkou se zorničkou, čočkou a sklivcem a umožňuje v sítnici vytvořit převrácený, zmenšený a neskutečný obraz vnějšího světa.

Nervová soustava je kromě nervového zásobení tvořena zejména sítnicí, což je průsvitná a poměrně tenká blána (asi 0,2 mm) s velmi složitou, ale pravidelnou buněčnou skladbou. Prvotní zpracování zrakové informace probíhá právě v sítnici, kde je přijata a zakódována pro přenos do vyšších úrovní zrakového systému. V sítnici se navíc také provádí určitý výběr užitečné informace.

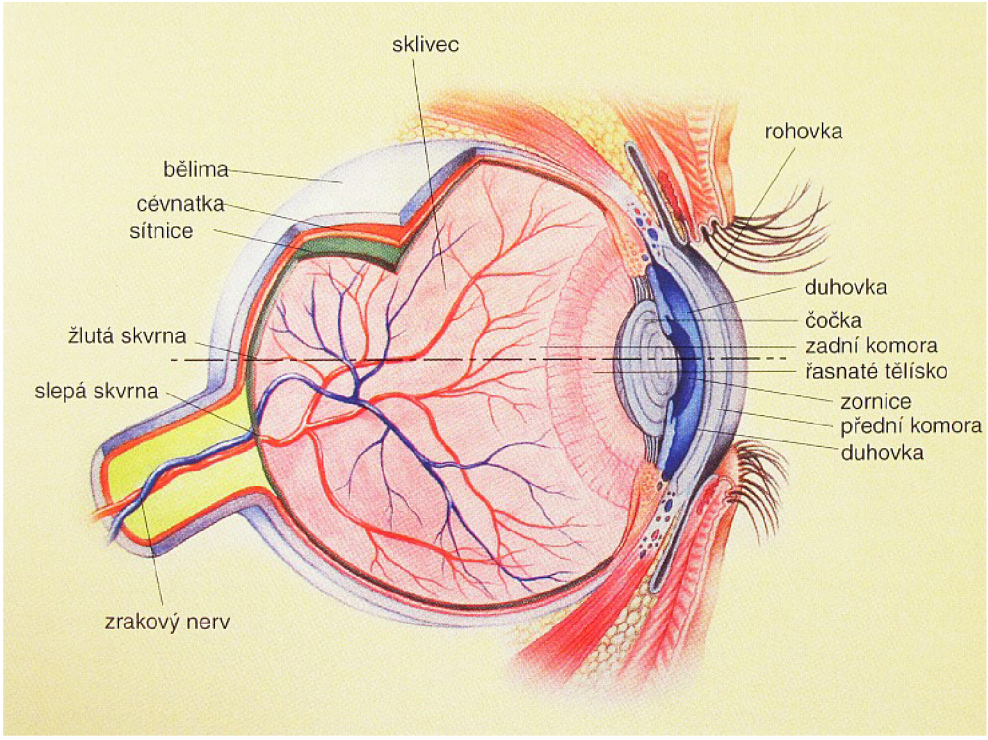


Obr. 1.1: Zjednodušené schéma zrakového systému [28]
SPO, SLO – sítnice pravého a levého oka
PZN, LZN – pravý a levý zrakový nerv
CH – místo částečného překřížení nervových vláken (chiasma)
PZT, LZT – pravý a levý zrakový nervový provazec
LG – laterální genikulát (primární mozkové centrum)
HH – horní hrbolky
ZK – zrakové korové ústředí

Nervové buňky (neurony) se na zrakové nervové dráze rozlišují na čtyři specializované úrovně, které jsou schopny odvádět daná podráždění či signály. Tyto buňky jsou umístěny v jedenácti vrstvách struktury sítnice a prostřednictvím složitých vzájemných propojení zpracovávají, vybírají a prostřednictvím zrakového nervu předávají informaci, kterou zachytily buňky citlivé na světlo (fotoreceptory) v podobě časových a prostorových změn barvy a jasu. Ke zrakovým neuronům patří (kromě těchto jsou ve struktuře sítnice i další důležité nervové buňky):

1. fotoreceptory
   - čípky
   - tyčinky
   - čidla cirkadiánní soustavy
2. bipolární buňky
3. gangliové buňky
4. těla nervových buněk, které vysílají své neurity z podkorových jader mozku do mozkové kůry

Čípků je v sítnici asi 6,5 milionů a jsou soustředěny více ke středu sítnice, kdežto tyčinky, kterých je asi 125 milionů, jsou hustěji rozmístěny kolem kraje sítnice. Místem přímého vidění s největší rozlišovací schopností je centrální jamka a obsahuje pouze čípky, kterých je zde asi 800 000. Průměr tyčinek je asi 0,002 mm a čípků asi 0,005 až 0,006 mm. Čípky se pak dají rozdělit na další tři typy z nichž každý reaguje na jiné spektrum záření. Díky tomu umožňují barevné vidění. Čípky reagují převážně při denním či fotopickém vidění. Naopak tyčinky neumožňují barevné vidění a reagují zejména při tzv. nočním či skotopickém vidění. [28]

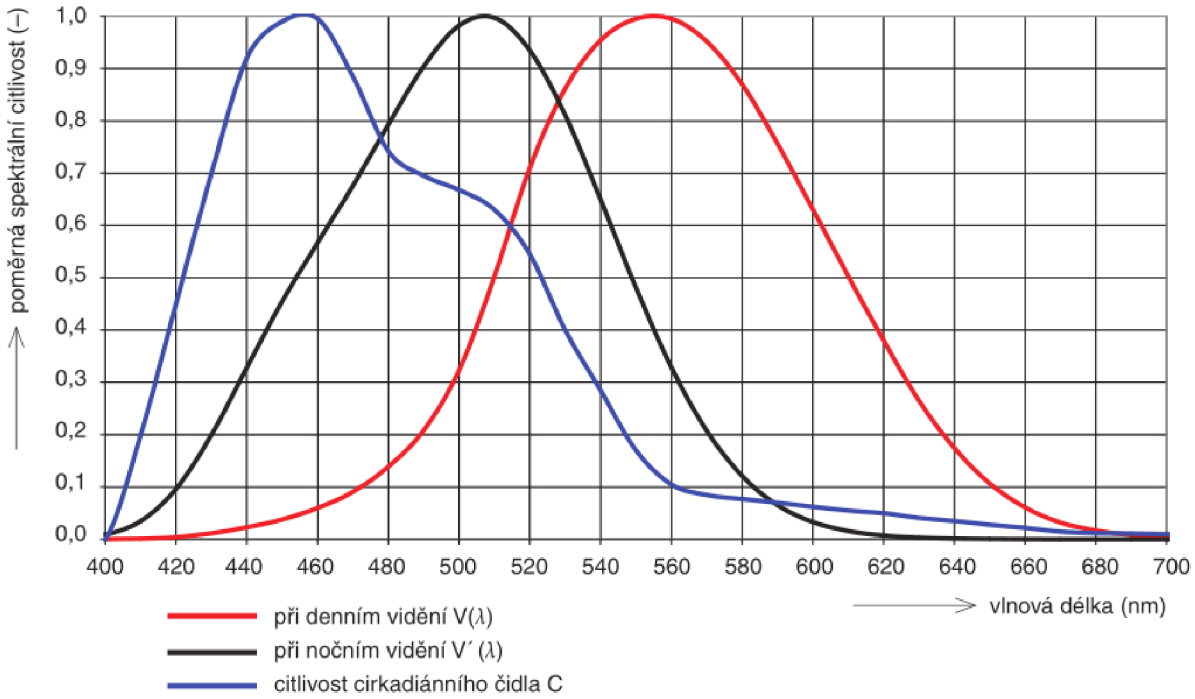


Obr. 1.2: Schématický vodorovný řez pravou oční bulvou dospělého člověka [28]

Třetím typem buněk jsou čidla cirkadiánní soustavy. Jde o relativně nově objevený typ, který tak boural dogma, že v oku jsou jen dva druhy fotoreceptorů, čípky a tyčinky. Jde o světlocitlivé sítnicové gangliové buňky (v angličtině používaná zkratka ipRGC z intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells), souhrnně označované čidly cirkadiánní soustavy. Tyto buňky se liší od ostatních sítnicových gangliových buněk tím, že obsahují barvivo melanopsin. Ukazuje se, že tyto buňky nejsou v sítnici rozloženy rovnoměrně, jak se zpočátku předpokládalo a že se dále dělí na několik dalších typů. Vzhledem k relativně nové problematice je v současné době prováděn intenzivní výzkum. [43] [44] [27]

Biologické pochody v těle člověka mají přibližně čtyřiadvacetihodinový (tzv. cirkadiánní) cyklus. Tímto cyklem se řídí množství pochodů v těle, například tělesná teplota, tepová frekvence, krevní tlak či uvolňování hormonů. Proto také narušením cirkadiánního cyklu vzniká množství potíží od mírných pocitů nepohody, přes poruchy spánku po závažné zdravotní potíže a onemocnění. Poměrná spektrální citlivost známých fotoreceptorů zraku normálního fotometrického pozorovatele je na obr. 1.3 společně s předpokládanou poměrnou citlivostí cirkadiánního čidla (modře).

Vzhledem k tolika typům fotoreceptorů není zrakový orgán stejně citlivý na záření různých vlnových délek. Při dobrém osvětlení je určena citlivost oka čípky a tedy při fotopickém vidění se maximum citlivosti nejčastěji pohybuje kolem 555 nm. A opačně při nízkých hladinách jasů je maximum citlivosti posunuto ke kratším vlnovým délkám asi 507 nm, kdy se při skotopickém vidění uplatňují především tyčinky. Při mezopickém vidění se maximum citlivosti pohybuje mezi těmito hodnotami. Hodnota citlivosti se obvykle udává v poměrných hodnotách vztažených k maximální absolutní hodnotě citlivosti. Průběhy těchto hodnot i hranice viditelnosti je u různých osob rozdílná. Pro zajištění jednotnosti při světelně technických výpočtech, přijala Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE) dohodu o hodnotách spektrální citlivosti tzv. normálního fotometrického pozorovatele, které jsou vidět na obr. 1.3 – černě pro skotopické vidění a červeně pro fotopické vidění. [28]



Obr. 1.3: Poměrná spektrální citlivost zraku normálního fotometrického pozorovatele [29]

1.2 Akomodace oka

Oko nedokáže zobrazit na sítnici stejně ostře předměty nacházející se v různých vzdálenostech. Normální oko, které hledí do dálky ostře, zobrazuje na sítnici předměty umístěné teoreticky nekonečně daleko od oka, prakticky to je ve vzdálenosti větší než asi 6 m. Pokud je objekt umístěný blíže, pak by se paprsky přenášející informaci o předmětu zobrazily za sítnicí, proto se v takovém případě optická soustava oka tomuto stavu přizpůsobí – akomoduje. Touto schopností oko přizpůsobuje lomivost optických prostředí vidění do blízka změnou zakřivení obou stěn čočky pomocí různého stahu svalu – řasnatého tělíska. Čímž se pak mění ohnisková vzdálenost a z toho vyplývající optická mohutnost. [28]

1.3 Adaptace oka

Při různých hladinách osvětlenosti se oko proměnným podmínkám přizpůsobuje pomocí adaptace. Oko se tak přizpůsobuje pomocí změny průměru zornice (fotopupilátní reflex), změny velikosti vjemových polí sítnice, ale zejména změnou citlivosti fotoreceptorů. Pomocí těchto mechanismů se oko může přizpůsobit velkému rozsahu osvětleností svislé roviny proložené zornicí v rozmezí asi od 0,25 lx do 10^5 lx. Ale vnímat je schopné ještě asi $2 \cdot 10^{-9}$ lx.

Působením světla se zrakové pigmenty rozkládají ve vnějších segmentech fotoreceptorů a naopak vlivem tmy probíhá jejich syntéza, což je princip fotochemického děje, který je hlavním adaptačním mechanismem. Díky tomuto se například při přechodu ze tmy na světlo zmenšuje citlivost fotoreceptorů a oko se tak adaptuje z nižšího jasu na vyšší (tzv. adaptace na světlo). Děj je dokončen asi do jedné minuty a poté dozníva asi 10 minut. Naopak adaptace z vyššího jasu na nižší (tzv. adaptace na tmu) je podmíněna vytvořením zásob fotopigmentů, což trvá déle od několika minut až i po hodinu při nízkých hladinách osvětlenosti.

Dalším adaptačním mechanismem je změna velikosti vjemových polí. Z výzkumů vyplynulo, že základní funkční jednotkou sítnice není jeden fotoreceptor, ale tzv. vjemové pole. To je část plochy sítnice přibližně kruhového tvaru, pomocí které lze podráždit jedno vlákno zrakového nervu. Vjemových polí je mnoho funkčních druhů a mohou se i částečně překrývat. Při vysokých hladinách osvětlenosti se pak vjemová pole zmenšují a naopak při nízkých hladinách osvětlenosti se zvětšují.

Vzhledem k různé citlivosti fotoreceptorů na světlo se při různých jasech uplatňují různé skupiny fotoreceptorů. Při jasech vyšších než 10 $cd \cdot m^{-2}$ se uplatňují čípky, které umožňují barevné vidění, kterému se říká fotopické vidění. Tyčinky jsou mnohem citlivější než čípky a uplatňují se při hladinách jasu nižších než 0,001 $cd \cdot m^{-2}$. Takové vidění se nazývá skotopické. V rozmezí uvedených jasů se uplatňují oba druhy fotoreceptorů, čemuž se říká mezopické vidění a je to další adaptační mechanismus oka. Uvedený stav vidění je velice důležitý zejména při osvětlování veřejných komunikací.

Při poměrně velkých změnách spektrálního složení přírodního a jistého umělého světla je pomocí adaptace na barvy zajištěna stálost vnímání barevných tónů. Tomuto se říká chromatická adaptace. Rozdíl ve vjemu barvy je možné rozlišit, pokud je možnost pozorovat dvě stejné scény osvětlené různými světelnými zdroji současně. Proto zpravidla není vhodné užívat v jednom prostoru světelné zdroje s velmi rozdílnou chromatičností světla pokud světlo není dostatečně promícháno. Tento problém může nastat i při kombinaci denního a umělého osvětlení. [28]

1.4 Zraková pohoda

Pro člověka je světlo zejména prostředkem pro přenos a získávání informací o okolním prostředí. Pro správné přijetí a zpracování informace přes zrakový systém bez zkreslení, s dostatečnou rychlostí a bez zbytečné námahy musí být osvětlení dané zrakové činnosti přiměřené. To zahrnuje, jak zajištění zrakového výkonu (tj. příjem a zpracování zrakovým systémem člověka daného množství světlem přenášených informací za jednotku času), tak i zajištění zrakové pohody. Během pracovních činností se splňují především požadavky na zrakový výkon, plynoucí z obtížnosti zrakového úkolu a poté se ověřuje, jestli nejsou

porušeny zásady zrakové pohody. Naopak při odpočinkové činnosti je možné snížit hladiny osvětleností a dbá se především na navození dobré nálady, vytvoření příjemného prostředí a ke zdůraznění estetických a architektonických prvků prostředí.

Projevy nepříznivých účinků záření, například při oslnění, můžou být příčinou i úrazů a havárií, ale je možné je sledovat i při nevhodně zvolené chromatičnosti světla či indexu podání barev. V takových případech může dojít ke ztížení či znemožnění rozlišení barev, případně může vznikat pocit nepohody a to zejména v případech, kdy je nevhodně zvolen barevný tón světla.

Vzhledem k tomu, že funkce zraku je úzce spjata s centrální nervovou soustavou, pak mají na zrakové vnímání podstatný vliv i různé podněty obklopujícího prostředí. Proto je důležité v daném prostoru podle jeho účelu a předpokládaných činností vytvořit tzv. mikroklima. Světelné mikroklima je tak tvořeno geometrickými rozměry prostoru, hladinami osvětleností a jejich rovnoměrností, typem světelných zdrojů, rozmístěním a druhem svítidel, rozmístěním vybavení, barevnou úpravou povrchů prostorů a vybavení a barevným podáním ostatních předmětů a lidí v prostoru. Proto pod pojmem zrakové pohody je třeba rozumět příjemný psychologický stav, při kterém celý zrakový systém pracuje optimálně a nad to musí i při delším pobytu vyvolávat pocit dobrého psychického pocitu z pobytu v daném prostoru. Naopak zraková nepohoda vede nejen k narušení zrakových funkcí a tím i k oční únavě, ale navíc se nepříznivě projevuje v celkové kondici, náladě člověka a jeho výkonnosti. [28]

1.5 Biodynamické osvětlení

Vzhledem uvedeným poznatkům zejména v souvislosti s cirkadiánními čidly vyvstalo mnoho otázek, jaký vliv na nás má světlo. Ukazuje se, že pomocí světla nepřijímáme jen informace o okolním prostředí, ale také jsou světlem řízeny biologické pochody v našem těle. Proto se na umělé osvětlení začíná pohlížet i z možnosti řízení denního cyklu člověka. Vzhledem k různým spektrálním citlivostem fotoreceptorů je potřeba studovat vliv současných zdrojů světla na denní cyklus člověka. Ke studii se zavádí nové pojmy, jako například cirkadiánní osvětlenost. Při jejím výpočtu či měření se uvažuje spektrální citlivost cirkadiánních čidel (obr. 1.3). Ve [27] je navržen *index cirkadiánního aktivačního účinku*, kterým by se dalo srovnávat různé světelné zdroje a tamtéž jsou některé světelné zdroje pomocí tohoto indexu porovnány.

Pro napodobení denního osvětlení se ve vnitřních prostorech používají biodynamické osvětlovací soustavy. V průběhu dne se pomocí takovéto soustavy nemění jen intenzita osvětlení, ale barevné nebo dokonce směrové vlastnosti světla – stejně jako u denního světla. Průběh těchto změn je pak naprogramován v řídícím systému v podobě dynamických světelných scén. Ty se pak dále nemusí měnit jen v průběhu dne, ale i na základě roční doby. Nastavení těchto světelných scén se také liší v závislosti na zeměpisné poloze objektu.

Uvedený způsob osvětlení je zatím využíván zejména pro osvětlení bezokenních prostorů, které existují zejména jako dispečinky či velíny v elektrárnách, továrnách a dalších podobných prostorech. V těch je potřeba vyvolat prostředí, které pokud možno nenaruší denní pochody pracovníků, ale v co největší míře je podpoří. Proto se do takových prostor pak instalují například tzv. umělá okna, která vytvářejí dojem denního osvětlení. Tyto systémy jsou, jak již bylo uvedeno, předem naprogramovány pro vytvoření biodynamického osvětlení

(anglicky Algorithmic lighting [23]), ale nastavení je možné je ovlivnit osobním nastavením například z čipové karty nebo v případě potřeby, je možné nastavit intenzitu osvětlení, teplotu chromatičnosti a případně i směrové vlastnosti světla ručně podle potřeby. [54] [28]

Zajímavá oblast využití se nabízí i v dalších interiérech, kde by bylo možné vytvořit osvětlení, které nejen že udržuje vhodnou hladinu osvětlenosti, ale i mění teplotu chromatičnosti podle aktuálního stavu venkovního osvětlení. Toho je možné dosáhnout zejména pro dostupnost vhodných snímačů osvětlení, jež umí měřit nejen hodnoty osvětlenosti, ale navíc i jednotlivé barevné složky světla. Tím by se rozsah využití rozšířil i do oblastí, které nejsou bezokenní. Došlo by tak ke sjednocení vlastností osvětlení v interiérech, kde se využívá jak denní, tak i umělé osvětlení, podle skutečných venkovních podmínek.

Další oblastí, kterážto se ukazuje jako vhodná pro využití posledních poznatků, je zobrazování informací na displejích. Jde zejména o monitory počítačů, laptopů, displeje přenosných zařízení a různé terminály, které se v dnešní sobě využívají v mnoha oblastech denního života. Problematikou tabletů a možnosti narušení denního cyklu se zajímal výzkum [52], ze kterého vyplynulo, že tyto přístroje můžou narušit spánek při používání ve večerních hodinách. Je také navrhováno, aby výrobci vyráběli zařízení, které nenaruší cirkadiánní cyklus, ale podpoří jej nejen změnou jasu (což je již u mnoha přístrojů realizováno), ale i úpravou vyzařovaného spektra. To je možné dosáhnout různými cestami a jednou z nich je například využití softwaru, který upraví nastavení displeje podle okolních podmínek. Pro některé platformy je možné již takový software najít, jde například o f.lux pro Windows, Mac, Linux, a iPhone/iPad [26], Redshift s otevřeným zdrojovým kódem pro Windows a Linux [47] či Twilight pro platformu Android [48].

2 Světelné parametry

Pro pochopení souvislostí je potřeba zmínit a vysvětlit používané parametry světelných zdrojů. S některými z nich se setkáváme mnohokrát, zejména při nákupu světelných zdrojů a ne vždy si uvědomujeme jejich souvislosti a vliv na náš zrak. Jsou zde uvedeny některé odlišnosti, které se vyskytují u světelných zdrojů a zejména u světelných zdrojů na polovodičové bázi (označované Solid-state lighting, zkráceně pak SSL).

Ve světelné technice se hodnotí zejména, jakým způsobem pomáhá osvětlení postupu přijetí a zpracování informace a proto se nevyužívají energetické veličiny, ale fotometrické pojmy a veličiny, jež respektují různou citlivost oka k záření různých vlnových délek.

2.1 Světelný tok

Světelný tok Φ je světelně technická veličina, která vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový počitek, resp. vjem a určí se ze vztahu [28]:

$$\Phi(\lambda)=K(\lambda)\cdot\Phi_e(\lambda)=K_m\cdot V(\lambda)\cdot\Phi_e(\lambda) \tag{2.1}$$

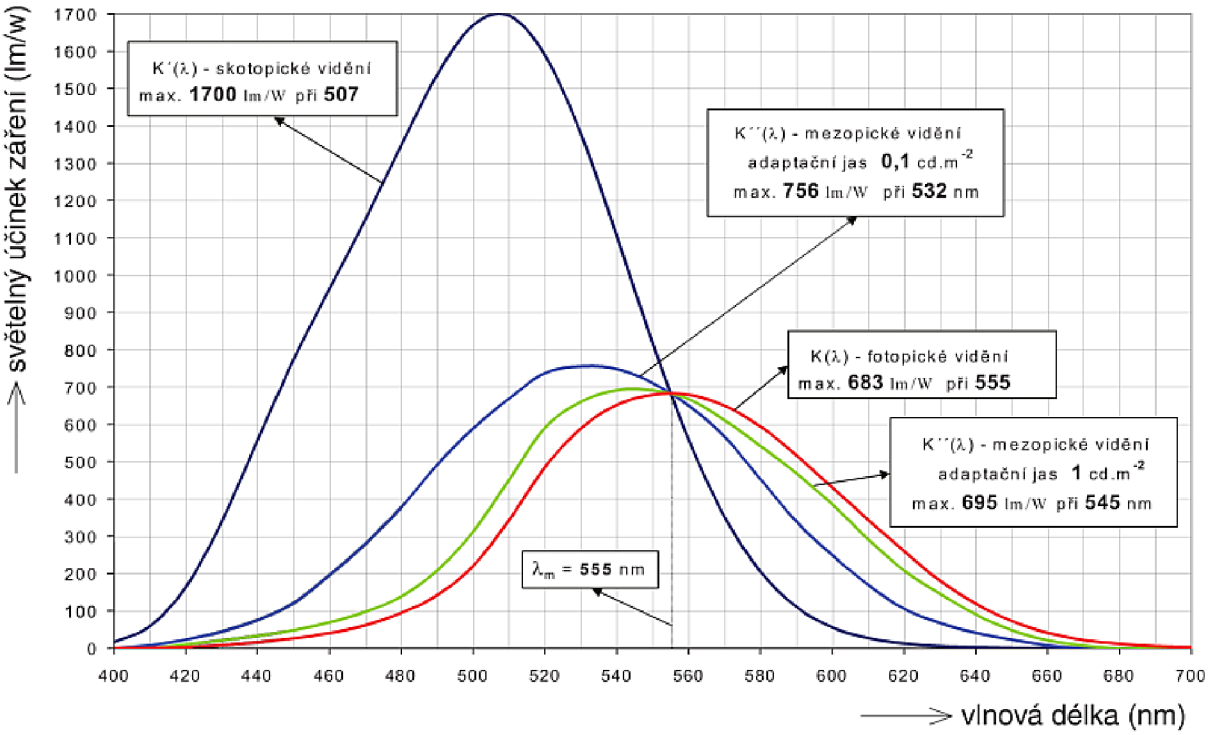
kde	$\Phi(\lambda)$	je	světelný tok monochromatického záření vlnové délky λ	[lm]
	$K(\lambda)$		světelný účinek monochromatického záření	[lm·W^{-1}]
	K_m		maximum světelné účinnosti záření $K(\lambda)$	[lm·W^{-1}]
	$V(\lambda)$		poměrná světelná účinnost	[–]
a	$\Phi_e(\lambda)$		zářivý tok	[W]

Veličina $V(\lambda)$ je poměrná světelná účinnost monochromatického záření a je možné ji definovat vztahem [28]:

$$V(\lambda)=\frac{K(\lambda)}{K_m} \tag{2.2}$$

Veličinu $K(\lambda)$ ve vztahu (2.1) je možné vyjádřit z (2.2). V souladu s definicí kandely schválily mezinárodní orgány CIE a ISO, že maximum K_m světelné účinnosti záření $K(\lambda)$ dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém vidění hodnoty $K_m = 683$ lm·W^{-1} a tohoto maxima dosahuje při vlnové délce monofrekvenčního záření $\lambda = \lambda_m = 555{,}015\ 5$ nm. Jak jsou pro fotopické vidění definovány veličiny $K(\lambda)$ a $V(\lambda)$, tak pro skotopické vidění byly stanoveny veličiny $K'(\lambda)$ a $V'(\lambda)$. Průběhy funkcí $V(\lambda)$ a $V'(\lambda)$ jsou na obr. 1.3. Definice kandely má důležitý důsledek pro záření základní vlnové délky 555,015 5 nm, pro kterou je světelný účinek záření při fotopickém a skotopickém vidění shodný a shodné jsou také spektrální citlivosti, viz obr. 2.1. Díky tomu je možné v těchto stavech vidění pracovat se světelnými toky v lumenech. [28]

V oblasti mezi krajními případy skotopického a fotopického vidění se nachází tzv. mezopické vidění. Během tohoto vidění se využívá jak čípků, tak i tyčinek a pro charakterizování dané situace je potřeba stanovit odpovídající průběh poměrné spektrální citlivosti a až poté provést potřebné světelně technické výpočty. Což podstatně komplikuje řešení daného problému. V rámci Mezinárodní komise pro osvětlování CIE není doposud žádný postup výpočtů vypracován. S mezopickým viděním se ale můžeme běžně setkat například ve veřejném osvětlení či v nouzovém osvětlení. [28]



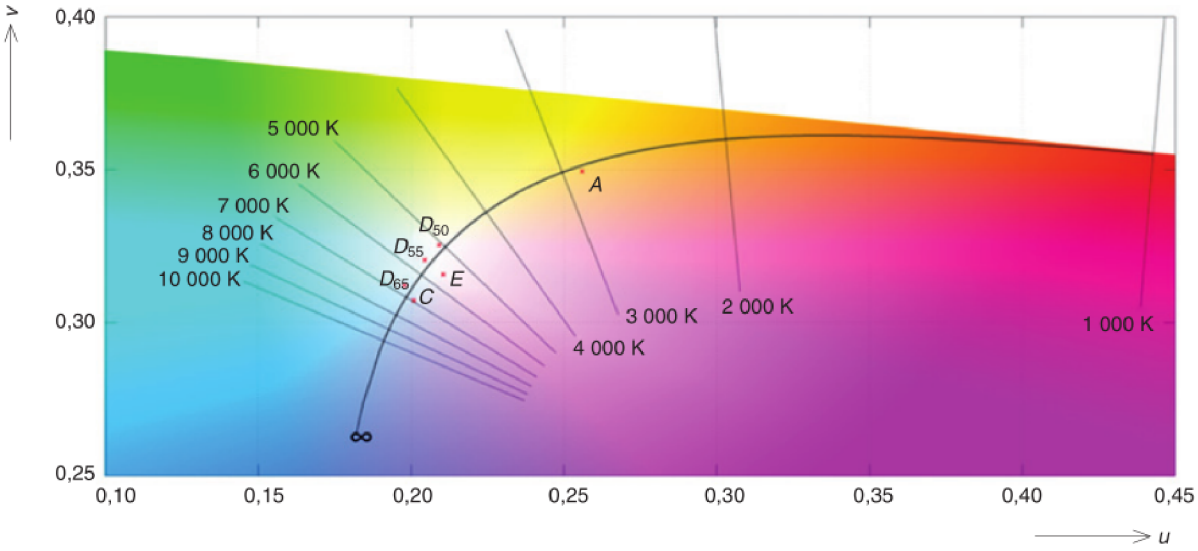
Obr. 2.1: Průběhy absolutních hodnot světelných účinků záření [28]

2.2 Teplota chromatičnosti

Barevné vlastnosti světla je možné označit názvem *chromatičnost* a pro označení barevných vlastností předmětů slouží pojem *kolorita*. Podle spektrálního složení barevného podnětu a spektrální citlivosti zraku je pak možné tyto vlastnosti jednoznačně fyzikálně popsat. Pro chromatičnost je to určením spektrálního složení záření vysílaného primárním zdrojem a pro koloritu je to určením spektrálního složení záření, které osvětluje daný předmět a spektrální propustností či odrazností materiálu předmětu. Pro popis barvy či barevných vlastností světla je možné použít i teplotu chromatičnosti.

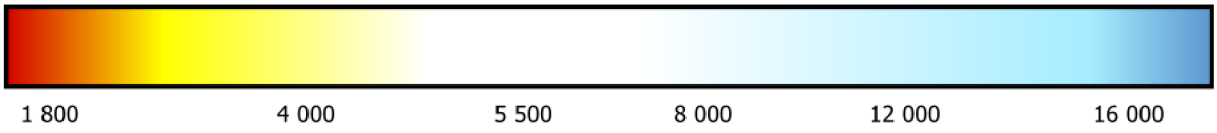
Teplota chromatičnosti T_c je rovna teplotě černého zářiče, jehož záření má stejnou chromatičnost jako uvažované záření a udává se v kelvinech (K). Často je možné se setkat s převrácenou hodnotou T_c vynásobenou milionem, která se tak udává v převrácených megakelvinech (MK^{-1}) nebo jejím označením mired (μrd).

Na obr. 2.2 jsou zakresleny čáry teplotních zářičů s vyznačenými hodnotami teploty chromatičnosti T_c. Pokud spektrální složení světla světelného zdroje odpovídá teplotnímu zářiči jen přibližně (křivka spektrálního složení je plynulá a bez prudkých změn), je možné barvu světla takových zdrojů popsat *ekvivalentní* teplotou chromatičnosti T_c. A nakonec pokud je křivka spektrálního složení s prudkými změnami (výrazná pásma či čáry), lze přibližně popsat barvu pomocí *náhradní* teploty chromatičnosti T_n a ta je definována teplotou chromatičnosti odpovídající bodu, který je na čáře teplotních zářičů nejblíže bodu, který popisuje chromatičnost uvažovaného světla. [28]



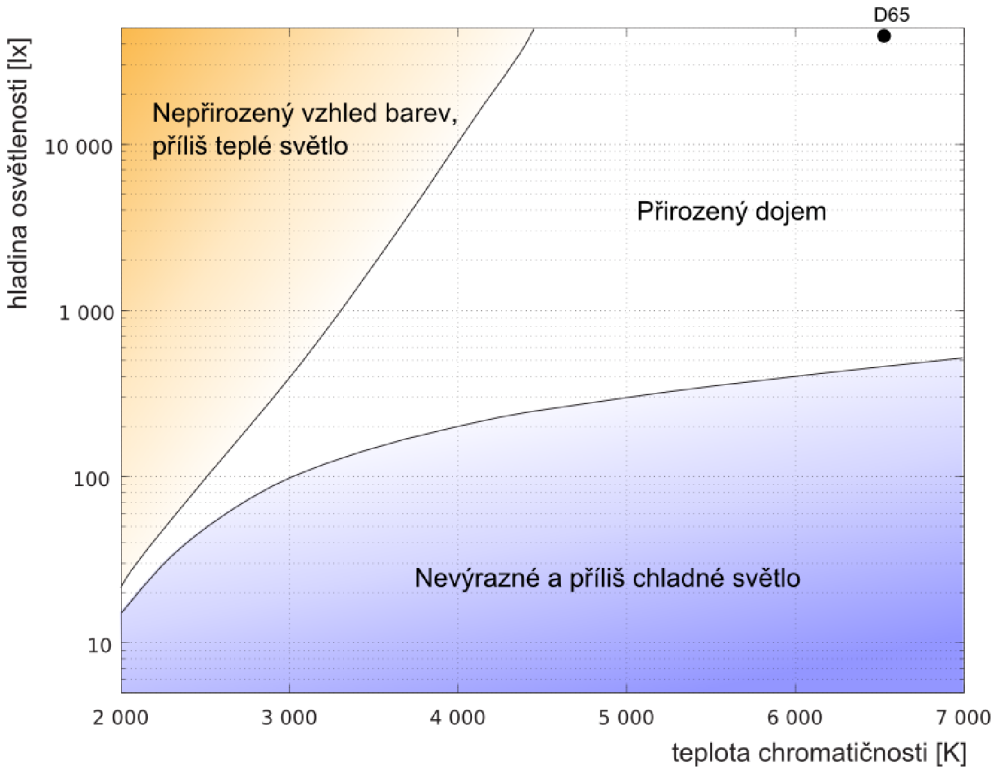
Obr. 2.2: Diagram chromatičnosti CIE 1976 s vyznačenými čarami konstantních teplot chromatičnosti (K) [37]

Podle náhradní teploty chromatičnosti u výbojových a luminiscenčních zdrojů je možné se setkat s dělením na teplou (do přibližně 3 750 K), neutrální (od asi 3 750 až 5 000 K) a studenou bílou (od 5 000 K výše). Dělení může být i jen na dvě skupiny studené a teplé bílé. Při tomto pojmenování se vychází z psychického vjemu daného odstínu světla. Důsledkem tohoto dělení můžou vzniknou nejasnosti v pochopení tohoto dělení a teplot chromatičnosti, které vyjadřují teplotu černého tělesa (například pro světlo s T_n = 3 000 K bude označení teplé, ale světlo s T_n = 6 500 K budeme označovat jako studené, ovšem černé těleso by mělo při druhé variantě vyšší teplotu). Na obr. 2.3 je znázorněna vazba mezi objektivním popisem pomocí teploty chromatičnosti a vjemem barevného tónu světla. [28] [4] [53]



Obr. 2.3: Orientační barevné znázornění teplot chromatičnosti [2]

Aby působil osvětlený prostor přirozeně a příjemně je potřeba volit teplotu chromatičnosti s ohledem na hladiny osvětlenosti. Závislost mezi těmito parametry je vysvětlována tzv. fylogenetickým přizpůsobením zraku přírodním podmínkám. To je dáno změnou podmínek v pohlcení a rozptylu slunečního světla v zemské atmosféře v průběhu dne a projevuje se teplejším a méně intenzivním denním světlem ráno a večer. Tuto skutečnost vystihuje tzv. Kruithoffův diagram na obr. 2.4. V něm jsou tři oblasti ve kterých světlo s danými parametry působí různým dojmem (jak je zřetelné ze samotného diagramu). Platnost tohoto diagramu se pokoušelo potvrdit mnoho výzkumů, ale zpravidla nebyly úspěšné. Pro většinu vnitřních prostorů není teplota chromatičnosti v současných normách povinně předepsaným parametrem. [28]



Obr. 2.4: Kruithoffův diagram [32]

2.3 Podání barev

Podání barev charakterizuje vliv spektrálního složení zdrojů světla na vjem barvy osvětlených předmětů. Při tom se srovnává vjem barvy ve světle zkoušeného světelného zdroje se světlem obvyklého či smluvního zdroje světla. Stupeň shodnosti vjemu barvy předmětů při osvětlení smluvním a zkoušeným světelným zdrojem při stanovených podmínkách pozorování se číselně hodnotí pomocí *indexu podání barev*. Během určování tohoto indexu se číselně vyjadřuje rozdíl mezi vjemem barvy vybraného souboru osmi, případně až čtrnácti barevných vzorků (tabulka 1) při postupném osvětlení zkoušeným a smluvním světelným zdrojem. Ze získaných hodnot se vypočítá *všeobecný index podání barev* R_a. Případně je možné pro podrobnější rozbor využít stanovení *speciálního indexu podání barev* R_1, R_2 atd., pro každý barevný vzorek zvlášť. [28]

Index podání barev R_a může nabývat hodnot od 0 po 100, kdy hodnota $R_a = 0$ znamená, že se barvy nerozlišují vůbec a naopak při hodnotě $R_a = 100$ se barvy vnímají nejvěrněji. Ve většině interiérů se vyžaduje $R_a > 80$ (podle ČSN EN 12464).

Hodnocení podání barev R_a používané v současnosti je založeno na předpokladu, že se teploty chromatičnosti světla zkoušeného a srovnávacího zdroje liší nejvýše o 5 MK^{-1}. To vede k nejednoznačnosti při určování teploty chromatičnosti srovnávacího světelného zdroje. Kromě toho se používají různé srovnávací zdroje při náhradní teplotě chromatičnosti pod 5 000 K a nad touto teplotou. To vede k problémům při určování R_a zejména u světelných zdrojů s křivkou spektrálního složení s prudkými změnami (výbojové zdroje, LED). Kromě

toho není žádný ze zkušebních barevných vzorků není vysoce saturován. Problém může nastat i při určování R_a pro světelné zdroje LED, které pro vytvoření bílého světla používají směs barev červené, zelené a modré. [1]

Tabulka 1: Barevné vzorky používané ke stanovení indexu podání barev [28] [37]

Označení vzorku	Orientační pojmenování podle barevného tónu		barva vzorku
	česky	anglicky	
TCS01	světle šedočervený	light grayish red	
TCS02	tmavě šedožlutý	dark grayish yellow	
TCS03	sytě žlutozelený	strong yellow green	
TCS04	středně žlutozelený	moderate yellowish green	
TCS05	světle modrozelený	light bluish green	
TCS06	světle modrý	light blue	
TCS07	světle fialový	light violet	
TCS08	světle červenopurpurový	light reddish purple	
TCS09	sytě červený	strong red	
TCS10	sytě žlutý	strong yellow	
TCS11	sytě zelený	strong green	
TCS12	sytě modrý	strong blue	
TCS13	světle žlutorůžová	light yellowish pink	
TCS14	středně olivově zelený	moderate olive green	

Proto se zkoumají různé metody, jak by šlo popsat barevné vlastnosti světelných zdrojů, zejména těch na polovodičové bázi. Různých metod je mnoho, ale zatím je stále nejpoužívanější i když v mnoha případech již zastaralý a ne zcela vhodný všeobecný index podání barev R_a. Někteří výrobci světelných zdrojů uvádějí (např. [36] [51]) kromě tohoto také speciální indexy podání barev, zejména R_9 (vzorek TCS09 – sytá červená, viz tabulka 1). Ale vzhledem k rychlému vývoji a neodpovídajícím hodnotám všeobecného indexu podání barev pro některé světelné zdroje je potřeba vymyslet nové metody hodnocení barevných vlastností světelných zdrojů. Popis několika návrhů hodnocení je možné najít například v [1].

Všeobecný index podání barev je možné u světelných zdrojů upravovat několika způsoby. Prvním je použití optického materiálu, na kterém se při odrazu nebo průchodu zvýší hodnota R_a při zachování co nejmenších ztrát. Druhou možností je kombinace různých barev světla s bílým zdrojem světla. Další možností je kombinace světelných zdrojů s rozdílnou teplotou chromatičnosti. [37]

3 Světelné zdroje

V kapitole jsou popsány některé světelné zdroje a jejich vlastnosti. Tyto informace mohou být zajímavé zvláště při konstrukci nových svítidel, zejména pro srovnání vlastností, které by měly být u nově navrhovaných pokud možno lepší. Umělý světelný zdroj lze podle světelně technického slovníku ČSN IEC 50(845) definovat, jako zdroj optického záření, zpravidla viditelného, zhotovený k tomuto účelu. [39]

V průběhu času lidé používali pro vytvoření zdroje světla mnoho různých principů. Mnohé z nich se zejména v rozvojových zemích dodnes využívají i když nejsou zcela vyhovující a jejich provoz je dražší. Větší rozvoj světelných zdrojů a svítidel nastal koncem 19. století a zvláště ve 20. století. Bezpečné a levné umělé osvětlení ve velké míře urychlilo vývoj zemí, které jej využívaly. Nadále se tedy využívají zdroje teplotní (spalovací-plamenné, tedy oheň, louče, svíčky, petrolejový a plynový plamen a vakuové a plynem plněné žárovky). Dnes se ve velké míře využívají světelné zdroje výbojové (nízkotlaké a vysokotlaké výbojky) a v poslední době se začínají prosazovat i světelné zdroje na polovodičové bázi (LED, OLED). [39]

Vývoj světelných zdrojů stále pokračuje a v některých oborech je pokrok velice rychlý. Na druhé straně mohou některé objevy vést k obnovení používání starších světelných zdrojů, například žárovky [40]. Velice důležitou vlastností světelných zdrojů je jejich bezpečnost. Všechny světelné zdroje ve větší či menší míře jsou zdroji tepla a tuto vlastnost je potřeba sledovat od návrhu až po konečnou instalaci a používání svítidla. [49]

3.1 Parametry světelných zdrojů

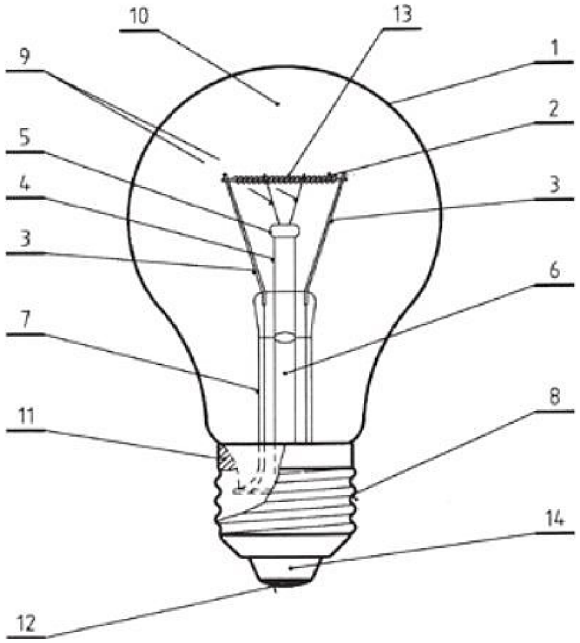
Popsat vlastnosti světelných zdrojů je možné pomocí mnoha parametrů. Mezi ty nejdůležitější technické parametry patří elektrické a světelně technické parametry, konstrukční provedení a život. Mezi elektrické parametry spadá příkon světelného zdroje, napájecí napětí, velikost a druh proudu (střídavý či stejnosměrný) a napětí na zdroji. Světelně technické parametry popisují zejména světelný tok, spektrální složení světla, jas, svítivost a její prostorové rozložení a jejich změny v průběhu života. Některé z nich byly popsány v kapitole 2. Ke konstrukčním parametrům náleží zejména vnější a připojovací rozměry, rozměry svítícího tělesa, hmotnost, typ patice a další. Život světelného zdroje je dán celkovou dobou, během které je světelný zdroj použitelný a splňuje stanovená kritéria.

Další skupinou jsou provozní parametry, mezi které patří účinnost, popřípadě měrný výkon, ekonomičnost a spolehlivost. Jedním z nejdůležitějších ukazatelů jakosti světelného zdroje je právě měrný výkon ($lm \cdot W^{-1}$), který je u mnoha skupin světelných zdrojů soustavně zlepšován. [28]

3.2 Obyčejné žárovky

Obyčejná žárovka je stále velice častým světelným zdrojem i přesto, že jejich prodej byl v mnoha místech světa zakázán. Jak již bylo uvedeno, tak žárovka je teplotní zdroj světla, kde se využívá inkandescenčního efektu. Při tom je vlákno žárovky aproximováno černým tělesem, kteréžto je zahřáto elektrickým proudem na poměrně vysokou teplotu. Při tom září podobně jako černé těleso s příslušnou teplotou. Vyzařované spektrum je spojité, což je společná vlastnost všech tepelných zdrojů světla. Žárovky ovšem mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světlo a to určuje jejich budoucnost. [33]

Konstrukce žárovky je jednoduchá (obr. 3.1), což je výhodné, jak při výrobě, tak i pro následnou likvidaci. Základem je wolframové vlákno vinuté v jednoduché nebo dvojité šroubovici. To je podle délky vlákna v několika místech fixováno a na konci je přichyceno k přívodům. Přívody jsou spojeny s vhodnou paticí pájením nebo svarem a patice je k baňce přitmelena speciálním tmelem. Skleněná baňka může mít různé úpravy od čiré, přes zabarvenou, zrcadlenou až po matnou. Uvnitř baňky je inertní plyn (argon, krypton s příměsí dusíku), který zpomaluje odpařování vlákna a umožňuje zvýšit teplotu vlákna, což zlepšuje účinnost. [18]



Obr. 3.1: Konstrukce žárovky [18]

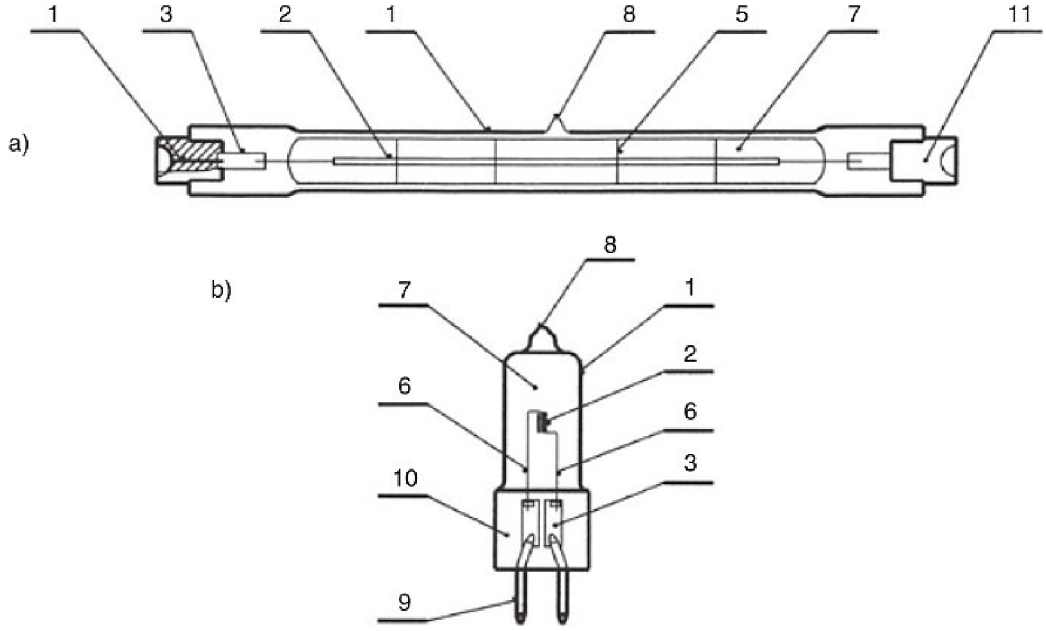
1 – baňka, 2 – wolframové vlákno, 3 – přívody, 4 – tyčinka, 5 – čočka, 6 – čerpací trubička, 7 – talířek, 8 – patice, 9 – háčky (podpěrky), 10 – plynná náplň, 11 – tmel, 12 – pájka, 13 – getr, 14 – izolace patice

Výhodou žárovek je jejich jednoduchost a z toho plynoucí nízká cena, relativně malé rozměry a hmotnost. Další z výhod je okamžitý start, provoz bez předřadných obvodů, stabilní svit bez blikání, ale zejména spojité spektrum a výborné podání barev (index podání barev R_a = 100). Nevýhodami jsou malá účinnost (energetická 7 až 10 %, při přepočtu na citlivost lidského oka pouze 1,5 až 4 %) nebo výrazná závislost parametrů žárovky na napájecím napětí. Jmenovitý život obyčejných žárovek je 1 000 h (u speciálních typů 2 500 a 5 000 h) a je ukončen typicky přerušením wolframového vlákna v nejtenčím místě (a tím i nejteplejším), které se během provozu odpařuje. [18] [28]

3.3 Halogenové žárovky

Halogenové žárovky jsou nástupcem běžných žárovek v oblasti tepelných světelných zdrojů. Jsou podobné žárovkám, ale jsou plněny plynem s příměsí halogenů nebo jejich sloučenin. Cílem těchto úprav je dosažení delšího života a to právě pomocí halogenů, které potlačují usazování wolframu na povrchu baňky a tím omezují pokles světelného toku během života žárovky.

Halogenové žárovky mají konstrukci oproti obyčejným žárovkám odlišnou (obr. 3.2). Jde zejména o potřebu větší tepelné odolnosti. Proto je baňka žárovky tvořena z křemenného skla, z tvrdého skla nebo skloviny typu „vycor“. Vlákno je také jednoduše nebo dvojitě vinuto a u lineárních žárovek je v několika místech fixováno. Náplň baňky je inertní plyn (krypton, xenon či směs těchto plynů), u žárovek na napětí vyšší než 12 V doplněných dusíkem, ve směsi se sloučeninou obsahující halogen (např. jodmethan CH_3I, methylen bromid CH_2Br_2 a další). Tlak náplně baňky je ve vypnutém stavu několik barů a při zapnutí se zvyšuje, což snižuje odpařování wolframového vlákna. [13]



Obr. 3.2: Konstrukce halogenové žárovky [13]

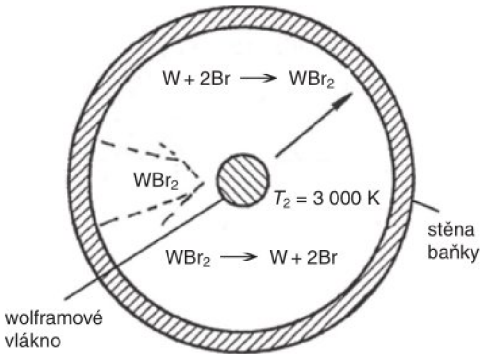
a) – dvoustisková žárovka, b) – jednostisková žárovka

1 – baňka, 2 – wolframové vlákno, 3 – molybdenová fólie, 4 – molybdenový přívod, 5 – podpěrka, 6 – konečky vlákna, 7 – plynná náplň, 8 – odpalek čerpací trubičky, 9 – kolík, 10 – stisk, 11 – keramická patice

Oproti obyčejným žárovkám se tedy wolfram odpařený z vlákna pomocí termochemických reakcí vrací zpět na vlákno. Na schématickém řezu lineární halogenovou žárovkou (obr. 3.3) je halogenový cyklus zjednodušeně zobrazen. Z vlákna se při teplotě kolem 3 000 K odpařuje wolfram, který se v blízkosti baňky při teplotě pod 1 700 K slučuje s halogenem (např. brom Br) na příslušný halogenid wolframu (WBr_2). Pak v důsledku gradientu koncentrace difunduje prostředím až k vláknu, kde se při teplotě vyšší než 1 700 K rozkládá zpět na wolfram a příslušný halogen. Uvedený cyklus je klíčový pro tento typ žárovek.

S obyčejnými žárovkami halogenové sdílejí většinu předností a v některých je předčí. Jde zejména o okamžitý start, spojité spektrum a vynikající podání barev. Oproti obyčejným žárovkám mají halogenové delší životnost, lepší účinnost, vyšší teplotu chromatičnosti 2900 až 3100 K (u speciálních typů dokonce i vyšší). Život halogenových žárovek je ukončen podobně jako u obyčejných žárovek přerušením wolframového vlákna v nejteplejším místě. Typická doba života je 2 000 h, ale lze se setkat i s dobou života 4 000 až 5 000 hodin

zejména u typů na malé napětí. Rozměry halogenových žárovek jsou ještě menší než u běžných žárovek. Mezi nevýhody patří stejně jako u obyčejných žárovek závislost parametrů na napájecím napětí a dále navíc vyšší cena. [13]

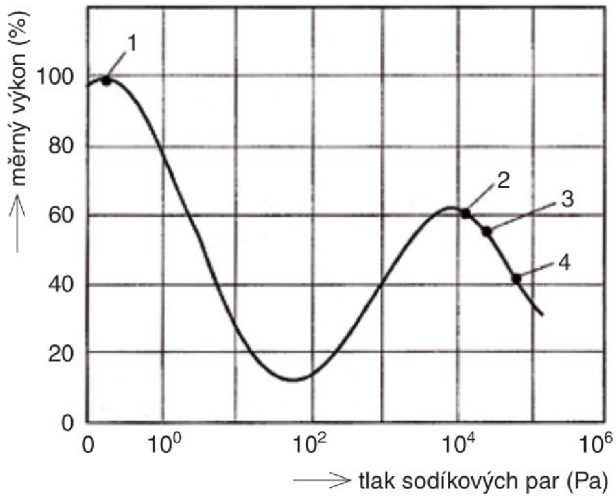


Obr. 3.3: Zjednodušené schéma halogenového cyklu [13]

3.4 Sodíkové výbojky

Sodíkové výbojky jsou jedny z velké skupiny výbojových zdrojů světla. Skupina sodíkových výbojek zahrnuje sodíkové výbojky nízkotlaké a vysokotlaké. U těchto výbojek je světlo vyzařováno zejména sodíkovými parami a výboj v nich je ze světelně technického pohledu velice zajímavý. Využití nízkotlakých sodíkových výbojek začalo ve třicátých letech minulého století. Vzhledem ke spektrální citlivosti lidského oka je výboj v sodíkových parách velice zajímavý (sodík má intenzivní rezonanční dublet ve žluté části spektra s vlnovými délkami 589,0 a 589,6 nm).

Provozní parciální tlak u nízkotlakých sodíkových výbojek je v rozsahu 0,1 až 1,5 Pa a u vysokotlakých 3 až 60 kPa. Obr. 3.4 ukazuje závislost měrného výkonu na tlaku sodíkových pak a z něj je vidět, že nízkotlaké sodíkové výbojky mají výbornou světelnou účinnost. Při zvětšování tlaku se spektrální čáry výrazně rozšiřují, díky čemuž je spektrum bohatší a vede to k lepšímu podání barev osvětlovaných předmětů. [17] [22]



Obr. 3.4: Závislost měrného výkonu na tlaku sodíkových par [22]

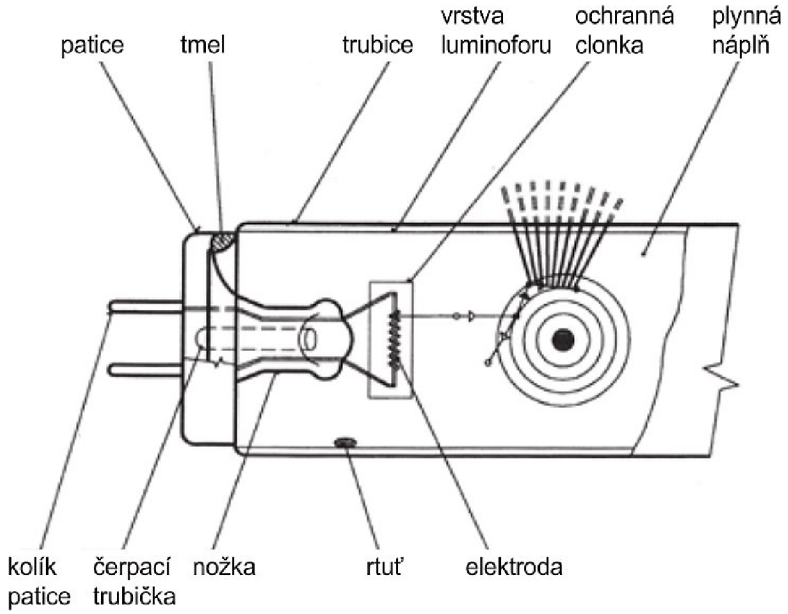
1 – nízkotlaké sodíkové výbojky $R_a \approx 0$, 2 – standardní vysokotlaké sodíkové výbojky $R_a \approx 25$, 3 – vysokotlaké sodíkové výbojky se zlepšeným podáním barev $R_a \approx 60$, 4 - vysokotlaké sodíkové výbojky s vynikajícím podáním barev $R_a > 85$

Doba života nízkotlakých sodíkových výbojek je až 20 tisíc hodin. Konec života tohoto druhu výbojek je dán ztrátou emisní schopnosti jedné z elektrod. U vysokotlakých sodíkových výbojek je doba života mezi 16 až 20 tisíci hodinami. Příznakem ukončení života je periodické blikání výbojky (pokud výbojky nejsou vůči tomuto vhodně ošetřeny). Je to dáno nárůstem napětí na výbojce, které, pokud je překročen určitý poměr k napájecímu, vede ke zhasnutí výboje. Poté výbojka vychladne a znovu se zapálí, čímž se zahájí cyklus znovu.

K výhodám sodíkových výbojek patří především dlouhý život a vysoký měrný výkon. Nízkotlaké sodíkové výbojky mají velký teplotní rozsah, ve kterém je účinnost nezávislá na teplotě, mají spolehlivý a rychlý zápal i při nízkých teplotách, který je možné rychle opakovat. U vysokotlakých sodíkových výbojek jsou dále výhodou menší rozměry, či zvládnutá technologie a z toho plynoucí nízké ceny. U nízkotlakých je několik nevýhod a mezi ty patří velmi špatné podání barev, pulzace světla z důvodu malé setrvačnosti nízkotlakého výboje, vyšší zápalné napětí, větší rozměry či náročnější sériová výroba. [17] [22]

3.5 Lineární a kompaktní zářivky

Další z výbojových zdrojů světla jsou zářivky, což je označení pro nízkotlaké rtuťové výbojky. Většina světla je u nich vyzařována z jedné nebo několika vrstev luminoforu, který je buzen ultrafialovým zářením výboje. Tvar těchto zářivek je rozmanitý, ale vždy to jsou trubice a ty jsou pak buď lineární nebo různě tvarované. Použití těchto světelných zdrojů se značně rozšířilo zejména kvůli pokrokům v používaných luminoforech a také v elektronické základně. Pokroky v elektrotechnice umožnily výrobu předřadníků, které optimalizují podmínky pro rtuťový výboj a také umožnily zejména zmenšení jejich rozměrů. Podle použitého luminoforu lze dosáhnout různého spektrálního složení, z čehož plyne možnost výroby zářivek s různou teplotou chromatičnosti či s různým všeobecným indexem podání barev R_a. [16] [15]

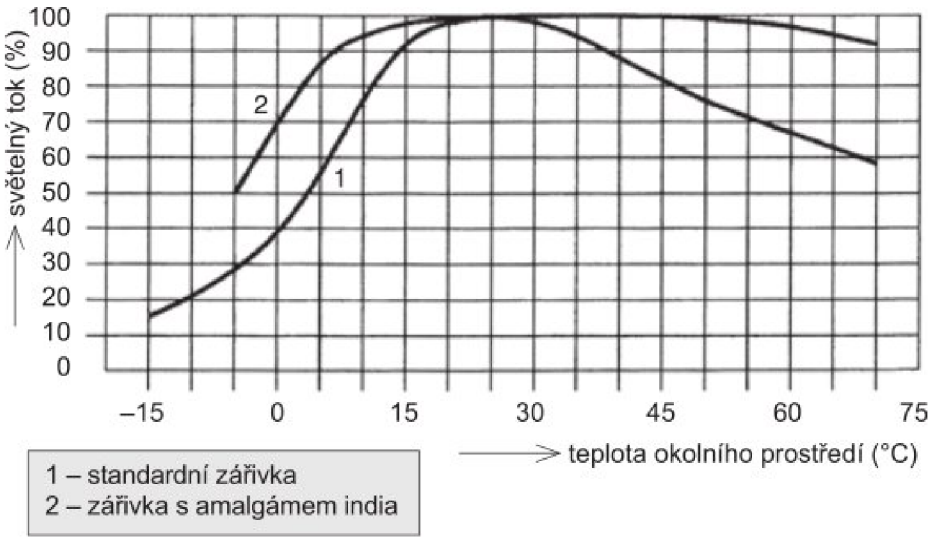


Obr. 3.5: Konstrukce lineární zářivky [16]

Základem zářivek (obr. 3.5) je trubice z měkkého skla, na jejíž vnitřní straně je jedna nebo více vrstev luminoforu. Trubice je buď lineární, tvarovaná nebo je složená ze vzájemně propojených trubic či šroubovice u kompaktních zářivek, čímž se dosahuje mnohem menších rozměrů a také to umožňuje použít jen jednu patici. Na koncích trubice je wolframová elektroda s emisní hmotou a okolo ní je ochranná clonka, která omezuje vypařování a usazování emisní hmoty na luminoforu. Plynná náplň je tvořena inertním plynem (argon nebo směr argonu a kryptonu) a nasycenými parami rtuti. Výboj pak probíhá při tlaku asi 0,8 Pa. Množství rtuti je po výrobě v přebytku kvůli její reakci s alkáliemi ve skle trubice. Pro další omezení množství rtuti je potřeba při výrobě dodržovat dobrou čistotou vstupních materiálů či použít ochrannou vrstvu mezi sklem a luminoforem. [16] [15]

V průběhu života rtuť ubývá a vzhledem k tomu, že současně vyráběné zářivky mají omezené množství rtuti pouze pro dosažení plánované životnosti může dojít k ukončení života z důvodu nedostatku rtuti. Pokud je rtuti málo, pak světlo vzniká především ve výboji inertního plynu, které je tmavě růžové. Další možností ukončení života je ztráta emisních schopností wolframové elektrody nebo její přerušení. Častým způsobem ukončení života je selhání elektronického předřadníku. V průběhu života klesá účinnost luminoforu a díky tomu dochází k poklesu světelného toku a těchto zdrojů a po jisté době nemusí být splněny požadavky na úrovně osvětlení v daných prostorech. [16] [25]

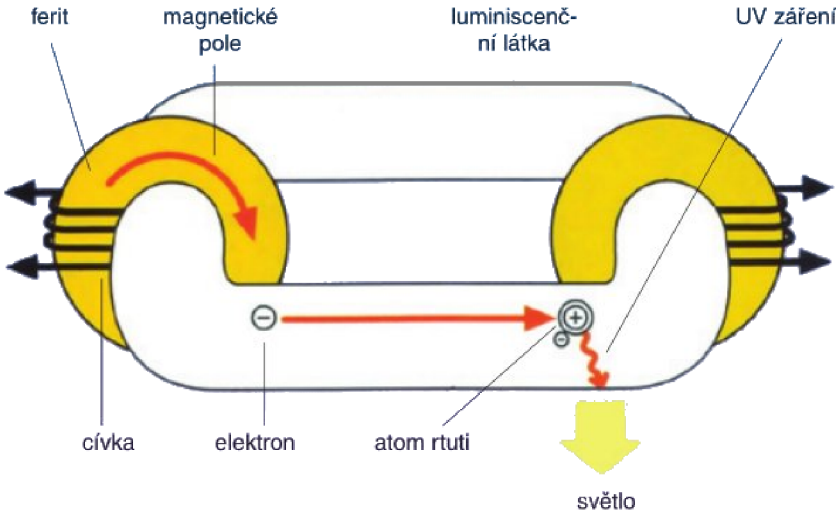
Mezi přednosti těchto zářivek patří vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světlo, dobrý index podání barev R_a, dlouhý život, nízká cena a zejména možnost vyrábět trubice různých tvarů. To umožňuje konstruovat rozličná svítidla či náhrady obyčejné žárovky. Vlastnosti jsou dále vylepšeny elektronickým předřadníkem, který omezuje stroboskopický jev, umožňuje rychlejší start a umožňuje zmenšit jejich rozměry. Mezi nevýhody patří závislost světelného toku na teplotě (obr. 3.6), obsah toxické rtuti či vliv počtu zapnutí na život zářivky. Kompaktní zářivky pak mají oproti lineárním poněkud horší účinnost přeměny elektrické energie na světlo a horší index podání barev. [16] [15]



Obr. 3.6: Závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí [16]

3.6 Indukční výbojky

Specifickou a poměrně novou kategorií výbojek jsou výbojky indukční. U těch je výboj buzen vnějším vysokofrekvenčním polem. Tyto výbojky mají podobnou konstrukci jako lineární či kompaktní zářivky, ale neobsahují elektrody. Výbojový prostor může mít i tvar uzavřeného závitu (obr. 3.7). Nahrazením elektrod vysokofrekvenčním buzením se dosahuje dalšího vylepšení oproti lineárním či kompaktním zářivkám a to zejména prodloužením životnosti a lepšího startu. Ovšem zatím je omezen výběr samotných výbojek a svítidel. Cena kompletu svítidla s výbojkou je vyšší než u jiných řešení. [14]



Obr. 3.7: Konstrukce indukční výbojky Endura [14]

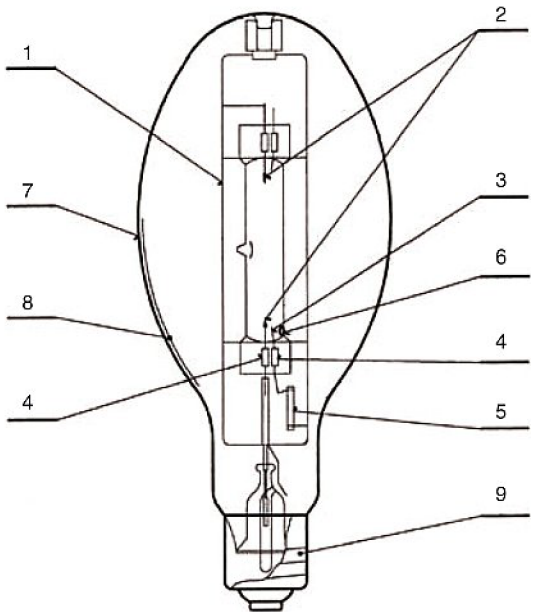
3.7 Vysokotlaké rtuťové výbojky

Velkou skupinu světelných zdrojů tvoří vysokotlaké rtuťové výbojky. Světlo v těchto výbojkách vzniká ve rtuťovém výboji při parciálním tlaku větším než 100 kPa. Tuto skupinu lze dále rozdělit na výbojky směsové a halogenidové.

Konstrukce vysokotlaké rtuťové výbojky je na obr. 3.8. Odlišné podmínky při výboji a zejména vyšší pracovní tlaky si vyžádaly použití odolnějších materiálů na konstrukci vlastní výbojové trubice – hořák. V prostoru hořáku je přesně stanovené množství rtuti spolu s argonem při tlaku asi 2,6 kPa. Po připojení napájecího napětí na výbojku vznikne nejdříve výboj mezi pomocnou a nejbližší hlavní elektrodou. Výboj je pak stabilizován odporem uvnitř vnější baňky. Pomocný výboj pak způsobí předběžnou ionizaci a usnadňuje rozvinutí výboje mezi hlavní elektrody. Není pak potřeba dalších zapalovacích zařízení. Vnější baňka slouží k ochraně vnitřních částí před oxidací a je naplněna směsí argonu a dusíku o tlaku asi 50 kPa. Na vnitřní straně baňky je nanesen luminofor, jenž ultrafialové světlo, kterého ve výboji vzniká většina, transformuje na světlo viditelné zejména v červené oblasti spektra. Směsové výbojky pak ještě v sérii s hořákem obsahují wolframové vlákno a to dále zlepšuje spektrum v červené oblasti. Vlákno plní funkci předřadníku, takže není potřeba používat tlumivku. [21]

Výhody těchto výbojek spočívají zejména v dlouhé životnosti, malém vlivu teploty na parametry výbojky, spolehlivém provozu i při nízkých teplotách či v nízké ceně. Výhody u směsových výbojek jsou dále doplněny o jednodušší provoz bez předřadníku a lepší index podání barev. Mezi nevýhody patří poměrně malá účinnost, poněkud horší index podání

barev, delší start, možnost výbojku znovu zapnout až po vychladnutí a zejména nutnost s nefunkčními výbojkami zacházet jako s nebezpečným odpadem kvůli obsažené rtuti. Jejich používání se z těchto důvodů omezuje. [21]



Obr. 3.8: Vysokotlaké rtuťové výbojky [21]

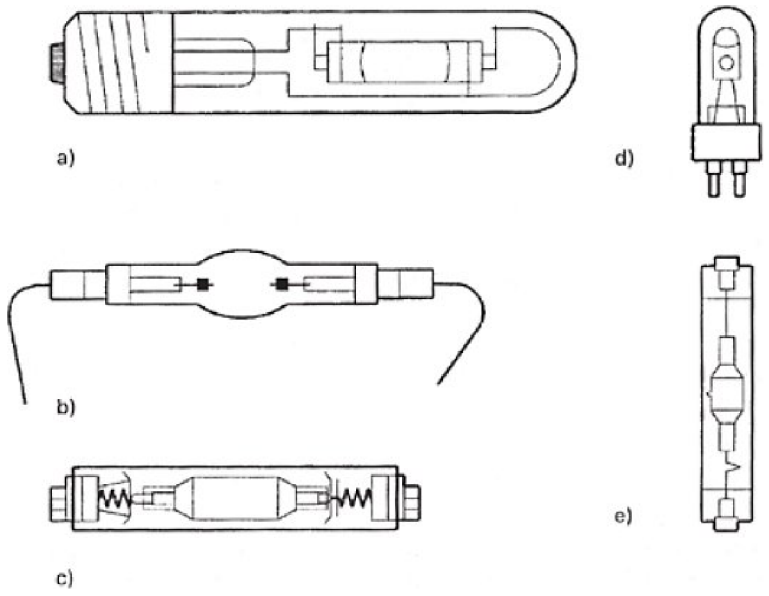
1 – nosný rámeček, 2 – hlavní elektrody, 3 – pomocná elektroda, 4 – molybdenová fólie, 5 – rezistor, 6 – rtuť, 7 – vnější baňka, 8 – vrstva luminoforu, 9 - patice

3.8 Halogenidové výbojky

Při hledání způsobů, jak zlepšit spektrum vysokotlakých rtuťových výbojek, byl objeven způsob, kdy se do rtuťového výboje přidaly některé další prvky, kteréžto spektrum vhodně rozšířily. Tím vznikly halogenidové výbojky, což jsou také vysokotlaké výbojky, ve kterých vzniká světlo zářením par kovů (např. rtuti) či plynů (např. xenonu) společně s produkty štěpení halogenidů. V těchto výbojkách jsou další prvky přítomny v podobě jednoduchých chemických sloučenin, z nichž se jako nejvhodnější jeví příslušné halogenidy. Světelné zdroje s těmito výbojkami jsou v dnešní době ve značné míře rozšířeny.

Konstrukce halogenidových výbojek je podobná výbojkám vysokotlakým rtuťovým (obr. 3.8 a obr. 3.9). Výboj v těchto výbojkách se zapaluje pomocí vnějšího zapalovacího zařízení napěťovým impulzem s amplitudou 1,8 až 5 kV. Tím se zapálí výboj v parách rtuti a inertního plynu nebo v xenonu. Poté začne růst teplota a s ní se zvyšuje koncentrace halogenidů ve výboji. Během 5 až 10 minut se teplotní režim ustálí. V oblasti osy hořáku po dosažení pracovní teploty se působením vysoké teploty halogenidy štěpí na atomy příslušného kovu, které se vybudí a září a atomy halogenu. Tak se vytvoří gradient koncentrace atomů od osy k okraji hořáku a ty pak difundují ke stěnám hořáku s nižší teplotou a tam se opět slučují na původní sloučeniny. Vlastní hořák může být vyroben ze speciálního druhu křemenného skla, nebo rozšířenějšího keramického oxidu hlinitého. [11] [12]

Mezi přednosti těchto výbojek patří možnost vyrobit výbojku s potřebným spektrem pomocí vhodného složení náplně hořáku, velký rozsah příkonů, dlouhý život, výborné podání barev a kompaktní rozměry. Mezi nevýhody patří větší náročnost výroby a z toho plynoucí i vyšší cena, citlivost parametrů na kolísání napájecího napětí či na poloze svícení. [11] [12]

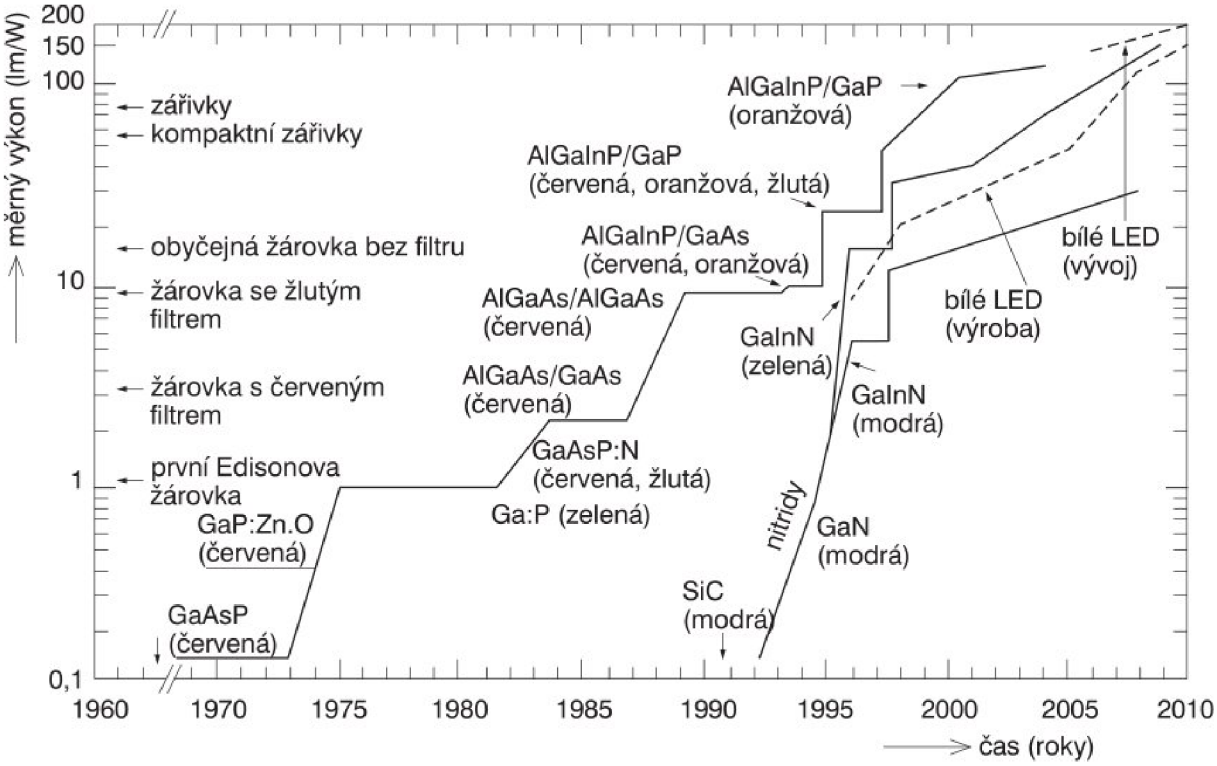


Obr. 3.9: Konstrukce základních typů halogenidových výbojek s křemenným hořákem [11]
a) s válcovou čirou vnější baňkou a paticí E40, b) dvoupaticová bez vnější baňky s krátkým obloukem, c) dvoupaticová s křemennou vnější baňkou a keramickou paticí Fc2, d) jednopaticová s kolíkovou paticí G12, e) dvoupaticová s křemennou vnější baňkou a keramickou paticí RX7s nebo RX7s-24

Halogenidové výbojky s keramickým hořákem dále vylepšují parametry oproti výbojkám s křemenným hořákem zejména v rozšíření rozsahu příkonů směrem k menším hodnotám (až ke 20 W), libovolné poloze svícení či umožňují další zmenšení rozměrů. [11] [12]

3.9 Světelné diody

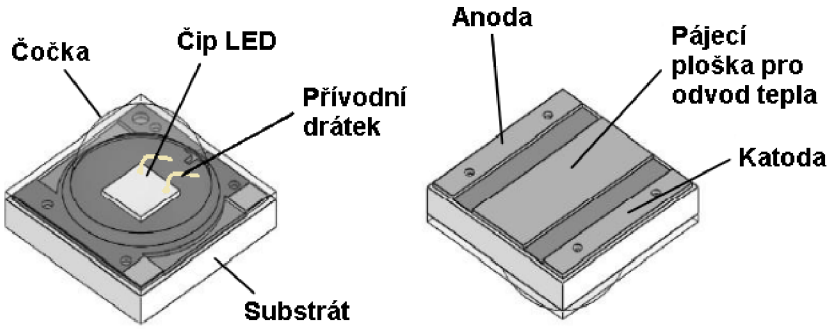
Světelná dioda, zkratka LED (z anglického Light Emitting Diode) nebo taky elektroluminiscenční dioda, je polovodičová součástka obsahující PN přechod. Tyto světelné zdroje jsou velice rychle se vyvíjejícím prvkem umělého osvětlení. Pokrok v oblasti je v posledních letech natolik rychlý, že je možné hovořit o morálním zastarávání starších světelných zdrojů používající LED (obr. 3.10). Díky tomu také od napsání semestrální práce, která předcházela této práci, došlo k překročení zajímavé hodnoty měrného výkonu 300 $lm \cdot W^{-1}$, což oznámila v březnu tohoto roku vedoucí firma v tomto oboru – Cree. Bylo dosaženo měrného výkonu 303 $lm \cdot W^{-1}$ při náhradní teplotě chromatičnosti 5 150 K a proudu 350 mA v laboratorních podmínkách [6]. Důležité je také rychlé uvádění nových poznatků do výroby. Od překročení hranice 200 $lm \cdot W^{-1}$ v laboratorních podmínkách [5] uplynuly téměř 3 roky do oznámení produkce LED dosahující takovéhoto měrného výkonu [7]. Takže lze v brzké době očekávat další pokroky v oblasti a díky tomu se tyto světelné zdroje začínají používat ve stále větší míře. [20] [19]



Obr. 3.10: Zvyšování měrného výkonu LED v průběhu času [19]

Světelné diody jsou konstruovány mnoha způsoby. Nízkovýkonové nebo indikační LED nepotřebují chlazení, proto je jejich konstrukce odlišná od výkonových LED, jež je potřeba i přes stále rostoucí účinnost chladit. Práce je tedy zaměřena zejména na výkonové LED a další popis je směřován právě k těmto LED.

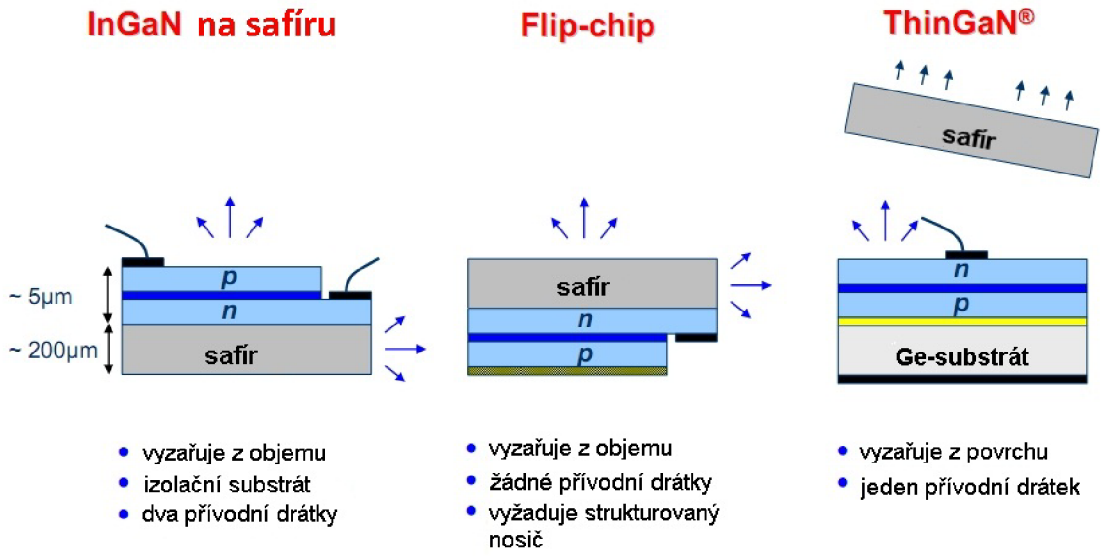
Konstrukce výkonových LED se dá rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou diody pro povrchovou montáž (obr. 3.11). Druhou skupinou jsou LED, které jsou určeny k přímé montáži na chladič (obr. 3.13). Obě skupiny se používají jak pro bílé, tak i barevné LED. Konstrukce LED pro povrchovou montáž se v poslední době spíše zjednodušuje a zmenšuje.



Obr. 3.11: Příklad konstrukce výkonové SMD LED [41]

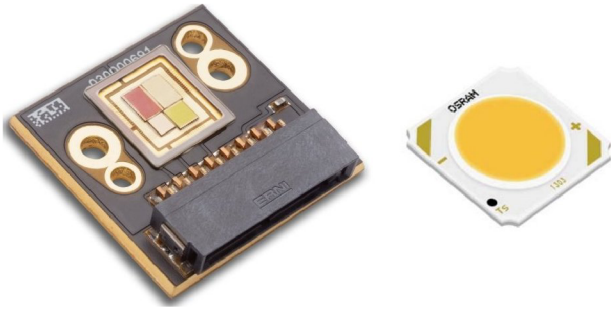
Jak je vidět na obr. 3.11, tak základem je substrát, který je většinou keramický či kovový. Na spodní straně substrátu jsou pájecí plošky společně s ploškou pro odvod tepla (ta může být nahrazena většími přívodními ploškami). Pájecí plošky jsou prokovy spojeny s horní stranou, kde je vytvořen jednoduchý plošný spoj, na němž je čip samotné LED. Způsoby montáže a kontaktování čipu jsou na obr. 3.12. Dnes se u výkonových LED nejčastěji používá poslední

způsob, kdy je přechod co nejblíže povrchu čipu. Pro kontaktování se používá buď pájení nebo vodivé lepidlo u flip-chip montáže čipu. V dalších případech se používá kontaktování bondováním, většinou zlatým drátkem. V případě, že se jedná o bílou LED, pak je na čip nanesen luminofor. Ten může být nanesen i po celé ploše substrátu nejen na ploše samotného čipu nebo rozptýlen v pouzdřícím materiálu. Vedle čipu vlastní LED je ještě ochranná struktura chránící LED před nadměrným závěrným napětím. Nakonec je celá struktura zapouzdřena, v současnosti nejčastěji silikonem pro optické účely. Tímto pouzdřením je častokrát vytvořena čočka, která usměrňuje vyzařování světla.

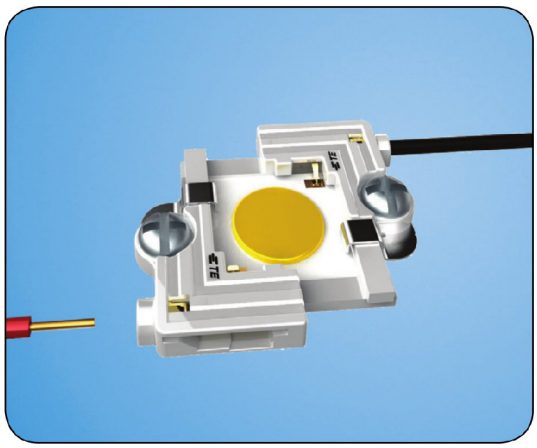


Obr. 3.12: Způsoby montáže a kontaktování čipu [34]

Výkonové LED, které jsou určeny k přímé montáži na chladič, mají oproti LED pro povrchovou montáž několik odlišností. U těchto světelných diod nejsou spodní pájecí plošky, ale místo nich mají LED buď konektor nebo plošky na horní straně (obr. 3.13). Ty můžou sloužit k připojení přívodů nebo je možné použít speciální objímky, které slouží, jak k elektrickému připojení, tak i k mechanickému uchycení celé LED k chladiči (obr. 3.14). Substrát je buď keramický nebo kovový. Absence dalších materiálů zlepšuje přenos tepla na chladič. U těchto světelných diod je v jednom pouzdře častokrát více čipů, které jsou vhodně spojeny pro dosažení potřebných parametrů. U bílých LED může být v silikonovém pouzdřícím materiálu rozptýlen luminofor.

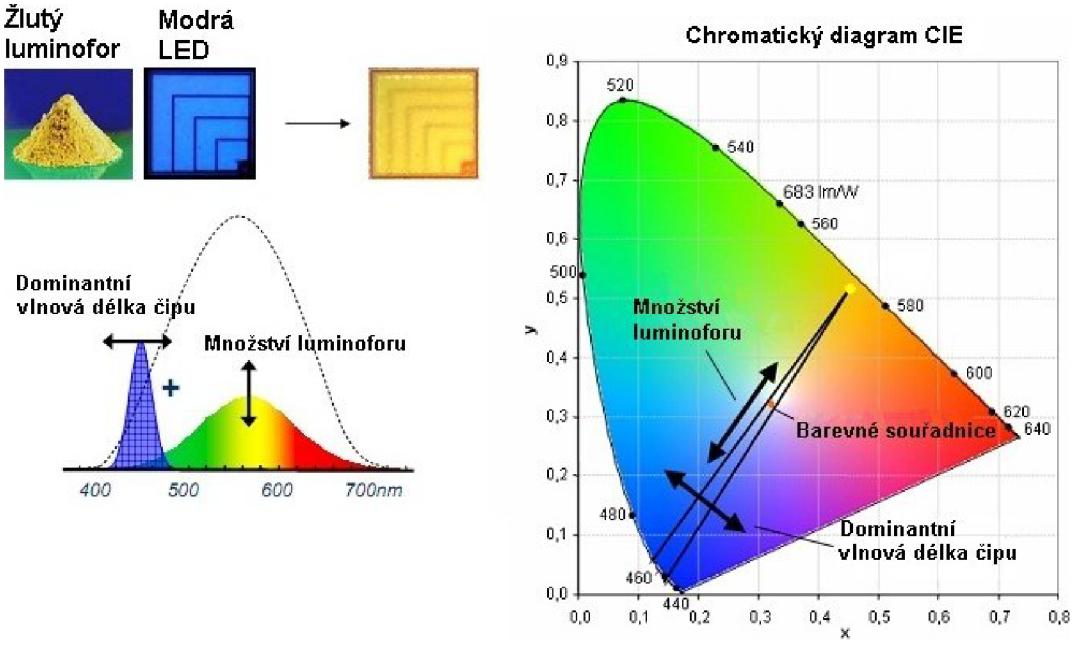


Obr. 3.13: Příklad výkonových LED k přímé montáži na chladič
vlevo CBM-380 (Luminus) [3], vpravo SOLERIQ® S 13 (OSRAM) [46]



Obr. 3.14: Objímka pro LED k přímé montáži na chladič [35]

Luminofor zásadním způsobem ovlivňuje světlo z bílých LED. Základem bílých LED je většinou modrá LED s luminoforem, který část světla převádí na žlutozelené. Tím se dosáhne bílé barvy. Obr. 3.15 ukazuje vliv množství luminoforu a dominantní vlnové délky modré světelné diody na výsledné spektrum. Složením a množstvím luminoforu je určena většina vlastností diody, jako všeobecný index podání barev R_a, náhradní teplota chromatičnosti T_n, ale i změna vlastností při různých teplotách, životnost a měrný výkon.



Obr. 3.15: Luminofor – vliv na výsledné světlo LED [34]

4 Provozní parametry LED

V této části je popis zaměřen na luminiscenční diody a jejich parametry. Diody LED mají mnoho odlišností od jiných světelných zdrojů. V prvé řadě je teplo v nich vznikající nežádoucí a je nutné jej odvést do okolí chlazením. To je znatelné zejména u LED s větším příkonem. Jejich provozní parametry jsou odlišné od jiných světelných zdrojů a to je nutné při návrhu světelných zdrojů s LED brát v potaz. U každé diody jsou pak specifikovány maximální parametry a těmi jsou zejména proud a teploty – provozní, skladovací a teplota přechodu, viz obr. 4.1.

Nejvyšší povolené hodnoty

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotka
Rozsah provozních teplot	T_{op}	-40 ... 110	°C
Rozsah skladovacích teplot	T_{stg}	-40 ... 110	°C
Nejvyšší teplota čipu	$T_{j, abs}$	150	°C
Teplota čipu	T_j	125	°C
Proud v propustném směru	I_F	-200 ... 1500	mA
Pulzní proud	I_{FM}	2000	mA
Proud v závěrném směru	I_R	200	mA
Maximální napětí ESD	V_{ESD}	8	kV

Obr. 4.1: Maximální parametry [42]

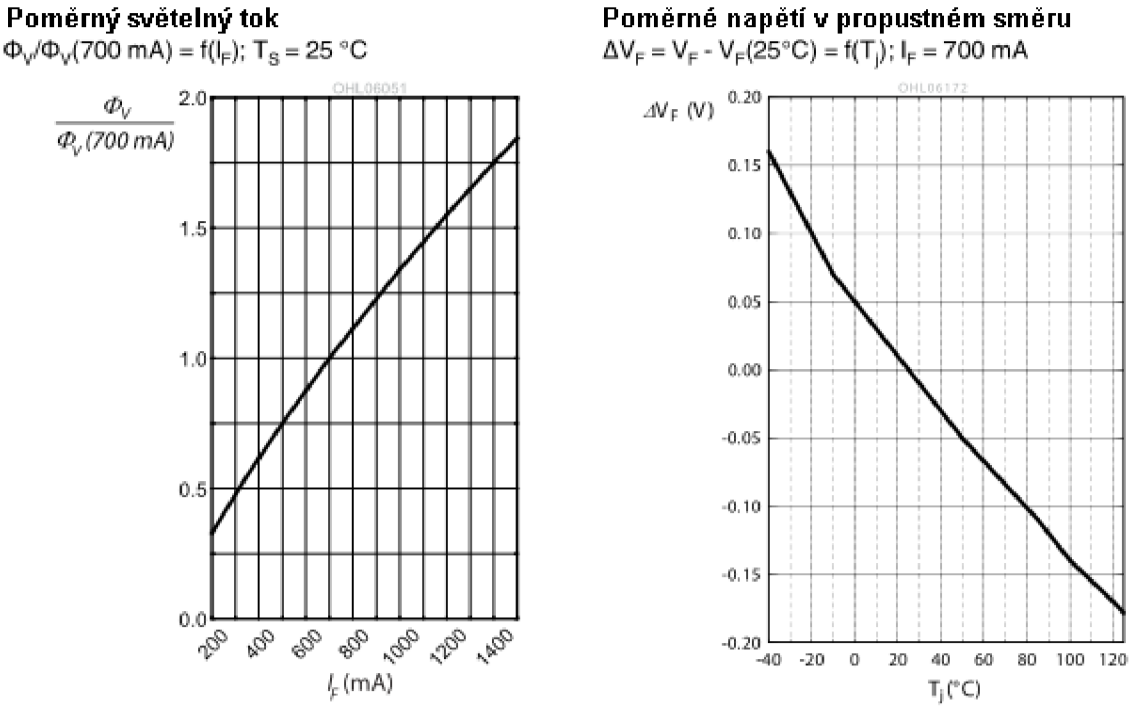
Mimo tyto parametry jsou pak v katalogových listech nebo doplňujících materiálech údaje o rozdělení LED do skupin při stanoveném proudu a teplotě podle světelných toků, náhradní teplotě chromatičnosti, podle všeobecného indexu podání barev či podle dalších parametrů (uvedené parametry platí zejména pro bílé LED, pro barevné je možno nalézt dělení do skupin podle zářivého výkonu, či například podle dominantní vlnové délky).

Dále jsou uvedeny charakteristické parametry při stanoveném proudu a teplotě (někteří výrobci uvádějí při 25 °C, nověji je možné se setkat s teplotou 85 °C, což lépe odpovídá reálnému provozu), pro napětí v propustném směru, vyzařovací úhel, tepelný odpor mezi přechodem a pájecí ploškou (či jinou definovanou plochou). U vícečipových LED se může uvádět místo tepelného odporu, závislost maximálního proudu na teplotě pouzdra.

4.1 Napájení LED

První a nejvíce viditelná odlišnost od jiných světelných zdrojů, je napájení LED pomocí zdroje konstantního proudu. To je potřeba z několika důvodů. V první řadě to je kvůli světelným parametrům LED. Ty se udávají v závislosti na procházejícím proudu. Změnou protékajícího proudu světelnou diodou se mění zejména její světelný tok a to nelineárně. S rostoucím proudem světelný tok roste pomaleji než by odpovídalo narůstajícímu proudu (viz obr. 4.2 vlevo). Proto je také u každé LED stanoven nejvyšší proud, který může diodou protékat, někdy se uvádí i špičkový proud. Další z parametrů, který se mění změnou protékaného proudu, je dominantní vlnová délka u barevných LED. U bílé světelné diody se

tímto mění dominantní vlnová délka modré LED a vlivem toho i náhradní teplota chromatičnosti a další parametry a v důsledku toho i celé spektrum. Výrobci změny těchto parametrů udávají v katalogových listech.



Obr. 4.2: Závislost parametrů na pracovních podmínkách [42]
vlevo – závislost poměrného světelného toku na proudu LED
vpravo – závislost změny napětí v propustném směru na teplotě

Dalším z parametrů, který závisí na proudu je vznikající teplo. Z voltampérové charakteristiky lze zjistit příkon do LED při vybraném proudu. Při napájení výkonových LED zdrojem napětí, by mohl nastat nekontrolovatelný vzestup teploty světelné diody (z angličtiny thermal runaway). To je dáno tím, že při oteplení diody na ní poklesne napětí v propustném směru (viz obr. 4.2 vpravo). A v případě zdroje konstantního napětí by místo poklesu napětí vzrostl proud. Výsledkem by pak bylo zničení LED nadměrným proudem anebo teplotou.

Konkrétní zapojení pro napájení LED se volí podle dané aplikace a potřeb. Dnes je již mnoho obvodů integrovaných a konstrukce napájecího zdroje se tak zjednodušuje. Při volbě zapojení se v prvé řadě vybírá podle proudu diodami LED a podle napěťových poměrů v obvodu. Během návrhu napájecí elektroniky se sleduje několik oblastí:

- požadovaný proud LED
- závislost mezi napětím na diodách LED a napájecím napětím
- cena
- stmívání a způsob stmívání
- celkové rozměry
- účinnost, spotřeba ve vypnutém stavu
- vyhodnocování teploty a funkce LED
- typ a počet LED v sérii (řetězci) počet takovýchto řetězců
- potřeba a způsob komunikace s nadřazeným systémem

Podle velikosti výstupního proudu mnoho výrobců dělí obvody do několika skupin pro jednodušší orientaci na nízkovýkonové/indikační obvody a výkonové obvody (ty se můžou dále dělit například na obvody pro podsvícení displejů, automobilové osvětlení, všeobecné osvětlování či obvody pro blesky fotoaparátů). Další dělení pak může být podle závislosti mezi napětím na diodách LED a napájecím napětím. Podle toho se pak navrhuje elektronika. V případě, že napájecích napětí je větší než napětí na LED, pak se používá snižovací měnič (anglicky Buck, Step-down) nebo lineární regulátor. Ten je spíše vhodný pro obvody s menšími proudy. Pokud je napětí LED podobné s napájením napětím, tak se používají měniče, které napětí umí zvýšit i snížit (anglicky Buck-Boost, SEPIC, Flyback). A v poslední řadě může být napětí na světelných diodách větší než napájecí napětí a v tom případě se použije zvyšovací měnič (anglicky Boost, Step-up). Podle použitého akumulačního prvku se pak rozlišují měniče s kondenzátorem nebo s cívkou.

Stmívání je možné řešit v zásadě dvěma způsoby. Prvním je stmívání pomocí změny hodnoty proudu LED. Výhodou tohoto způsobu je lepší účinnost (měrný výkon) LED při nižším proudu (závislost světelného toku na proudu je nelineární, viz obr. 4.2 vlevo) a také to, že dioda nebliká. Nevýhodou je změna některých parametrů světelné diody, zejména náhradní teploty chromatičnosti. Druhým způsobem stmívání je pulzně-šířková modulace. Princip metody je založen na stmívání pomocí proměnné šířky pulzu proudu do LED. Střední hodnota pak udává světelný tok. U této metody proud diodou dosahuje dvou hodnotu a tedy buď diodou neteče žádný proud nebo teče nastavený proud, který je regulován, čímž se dosahuje omezení změn parametrů světelné diody a tedy zejména náhradní teploty chromatičnosti. Nevýhodou je, že LED bliká. To většinou není vzhledem k setrvačnosti oka postřehnutelné, ale v případě pohyblivých aplikací může být blikání znatelné. Další nevýhodou je menší účinnost LED než při napájení konstantním proudem, který má stejnou hodnotu, jako střední hodnota proudu při regulaci pomocí pulzně-šířkové modulace (což je pochopitelné z obr. 4.2 vlevo).

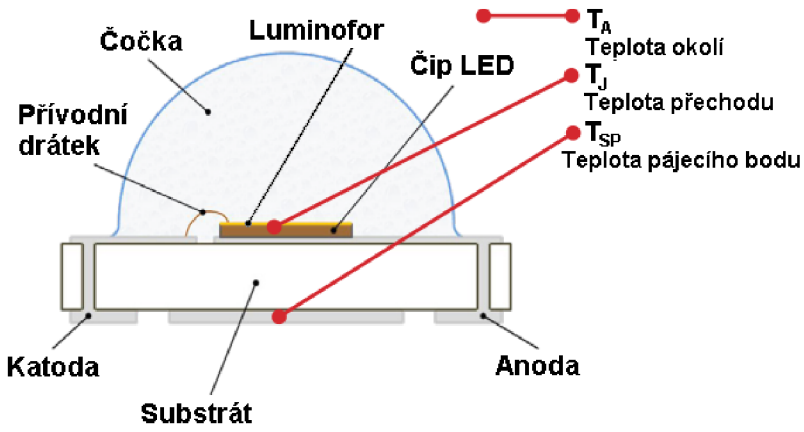
4.2 Chlazení

Další z odlišností od většiny světelných zdrojů je potřeba odvádět vznikající teplo. Podobně jako u jiných polovodičů, je vznikající teplo nežádoucí, tak i ve světelných diodách a zvláště výkonových, vzniká teplo, které je nutné odvádět. Správný odvod tepla pak zajišťuje dobrou účinnost LED (s rostoucí teplotou světelný tok a tím i účinnost, potažmo měrný výkon klesá) a zejména zajišťuje dobrou životnost samotné diody.

Jak již bylo uvedeno, tak výkonové diody LED jsou určeny buď k přímé montáži na chladič nebo k připájení na desku plošných spojů. Oba způsoby musí zajistit dobrý odvod tepla na chladič. Jako desky plošných spojů je možné použít buď prokovené desky ze skloepoxidového laminátu. Častěji se používají desky s kovovým základem, nejčastěji ze slitin hliníku a v poslední době se používají i desky s měděným základem. Způsob montáže připájené LED na chladič je pak podobná jako u jiných elektronických součástek, tedy například přišroubováním k chladiči či lepením teplovodivým lepidlem.

Během konstrukce svítidla se světelnými diodami se postupuje podobně, jako u jiných návrhů chlazení součástek v elektrotechnice. Zjistí se pracovní podmínky svítidla, zejména teplota okolí, ztrátový výkon svítivých diod a přípustná teplota pouzdra nebo čipu LED (obr. 4.3). Poté se sestaví tepelné schéma, kam se dosadí zvláště tepelný odpor LED a další tepelné odpory, podle dané situace. Výsledkem je pak nejvyšší tepelný odpor chladiče. V případě, že

chladič s danými parametry není vhodný, například kvůli estetické stránce plynoucí z větších rozměrů, pak je potřeba návrh upravit. Úpravy je vhodné provádět v oblasti světelných diod a to buď zvýšením uvažované teploty LED nebo lépe zmenšením jejich proudu a použitím více kusů. Menším proudem přes diody se dosáhne jejich lepší účinnosti, díky čemuž pak vzniká méně tepla a také je vznikající teplo lépe rozloženo. [8]



Obr. 4.3: Řez výkonovou LED [8]

Během návrhu se většinou neuvažuje účinnost LED a předpokládá se, že všechna energie se mění na teplo. To ve výsledku znamená, že teploty budou o něco menší a společně s tímto bude lepší, jak měrný výkon samotné diody, tak i její životnost. Kvůli pokrokům v oblasti výroby samotných světelných diod je ztrátový výkon pro daný světelný tok stále menší, což umožňuje používat menší chladiče nebo dosahovat větších výkonů. Zajímavé srovnání účinnosti a ztrátového tepla pro náhradu obyčejné 100 W žárovky (1 700 lm) je na [30].

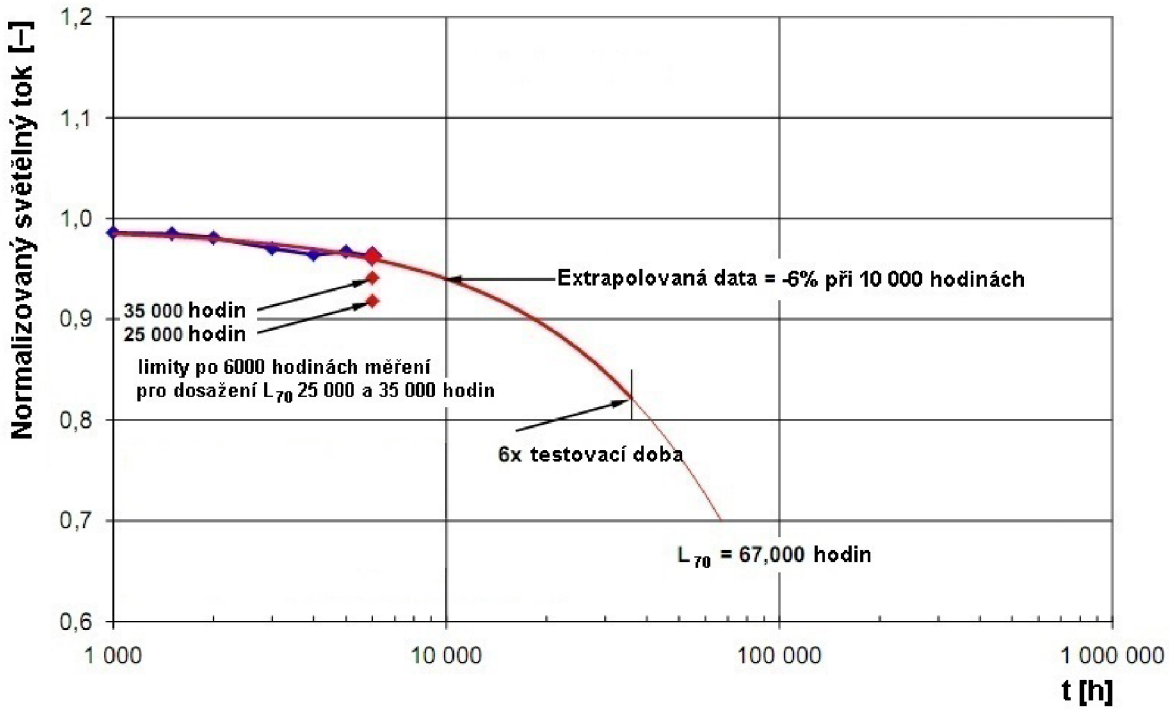
4.3 Životnost LED

Pracovní podmínky a zejména teplota ovlivňuje životnost LED. Výkonové diody LED na rozdíl on jiných světelných zdrojů většinou neselžou úplně, tedy že přestanou svítit, ale v průběhu používání jejich světelný výkon klesá. Uvedený pokles je velice pomalý a zkoušení životnosti může trvat dlouhou dobu.

Výrobci světelných diod pro měření životnosti používají metodu popsanou v dokumentu LM-80. Tu vydala společnost Illuminating Engineering Society of North America (IES nebo také IESNA). Problematika měření je v uvedeném dokumentu popsána a základem je měření světelných parametrů na sadách několika diod svítících při různých teplotách v definovaných intervalech po dobu nejméně 6 000 hodin.

Důležitým údajem při měření životnosti LED i obecně světelných zdrojů, je takzvaný zůstatek světelného toku nebo jinak také činitel stárnutí světelného zdroje (anglicky lumen maintenance). Ten udává zůstatek světelného toku oproti hodnotě ze začátku měření. S touto hodnotou je vázána doba za kterou ji dosáhne. Výsledkem pak je jmenovitá hodnota života do zůstatku světelného toku (anglicky rated lumen maintenance life), což je doba během které má světelný zdroj světelný tok větší, než je stanovený zůstatek. Uvedená hodnota se značí L_P, kde p značí stanovený zůstatek světelného toku v procentech původní hodnoty. Pak se lze setkat například s označením L_{70}., které označuje dobu trvalého svitu, během které je světelný tok právě 70% z původního. Právě tato hodnota se častokrát používá při návrhu osvětlení, pro stanovení doby života.

Světelné diody mají natolik pomalý pokles světelného toku v průběhu času, že je doba dosažení L_{70} velice dlouhá. Proto IES vydalo dokument TM-21 ve kterém popisuje, jakým způsobem změřená data vyhodnotit a zejména extrapolovat do delšího časového měřítka. Ty se ze změřených hodnot dopočítají do stanoveného zůstatku světelného toku. Doba života se pak určuje ze změřených nebo extrapolovaných hodnot podle toho, kde dosáhnou zvoleného limitu světelného toku. Někteří výrobci doporučují uvažovat extrapolaci doby života nejvýše do šestinásobku doby měření [50] (obr. 4.4).



Obr. 4.4: Příklad změřených hodnot světelného toku v průběhu času [50]

Životnost LED tedy ovlivňuje jak proud, tak zejména teplota diody a jejich částí. Hlavní části, které u světelných diod podléhají stárnutí jsou materiál pouzdření pro čočku, samotný čip LED a luminofor (viz obr. 4.3). Každá z těchto částí pak různým způsobem a různou rychlostí stárne. Příkladem může být pouzdřící materiál, který slouží i jako čočka směrující světlo. Ten je většinou nějakou variací silikonu (v průmyslu LED to jsou siloxany). Podle daného složení silikonu je různě citlivý na provozní teplotu. Působením vyšších teplot se může použitému materiálu zhoršit propustnost pro světlo a ve výsledku poklesne výstupní světelný tok. Stejně tak energie fotonů ze samotného čipu může poškodit pouzdřící materiál. Podobných vlivů lze nalézt celou řadu a mnohokrát záleží na dané výrobní technologii, použitých materiálech a pracovních podmínkách. [8]

5 Návrh řešení

V kapitole je uvedeno řešení zadaného problému práce. Při navrhování vhodného řešení bylo zkoumáno vícero možností, ze kterých vyplynuly poznatky, které jsou rozepsány v následujících podkapitolách. Je uvedeno uvažované zapojení do systému, výběr diod LED, volba rozsahu regulace a návrh řídící a napájecí části.

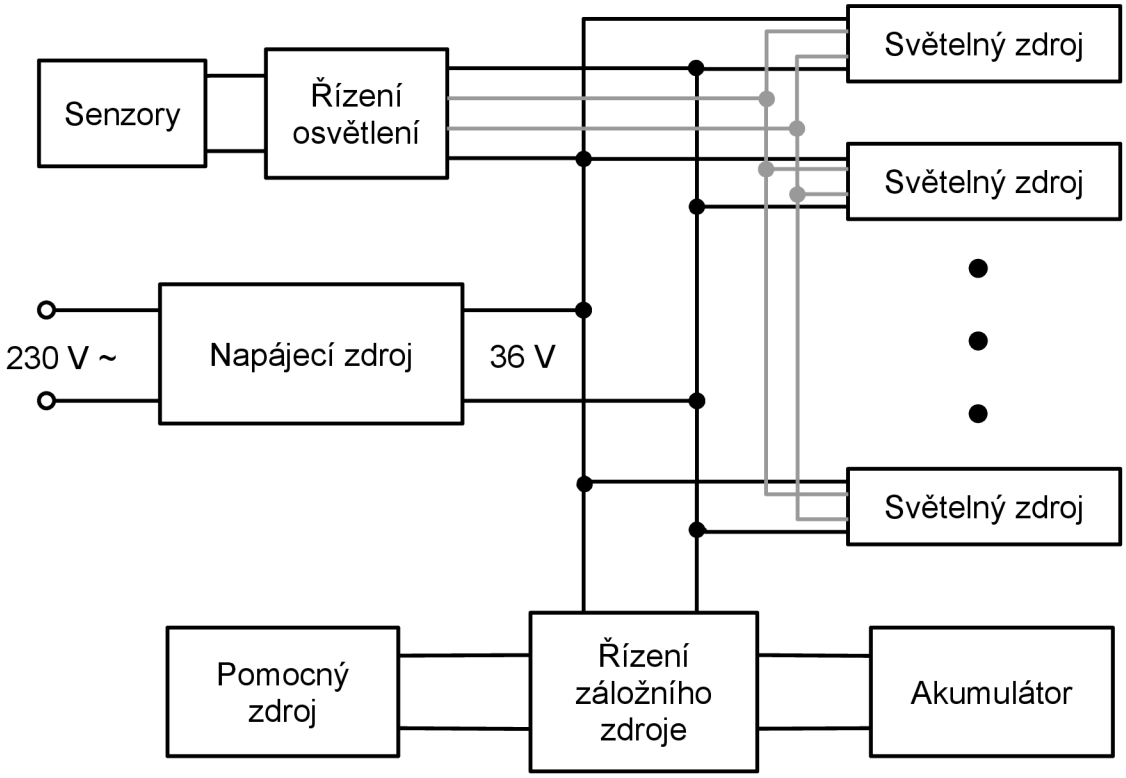
Uvedené řešení není jediné, které lze použít při návrhu osvětlení s proměnnou teplotou chromatičnosti a tím i spektrální charakteristikou a proměnným jasem, ale jedno z jednodušších. To lze pak relativně jednoduchým způsobem převést do praxe a tedy i do výsledné výroby. Při návrhu řešení bylo snahou dosažení co nejlepšího indexu podání barev. Vytvořený modul je tak vhodný pro osvětlování vnitřních prostorů, kde jsou zvětšené požadavky na všeobecný index podání barev $R_a > 90$. Je možné jej tedy použít i pro náročnější činnosti, které vyžadují dobrou věrnost rozlišování barev. [28]

Navrhované parametry:

- světelný tok 1 066 lm až 1 080 lm (viz kapitola 5.2)
- všeobecný index podání barev nejméně $R_a = 90$
- regulace náhradní teploty chromatičnosti od $T_n = 3\,000$ K po $T_n = 4\,500$ K
- napájecí napětí v rozsahu 20 až 38 V (maximálně 40 V)

5.1 Koncept napájení

Při rozboru možných variant napájení diod LED v souvislosti s kapitolou 4.1, bylo uvažováno využití vytvořeného světelného zdroje jako součásti většího celku, například při osvětlování místností či celých domů. To vede společně s dalšími požadavky na možnosti nastavení osvětlení k řízeným soustavám osvětlení. U takových řešení je pak možné využívat různé



Obr. 5.1: Koncept napájení a řízení osvětlení

možnosti automatizace, vzdálené správy a dalších stále se rozvíjejících možností. Součástí jsou pak i různé senzory, které měří osvětlenost a případně i další parametry a řídí je podle nastavených požadavků. Příklad řešení je na obr. 5.1.

Pro mnohem lepší měrný výkon moderních světelných zdrojů, je možné použít pro jejich napájení i mnohem menší napětí než je běžné a dokonce je možné využít i malé napětí. To vede k dalším možnostem, kdy je napájecí napětí soustavy osvětlení nejen bezpečné, ale umožňuje i jednoduché připojení dalších součástí. Na obr. 5.1 je pak k napájení osvětlovací soustavy připojen záložní zdroj, který může být dobíjen například fotovoltaickými panely. Vzhledem k možnosti nastavení teploty chromatičnosti, by pak v soustavě senzorů měly být i čidla detekující venkovní teplotu chromatičnosti a v případě míchání přirozeného a umělého světla by mělo být umělé světlo nastavováno tak, aby byly dosaženy potřebné hodnoty osvětlenosti a také, aby byly teploty chromatičnosti přirozeného a umělého osvětlení stejné.

5.2 Diody LED

Proměnnou teplotu chromatičnosti je možné získat kombinací světla ze dvou zdrojů s různou teplotou chromatičnosti, což je v použito i v této práci. Díky tomu je zajištěna relativně jednoduchá změna teploty chromatičnosti. Měřením je potřeba zajistit shodu mezi navrhovanými a skutečnými parametry.

Pro dosažení dobrého indexu podání barev R_a v celém rozsahu náhradní teploty chromatičnosti byly vybrány diody skupiny OSLON Square® od výrobce Osram, typ LCW CQAR.CC. U těch výrobce udává minimální hodnotu $R_a = 90$ a typickou $R_a = 96$ pro diody s T_n v rozsahu od 2 700 do 4 500 K [42]. Měrný výkon je u LED s menší T_n horší, proto byly vybrány diody s $T_n = 3\ 000$ K a $T_n = 4\ 500$ K. Těmito hodnotami je pak dán možný rozsah náhradních teplot chromatičnosti (viz kapitola 5.4).

Světelný tok je navrhován přibližně 1 000 lm, což podle [24] nahrazuje všesměrovou žárovku o příkonu 60 W a počáteční světelný tok má být nejméně 800 lm. Pro náhradu všesměrové žárovky o příkonu 75 W je potřeba počáteční světelný tok nejméně 1 100 lm. Kvůli rozdílnému měrnému výkonu teplých a neutrálních (potažmo i studených) odstínů LED je použito pět diod s $T_n = 3\ 000$ K s navrhovaným světelným tokem 1 066 lm (5.1) a čtyři diody s $T_n = 4\ 500$ K s navrhovaným světelným tokem 1 080 lm (5.2).

$$\Phi_T = \Phi_{1T} \cdot \frac{\Phi_{1T}(0{,}97\,A)}{\Phi_{1T}(0{,}70\,A)} \cdot n_T = 164 \cdot 1{,}3 \cdot 5 = 1\,066\,lm \tag{5.1}$$

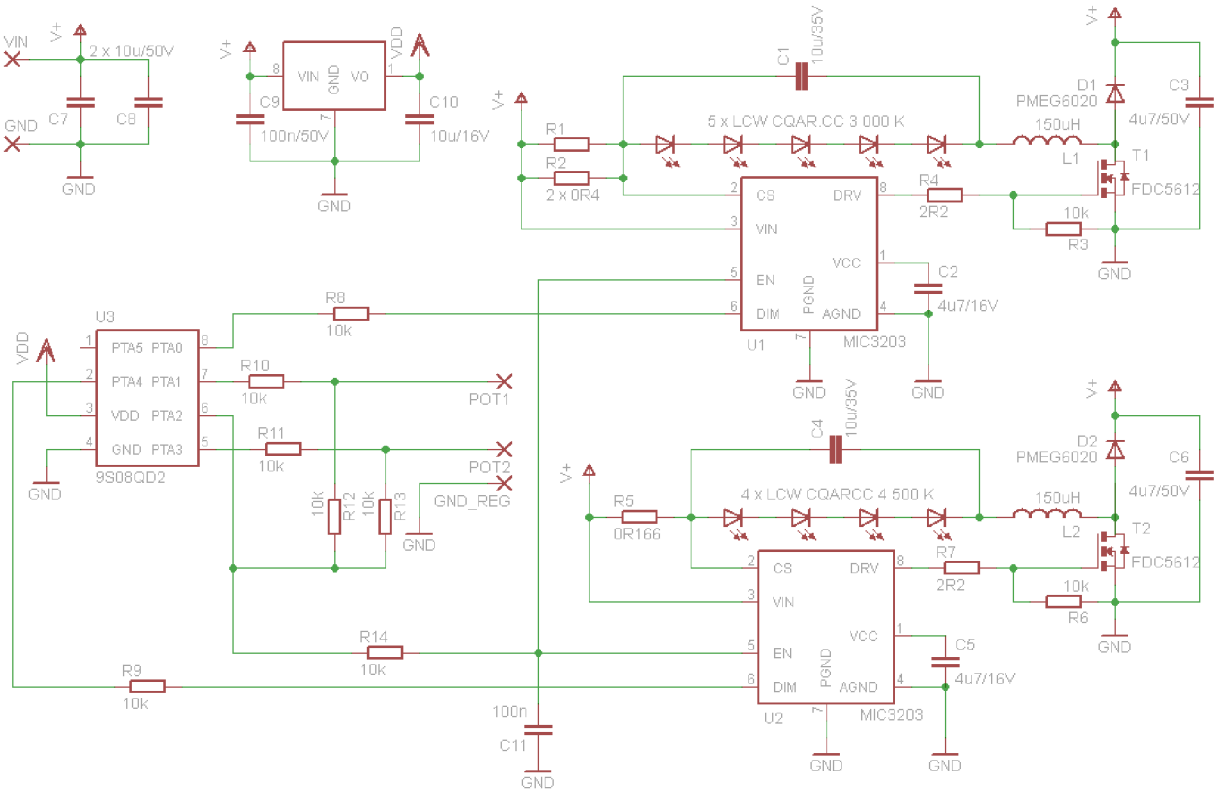
$$\Phi_N = \Phi_{1N} \cdot \frac{\Phi_{1N}(1{,}17\,A)}{\Phi_{1N}(0{,}70\,A)} \cdot n_N = 180 \cdot 1{,}5 \cdot 4 = 1\,080\,lm \tag{5.2}$$

kde Φ_T, Φ_N je celkový světelný tok LED s teplým resp. neutrálním odstínem [lm]
Φ_{1T}, Φ_{1N} světelný tok jedné LED s teplým resp. neutrálním odstínem [42] [lm]
$\frac{\Phi_{1T}(0{,}97\,A)}{\Phi_{1T}(0{,}70\,A)}, \frac{\Phi_{1N}(1{,}17\,A)}{\Phi_{1N}(0{,}70\,A)}$ poměrný světelný tok při zvoleném a referenčním proudu LED s teplým resp. neutrálním odstínem [42] [–]
a n_T, n_N je počet LED s teplým resp. neutrálním odstínem [–]

5.3 Napájecí a řídící část

Pro napájení diod LED byly vybrány obvody MIC3203 (U1, resp. U2) firmy Micrel, zvláště pro jednoduchost zapojení a možnost použití tranzistorů MOS-FET s indukovaným kanálem typu N [38]. Tyto obvody tvoří, spolu s ostatními součástkami (R1 až R4, C1 až C3, L1, T1, D1, resp. R5 až R7, C4 až C6, L2, T2 a D2) podle doporučovaného zapojení výrobce, zdroje konstantního proudu (obr. 5.2) přes sériově zapojené diody LED popsané v předcházející kapitole. Obvody umožňují regulaci proudu pomocí PWM přes vstup DIM a vypnutí do režimu se sníženou spotřebou vstupem EN. Tyto části jsou pak dále nazývány zdroje konstantního proudu.

Řízení těchto obvodů přes uvedené vývody je uskutečněno mikrokontrolérem (MCU) U3. Ten zajišťuje snímání řídících signálů ze vstupních potenciometrů, které slouží pouze jako proměnné odpory. Potenciometry jsou napájeny přes vývod PTA2 a odpory R12 a R13. Program v MCU (viz příloha 1) pak snímá napětí na potenciometrech přes vstupy PTA1 a PTA3 a řídí pomocí PWM proudové zdroje přes výstupy PTA0 a PTA4 v souvislosti s následující kapitolou 5.4. V případě, že je hodnota potenciometru pro nastavení celkového světelného toku menší než stanovená hodnota (kapitola 5.4), pak MCU přes vývod PTA2 přepne obvody U1 a U2 do úsporného režimu a sám také přejde do režimu se sníženou spotřebou. V tomto stavu jsou proudové zdroje vypnuty a MCU v pravidelných intervalech (viz příloha 1) aktivuje výstup PTA2 a kontroluje stav potenciometru pro nastavení celkového světelného toku pro případné zapnutí svítidla. V tomto režimu RC článek z R14 a C11 omezuje zapnutí zdrojů proudu. Celá tato část je v textu označována jako řídící část.



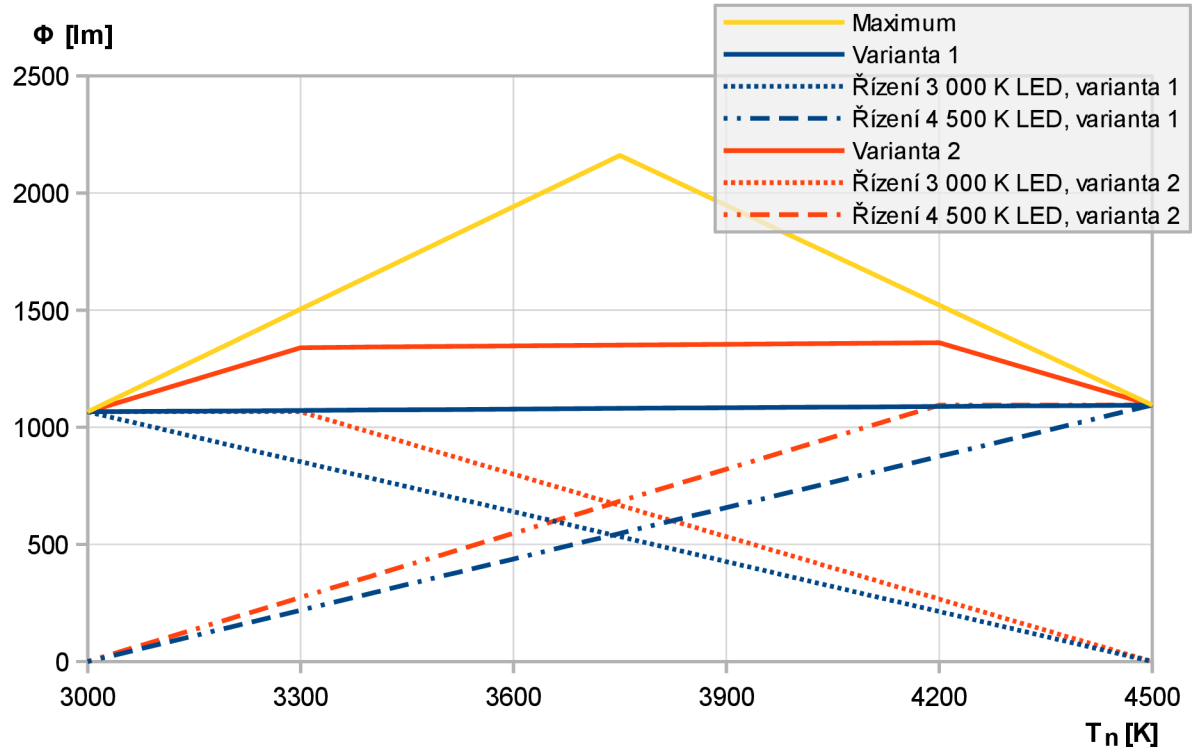
Obr. 5.2: Schéma zapojení

Návrh desky plošných spojů je v části příloha 2. Při návrhu bylo dbáno na doporučení výrobce a obecné pravidla při návrhu spínaných zdrojů. Proto jsou plochy spojů mezi cívkami L1 a L2, kolektory tranzistorů T1 a T2 a anodami diod D1 a D2 co možná nejmenší. Stejně tak jsou přívody k hradlům tranzistorů T1 a T2 co možná nejkratší a pro omezení rušení jsou použity odpory R4 a R7. Spínané smyčky jsou co možná nejkratší a jsou ošetřeny kondenzátory C1, C3, C4 a C6, které jsou umístěny co nejblíže spínacích prvků a cívek.

5.4 Rozsah nastavení

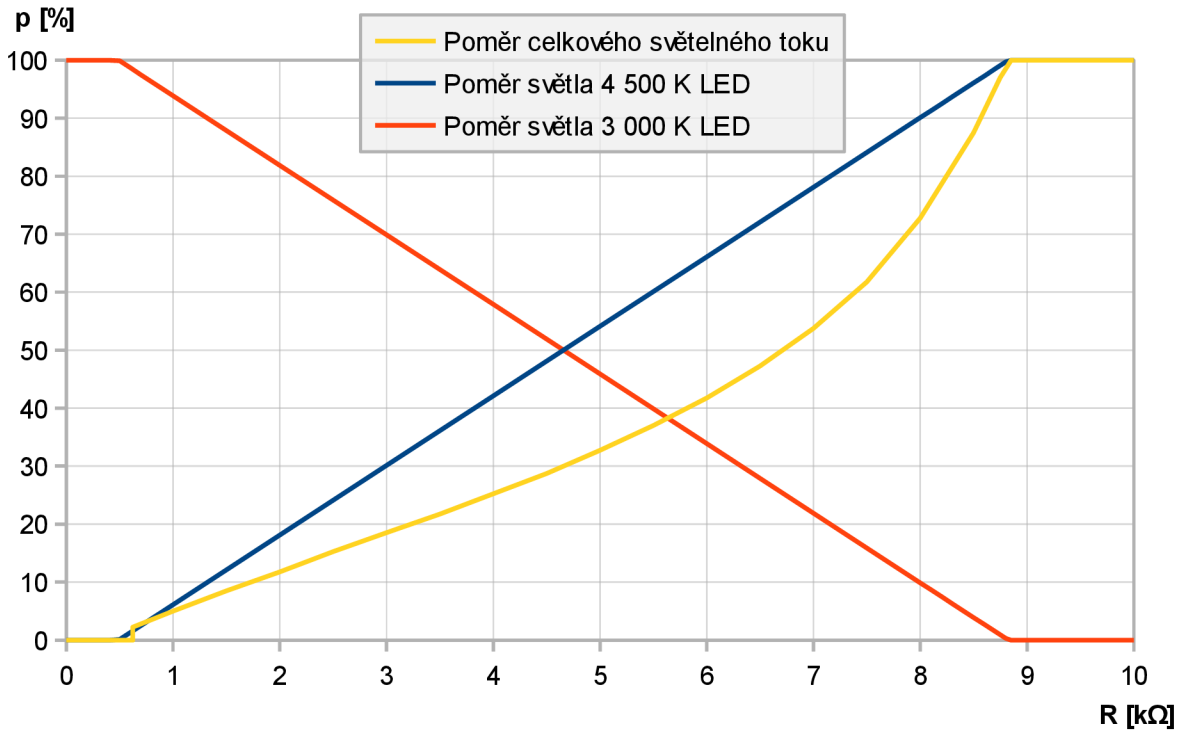
Při návrhu bylo potřeba zvolit vhodný rozsah nastavení zejména teploty chromatičnosti. Volba rozsahu nastavení závisí na potřebném rozsahu změn teploty chromatičnosti a světelného toku, dále na možnostech elektroniky řídící zdroje proudu LED, ale zejména na ekonomických potřebách. Regulace je pro omezení vlivu na vlastnosti světla řízena pomocí pulzně-šířkové modulace (PWM) pro každou skupinu LED (neutrální a teplý odstín) samostatně.

Pro jednoduchost, zejména při měření, byla zvolena nejjednodušší varianta 1, která je vidět na grafu 5.1. Ta využívá celého rozsahu náhradní teploty chromatičnosti při neměnné hodnotě světelného toku. Regulace jednotlivých skupin LED je lineární mezi oběma krajními hodnotami (křivky řízení LED s T_n = 3 000 a 4 500 K pro variantu 1). Nejvyšší dosažitelná hodnota světelného toku z tohoto svítidla je zobrazena křivkou maximum. Jako příklad je uvedena varianta 2, u které je konstantní světelný tok v rozsahu T_n = 3 300 až 4 200 K. Ten je oproti variantě 1 přibližně o 250 lm vyšší. To zajistí větší využití obou skupin světelných diod a v důsledku i lepší ekonomiku provozu. Ovšem je potřeba zajistit lepší chlazení světelného zdroje a také je potřeba omezit teplotu chromatičnosti na uvedený rozsah hodnot, aby při její změně zůstával světelný tok neměnný.



Graf 5.1: Návrhy regulace náhradní teploty chromatičnosti T_n

Proud každou skupinou LED je regulován na konstantní hodnotu zdrojem proudu a řízení světelného toku každé skupiny je řešeno pomocí PWM. Uvedený způsob napájení zajišťuje omezení změn světelných parametrů v celé oblasti nastavení náhradní teploty chromatičnosti a světelného toku. Závislost poměru světla skupiny LED s T_n = 4 500 K v procentech je zobrazena modrou křivkou na grafu 5.2. V oblasti 0 až asi 0,5 kΩ tato skupina nesvítí vůbec, poté světelný tok skupiny lineárně roste a od přibližně 8,8 kΩ je světelný tok nejvyšší možný, nastavený potenciometrem pro řízení celkového světelného toku. Pro skupinu LED s T_n = 3 000 K je jejich průběh světelného toku doplňkem do 100% první uvedené skupiny a zobrazen červenou křivkou v grafu 5.2. Tím je zajištěn průběh nastavení T_n podle varianty 1 z grafu 5.1 a také je nastavení náhradní teploty chromatičnosti zajištěno pouze jedním potenciometrem (či případně jedním jiným řídícím signálem). Celkový světelný tok se nastavuje druhým potenciometrem a řídí střídu obou kanálů tak, aby byla zachována nastavená T_n. Průběh poměrné hodnoty v procentech celkového světelného toku je zobrazen žlutou křivkou v grafu 5.2 a je kvůli různé citlivosti oka při různých jasech zpočátku rostoucí pomaleji. Krajní oblasti jsou určeny pro omezení výrobních odchylek potenciometrů. Při nezapojených potenciometrech je nastaven nejvyšší světelný tok při T_n = 4 500 K. V případě, že je odpor potenciometru pro nastavení celkového světelného toku menší než přibližně 0,6 kΩ jsou zdroje proudu vypnuty a řídící mikrokontrolér se přepne do úsporného režimu. Takto je dosaženo režimu vypnutí svítidla a snížení spotřeby v tomto režimu na minimum.



Graf 5.2: Závislost parametrů světla na odporu potenciometrů

6 Měření

Po kompletním návrhu byly dva kusy navržených svítidel vyrobeny a naprogramovány. V programu byly opraveny chyby a upraveny některé výpočty v souvislosti s předcházejícími kapitolami. Výsledný zdrojový kód je pak umístěn v části příloha 1. Fotografie vyrobených svítidel jsou v části příloha 3. Po dokončení byly proměřeny parametry vyrobených svítidel. Oba moduly byly uchyceny na chladič a dále v textu jsou identifikovány jako svítidlo 1 a svítidlo 2.

6.1 Měření oteplení

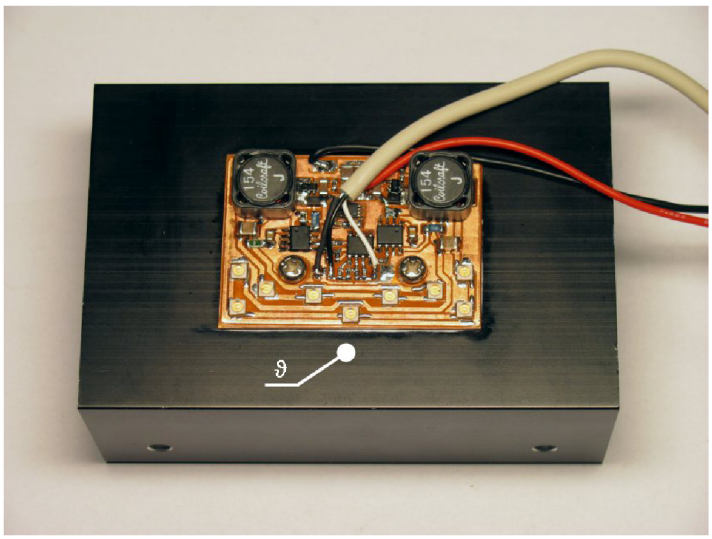
Pro potřeby měření světelných parametrů bylo potřeba zjistit, jak dlouho trvá ohřívání svítidel a jakých teplot dosahuje chladič. Proto bylo změřeno oteplení chladičů obou svítidel. To bylo měřeno ve třech různých polohách chladiče pro získání informací o vlivu polohy žeber chladiče na jeho teplotu.

Použité přístroje:

- multimetr Fluke 45
- laboratorní zdroj Thurlby Thandar PL330DP
- odporové teplotní čidlo Pt100

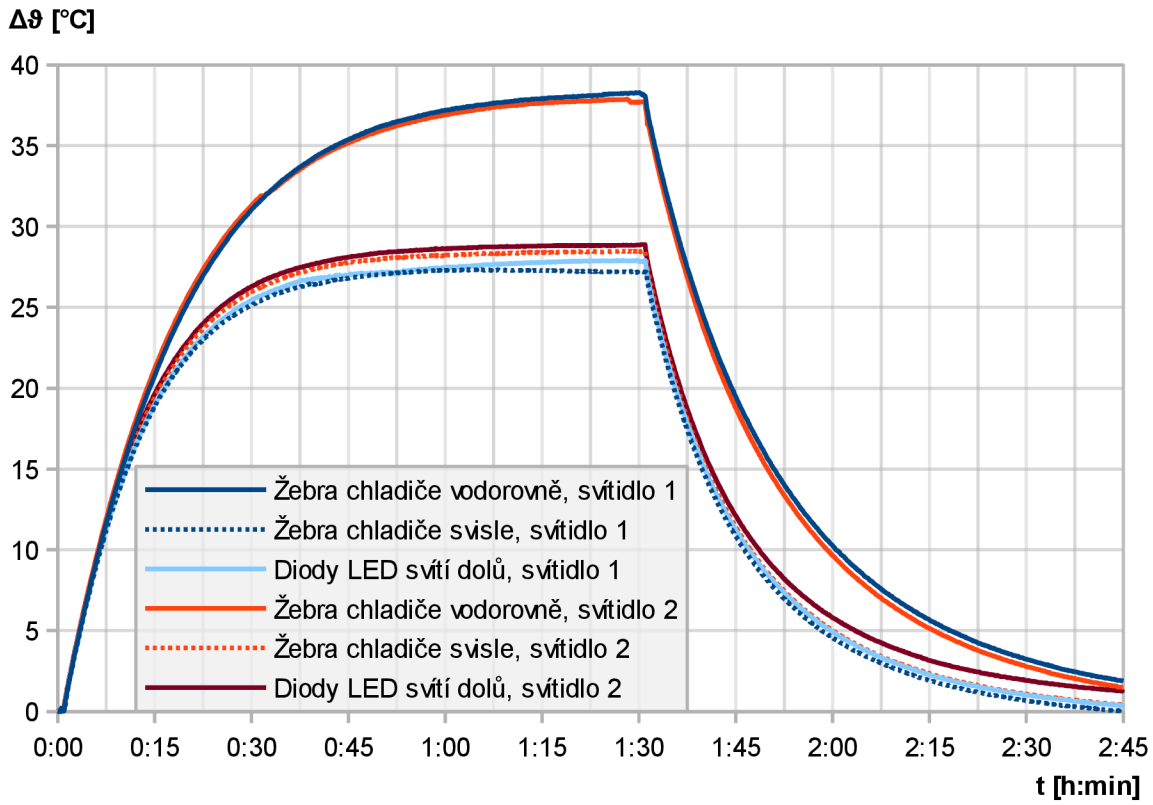
Měření probíhalo v prostoru se stálou teplotou, omezeným prouděním vzduchu a dostatečným prostorem kolem chladičů při napájecím napětí svítidla 36 V, maximálním světelném toku a při nastavené náhradní teplotě chromatičnosti T_n = 3 000 K. Data byly automaticky zaznamenávány v určených časových intervalech do počítače.

Modul svítidla sestává z desky plošných spojů s měděným základem, která je přišroubována na chladiči SK 100 100 SA o výšce 40 mm, šířce 66 mm a délce 100 mm [45] (viz příloha 3). Vyrobený modul byl zavěšen tak, aby kolem něj bylo dostatek prostoru. Modul byl tedy měřen ve třech polohách oproti zemi, které jsou označeny jako žebra chladiče vodorovně (světlo svítilo vodorovně), žebra chladiče svisle (světlo svítilo vodorovně) a LED svítí dolů (světlo svítilo svisle dolů). Teplota byla měřena odporovým teplotním čidlem Pt100 umístěným poblíž desky plošných spojů (viz obr. 6.1).



Obr. 6.1: Místo měření teploty chladiče

Ze změřených hodnot byla vypočítána teplota a pro všechny polohy byl vytvořen graf závislosti oteplení chladiče na čase graf 6.1. Z něj je vidět, že nejhorší možné umístění chladiče z měřených variant je s žebry vodorovně, kdy oteplení během měření bylo více než 37 °C. Během ostatních měřeních se oteplení pohybovalo kolem 28 °C. Při návrhu svítidel by se tedy mělo uvažovat rozmístění konečné aplikace a podle toho navrhnout vhodný chladič a jeho umístění.



Graf 6.1: Závislost oteplení chladiče na čase

6.2 Měření spotřeby ve vypnutém stavu

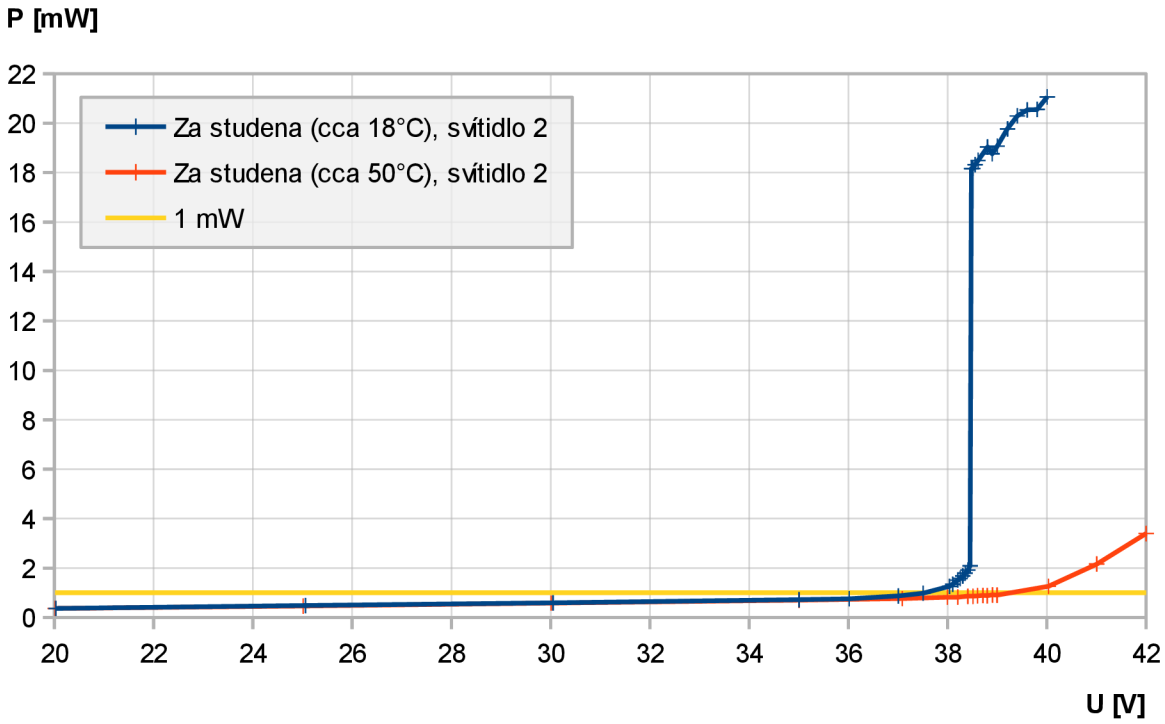
Vzhledem k tomu, že navrhovaný světelný zdroj umožňuje úplné vypnutí, tak bylo potřeba zajistit co nejmenší spotřebu elektrické energie v tomto stavu. Toho bylo dosaženo, jak samotným návrhem zapojení a výběrem vhodných součástek, tak i programem v mikrokontroléru řídící části. Snahou bylo dosažení spotřeby menší než 1 mW v celém rozsahu napájecího napětí.

Použité přístroje:

- multimetr Fluke 45
- laboratorní zdroj Thurlby Thandar PL330DP

Proto byla provedena kontrola spotřeby ve vypnutém stavu u svítidla 2 (u svítidla 1 byly naměřené údaje podobné). Výsledky měření zobrazuje graf 6.2. Měření bylo prováděno při dvou teplotách a ukázalo se, že při teplotě chladiče přibližně 18 °C spotřeba ve vypnutém stavu při napájecím napětí nad 38 V prudce roste. To by odpovídalo průběhu spotřeby obvodů U1 a U2 podle informací výrobce, ten ovšem uvádí řádově nižší spotřebu. Při teplotě chladiče cca 50 °C je naopak spotřeba ještě menší než uvádí výrobce. Příčinu těchto odchylek se nepodařilo objasnit.

Žlutá křivka v grafu 6.2 znázorňuje spotřebu 1 mW, jejíž dosažení bylo cílem. Při teplotě chladiče cca 18 °C je spotřeba 1 mW překročena při napájecím napětí vyšším než asi 37,5 V. Při teplotě přibližně 50 °C je pak spotřeba 1 mW překročena až při napájecím napětí větším než 39 V.



Graf 6.2: Závislost spotřeby svítidla ve vypnutém stavu na napájecím napětí

6.3 Měření světelně technických parametrů

Hlavní částí bylo měření světelně technických parametrů obou svítidel. To bylo prováděno na ústavu elektroenergetiky v laboratoři světelné techniky. Účelem měření bylo ověření navrhovaných parametrů.

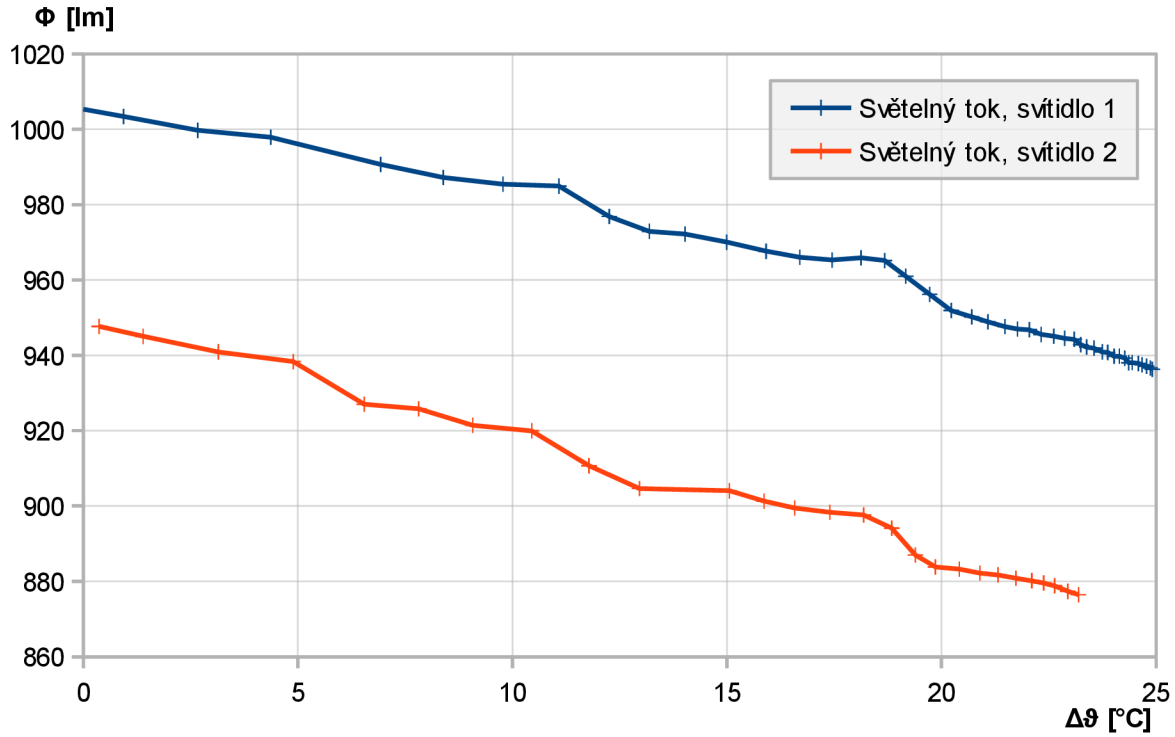
Použité přístroje:

- laboratorní zdroj Keithley 2601B
- kulový integrátor s korekční žárovkou
- spektroradiometr Konica-Minolta CS-1000A
- pětikanálový měřič teploty
- počítačová jednotka pro řízení měřících přístrojů a záznam dat

Všechna měření byla prováděna v kulovém integrátoru pomocí spektroradiometru a měřiče teploty. Během měření bylo napájecí napětí svítidla nastaveno na 36 V a bylo připojeno pomocí čtyřvodičového zapojení k laboratornímu zdroji. Teplota byla zaznamenávána automaticky do počítačové jednotky a byla měřena, jak teplota okolí vně kulového integrátoru, tak teploty uvnitř integrátoru. Uvnitř byly měřeny dvě teploty nad svítidlem, jedna teplota pod svítidlem a jedna teplota chladiče. Z teplot uvnitř kulového integrátoru kromě teploty chladiče byla vypočítána průměrná hodnota. Pro lepší srovnání je v

grafech uveden rozdíl teplot mezi teplotou chladiče a průměrnou teplotou uvnitř integrátoru místo absolutních hodnot teploty, což je označováno jako oteplení. Během měření bylo dosahováno podobných hodnot, jako při měření oteplení v kapitole 6.1.

První a velice důležitý výsledek měření je shrnut v grafu 6.3. V něm je znázorněna závislost světelného toku při nastaveném nejvyšším světelném toku a $T_n = 3\ 000$ K. Svítidlo 1 přibližně splňuje navrhovaný světelný tok, ten je navrhován při katalogových údajích výrobce LED, které jsou udávány při 25 °C. Ovšem svítidlo 2 navrhované parametry při $T_n = 3\ 000$ K nesplňuje z důvodu špatného spoje jedné z LED. Uvedený problém se projevil až během tohoto měření, proto jsou výsledky svítidla 2 zkreslené. Po zahřátí je světelný tok přibližně 93% původní hodnoty po zapnutí, což podle katalogového listu [42] odpovídá teplotě čipu přibližně 80 °C při výchozí teplotě 25 °C.



Graf 6.3: Závislost světelného toku na oteplení při $T_n = 3\ 000$ K

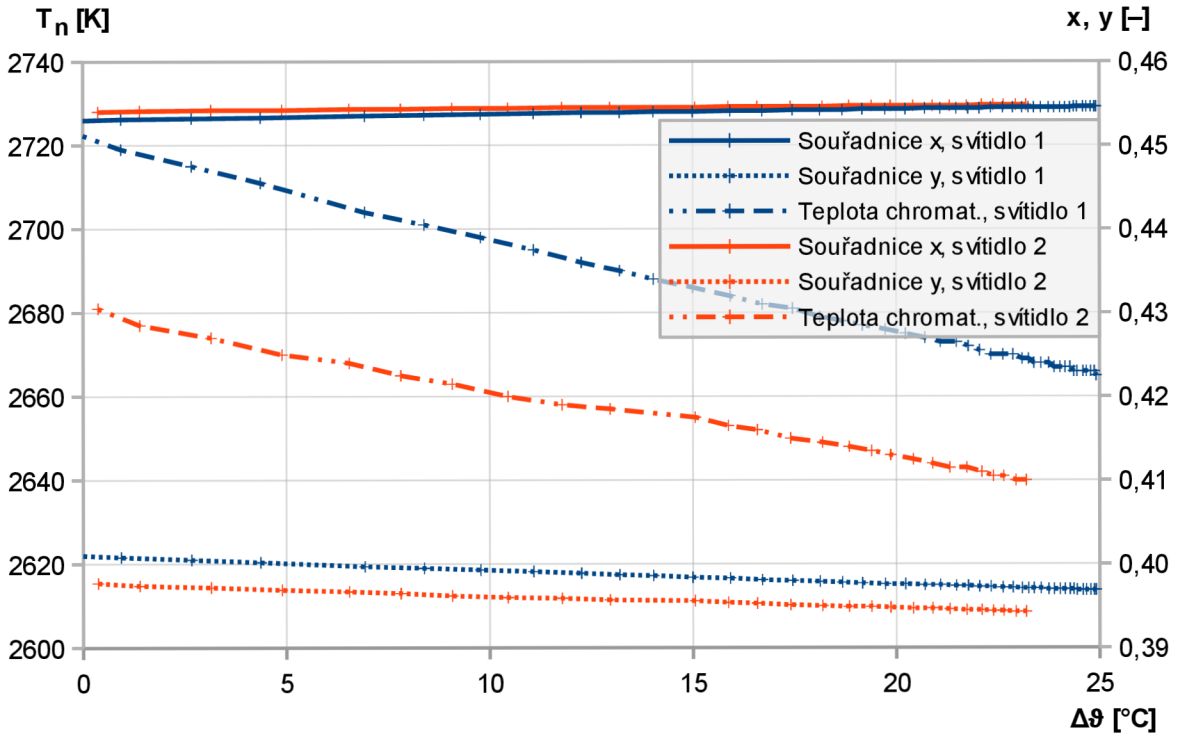
Světelný tok je vypočítán ze změřených hodnot podle (6.1), kde je uveden i příklad výpočtu pro studené svítidlo 1 ihned po zapnutí.

$$\Phi = \frac{L_{PR}}{L_{PL}} \cdot k_I L_S = \frac{247{,}70}{225{,}56} \cdot 6{,}097\,707 \cdot 150{,}28 = 1\,006\,lm \qquad (6.1)$$

kde Φ je výsledný světelný tok [lm]
L_{PR} jas měřícího okénka při prázdném kulovém integrátoru (bez měřeného svítidla) a s rozsvícenou korekční žárovkou [cd·m^{-2}]
L_{PL} jas měřícího okénka při plném kulovém integrátoru (s měřeným svítidlem) a s rozsvícenou korekční žárovkou [cd·m^{-2}]
k_I kalibrační konstanta kulového integrátoru [lm·m^2·cd^{-1}]
L_S jas měřícího okénka při měření zkoušeného svítidla [cd·m^{-2}]

Tedy světelný tok se počítá ze součinu jasu měřícího okénka při měření zkoušeného svítidla, kalibrační konstanty kulového integrátoru a poměru jasů měřícího okénka při prázdném a plném kulovém integrátoru s rozsvícenou korekční žárovkou. Tento poměr lze nazvat korekčním číslem daného svítidla a vyjadřuje v převráceném poměru relativní množství světla, které se pohltí na svítidle. Jasy při rozsvícené korekční žárovce byly měřeny pětkrát a ze změřených hodnot byl vypočítán průměr, z něhož se vychází při dalších výpočtech, ve kterých jsou tyto hodnoty použity.

Dalším důležitým údajem je náhradní teplota chromatičnosti T_n a její změna s oteplením svítidla. Ta je znázorněna na grafu 6.4 žlutou křivkou pro svítidlo 1 a světle modrou křivkou pro svítidlo 2. Je vidět, že při zvyšování teploty se T_n zmenšuje řádově o desítky kelvinů. To nemusí být na závadu a není tak potřeba kompenzace. V případě potřeby kompenzace by se uvedený vliv mohl naprogramovat do řídícího mikrokontroléru, jako závislost na teplotě a ten by to pak kompenzoval. Takový způsob by vyžadoval proměření této změny na více vzorcích, sestavení kompenzačního modelu a naprogramování jej do mikrokontroléru. Dalším způsobem by byla kompenzace pomocí zpětné vazby, která by tuto změnu snímala u každého svítidla a buď by ji vyhodnocovalo každé svítidlo samostatně nebo lépe by se tyto data přenášely do řízení osvětlení celého systému (viz kap. 5.1). Také se nabízí možnost použití kombinace uvedených možností. Trichromatická souřadnice x s teplotou roste a y klesá, což odpovídá informacím výrobce [42].

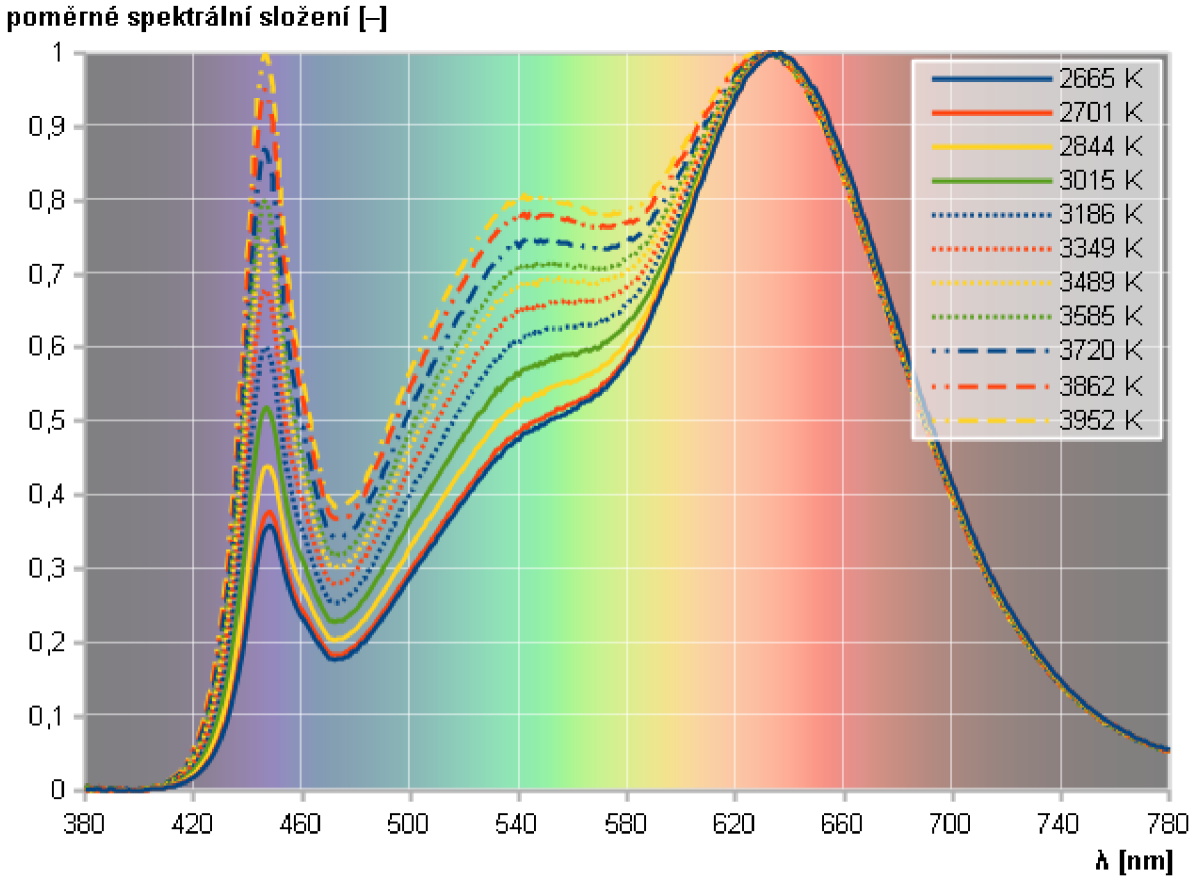


Graf 6.4: Změna trichromatických souřadnic x a y a náhradní teploty chromatičnosti T_n v závislosti na oteplení svítidel

Z tohoto výsledku také vyplynul poznatek, že náhradní teplota chromatičnosti může být velice odlišná od udávaných hodnot. Může to být způsobeno, jak postupem při výrobě světelných zdrojů a to zejména při pájení, tak i relativně velkým rozptylem parametrů v jedné skupině diod LED. Ty se při výrobě třídí podle skutečných parametrů do skupin, které jsou

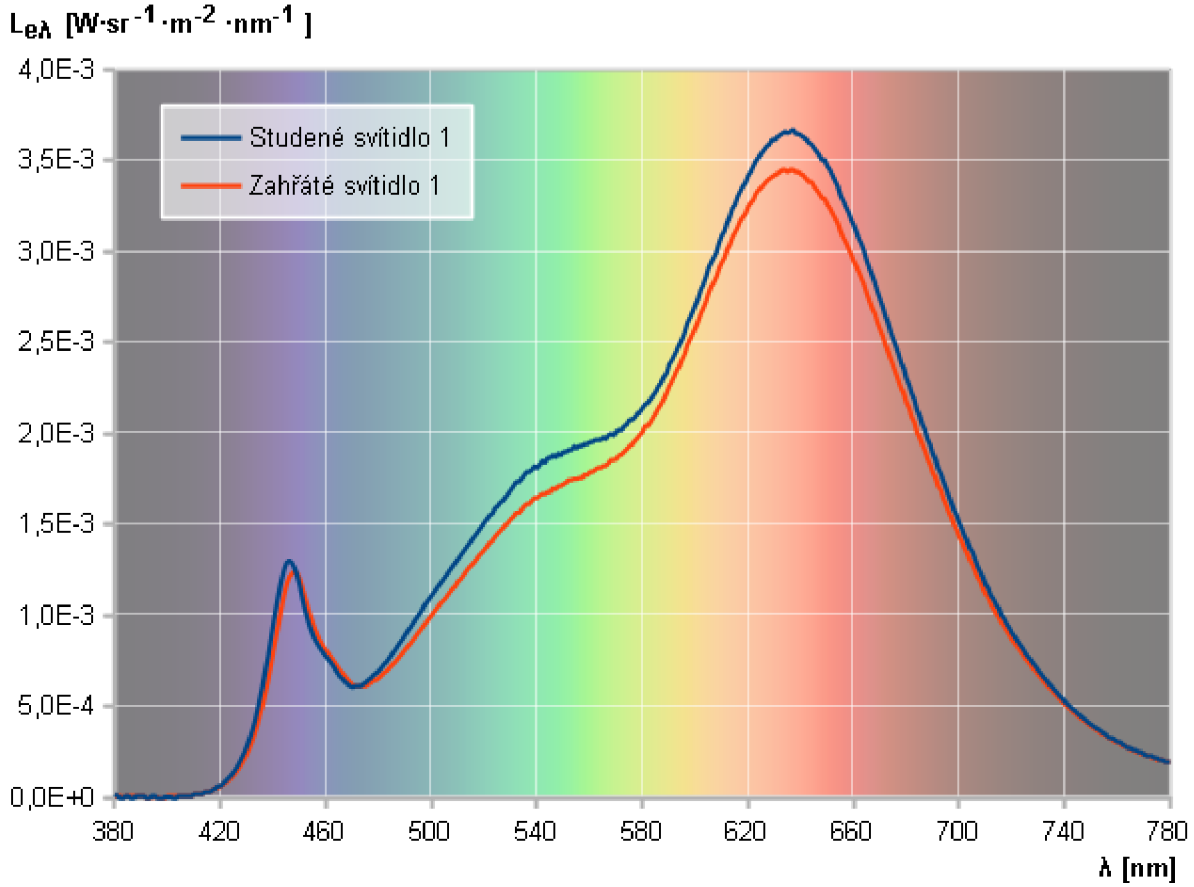
poměrně velké. Díky tomu můžou být parametry docela odlišné od požadovaných a rozdíl se ještě zvětší po zahřátí. Změřené průměrné náhradní teploty chromatičnosti jsou pro svítidlo 1 nastavené na teplý odstín bílé T_n = 2665 K a pro neutrální odstín T_n = 3952 K. Pro svítidlo 2 je to T_n = 2639 K pro teplý odstín a T_n = 3893 K pro neutrální. Tím se navrhovaný rozsah regulace T_n podstatně změnil a je ho potřeba kompenzovat k vyšším teplotám chromatičnosti použitím jiných LED nebo přesnějším výběrem diod při výrobě. Problémem je, že se použitý typ LED nevyrábí s T_n větší než 4 500 K. Proto by bylo potřeba použít úplně jiné diody, ale dostupnost LED s náhradní teplotou chromatičnosti větší než 4 500 K a všeobecným indexem podání barev větším než 90 je v současné době omezený.

Při nastavování náhradní teploty chromatičnosti se mění spektrum vyzařovaného světla, jak ukazuje graf 6.5. Z toho je vidět změna spektra mezi krajními hodnotami T_n, které jsou reprezentovány tmavě modrou křivkou pro světlo s teplým odstínem a tmavě červenou křivkou pro světlo s neutrálním odstínem bílé. Z tohoto grafu se dá usoudit, že luminofor je složen ze dvou částí, kdy první část má maximum okolo 545 nm a druhá část okolo 635 nm. Samotná modrá LED pak vyzařuje světlo s vlnovou délkou přibližně 448 nm. Teplotu chromatičnosti pak výrobce určuje zejména množstvím druhé složky luminoforu (s maximem okolo 635 nm), kterou ovlivňuje poměr červeného světla k modrému. Z grafu 6.5 je také vidět, že část spektra zasahuje i do infračervené oblasti.



Graf 6.5: Závislost poměrného spektrálního složení při různém nastavení náhradní teploty chromatičnosti pro svítidlo 1 po ohřátí

V grafu 6.6 je vidět spektrální prostorová a plošná hustota zářivého toku $L_{e\lambda}$, do které jsou přepočteny výsledky měření a jsou zaznamenány jako výsledek. Je možné tak srovnat spektrum studeného a zahřátého svítidla. Z tohoto grafu je vidět, že při vyšších teplotách klesá účinnost obou luminoforů. Při studeném svítidle je vlnová délka samotné světla LED přibližně 446 nm a po ohřátí mírně stoupne na 448 nm, ale také se sníží její světelný tok.



Graf 6.6: Spektrální prostorová a plošná hustota zářivého toku $L_{e\lambda}$ pro svítidlo 1

Pro srovnání s dalšími světelnými zdroji byl spočítán index cirkadiánního aktivačního účinku A_c (6.2) podle [27]. Podle uvedeného zdroje má tento index pro denní světlo (D65) referenční hodnotu $A_c = 100$.

$$A_c\{X(\lambda)\} = 100 \frac{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} X_{D65}(\lambda) C(\lambda) d\lambda} a_{cv}\{X(\lambda)\} \approx 106{,}25\, a_{cv}\{X(\lambda)\} \qquad (6.2)$$

kde	A_C	je	index cirkadiánního aktivačního účinku	[–]
	$X(\lambda)$		poměrné spektrální složení zkoumaného světla	[–]
	X_{D65}		poměrné spektrální složení denního světla D65	[–]
	$V(\lambda)$		poměrná spektrální citlivost fotoreceptorů při fotopickém vidění	[–]
	$C(\lambda)$		poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla	[–]
a	a_{cv}	je	činitel cirkadiánní účinnosti	[–]

Činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} se pak vypočítá ze vzorce (6.3) podle [27]. Protože byly změřené hodnoty měřeny v intervalech $\Delta\lambda$ = 1 nm a poměrná spektrální citlivost fotoreceptorů při fotopickém vidění $V(\lambda)$ udána v intervalech $\Delta\lambda$ = 5 nm (třetí sloupec v [31]) a stejně tak poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla $C(\lambda)$ [10], pak byly změřené hodnoty poměrného spektrálního složení zkoumaného světla svítidel pro každých $\Delta\lambda$ = 5 nm zprůměrovány s okolními hodnotami a činitel cirkadiánní účinnosti a_{cv} byl vypočítán podle (6.4).

$$a_{cv}\{X(\lambda)\} = \frac{K_m \int_{380}^{780} X(\lambda) C(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} X(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \tag{6.3}$$

$$a_{cv}\{X(\lambda)\} = \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} X(\lambda) C(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} X(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda} \tag{6.4}$$

Například pro teplý odstín bílé pro studené svítidlo 1 je pak index cirkadiánního aktivačního účinku A_c:

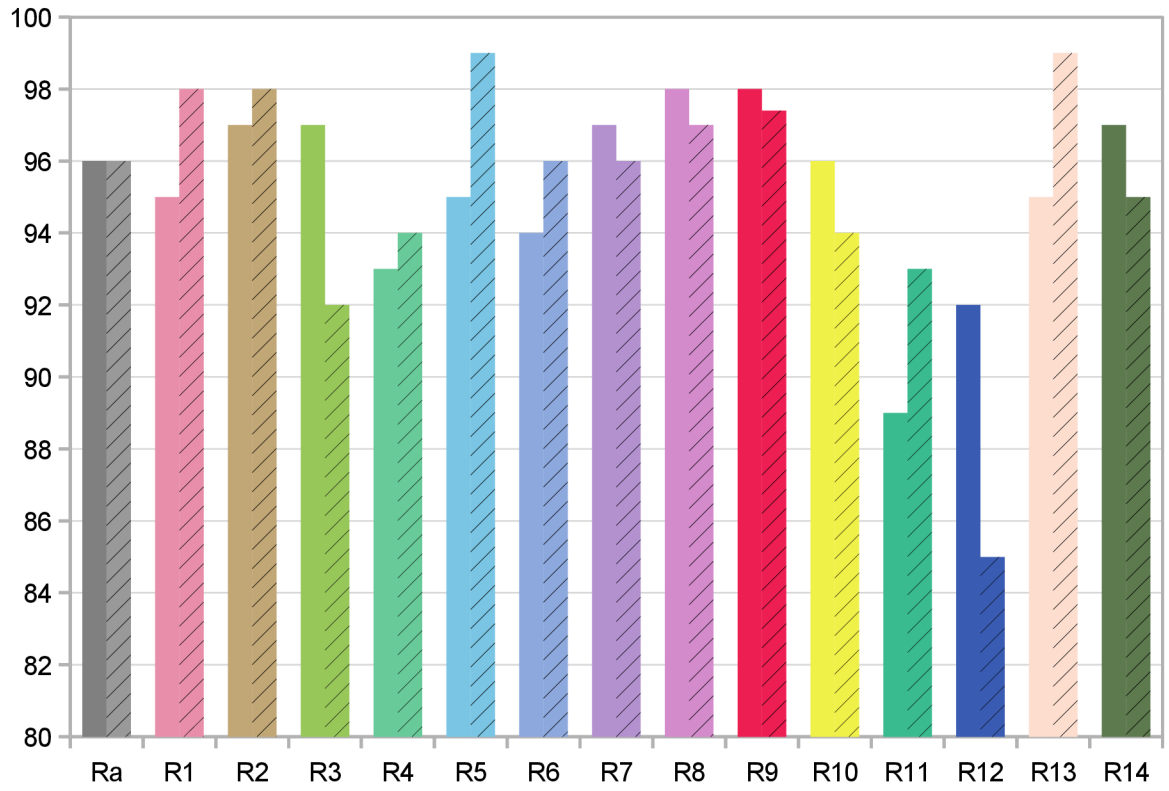
$$A_c \approx 106{,}25\, a_{cv}\{X(\lambda)\} = 106{,}25 \frac{\sum_{\lambda=380}^{780} X(\lambda) C(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=380}^{780} X(\lambda) V(\lambda) \Delta\lambda} \approx 106{,}25 \frac{21{,}61}{59{,}95} \approx 38$$

Pro srovnání vypočítaných hodnot svítidel jsou uvedeny i některé hodnoty z [27] (označeny podtržením) v tabulce 2. V té je vidět, že po zahřátí svítidla se sice o něco zmenší náhradní teplota chromatičnosti T_n, ale index A_c o něco vzroste. Index A_c samozřejmě vzroste i pokud se změní nastavení odstínu bílé z teplé na neutrální.

Tabulka 2: Index cirkadiánního aktivačního účinku A_c

Světelný zdroj	Specifikace zdroje	A_c [–]
denní světlo	D65	100
obyčejná žárovka	2 800 K	36
sodíková výbojka	vysokotlaká	8 až 13
LED	modrá	875
	červená	0,4
svítidlo 1, studené	2 724 K	38,3
svítidlo 1, zahřáté	2 665 K	38,7
svítidlo 1, zahřáté	3 952 K	61,7
svítidlo 2, studené	2 681 K	38,7
svítidlo 2, zahřáté	2 639 K	39,1
svítidlo 2, zahřáté	3 893 K	61,0

Všeobecný index podání barev R_a měl během všech měření obou svítidel hodnotu vyšší než hodnotu $R_a = 90$, požadovanou při návrhu. Hodnoty všeobecného indexu podání barev se u obou svítidel pohybovaly kolem hodnoty 96. Výjimkou byla u svítidla 1 hodnota $R_a = 95$, která byla změřena při nastavení $T_n = 3\ 186$ K a $T_n = 3\ 015$ K. Při měření svítidla 2 byla hodnota $R_a = 95$ změřena při teplém odstínu bílé s $T_n = 2\ 639$ K po zahřátí. Hodnoty všeobecného a speciálních indexů podání barev jsou v grafu 6.7 pro svítidlo 1 po zahřátí. Všeobecný index podání barev je označen Ra a speciální indexy podání barev jsou označeny R1 (pro R_1) až R14 (pro R_{14}). Sloupce s plnou barvou jsou pro nastavený teplý odstín bílé s $T_n = 2665$ K a sloupce se šrafováním jsou pro neutrální odstín s $T_n = 3952$ K.



Graf 6.7: Hodnoty všeobecného a speciálních indexů podání barev pro svítidlo 1

Všeobecný index podání barev se nad hodnotu $R_a = 96$ během nastavování různých náhradních teplot chromatičnosti nedostal, jak bylo uvedeno v kapitole 2.3 a ve [37]. Je to zřejmě způsobeno použitím stejného typu LED pro teplý a neutrální odstín bílé. Výsledné světlo je pak složeno ze stejných složek, které jsou u diod s rozdílnou T_n pouze v jiném poměru a ta je dána rozdílným poměrem a množstvím složek luminoforu. Pro zvětšení indexu podání barev je potřeba použít LED s odlišným spektrálním složením, tak aby se spektra světla co nejvíce doplňovaly.

7 Zhodnocení výsledků

V úvodu práce je zmíněn zrak a vidění. Je stručně popsán proces vidění nejen z pohledu vzniku zrakového vjemu, ale také z hlediska vlivu světla na denní cyklus člověka. Zajímavá je možnost využití nově objevovaných poznatků v možnosti řízení denního cyklu, jak je zmíněno v kapitole 1.5.

Následuje popis některých parametrů světla. Zajímavá je závislost teploty chromatičnosti a hladiny osvětlenosti. To je potřeba uvažovat při návrhu osvětlení s proměnnou teplotou chromatičnosti. Tyto závislosti by měl sledovat zejména systém řízení osvětlení. Byly zmíněny i problémy s určováním indexu podání barev především u světelných zdrojů na polovodičové bázi, které se ve značné míře rozšiřují.

V další části jsou popsány některé parametry světelných zdrojů. Jsou rozebrány světelné zdroje, které se dnes více či méně používají a se kterými je možné se při návrhu osvětlení setkat. Jejich popis a výčet není zdaleka vyčerpávající. Velkou část tvoří popis světelných diod a to zejména jejich vlastností a konstrukcí, které jsou při návrhu velice důležité.

Na tuto část navazuje popis provozních parametrů LED. Jde zejména o způsob jejich napájení, chlazení a životnost. Všechny tyto jsou od ostatních světelných zdrojů ve velké míře odlišné a vyžadují nové přístupy a řešení. Je možné očekávat vývoj nejen LED samotných, ale i způsobů, jak s nimi pracovat a jak popisovat jejich vlastnosti.

V předposlední části je popsán návrh řešení. Ten je zmíněn již od samotného konceptu napájení světelných zdrojů s LED, které může být odlišené zejména pro menší příkony těchto světelných zdrojů, kvůli jejich lepší účinnosti. To s sebou nese nové možnosti, například zmíněnou možnost zálohování a napájení systému fotovoltaickými zdroji elektrické energie. Ale kromě toho je potřeba celý systém vhodným způsobem řídit. V práci jsou navržené světelné zdroje řízeny pouze potenciometry a to zvláště z důvodu jednoduchého nastavování během měření. Místo těch je možné zapojení vhodných obvodů například pro připojení na sběrnici DALI. Popis řešení připojení včetně zdrojových kódů je možné najít například v [9]. Část návrhu zahrnuje také rozbor problematiky návrhu rozsahu řízení.

Poslední a zcela stěžejní částí je měření vytvořených svítidel. V té je v úvodu změřeno oteplení svítidel zvláště pro potřeby dalších měření. Z něj je také vidět, že nejhorší možné umístění během měření bylo s žebry chladiče vodorovně, kdy bylo oteplení chladiče přibližně o 9 °C větší než při dalších dvou umístěních chladiče.

Další částí bylo ověření spotřeby ve vypnutém režimu svítidla. Cílem bylo dosažení spotřeby menší než 1 mW v celém rozsahu napájecího napětí. Spotřeba ve vypnutém stavu může tvořit nezanedbatelnou část spotřeby elektrické energie svítidla a měla by být co možná nejmenší. Požadovaná spotřeba byla v téměř celém rozsahu dodržena, kromě napětí nad asi 37,V při studeném svítidle a 39 V při zahřátém svítidle. Příčinu tohoto jevu se nepodařilo objasnit. Vzhledem k těmto hodnotám by bylo vhodné upravit rozsah napájecího napětí na 20 až 37 V.

Nejdůležitější částí celého měření bylo ověření světelně technických parametrů. Ty jsou ze všech parametrů jedny z nejdůležitějších a jejich změření umožnilo ověřit dosažení či nedosažení navrhovaných parametrů, ukázat na možnou strukturu použitých diod LED a také umožnit další studii parametrů ovlivňujících denní cyklus člověka.

Byly sestaveny dva svítidla zejména pro zjištění shodnosti jejich parametrů. Po změření se ukázalo, že u svítidla 2 byl u jedné diody špatný spoj. Proto byly změřené hodnoty u svítidla 2 zkreslené. Je to vidět již v prvním grafu 6.3, kde je světelný tok špatného svítidla menší. V dalších případech byly světelné toky odpovídající předpokladům při návrhu. U obou svítidel byly světelné toky při nastaveném neutrálním odstínu bílé i po zahřátí větší než bylo předpokládáno a pohybovaly se okolo 1 100 lm.

Z dalšího rozboru změřených dat vyplynulo, že teploty chromatičnosti, jak za studena, tak i po zahřátí neodpovídají navrhovaným parametrům. To může být způsobeno, jak výrobou svítidel a zejména pájením, tak i poměrně velkým rozptylem parametrů konkrétní vyráběné skupiny LED. Teploty chromatičnosti byly mnohem menší, než bylo navrhováno. To je možné kompenzovat přesnějším výběrem LED před výrobou nebo použitím luminiscenčních diod s větší teplotou chromatičnosti v případě častějšího výskytu.

Během změn teplot chromatičnosti se v souvislosti s tím měnilo i spektrum vyzařovaného spektra, což je vidět na grafu 6.5. Index podání barev se během všech měření pohyboval v rozmezí $R_a = 95$ a $R_a = 96$. Pro jeho zvětšení podle kapitoly 2.3 by bylo potřeba použít LED s odlišným spektrem tak, aby se vhodně doplňovaly. Index cirkadiánního aktivačního účinku A_c se pohybuje poblíž hodnot $A_c = 38$ a $A_c = 39$ při nastaveném teplém odstínu bílé a po zahřátí se trochu zvětší. Při nastaveném neutrálním odstínu bílé se tento index pohybuje kolem hodnoty $A_c = 61$. Pro denní světlo má hodnotu $A_c = 100$.

Uvedené řešení svítidla s proměnnou teplotou chromatičnosti je relativně jednoduché a to by se mělo projevit i v levné výrobě. Jak se z měření ukázalo, pak zvláště teplota chromatičnosti je dost odlišná od požadovaných hodnot. To vyžaduje zejména přesnější výběr samotných LED.

8 Závěr

Práce je zaměřena na popis vlivu světla na člověka. Část práce je zaměřena na vliv světla na denní cyklus člověka, který je v práci několikrát zmíněn a v závěru je zhodnocen u vytvořených vzorků svítidel. S tím jsou popsány i důležité spektrální průběhy a některé parametry a vlastnosti světelných zdrojů. V rámci práce jsou tedy naznačeny možnosti, kterými se může umělé osvětlení v budoucnu ubírat.

Je možné očekávat, že se podobná řešení budou objevovat stále častěji zejména v závislosti na objevovaných poznatcích o vidění a denních cyklech člověka. Proto je práce zaměřena tímto směrem a snaží se vytvořit vhled do problematiky biodynamického osvětlení, jež by mohlo být v budoucnu běžným a denně používaným doplňkem denního světla. Na druhou stranu je žádoucí využívat v co největší míře světla denního, které můžeme mít zdarma a v dostatečné intenzitě a kvalitě.

9 Seznam literatury

[1] BANIYA, Rupak, Raj. *Study of various metrics evaluating color quality of light sources*. Espoo, 23.02.2012. [vid. 2014-3-27]. Dostupné z: http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100575.pdf. Master of Science. Aalto University, Department of Electronics, Lighting Unit. Vedoucí práce prof. Liisa Halonen.

[2] *Barevná teplota* [online]. Wikimedia Foundation, Inc. 23. 12. 2013. [vid. 2014--4-8]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Barevná_teplota

[3] *CBM-380 Product Datasheet* [online]. Luminus Devices. © 2011. [vid. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.luminus.com/products/Luminus_CBM380_Datasheet.pdf

[4] *Color temperature* [online]. Wikimedia Foundation, Inc. 23 April 2014. [vid. 2014--4-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature

[5] *Cree Breaks 200 Lumen Per Watt Efficacy Barrier* [online]. Cree, Inc. February 3, 2010. [vid. 2013-12-9]. Dostupné z: http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2010/February/100203-200-Lumen-Per-Watt

[6] *Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier* [online]. Cree, Inc. March 26, 2014. [vid. 2014-4-15]. Dostupné z: http://cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier

[7] *Cree Reaches LED Industry Milestone with 200 Lumen-Per-Watt LED* [online]. Cree, Inc. December 18, 2012. [vid. 2013-12-9]. Dostupné z: http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2012/December/MKR-intro

[8] *Cree® XLamp® Long-Term Lumen Maintenance* [online]. Cree, Inc. 13 May 2013. [vid. 2013-12-15]. Dostupné z: http://cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_lumen_maintenance

[9] Digitally Addressable Lighting Interface (DALI) Unit Using the MC68HC908KX8: Designer Reference Manual [online]. Freescale Semiconductor, Inc. 3/2002. [vid. 2014--5-6]. Dostupné z: http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/ref_manual/DRM004.pdf

[10] DIN V 5031-100: *Optical radiation physics and illuminating engineering — Part 100: Non-visual effects of ocular light on human beings — Quantities, symbols and action spectra*. Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2009

[11] DVOŘÁČEK, Vladimír. S*větelné zdroje – halogenidové výbojky (část 1)*. Světlo, č. 1, 2009. s. 36-38. [vid. 2013-12-6]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/38556.pdf

[12] DVOŘÁČEK, Vladimír. S*větelné zdroje – halogenidové výbojky (část 2)*. Světlo, č. 2, 2009. s. 48-49. [vid. 2013-12-7]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/38908.pdf

[13] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – halogenové žárovky*. Světlo, č. 5, 2008. s. 56-58. [vid. 2013-12-2]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/37973.pdf

[14] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – indukční výbojky*. Světlo, č. 4, 2009. s. 58-59. [vid. 2013-12-4]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/39389.pdf

[15] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – kompaktní zářivky*. Světlo, č. 3, 2008. s. 43-45. [vid. 2013-12-4]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/37410.pdf

[16] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – lineární zářivky*. Světlo, č. 2, 2008. s. 56-58. [vid. 2013-12-4]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/37032.pdf

[17] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – nízkotlaké sodíkové výbojky*. Světlo, č. 6, 2009. s. 58-59. [vid. 2013-12-3]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/40237.pdf

[18] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – obyčejné žárovky*. Světlo, č. 4, 2008. s. 38-39. [vid. 2013-12-2]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/37590.pdf

[19] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – světelné diody (pokračování)*. Světlo, č. 2, 2011. s. 44-45. [vid. 2013-12-8]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/43461.pdf

[20] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – světelné diody*. Světlo, č. 5, 2009. s. 68-71. [vid. 2013-12-8]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/39810.pdf

[21] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – vysokotlaké rtuťové výbojky, směsové výbojky*. Světlo, č. 6, 2008. s. 56-58. [vid. 2013-12-5]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/38296.pdf

[22] DVOŘÁČEK, Vladimír. *Světelné zdroje – vysokotlaké sodíkové výbojky*. Světlo, č. 3, 2009. s. 40-42. [vid. 2013-12-3]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/39197.pdf

[23] EN 15193:2007: *Energy performance of buildings - Energy requirements for lighting*. Brussels: European Committee for Standardization, 2007

[24] *ENERGY STAR® Program Requirements for Integral LED Lamps* [online]. U.S. Environmental Protection Agency. March 22, 2010. [vid. 2014-3-30]. Dostupné z: http://www.energystar.gov/ia/partners/product_specs/program_reqs/ILL_prog_reqs.pdf

[25] *Fluorescent lamp: End of life* [online]. Wikimedia Foundation, Inc. 29 March 2014. [vid. 2014--3-29]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp#End_of_life

[26] FLUX SOFTWARE LLC. *F.lux: software to make your life better* [online]. [2013] [vid. 2014-05-1]. Dostupné z: https://justgetflux.com/

[27] FUKSA, Antonín. *Světlo a biologické hodiny*. Světlo, č. 6, 2010. s. 56-58. ISSN 1212-0812. [vid. 2014-3-10]. Dostupné též z: http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=42567

[28] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013, 624 s. ISBN 978-80-86534-21-3.

[29] HABEL, Jiří. *Základy světelné techniky (2): Zrak a vidění*. Světlo, č. 6, 2008. s. 52-55. ISSN 1212-0812. [vid. 2014-3-2]. Dostupné též z: http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=38297

[30] http://i91.photobucket.com/albums/k318/jtr1962/CPF/LED_Cooling_Comparison.gif z příspěvku http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?169724-Some-

thoughts-on-the-practical-limits-of-LED-efficiency&p=2082936&viewfull=1#post2082936. [vid. 2013-12-15].

[31] http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/files/data/ciexyz31.txt. [vid. 2014-5-2].

[32] *Kruithof curve* [online]. Wikimedia Foundation, Inc. 19 March 2014. [vid. 2014--4-2]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kruithof_curve

[33] LIBRA, Martin, KLUIBER, Zdeněk. *Klasická žárovka neztrácí svůj význam ani ve třetím tisíciletí*. Světlo, č. 2, 2002. s. 50. [vid. 2013-12-2]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=22957

[34] LINDER, Norbert. *LEDs for Solid State Lighting* [online]. SEREC, 25 June 2009. [vid. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.serec.ethz.ch/eventprog/LEDs_for_Solid_State_Lighting.pdf

[35] *LUMAWISE LED Holders: TE LED Holder for Osram Opto SOLERIQ™* [online]. TE Connectivity, Ltd. 01/2014. [vid. 2014-5-3]. Dostupné z: http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7F1-1773700-6_LED_HOLDER_TYPE_OSRAM%7F0114%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_1-1773700-6_LED_HOLDER_TYPE_OSRAM_0114_1-1773700-6_LED_holder_Type_OS_R3_012014.pdf%7F3-2154857-3

[36] *LUXEON ® Rebel: Illumination Portfolio* [online]. Philips Lumileds Lighting Company. 20121212. [vid. 2014-4-3]. Dostupné z: http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS63.pdf

[37] MÁCHA, Marek. *Miešanie LED svetelných zdrojov ako nástroj pre zvyšovanie R_a.* Světlo, č. 5, 2011. s. 62-63. ISSN 1212-0812. [vid. 2014-4-3]. Dostupné též z: http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=44777

[38] *MIC3203/MIC3203-1: High-Brightness LED Driver Controller with High-Side Current Sense* [online]. Micrel Inc. March 2010. [vid. 2014-3-27]. Dostupné z: http://www.micrel.com/_PDF/mic3203.pdf

[39] NOVOTNÝ, Jiří. *Umělé světelné zdroje*. Světlo, č. 5, 2006. s. 2. ISSN 1212-0812. [vid. 2013-11-29]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35806

[40] NOVOTNÝ, Jiří. *Vývojová spirála*. Světlo, č. 3, 2011. s. 2. ISSN 1212-0812. [vid. 2013-12-1]. Dostupné též z: http://odbornecasopisy.cz/res/pdf/43785.pdf

[41] *Optimizing PCB Thermal Performance for Cree® Xlamp® LEDs* [online]. Cree, Inc. 10 Feb 2012. [vid. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.cree.com/~/media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/XLamp%20Application%20Notes/XLamp_PCB_Thermal.pdf

[42] *OSLON Square® Datasheet: LCW CQAR.CC* [online]. OSRAM Opto Semiconductors, GmbH. 2013-06-15. [vid. 2014--3-28]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic7/00088588_0.pdf/LCW%20CQAR.CC.pdf

[43] SAND, Andrea, Tiffany M. SCHMIDT, Paulo KOFUJI. *Diverse types of ganglion cell photoreceptors in the mammalian retina*. Progress in Retinal and Eye Research, Volume 31, Issue 4, July 2012, Pages 287-302. ISSN 1350-9462. [vid. 2014-3-8]. Dostupné též z: http://dx.doi.org/10.1016/j.preteyeres.2012.03.003

[44] SCHMIDT, Tiffany, M., Shih-Kuo CHEN, Samer HATTAR. *Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells: many subtypes, diverse functions.* Trends in Neurosciences, Volume 34, Issue 11, November 2011. s. 572-580. ISSN 0166-2236. [vid. 2014-3-8]. Dostupné též z: http://dx.doi.org/10.1016/j.tins.2011.07.001

[45] *SK 100 100 SA: Standard extruded heatsinks* [online]. Fischer Elektronik, GmbH & Co. KG. [vid. 2014-4-5]. Dostupné z: http://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/heatsinks/A01/Standard%20extruded%20heatsinks/VA/SK100100SA/$productCard/dimensionParameters/index.xhtml

[46] *SOLERIQ® S 13 Datasheet: GW KAGHB1.EM* [online]. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. 2013-05-08.[vid. 2013-12-10]. Dostupné z: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic2/00118219_0.pdf/GW%20KAGHB1.EM%20-%20SOLERIQ%20S%2013%20(EnglishDeutsch).pdf

[47] STEFFENSEN, Jon Lund. Redshift. *Jonls devblog* [online]. [2014] [cit. 2014-05-1]. Dostupné z: http://jonls.dk/redshift/

[48] Twilight. URBANDROID TEAM. *Android Apps on Google Play* [online]. May 7, 2014 [cit. 2014-05-1]. Dostupné z: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.urbandroid.lux

[49] URBAN, Zbyněk. *Osvětlení a svítidla z hlediska požární bezpečnosti.* Světlo, č. 4, 2006. s. 35. ISSN 1212-0812. [vid. 2013-12-1]. Dostupné též z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35817

[50] *Useful Life: Understanding LM-80, Lumen Maintenance, and LED Fixture Lifetime* [online]. Philips Solid-State Lighting Solutions, Inc. c2010. [vid. 2014-4-15]. Dostupné z: http://www.colorkinetics.com/support/whitepapers/LEDLifetime.pdf

[51] *Where brightness and quality are essential for you: Specialty light sources for medical and industrial applications* [online]. OSRAM, GmbH. [vid. 2014-4-8]. Dostupné z: http://www.osram.com/media/resource/hires/491208/medical-brochure.pdf

[52] WOOD, Brittany, Mark S. REA, Barbara PLITNICK, Mariana G. FIGUEIRO. *Light level and duration of exposure determine the impact of self-luminous tablets on melatonin suppression*. Applied Ergonomics, Volume 44, Issue 2, March 2013. s. 237-240. ISSN 0003-6870. [vid. 2014-3-11] Dostupné též z: http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2012.07.008

[53] *XLamp XM-L2* [online]. Cree, Inc.© 2014. [vid. 2014-4-5]. Dostupné z: http://cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XML2

[54] ŽÁK, Petr. *Biodynamické systémy osvětlení*. Světlo, č. 2, 2005. ISSN 1212-0812. [vid. 2014-3-14]. Dostupné též z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34942

10 Seznamy symbolů, veličin a zkratek

A_c	[–]	index cirkadiánního aktivačního účinku
a_{cv}	[–]	činitel cirkadiánní účinnosti
$C(\lambda)$	[–]	poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla
DALI		Digital Addressable Lighting Interface
IES		Illuminating Engineering Society
$K(\lambda)$	[lm·W^{-1}]	světelný účinek monochromatického záření
k_I	[lm·m^2·cd^{-1}]	kalibrační konstanta kulového integrátoru
K_m	[lm·W^{-1}]	maximum světelné účinnosti záření $K(\lambda)$
LED		light-emitting diode, elektroluminiscenční dioda
$L_{e\lambda}$	[W·sr^{-1}·m^{-2}·nm^{-1}]	spektrální prostorová a plošná hustota zářivého toku
L_{PL}	[cd·m^{-2}]	jas měřícího okénka při plném kulovém integrátoru (s měřeným svítidlem) a s rozsvícenou korekční žárovkou
L_{PR}	[cd·m^{-2}]	jas měřícího okénka při prázdném kulovém integrátoru (bez měřeného svítidla) a s rozsvícenou korekční žárovkou
L_S	[cd·m^{-2}]	jas měřícího okénka při měření zkoušeného svítidla
MCU		microcontroller, mikrokontrolér
MOS-FET		metal oxide semiconductor field effect transistor, polem řízený tranzistor
n_T, n_N	[–]	počet LED s teplým respektive neutrálním odstínem
R_1 až R_{14}	[–]	speciální indexy podání barev
R_a	[–]	všeobecný index podání barev
SEPIC		single-ended primary-inductor converter
SMD		surface mount device, součástka pro povrchovou montáž
T_c	[K]	teplota chromatičnosti
T_e	[K]	ekvivalentní teplota chromatičnosti
T_n	[K]	náhradní teplota chromatičnosti
$V(\lambda)$	[–]	poměrná spektrální citlivost fotoreceptorů při fotopickém vidění nebo také poměrná světelná účinnost
$X(\lambda)$	[–]	poměrné spektrální složení zkoumaného světla
X_{D65}	[–]	poměrné spektrální složení denního světla D65
Φ	[lm]	světelný tok
$\Phi(\lambda)$	[lm]	světelný tok monochromatického záření vlnové délky λ
Φ_{1T}, Φ_{1N}	[lm]	světelný tok jedné LED s teplým resp. neutrálním odstínem
$\Phi_e(\lambda)$	[W]	zářivý tok
Φ_T, Φ_N	[lm]	celkový světelný tok LED s teplým resp. neutrálním odstínem

11 Seznam příloh

Příloha 1 Zdrojový kód pro řídící mikroprocesor 60
Příloha 2 Deska plošných spojů (zvětšeno 2:1) 63
Příloha 3 Fotografie vyrobených svítidel 64

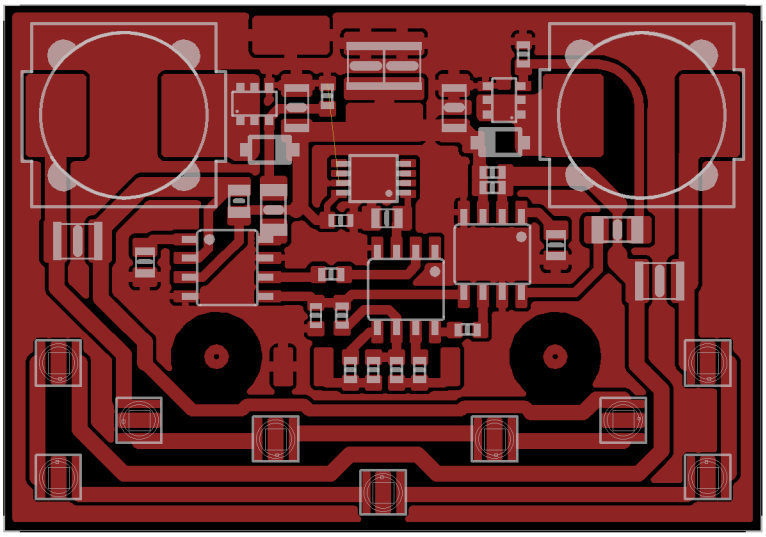
Příloha 1 Zdrojový kód pro řídící mikroprocesor

```
/*-----------------------------------------------*/
/*                                               */
/*                     DP                        */
/*                                               */
/*      Author: Jakub Kozdon                     */
/*      Date:   28.03.2014                       */
/*      Device: MC9S08QD4                        */
/*                                               */
/*      PTA4 = cold LEDs dimming                 */
/*      PTA3 = POT2                              */
/*      PTA2 = enable, POT source                */
/*      PTA1 = POT1                              */
/*      PTA0 = warm LEDs dimming                 */
/*                                               */
/*                        Last edit   22.04.2014 */
/*-----------------------------------------------*/

#include <hidef.h> /* for EnableInterrupts macro */
#include "derivative.h" /* include peripheral declarations */


#define EN PTAD_PTAD2   // definice pinu pro napajeni potenciometru a zapinani
ridicich obvodu zdroje proudu
#define cold TPM2C0V    // definice registru pro stridu studenych
#define warm TPMC0V     //   a teplych skupin LED

unsigned int power;     // pro nastaveny vykon
unsigned int cct;       //  pro teplotu chromaticnosti


void main(void) {

  // ------------------- inicializace systemu a nastaveni periferii
-------------------

  PTAD = 0x00;          // vynuluji vystupy do 0 pro omezeni prekmitu
  PTADD = 0x15;         // nastavim smer > vstup = 0, vystup = 1
  PTAPE = 0x20;         // povolim pull-up na nezapojenem PTA5

  SOPT1 = 0xE0;         // zapnu watchdog, dlouha perioda pro watchdog, povolim
stop, nastavim PTA4 jako normalni vystup
  SOPT2 = 0x00;         // watchdog ma vstup 32 kHz

  SPMSC1 = 0x40;        // vypnu podpetovou ochranu > zmenseni prikonu o ~ 90 uA,
bandgap je vypnuty
  SPMSC2 = 0x00;        // povolim stop3

  ADCCFG = 0x88;        // AD prevodnik > nizky prikon, frekvence sbernice s
delenim 1, rychle vzorkovani, 10bit
  APCTL1 = 0x0A;        // na AD je pripojen PTA1 a PTA3

  TPMMOD = 3995;        // casovac cita od 0 po 3995
  TPM2MOD = TPMMOD;     // casovac 2 cita od 0 po 3995
  TPMC0SC = 0x20;       // kanal 0 casovace je bez preruseni, mod PWM
  TPM2C0SC = 0x20;      // kanal 0 casovace 2 je bez preruseni, mod PWM
```

```
  TPMC0V = 0;          // vychozi strida 0% pro kanal 0 casovace
  TPM2C0V = 0;         // vychozi strida 0% pro kanal 0 casovace 2
  TPMSC = 0x08;        // spustim casovac bez preruseni, bus clk div by 1
  TPM2SC = 0x08;       // spustim casovac 2 bez preruseni, bus clk div by 1

  ICSTRM = NVICSTRM;   // nacteni TRIM registru
  ICSSC = NVFTRIM;     // nacteni FTRIM registru pro ISC

  SRTISC = 0x54;       // povolim preruseni, vnitrni 1 kHz zdroj, preruseni
povoleno, preruseni co 128 ms

  power = 0;           // vychozi hodnoty
  cct = 0;

  EnableInterrupts;    // povolim preruseni

  // --------------- konec inicializace systemu a nastaveni periferii
-----------------

  for(;;) {
    if (EN) _Wait;
    else _Stop;              // pokud jsou LED vypnuty prejdu do usporneho rezimu
    __RESET_WATCHDOG();      // nakrmim psa
  } /* nekonecna smycka */
}



/* ----------------------- obsluhy preruseni ----------------------------------
*/


interrupt 19 void ADC(void){   // preruseni od ADC

unsigned int pom;

  if (ADCSC1_ADCH == 3){        // v pripade, ze se merilo na kanale 3
    if (ADCR < 48) pom = 0;
    else{
      if (ADCR >= 480) pom = 103;
      else pom = ((ADCR-48)*130)/(1024 - ADCR);
    }
    cct = (cct*3 + pom)/4;    // vysledek prevodu ulozim do promenne cct;
jednoduchy filtr IIR
  }

  if (ADCSC1_ADCH == 1){       // v pripade, ze se merilo na kanale 1
    if (ADCR < 58){         // pokud je vstupni uroven pod nastavenou hodnotou
      pom = 0;              // vynuluji promennou
      EN = 0;               // a prepnu ridici obvody zdroje proudu do usporneho
rezimu
      power = 0;
      TPMC0SC_ELS0B = 0;    // nastavim PTA0 jako normalni vystup
      TPM2C0SC_ELS0B = 0;   // nastavim PTA4 jako normalni vystup
      SRTISC = 0x54;        // zmenim interval preruseni 128 ms pro zmenseni
spotreby
```

```
    }else if (ADCR > 59){      // pro hysterezi vstupni urovne
      EN = 1;                // zapnu ricidi obvody zdroje proudu
      TPMC0SC_ELS0B = 1;     // nastavim 0 po dosazeni hodnoty v TPMC0V a nastavim
PTA0 jako vystup citace  > pro zmenseni spotreby o ~ 3 uA
      TPM2C0SC_ELS0B = 1;    // nastavim 0 po dosazeni hodnoty v TPM2C0V a nastavim
PTA4 jako vystup citace > pro zmenseni spotreby o ~ 3 uA
      SRTISC = 0x51;         // zmenim interval preruseni na 8 ms pro rychlejsi
odezvu
      if (ADCR > 430) pom = 403;
      else pom = ADCR/4 + 16384/(478-ADCR) - 44; //405 - ADCR; //
      power = (power*3 + pom)/4;
    }

    if (!EN) ADCSC1 = 0x1F;     // vypnu AD prevodnik
    else ADCSC1 = 0x43;         // nebo spustim mereni na kanale 3
  }

  cold = (cold*7 + (power*cct)/10)/8;
  warm = (warm*7 + (power*(100-cct))/10)/8;
}



interrupt 23 void RTi(void){  // preruseni od RTI

  EN = 1;            // zapnu napajeni pro potenciometry
  asm nop            // kvuli delsi nabezne hrane
  asm nop
  ADCSC1 = 0x41;     // spustim mereni AD prevodnikem na kanalu 1

  SRTISC |= 0x40;    // smazu priznak preteceni
}
```

Příloha 2 **Deska plošných spojů (zvětšeno 2:1)**



Příloha 3 Fotografie vyrobených svítidel

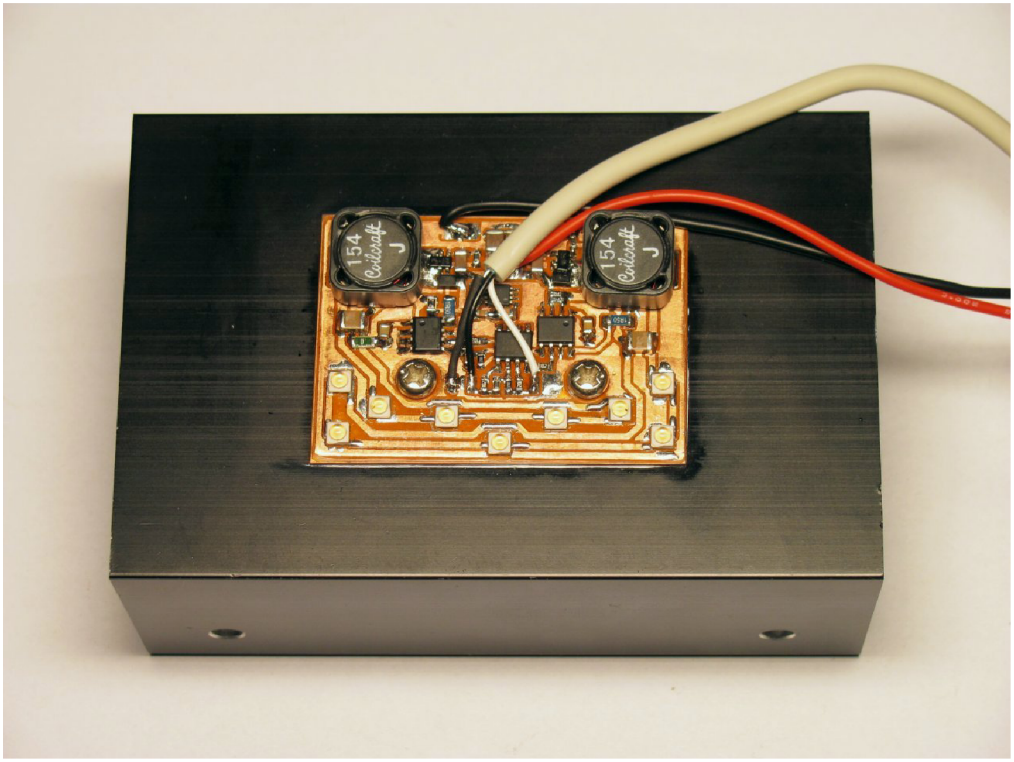


Foto 1: Pohled na svítidlo shora

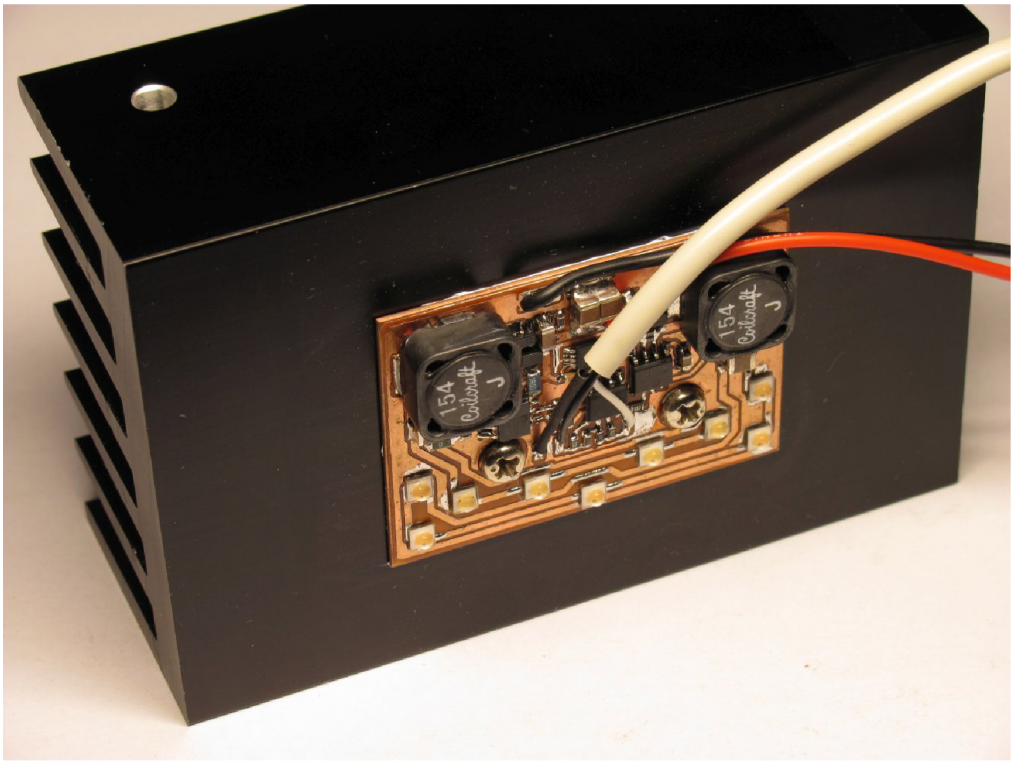


Foto 2: Izometrický pohled na svítidlo

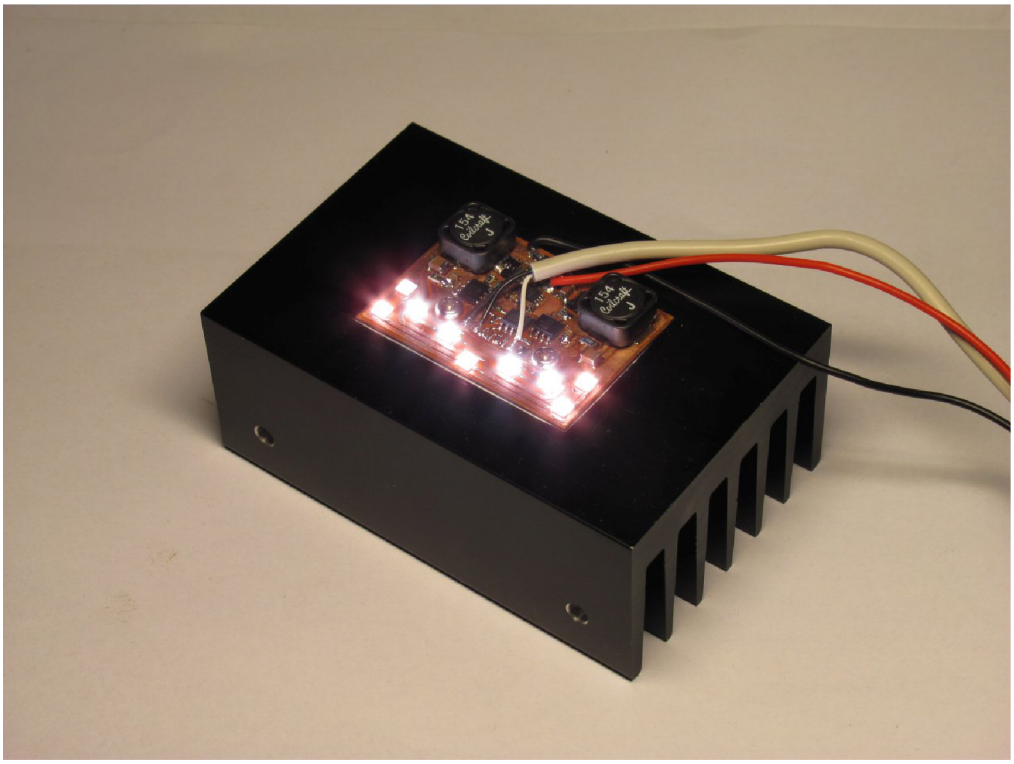


Foto 3: Nastaven přechod mezi teplým a neutrálním odstínem bílé

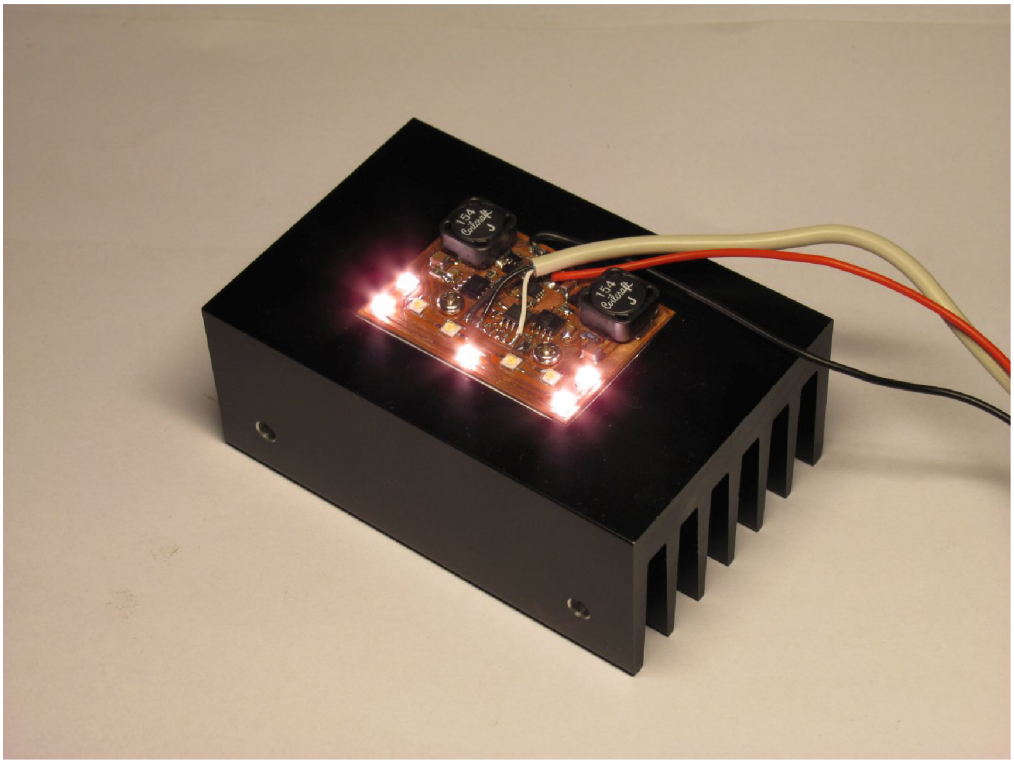


Foto 4: Rozsvícené LED s teplým odstínem bílé

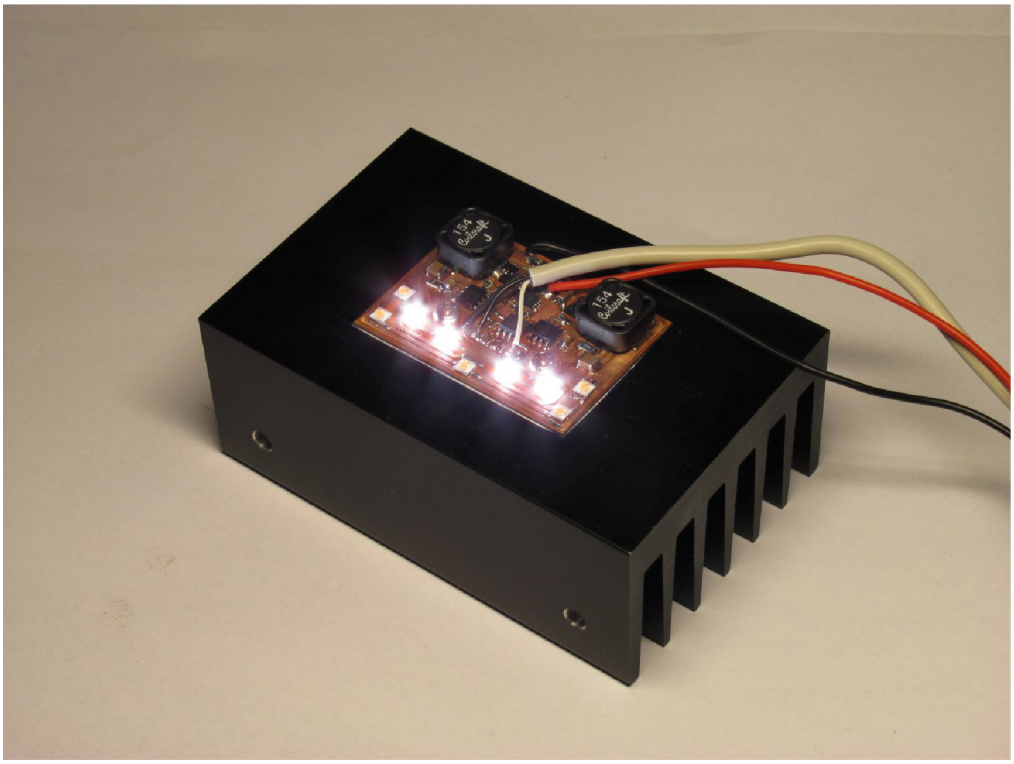


Foto 5: Svítí pouze LED s neutrálním odstínem bílé