



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE ZALÉVÁNÍ LED PÁSKŮ EPOXIDOVÝMI HMOTAMI

TECHNOLOGY OF POURING LED STRIPS WITH EPOXY MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Rudy

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Studentka: | Bc. Veronika Rudy |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie a průmyslový management |
| Vedoucí práce: | prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. |
| Akademický rok: | 2020/21 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Technologie zalévání LED pásků epoxidovými hmotami

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Literární rešerše aplikací zalévacích hmot pro osvětlení a příklady využití v osvětlovacích soustavách. Podmínky správného skladování pro zamezení degradace a znehodnocení materiálu. Analýza stávajících technologií v průmyslové praxi (doby tuhnutí, chemické procesy epoxidu, kvalita povrchu, metody zušlechtnění povrchu, opravy, dávkování, stárnutí, dostupnosti, ceny, pohledové vlastnosti hmot, vhodnost použití). Výběr epoxidových hmot pro elektroniku a LED aplikace. Výběr souvisejících elektrochemických produktů (ochranné laky, pigmentační látky apod.).

Zhotovení několika vzorků lineárních LED svítidel s různými kombinacemi délek, množství pigmentace, ochranných laků apod. Měření vzorků svítidel ve fotometrické laboratoři – stanovení optické ztráty a změny teploty chromatičnosti. Jasová analýza homogenity světelné plochy.

Testování životnosti vzorků – šoková komora, venkovní dlouhodobý test (změny teploty, UV záření, spínání s veřejným osvětlením). Vyhodnocení vzorků po delší době testování (několik měsíců). Vyhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých kombinací. Přenesení poznatků do praxe – vytvoření předpokládaného výrobního plánu pro aplikaci v sériové výrobě (výrobní postupy, potřebná zařízení apod.).

Cíle diplomové práce:

Úvod do problematiky fotometrie, zalévacích hmot a metod testování dané technologie.

Návrh metodiky zkoušek.

Realizace experimentálních zkoušek.

Technické zhodnocení dosažených výsledků.

Technologicko–ekonomické zhodnocení.

Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

BAXANT, P. Světelná technika [online]. Brno, 2013 [vid. 2020-10-18]. Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MSVT/Ucebni_text_MSVT.pdf. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.

PORTUŽÁK, R. Světelná technika [online]. 2011, , 255 [vid. 2020-10-18]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/CVUT-6-Svetelna.pdf>

Laboratoř světelné techniky [on-line], [vid. 2020-10-18]. Dostupný z [www](http://www.ueen.feec.vutbr.cz/light-laboratory/):

PLCH, J., KUTAL, K. Příklady měření jasů, Kurz osvětlovací techniky XXV [online]. Česká společnost pro osvětlování, VŠB-TU Ostrava, 2006 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: http://www.artmetal-cz.com/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ky/sborn%C3%ADky/Kurz_osvetlovaci_techniky_XXV.pdf

NARENDRAN, N., GU, Y., FREYSSINIER, J. P., YU, H. DENG, L. Solid-state lighting :failure analysis of white LED. Journal of Crystal Growth 268 (2004). pp. 449–456. ISSN: 0022-0248.

HUANG, J. et al. Lumen degradation modeling of white-light LEDs in step stress accelerated degradation test. Reliability Engineering and System Safety. 154 (2016) pp. 152–159. ISSN: 0951-8320.

HABEL, J. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 622 s. ISBN:978-80-86534-21-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá problematikou zalévání LED pásků epoxidovými hmotami. Rešeršní část obsahuje úvod do fotometrie a shrnuje druhy zalévacích hmot a jejich charakteristiky. V praktické části se zkoumá vliv množství použitého pigmentu na fotometrické veličiny. To je zpracováno pomocí provedených měření na goniofotometru a integrační kouli pro vyrobené vzorky o různém množství pigmentu. Dále byla provedena jasová analýza a dlouhodobý venkovní test.

Klíčová slova

fotometrie, zalévací hmoty, epoxidové hmoty, zalévací hmoty pro elektroniku, goniofotometr, kulový integrátor, teplota chromatičnosti, světelný tok

ABSTRACT

The thesis deals with the pouring of epoxy materials over LED strips. The research part contains an introduction to photometry and summarizes the types of potting compounds along with their characteristics. The practical part delves into the effect different amount of pigment has on the photometric properties. This is assessed based on verified measurements performed with the help of a goniophotometer on samples with different amounts of pigment, which were created using an integration sphere. Furthermore, a brightness analysis and a long-term outdoor test were performed.

Key words

photometry, encapsulants, epoxy resin, encapsulation for electronic, goniophotometr, spherical integrator, color temperature, luminous flux

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RUDY, Veronika. *Technologie zalévání LED pásků epoxidovými hmotami*. Brno 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 63 s. prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Technologie zalévání LED pásků epoxidovými hmotami** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Veronika Rudy

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu prof. Ing. Miroslavovi Píškovi CSc. za cenné připomínky, rady a čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala firmě Lamberga, která mi byla po dobu magisterského studia velkou oporou a za její pomoci jsem mohla realizovat tuto diplomovou práci. A v neposlední řadě svým rodičům, Anežce a Zdeňkovi, že jsem díky nim mohla studovat.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PROHLÁŠENÍ | 4 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 5 |
| OBSAH..... | 6 |
| ÚVOD | 8 |
| 1 ÚVOD DO FOTOMETRIE | 9 |
| 1.1 Základní pojmy a veličiny fotometrie | 9 |
| 1.1.1 Světelný tok | 9 |
| 1.1.2 Prostorový úhel | 9 |
| 1.1.3 Svítivost | 11 |
| 1.1.4 Osvětlenost | 12 |
| 1.1.5 Jas | 13 |
| 1.1.6 Světlení | 13 |
| 1.2 Barevné vlastnosti světla | 13 |
| 1.2.1 Barva..... | 14 |
| 1.2.1.1 Tón..... | 14 |
| 1.2.1.2 Čistota..... | 15 |
| 1.2.1.3 Jas | 15 |
| 1.2.2 Míchání barev | 15 |
| 1.2.3 Trichromatické souřadnicové systémy | 17 |
| 1.2.4 Atlas barev | 17 |
| 1.2.5 Teplota chromatičnosti | 19 |
| 1.2.6 Index podání barev | 20 |
| 1.3 Fyziologie zrakového systému | 20 |
| 1.3.1 Anatomie oka | 20 |
| 1.3.2 Onemocnění a vady lidského oka | 21 |
| 1.3.3 Mezní stavy zraku a adaptační mechanismus | 22 |
| 1.3.4 Rozlišovací schopnost | 22 |
| 2 ZDROJE SVĚTLA | 23 |
| 2.1 Výkonové LED (Lighting Emited Diode) | 23 |
| 2.1.1 Fyzikální podstata a konstrukce LED čipu | 23 |
| 2.1.2 Stanovení životnosti a degradace LED | 25 |
| 2.1.3 Napájení LED..... | 25 |
| 2.1.4 Předřadná zařízení..... | 26 |

| | |
|--|----|
| 2.1.5 Ostatní elektrické parametry | 28 |
| 3 ZALÉVACÍ HMOTY | 31 |
| 3.1 Epoxidy | 32 |
| 3.1.1 Impregnační laky..... | 32 |
| 3.1.2 Pryskyřice | 33 |
| 3.2 Polybutadieny..... | 34 |
| 3.3 Polyuretany | 34 |
| 3.4 Silikony | 34 |
| 4 PRAKTICKÁ ČÁST | 36 |
| 4.1 Požadavky na zalévací hmotu..... | 36 |
| 4.2 Výběr zalévací hmoty | 39 |
| 4.3 Výroba vzorků pro venkovní dlouhodobý test..... | 40 |
| 4.3.1 Vlastnosti materiálu a podmínky skladování | 40 |
| 4.3.2 Bezpečnost práce | 40 |
| 4.3.3 Příprava profilů pro zalévání | 41 |
| 4.3.4 Zpracování zalévací hmoty | 41 |
| 4.3.5 Vytvrzení hmoty | 42 |
| 5 MĚŘENÍ SVÍTIDEL VE FOTOMETRICKÉ LABORATOŘI | 43 |
| 5.1 Měření křivky svítivosti na goniofotometru | 43 |
| 5.2 Měření světelného toku v kulovém integrátoru | 46 |
| 5.3 Změna teploty chromatičnosti..... | 47 |
| 6 TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI VZORKŮ..... | 49 |
| 6.1 Zkouška vysokým gradientem teplot | 49 |
| 6.2 Venkovní dlouhodobý test | 50 |
| 6.2.1 Pokles světelného toku | 52 |
| 6.2.2 Změna teploty chromatičnosti | 53 |
| 6.2.3 Vizuelní zhodnocení funkčnosti vzorků | 53 |
| 7 JASOVÁ ANALÝZA | 55 |
| 9 ZÁVĚR | 60 |
| Seznam použitých zdrojů | 61 |
| Seznam použitých symbolů a zkratk | 63 |

ÚVOD

Zdroje světla lidé používají již od pradávna. Vývoj těchto zdrojů umělého osvětlení prodělal dlouhou cestu od svícení loučí, voskovou svíčkou, přes veřejné osvětlení hořením plynu, vynález žárovky až k dnešním LED technologiím. Dnešní moderní civilizovaná společnost si již život bez světelné techniky nedokáže představit. Tato zařízení nám vytváří vhodné světelné podmínky pro práci, čas trávený doma s rodinou, bezpečný dopravní provoz atd. Ze široké nabídky si můžeme volit světla o různých výkonech, teplotách chromatičnosti, s možností stmívání, časovače zapnutí/vypnutí či imitací slunce pro opálení kůže, dodání vitamínu D, podporu růstu rostlin a jiné. Lze s jistotou říct, že díky světelné technice se odstartovala průmyslová revoluce, jelikož již bylo možné pracovat v prostorech bez dostatku denního světla, tím se zvýšila produkce průmyslu.

K technické stránce světel jsem se však dostala až jako zaměstnanec firmy Lamberga, což mě přivedlo k tomuto tématu diplomové práce, i když se jedná o jiný obor, než je obor mého studia.

Práce se v rešeršní části zabývá úvodem do fotometrie a zalévacími hmotami. Tyto poznatky byly dále zužitkovány během praktické práce, která se zabývá výrobou svítidel za použití epoxidových hmot. Zalití LED pásků nahrazuje použití difuzoru, se kterým by svítidlo dosahovalo nižší mechanické odolnosti. Proto je možno takto vyrobená svítidla použít i na místech ohrožených vandalismem, jako jsou například autobusové zastávky, lavičky v parku a podobně.

1 ÚVOD DO FOTOMETRIE

1.1 Základní pojmy a veličiny fotometrie

Světlo se nazývá ta část elektromagnetického záření, kterou lze detekovat lidským zrakem. Oko je schopné toto záření zachytit, a to včetně jeho prostorového rozložení a částečně i spektrálního složení a intenzity. Výsledkem pak je zrakový vjem. Aby ale mohl vzniknout, je potřebný světelný zdroj, který do prostoru toto světlo vyzáří. Po dopadu světleného paprsku na povrch tělesa se část pohltí, část odrazí a část může prostoupit. Pro zrak je důležitá ta část světla, která se odrazí a doputuje k lidskému oku, kde dopadne na světlocitné buňky sítnice a vyvolá tak patřičnou fotochemickou reakci. Jak silná reakce vznikne, je dáno absolutním množstvím energie i spektrálním složením, tj vlnovou délkou světla. Zatímco zářivá energie (výkon) je udávána a měřena ve wattech, světelná energie (světelný výkon) je udávána a měřena v lumenech [lm]. Tím pádem je lumen základní jednotkou světelné techniky a vyjadřuje výkon světelného zdroje v ekvivalentu, který je možný psychosenzoricky vyhodnotit lidským zrakem. Z hlediska velikosti můžeme 1 lumen definovat jako $1/683 \text{ W}$ monochromatického záření s frekvencí $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$, což je frekvence, při níž má oko běžného pozorovatele normou stanovenou nejvyšší účinnost optického záření rovnou 100 %. Avšak díky diverzitě populace je pochopitelné, že různí jedinci mají různou citlivost na světlo [1].

1.1.1 Světelný tok

Světelný tok představuje základní jednotku ve světelné technice. Udává množství světla potřebného k vyvolání zrakového vjemu. Jednotkou světelného toku je lumen [lm] a značí se písmenem řecké abecedy Φ [2].

Světelný tok monochromatického záření o vlnové délce λ se určí vztahem (1.1) podle [2].

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (1.1)$$

| | | |
|------|------------------------------------|---|
| kde: | $\Phi(\lambda)$ [lm] | je světelný tok monochromatického záření o vlnové délce λ ; |
| | $K(\lambda)$ [lm·W ⁻¹] | je světelný účinek monochromatického záření rovný poměru světelného toku a jemu odpovídajícímu zářivému toku; |
| | Φ_e [W] | je spektrální zářivý tok o jedné specifické vlnové délce λ . |

V soustavě SI se jednotky světelně technických veličin odvozují od základní jednotky svítivosti (1 kandela), tj. od svítivosti zdroje záření o jediné frekvenci $\nu = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$, při zářivosti zdroje v daném směru $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. Zmíněná frekvence ν je ve standardním ovzduší tzv. základní vlnové délce λ_m ($\approx 555 \text{ nm}$) [2].

1.1.2 Prostorový úhel

Světelný tok vychází ze zdroje v určitém prostorovém úhlu, což je ta část prostoru, která se vymezení obecnou kuželosečkou, jejíž vrch je v místě středu vycházejícího záření. Velikostně je roven ploše, kterou tato kuželosečka vytne na povrchu jednotkové koule (koule o poloměru 1 m), jejíž střed je shodný s vrcholem kužele, viz obr. 1.1 [1].



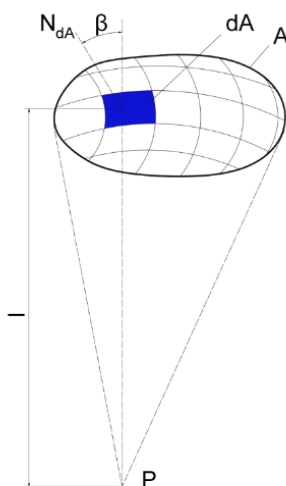
Obr. 1.1 Prostorový úhel kulového vrchlíku a kulového pásu - podle [1].

Prostorový úhel zastává ve fotometrii důležitou roli, neboť je součástí výpočtu pro zjištění svítivosti. Značí se písmenem řecké abecedy Ω a jeho jednotkou je jeden steradián [sr] určený jednotkovou plochou (1 m^2) [3].

Prostorový úhel, pod nímž je ze středu koule vidět plocha A (viz obr. 1.2), se stanoví vztahem (1.2) podle [2].

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (1.2)$$

| | | | |
|------|----------|-------------------|------------------------------------|
| kde: | Ω | [sr] | je prostorový úhel; |
| | A | [m ²] | je plocha vyřatá na povrchu koule; |
| | r | [m] | je poloměr koule. |



Obr. 1.2 Vymezení prostorové úhlu - podle [2].

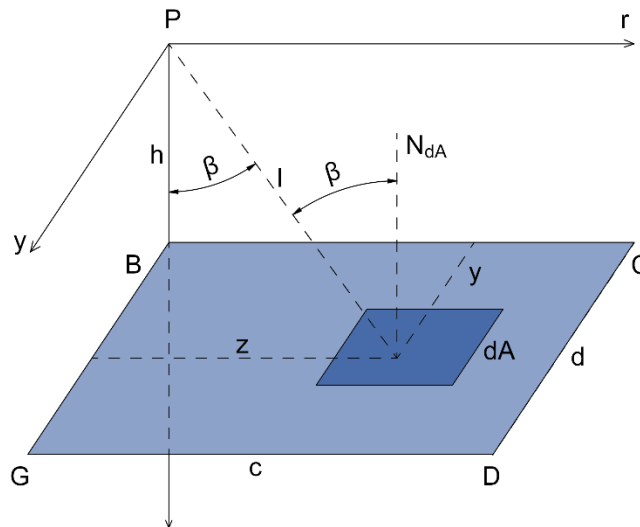
Největší hodnoty $\Omega_{\max} = 4\pi$ nabývá prostorový úhel pro plochu A rovnou povrchu celé koule (tj. $A = 4\pi r^2$).

V praxi se často počítá prostorový úhel, pod kterým se z určité vzdálenosti pozoruje obdélníková plocha. Tento pozorovaný obdélník BCDG (viz obr. 1.3) leží v souřadnicové soustavě x, y, z v rovině rovnoběžné s rovinou xy ve vzdálenosti h od počátku P soustavy [2].

Prostorový úhel, pod nímž je z bodu P vidět obdélník BCDG, se stanoví z rovnice (1.3) podle [4].

$$\Omega = \arctg \frac{c \cdot d}{h \cdot \sqrt{c^2 + d^2 + h^2}} \quad (1.3)$$

kde: Ω [sr] je prostorový úhel;
 c, d [m] jsou strany obdélníku.



Obr. 1.3 Ilustrace k rovnici 1.3 - podle [2].

1.1.3 Svítivost

Další fotometrickou veličinou je svítivost, značí se I_v a její jednotka je kandela [cd]. Svítivost patří mezi základní jednotky SI soustavy. Dle usnesení 16. generální konference „Míry a váhy“ z roku 1979 je kandela rovna svítivosti zdroje, který vyzařuje v určitém směru monochromatické záření o frekvenci $540 \cdot 10^{12}$ Hz, přičemž zářivost zdroje v tomto směru je $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$. Může být určena pomocí vymezení malého prostorového úhlu, pokud je známý světelný tok, který takovým prostorovým úhlem prochází [1, 2].

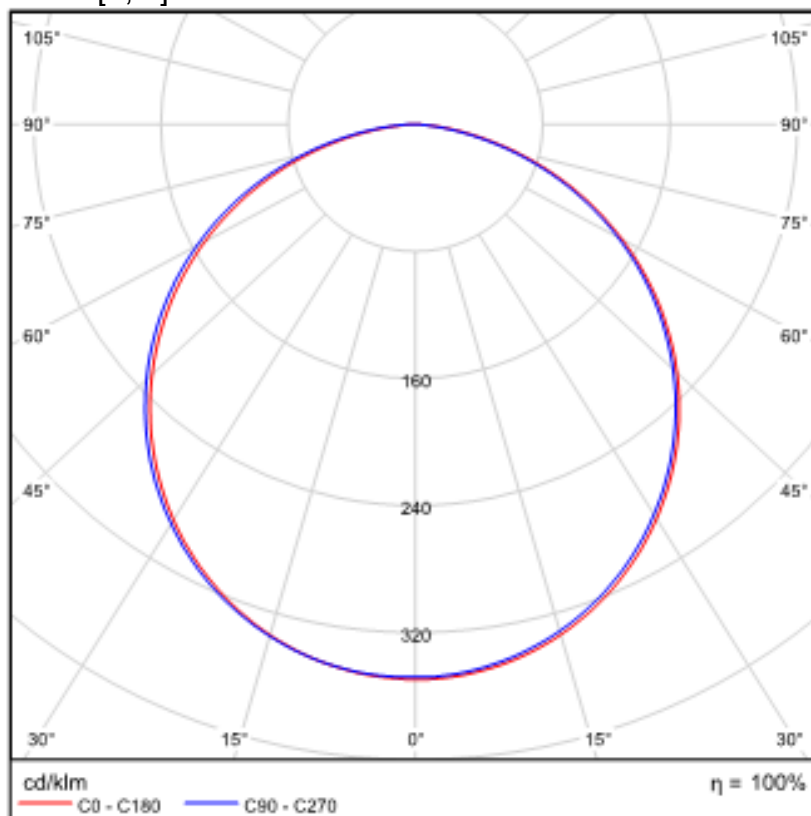
Svítivost vypočítáme ze vztahu (1.4) podle [1].

$$I_v = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1.4)$$

kde: I_v [cd] je svítivost;
 $d\Phi$ [lm] světelný tok;
 $d\Omega$ [sr] prostorový úhel.

Svítivost má svou velikost a směr, může být tedy brána jako vektor. Její směr je určen úhlem γ , a pokud spojíme všechny její koncové body od bodového zdroje světla, získáme tzv. fotometrickou plochu svítivosti. Při výpočtech obvykle stačí znát pouze některé řezy touto plochou, a to rovinami, které procházejí bodovým zdrojem. V těchto rovinách řezů tak vzniknou čáry (křivky) svítivosti v polárních souřadnicích

(viz obr. 1.4). Počátek těchto diagramů se umísťuje do světelného středu zdroje či svítidla. Základní či vztažný směr diagramu, od něhož se měří úhly, se obvykle umísťuje do směru normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje světla. Jednotlivé křivky se získají z měření na goniofotometru. Důležitou znalostí je, že svítivost je definovaná pouze pro bodové zdroje, což je zdroj s nekonečně malým rozměrem. V praxi je tato podmínka nerealizovatelná, a tak se pokládá za bodový ten zdroj, jehož největší rozměr nepřesahuje 1/10 vzdálenosti, ze které je tento bod pozorován. Chyba výpočtů, které jsou dané tímto zjednodušením, běžně nepřesahuje 1 %. Reálné zdroje, které tuto podmínku nemohou splnit, se rozdělí na zdroje menší, které již této podmínce vyhovují. Výsledné působení je pak dáno společným působením jednotlivých elementárních částí [1, 2].



Obr. 1.4 Křivka svítivosti v polárních souřadnicích.

1.1.4 Osvětlenost

Po dopadu světelného toku na osvětlovanou plochu vznikne určitá osvětlenost (intenzita osvětlení). Tato veličina je v praxi nejsledovanější ze světelné techniky. Její jednotkou je lux [lx] a značí se písmenem E (A).

Osvětlenost se určí vztahem (1.5) podle [1].

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \tag{1.5}$$

kde: E [lx] je osvětlenost (intenzita osvětlení);
 dΦ [lm] je velikost světelného toku;
 dS [m²] je plocha, na kterou světelný tok dopadá.

1.1.5 Jas

Světelně technická veličina, na kterou přímo reaguje zrakový orgán, je jas. Z fyziologického hlediska jde o prakticky nejvýznamnější veličinu. Jas vyjadřuje množství světelného toku, který se odráží od daného elementu (nebo z něj vychází) v určitém směru k místu pozorovatele. Jednotkou jasu je kandela na čtverečný metr [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$] a značí se písmenem L [1].

Jas je definovaný vztahem (1.6) podle [1].

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_n} \quad (1.6)$$

kde: L [$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$] je jas;
 $d\Phi$ [lm] je velikost světelného toku;
 $d\Omega$ [sr] je velikost prostorového úhlu;
 dA_n [m^2] je plocha kolmá k ose svazku paprsků, na které se realizuje plošná hustota světelného toku.

1.1.6 Světlení

Světlení je veličina ekvivalentní k osvětlení. Rozdíl je v tom, že u osvětlení se bere dopadající světelný tok na osvětlovanou plochu, kdežto světlení definuje světelný tok vyzařující (resp. odražený) z dané plochy. Jednotkou světlení je [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$] a značí se písmenem H [1].

Světlení je definované vztahem (1.7) podle [1].

$$H = \frac{d\Phi}{dS} \quad (1.7)$$

kde: H [$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$] je světlení;
 $d\Phi$ [lm] je velikost světelného toku;
 dS [m^2] je plocha, ze které se vyzařuje Φ .

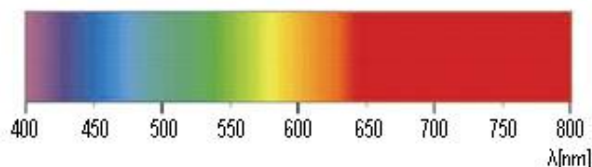
1.2 Barevné vlastnosti světla

Světlo nezpůsobuje pouze zrakový vjem, ale i barevný počitek. Vnímání těchto počitků je složitý proces, který se zakládá na fyziologii lidského oka a každý jedinec může jednotlivé barvy vnímat trochu jinak. Některá zvířata dokonce tuto vlastnost postrádají a jsou tzv. „barvoslepá“. Barevné vlastnosti primárních světelných zdrojů se označují názvem chromatičnost a jsou dány spektrálním složením vyzařujícího zdroje, nebo se mohou vyjádřit všeobecným indexem barevného podání R_a . Oproti tomu barevné vlastnosti sekundárních světelných zdrojů (látek, materiálů) se označují jako tzv. kolorita. Kolorita je dána spektrálním složením zdroje, který osvětluje objekt, a spektrální odrazností či propustností materiálu [4].

Vnímání barev závisí na okolních podmínkách. Za jistých okolností je možné vnímat dvě různé barvy jako jednu. To je dáno tím, že lidské oko obsahuje čípkové buňky, které jsou citlivé na dlouhé, střední a krátké vlnové délky (ρ , γ , β) a tyto čípkové buňky se mohou stimulovat takovým způsobem, že se nám barvy jeví stejně. Příčinou tohoto jevu může

být druh osvětlení, nebo odlišná citlivost na barvu v lidském oku. Tomuto jevu se říká metamerie [4].

Složení viditelného světla je znázorněno na obr. 1.6 a popsáno v tabulce 1.1.



Obr. 1.5 Rozložení barev ve spektrální oblasti viditelného záření - podle [4].

1.2.1 Barva

Barvy dělíme do dvou skupin. První skupina jsou barvy chromatické (pestré) a druhou skupinou jsou barvy achromatické (nepestré). Chromatické barvy jsou takové barvy, které mají barevný tón (červená, modrá atd.). Dělíme je na jednoduché a složené. Jednoduché barvy jsou charakterizované pouze jednou vlnovou délkou, jsou to barvy se stejným odstínem a odlišují se od sebe rozdílnou intenzitou jasu. Složené barvy jsou ty, které mají spektrální průběh přes více vlnových délek. Druhou skupinu, achromatické barvy, tvoří naopak barva bílá, černá a odstíny šedi. Spektrální složení achromatických barev vystihuje tzv. izoenergetická přímka, která je rovnoběžná s osou vlnových délek. Dále se barvy dělí na spektrální a nespektrální. Spektrální barvy jsou obsaženy ve spektru slunečního záření. Nespektrální barvy nejsou obsaženy ani ve slunečním záření, ani v záření umělého zdroje. Jsou označovány jako purpurové a vznikají při míchání krajních barev viditelného spektra (červená a fialová) [4, 5].

K popisu barev používáme tón, čistotu a jas.

1.2.1.1 Tón

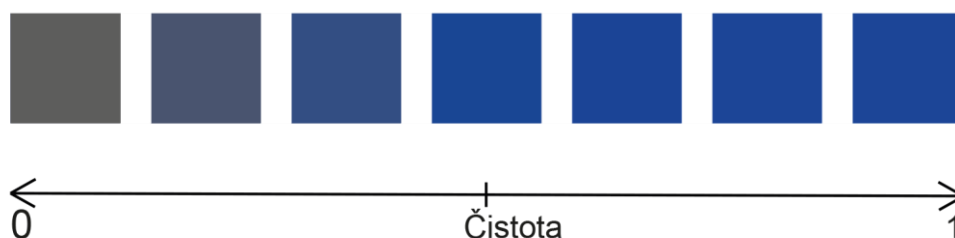
Tón je jeden z nejznámějších atributů popisujících barvu. Dle tónu můžeme pojmenovat barvu jako červenou, modrou, zelenou atd. Tyto barvy se řadí mezi spektrální, a proto můžeme určovat tón pouze u barev spektra. Dále je můžeme označit jako barvy pestré, mění se u nich tedy jen tón, čistota a světlost zůstávají stejné. Díky tomu u nich lze určit vlnovou délku. Složení viditelného spektra je znázorněno v tabulce 1.1 [5].

Tab. 1.1 Barevné tóny viditelného světla [4].

| Vlnová délka λ [nm] | Barevný tón spektrální barvy |
|-----------------------------|------------------------------|
| 380÷420 | Fialová |
| 420÷440 | Modrofialová |
| 440÷460 | Modrá |
| 460÷510 | Modrozelená |
| 510÷560 | Zelená |
| 560÷590 | Žlutá |
| 590÷650 | Oranžová |
| 650÷780 | Červená |

1.2.1.2 Čistota

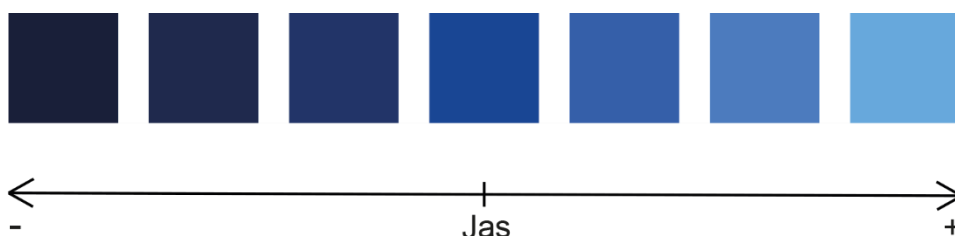
Čistota nebo také sytost barvy je vlastností zrakového vjemu. Udává, jak moc je daná barva intenzivní. Čistě sytými barvami jsou spektrální barvy. Jejich sytost se rovná jedné. Sytost barvy se může snížit přidáním podílu jiného tónu nebo „bílého“ světla (sluneční záření). Po snížení sytosti barvy se tato barva pak těžko zařazuje ve viditelném spektru, jelikož přidáním jiného tónu se nám přidá i vlnová délka tohoto přidaného tónu. Achromatické barvy mají sytost rovnu nule [4, 5].



Obr. 1.6 Změna čistoty (sytosti).

1.2.1.3 Jas

Posledním atributem barvy je jas, který nám udává světlost, či tmavost dané barvy. Jas je celkové množství světla dopadajícího do oka ze všech částí viditelného spektra. Čím intenzivnější je světlo, tím světlejší je barva [5].



Obr. 1.7 Změna jasu.

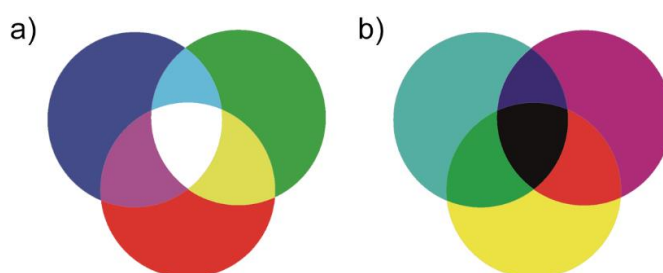
1.2.2 Míchání barev

Dva nebo více barevných podnětů se mohou smísit a vytvořit tak výsledný barevný vjem. Po smíšení však nejsme schopni zpětně určit, z jakých komponentů podnět vznikl. Pokud se bere barevné spektrum jako směs všech dostupných monochromatických světél, pak se může brát každá barva jako kompozice těchto dílčích barevných podnětů. Lidský zrak obsahuje pouze tři typy barevných čípků, které rozlišují vjem na dlouhé, krátké a střední vlnové délky. Proto po dopadu světla na sítnici dochází k razantní redukci spektrální informace a k rozdělení barevné informace na tři základní podněty, které následně smíchají výslednou barvu. Míchání barev může být aditivní nebo substantivní [1].

Aditivní míšení barev je základem subjektivní kolorimetrie. Principem tohoto míšení je prosté sečtení jednotlivých podnětů do jednoho. Tohoto míšení využívá např. lidské oko. Jako aditivní míchání barev lze vnímat, i pokud se periodicky střídají

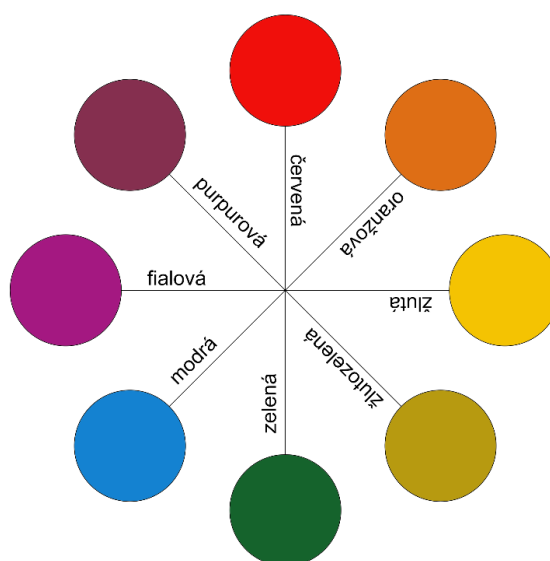
barevné podněty v takové rychlosti, že tuto změnu není lidské oko schopné zaznamenat. Výsledná barva je pak průměrnou hodnotou těchto barev. V neposlední řadě je aditivní míchání barev tvořeno i mozaikou velice malých plošek, které lidské oko není schopné rozlišit od sebe. Oko rozliší až jejich celkové působení v součtové ploše. Tento princip se využívá u prakticky všech displejů a zobrazovacích zařízení [1].

Subtraktivní míšení barev je druhým základním způsobem míchání barev, kde toto míchání vychází z opačného principu. Výsledný barevný vjem vzniká z původního světelného podnětu odečtením (odfiltrováním) určitých spektrálních částí (viz obr. 1.8). Tohoto míchání barev lze dosáhnout např. spektrální odrazností nebo propustností materiálu. Tuto metodu využívají tisková zařízení, kde např. smícháním inkoustů s různým činitelem odrazu vznikají po osvětlení papíru různé odražené složky vzniklé odrazem od dané směsi pigmentů. Z toho lze vyvodit, že subtraktivní míšení je tedy spíše pojmem vytvořeným člověkem [4].



Obr. 1.8 Způsoby míchání barev – a) aditivní; b) subtraktivní - podle [1].

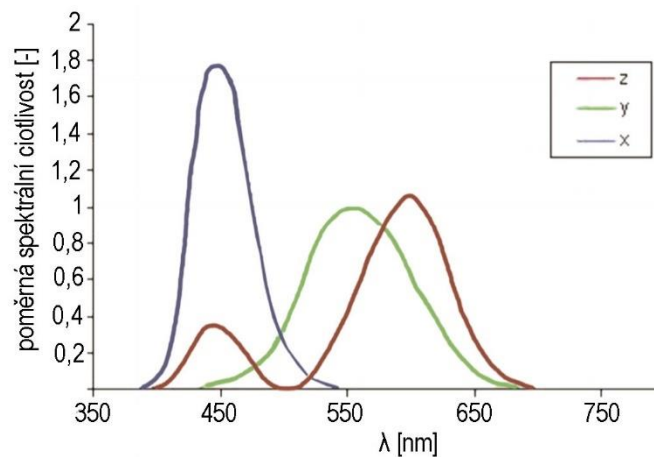
S mícháním také souvisí pojem tzv. doplňkové barvy. Každá barva má svoji barvu doplňkovou a jejich vzájemným smícháním ve správném poměru vznikne barva nepestrá, šedá. Doplňkové barvy pak společně s černou barvou tvoří CMYK (*Cyan, Magenta, Yellow, black*) prostor. Černá barva se přidala z důvodu, že smícháním pouze tří základních barev nevznikne čistě černá barva, ale barva tmavě šedá (viz obr. 1.9). Příklad doplňkových barev je znázorněn na obrázku 1.10 [1, 4].



Obr. 1.9 Doplňkové barvy - podle [2].

1.2.3 Trichromatické souřadnicové systémy

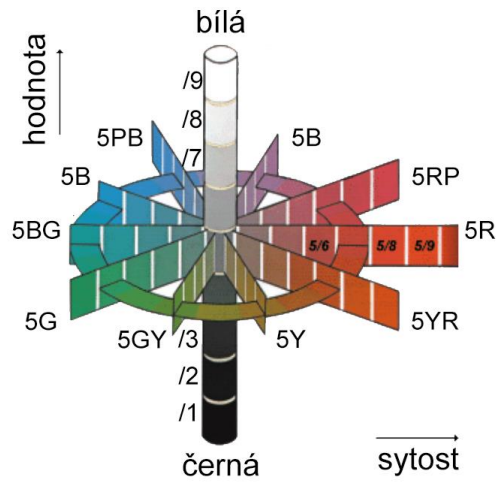
Trichromatická soustava byla vytvořena pro objektivní popis barev. Stanovila ji Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. Soustava se nazývá trichromatická, jelikož k vytvoření jakékoliv barvy jsou použity tři základní barvy, které se míchají v různých poměrech. Soustavu definují tři barevné funkce, které jsou označeny malými písmeny $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ (viz obr. 1.11). Velkými písmeny X, Y, Z pak značíme trichromatické složky. Ty udávají kolorimetrické množství všech tří barev, jež vyvolají požadovaný barevný vjem [4].



Obr. 1.10 Barevní činitelé $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ - podle [4].

1.2.4 Atlas barev

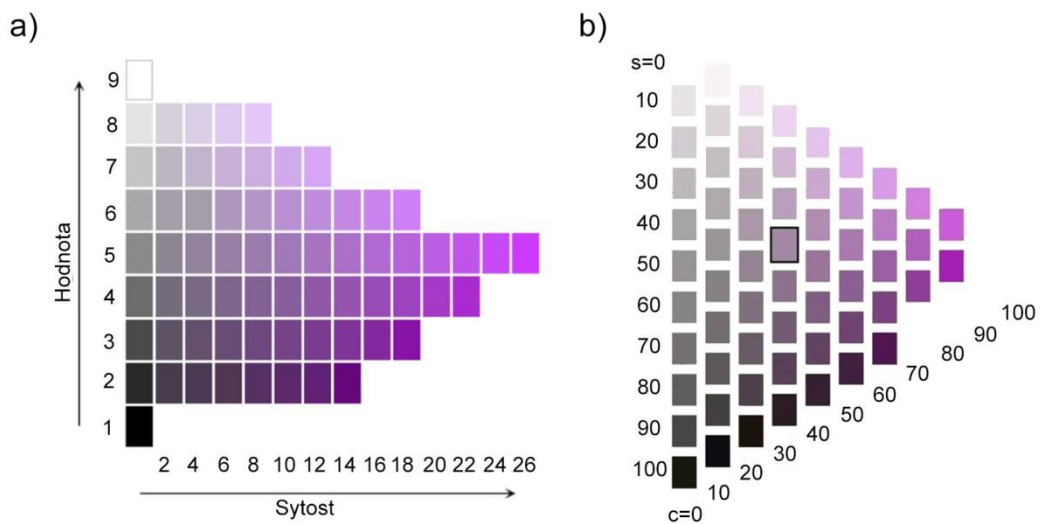
Atlasy barev jsou řazeny k prostředkům barevnostní komunikace, jako jsou předlohy, standardní řady, barevné specifikátory atd. Atlas barev je chápán jako systematický soubor barevně odstupňovaných vzorků. Toto barevné odstupňování se může u nejvýznamnějších představitelů lišit. V současnosti jsou nejvýznamnější Munsellův atlas barev (viz obr. 1.11) a švédský NCS (*Natural Colour System*). U obou těchto atlasů lze nalézt přibližně stejné uspořádání. V cylindrické (válcové) soustavě souřadnic po obvodové linii, resp. podle rovníku, jsou umístěny barvy pestré (chromatické), vertikální osa je tvořena šedou (achromatickou) řadou, kde na spodní straně začíná černou a nahoře končí bílou barvou. Ve směru rádiusvektoru (od svislé osy k obvodu) narůstá čistota, tento princip je znázorněn na obr. 1.12 [6].



Obr. 1.11 Munsellův prostor - podle [6].

Tab. 1.2 NCS versus Munsellův systém [7].

| Natural Colour System | Munsell Colour Notation |
|--|--------------------------------------|
| Více chromatický | Lze poměrně dobře vytvořit recepturu |
| Rovnoměrně odstupňovaný | Nerovnoměrně odstupňovaný |
| Nelze použít pro vzorování a odhad receptury | Lze použít pro vzorkování |
| Nesymetrické těleso | Symetrické těleso |



Obr. 1.12 Znáornění a) NCS systému a b) Munsellova systému - podle [7].

1.2.5 Teplota chromatičnosti

K popisu barvy jde vedle trichromatických souřadnic využít též teplotu chromatičnosti, která se značí písmeny T_c a udává se v kelvinech [K]. Vychází z fyziologických aspektů zrakového vnímání, které zaznamenávají změnu teploty chromatičnosti světla během denního cyklu. Tzv. teplým barvám osvětlení odpovídají nižší teploty chromatičnosti a opačně (viz obr. 1.13). Rychlost změny teplot během dne se výrazně liší podle ročního období a času. Kolem rozbřesku a soumraku jsou tyto změny nejrychlejší. V dnešní době roste snaha přizpůsobit vnitřní osvětlení těmto principům, a tak přes den svítit bílými studenými svítidly (např. 6 000 K) a k večeru svítit svítidly s nižší teplotou chromatičnosti, tedy teplým světlem (například 2 700 K) [1, 2].



Obr. 1.13 Teplota chromatičnosti žárovek [9].

Volba teploty chromatičnosti ovlivňuje lidské chování, soustředění a výkon. S využitím těchto znalostí tak lze ovlivnit lidské psychické a fyziologické rozložení. Rozsah barevného spektra je od teplých odstínů až ke chladným:

- teplá bílá $\pm 2\,700\text{--}3\,200\text{ K}$.
Tento odstín vyvolává příjemnou atmosféru. Je určena pro večerní osvětlení pro obývací prostory a ložnice. Komerčně se využívá v hotelích, restauracích, kavárnách a podobně;
- neutrální bílá $\pm 4\,000\text{ K}$
Všestranné využití pro domácnosti, kanceláře, nákupní střediska, obchody a jiné;
- studená bílá $\pm 5\,000\text{--}6\,000\text{ K}$
Využívá se pro osvětlení dílny, kanceláře, obchodů, sklepů, pivnic a dalších míst bez přirozeného denního světla;
- denní osvětlení nad $6\,500\text{ K}$
Osvětlení, které se nejvíce přibližuje hodnotám přirozeného denního světla. Vhodné pro místnosti, kde je potřeba zvýšená mentální činnost. Dále se využívá pro maximální noční nasvícení nebo světla pro detailní práci. Nemocnice, dílny, klenotnictví atd. [9].

1.2.6 Index podání barev

Pro určení, jaký vliv má zdroj světla s různým spektrálním složením na barevné vnímání lidského oka, se zavedl všeobecný index podání barev R_a . Ten vyjadřuje stupeň shodnosti vnímání barev předmětu pod daným zdrojem a pod smluvně stanoveným zdrojem. Index se udává v číselné hodnotě 0–100, kde 100 představuje shodu a 0 značí, že se barvy nedají rozlišit. Hodnocení se provádí u osmi až čtrnácti vzorků, na nichž se následně zjišťují rozdíly ve vnímání barev. Po zjištění rozdílů se udává buď všeobecný index podání barev R_a , nebo speciální index podání barev ($R_1, R_2, R_3 \dots R_{14}$) pro každý vzorek. Barevné vzorky slouží jako etalon pro stanovení indexu, představují přesně dané barvy učené dle CIE nebo dle Munsellova atlasu barev. Při měření se počítá s tím, že rozdíl u teploty chromatičnosti mezi zkoušeným a zkušebním vzorkem je max. $5MK^{-1}$ [4].

1.3 Fyziologie zrakového systému

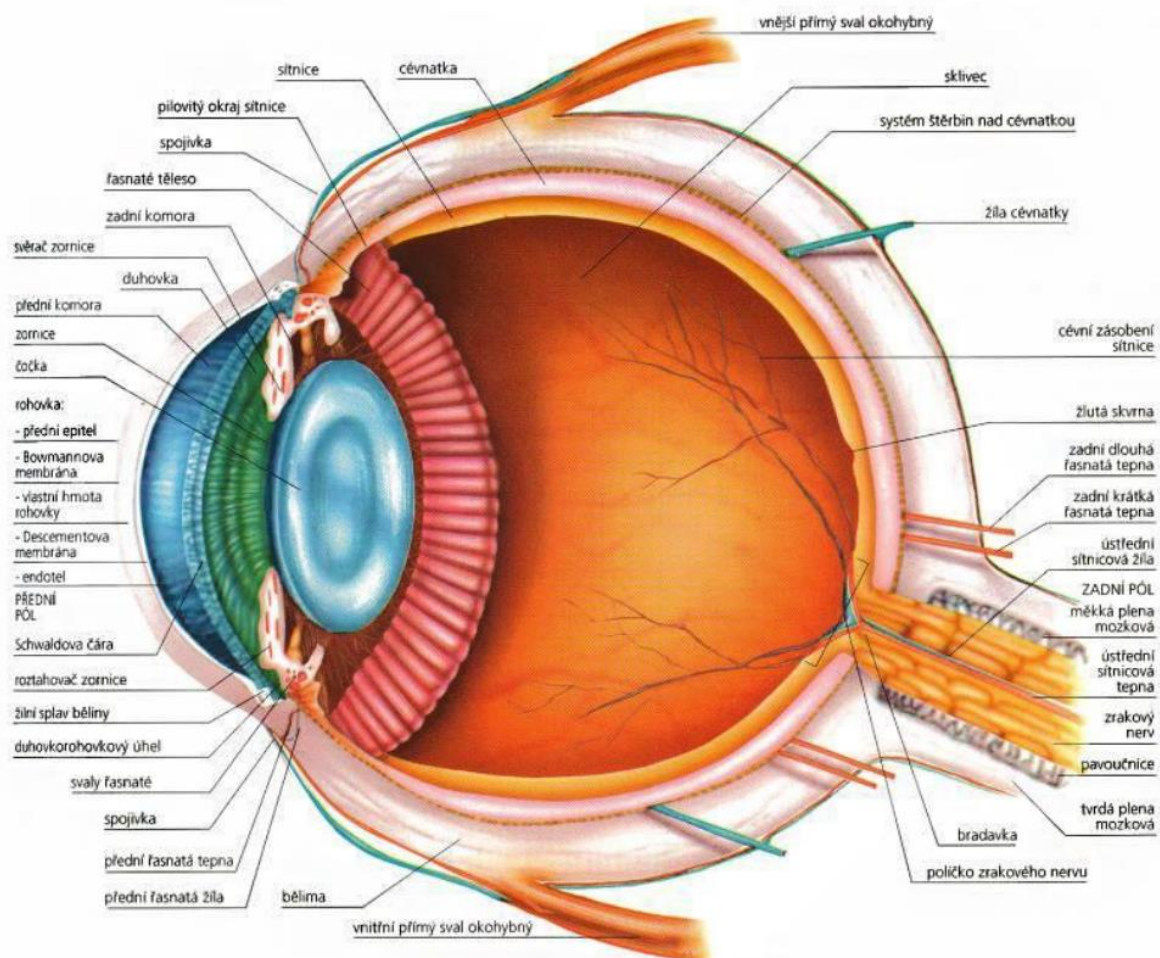
Zrak patří mezi nejvyvinutější a nejdůležitější lidský smysl a oko je jeho základním čidlem, jež převádí vnímané světelné podněty na nervové signály, ty jsou pak zrakovým nervem vedeny do mozku. Zrakové ústrojí tvoří soubor orgánů, jenž můžeme rozdělit na tři části: periferní (oči), spojovací (nervy) a centrální (podkorové a korové části mozku) [10].

1.3.1 Anatomie oka

Na obr. 1.14 je znázorněn podrobný popis zrakového systému, kde jeho nejdůležitější části pro tuto práci jsou:

- rohovka – lidská rohovka představuje asi 2/3 optické mohutnosti oka. Společně s čočkou se podílí na lomu světla, které vchází do oka. Optická mohutnost se udává v dioptriích, přičemž jedné dioptrie dosahuje čočka s ohniskovou vzdáleností 1 m, půl dioptrie čočka se vzdáleností 2 m, naopak dvě dioptrie má čočka s ohniskovou vzdáleností 0,5 m;
- duhovka – rozděluje spolu s čočkou oko na přední a zadní komoru. Barva duhovky je závislá na množství pigmentu ve stromatu a skladbě duhovkové tkáně. Duhovka obsahuje dva svaly a tím pádem se může roztahovat nebo stahovat podle intenzity světla a tím regulovat množství světla dopadajícího na sítnici;
- řasnaté tělísko – je střední částí oční bulvy a má tvar mezikruží. Součástí je ciliární sval, který ovlivňuje akomodaci čočky;
- sítnice – je třetí vrstvou obalu oka. Slouží k snímání a předzpracování světelných signálů přicházejících na sítnici skrz čočku. Anatomicky se dělí na deset vrstev: vrstva pigmentových buněk, vrstva čivých výběžků, zevní ohraničující membrána, vnitřní jádrová vrstva (tyčinky a čípky), zevní plexiformní vrstva, vnitřní jádrová vrstva (bipolární, horizontální a amakrinní buňky), vnitřní plexiformní vrstva, vrstva gangliových buněk;

- pigmentové buňky – pohlcují světlo, které již bylo zaznamenáno tyčinkami a čípkami a zabraňuje jeho zpětnému odrazu, čímž zvyšuje ostrost vidění;
- tyčinky a čípkky – modifikované neurony se schopností reagovat na dopad světla. Tyčinky reagují i na slabé světlo, ale neregistrují barvy a neposkytují dostatečně ostrý obraz. Čípkky se dělí na tři druhy (každý pro jednu ze základních barev), poskytují ostrý a barevný obraz, ale potřebují dostatečné osvětlení [10].



Obr. 1.14 Zrakový orgán [10]

1.3.2 Onemocnění a vady lidského oka

Vady lidského oka mohou být vrozené, nebo se mohou vyvinout během života jedince. Mezi nejběžnější se řadí:

- astigmatismus – je refrakční vada lomivosti oka, kdy je rohovka v některé ose více, či méně vyklenutá;

- barvoslepost – vrozená porucha buněk sítnice vnímajících barvy. Způsobuje neschopnost rozlišovat některé barvy, nejčastěji zelenou a černou;
- myopie (krátkozrakost) – neschopnost ostře vidět do dálky, obraz je vytvářen před sítnicí;
- hypermetropie (dalekozrakost) – neschopnost ostře vidět nablízko, protože oční koule je příliš krátká pro normální ostření, obraz se tedy vytváří za sítnicí;
- glaukom (zelený zákal) – zvýšený tlak tekutiny uvnitř oka, není-li léčen, způsobuje slepotu;
- katarakta (šedý zákal) – zákal čočky, způsobuje zastřené vidění a ztrátu vnímání podrobností [10].

1.3.3 Mezní stavy zraku a adaptační mechanismus

Zrak má vymezeny určité hranice své funkčnosti. Pokud se blížíme k těmto hranicím, mluvíme o tzv. mezních stavech, kdy už zrak nemusí fungovat zcela zprávně. Nejběžnějším podnětem k narušení zrakové činnosti je úroveň jasu. Přizpůsobení těmto různým hladinám osvětlenosti se nazývá adaptace – oko se může přizpůsobit v rozmezí asi od 0,25 lx až 10^5 lx. Činí tak změnou citlivostí fotoreceptorů sítnice a změnou velikosti vjemových polí sítnice. Při vysokém jasu dochází k přetížení sítnice a oko se to snaží vyrovnat rozkladem fotopigmentů, čímž dochází ke zmenšení citlivosti fotoreceptorů. Adaptace z vyšší hodnoty jasu na nižší vyžaduje naopak vytvoření zásob fotopigmentů, proto také trvá déle. Nejdokonalejším mechanismem je pak změna velikosti vjemových polí, kde nastávají procesy nervové adaptace. Průměr těchto polí se zmenšuje s rostoucí intenzitou osvětlení, naopak se zvětšuje při adaptacích na tmou, aby mohla zachytit větší procento fotonů dopadajících na sítnici [1, 10].

1.3.4 Rozlišovací schopnost

Zrakové rozlišení předmětů a detailů je založeno na schopnosti zrakového orgánu rozeznat, že z určitých částí zorného pole vycházejí rozdílné světelné podněty, tj. schopnost zhodnotit jasnost rozlišovaných detailů. Nejmenší detail, který je schopný rozlišit se nazývá kritickým detailem. Rozlišovací schopnost zraku se označuje jako zraková ostrost a definuje se jako schopnost zraku rozeznat dva detaily na určitém pozadí [1, 10].

2 ZDROJE SVĚTLA

V rámci této práce se budou uvádět pouze elektrické zdroje světla. Ty se rozdělují do kategorií a podkategorií dle způsobu přeměny energie elektrické na světelnou.

Zdroje světla můžeme rozdělit na tři kategorie:

- teplotní zdroje světla – princip záření těchto zdrojů je založen na rozžhavení pevného tělesa. Je to nejstarší a stále nejlevnější elektrický zdroj světla. Patří sem žárovka, u níž dochází k rozžhavení wolframového vlákna až na teplotu 2500 °C. Žárovky jsou buď vakuové, nebo plněné vzácným plynem. Tento plyn bývá zpravidla krypton či neon;
- výbojové zdroje světla – tyto zdroje světla využívají přeměnu elektrické energie na světelnou za pomoci elektrického výboje, který hoří v prostředí plynů či par kovů. Tento výboj se odehrává ve skleněné trubici mezi minimálně dvěma elektrodami. Tento typ osvětlení není vhodné umístit na místa, kde dochází k častému zapínání a vypínání, jelikož intenzita postupně roste, než se dostane na své maximum. Častým vypínáním a zapínáním se výrazně snižuje životnost světelného zdroje;
- luminiscenční zdroje světla (LED) – tento typ zdroje světla je založen na elektricky buzené luminiscenci za pomoci dějů, které probíhají v polovodičovém přechodu PN. Mají široké pásmo využití, kromě ekvivalentu k žárovkám a zářivkám se také využívají jako signálky, kontrolky, ruční baterky a další malé zdroje světla. Pro jejich správnou funkci je zapotřebí dvou základních prvků – LED modul a zdroj elektrické energie [11].

2.1 Výkonové LED (Lighting Emited Diode)

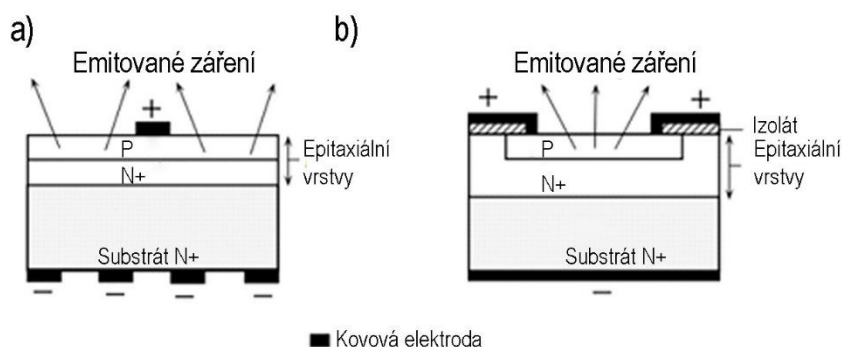
Výkonové LED čipy jsou vhodné zdroje světla do osvětlovacích systémů. Od indikačních LED se liší vysokým měrným výkonem a příkonem i fotometrickými a kolorimetrickými parametry. U LED svítidel se posuzují 4 základní parametry (světelný tok, měrný výkon, teplota chromatičnosti a index podání barev) [12].

2.1.1 Fyzikální podstata a konstrukce LED čipu

LED čip je polovodičovou součástí s jedním neutrálním PN přechodem, kterým prochází proud. PN přechod je tvořen dvěma k sobě přiloženými polovodiči o nevlastní vodivosti N a P. V tenké vrstvě na styku těchto dvou polovodičů některé elektrony a díry tzv. rekombinují neboli vytvoří neutrální pár a tím dojde k tvorbě P-N přechodu. Takto vzniklá polovodičová struktura se při napájení stejnosměrným napětím označuje jako dioda. Pokud je dioda zapojena tak, aby proud tekla, jedná se o připojení v propustném směru, v opačném případě jde o závěrný člen. Průchodem proudu v propustném směru se při rekombinaci elektronů a děr v oblasti P-N přechodu uvolňuje energie, která vzniká při sestoupení elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší. Tato energie se uvolňuje ve formě tepla a elektromagnetického záření jakožto viditelného světla. Na poměr, ve které formě se uvolněná energie promění, má zásadní vliv chemické složení polovodičů, koncentrace příměsových atomů nevlastních polovodičů, šířce přechodu P-N apod. Tepelné ztráty ovšem vznikají vždy a mají

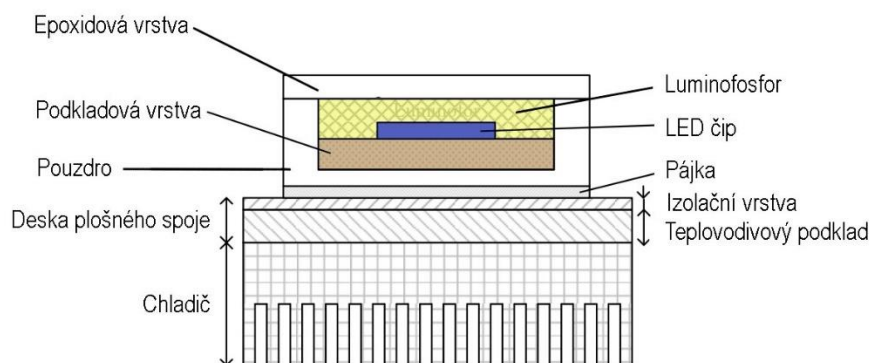
výrazný vliv na stárnutí LED. Je tedy žádoucí vytvořit takový P-N přechod, kde bude podíl tepelných ztrát vůči vyzářenému teplu co nejmenší [13].

U LED je z technologického hlediska základním konstrukčním principem epitaxe polovodičových struktur na vhodném substrátu. Užívá se například směs GaAs či GaP. Na obrázku 2.1. a) je znázorněna LED struktura vrstev, kde je nejprve na substrátu epitaxiálně vytvořena N vrstva a následně vytvořena vrstva P. Substrát primárně slouží jako mechanický prvek pro podporu PN přechodu, a není proto nutné, aby měl stejnou krystalickou strukturu jako epitaxiální vrstva. Pro zajištění toho, aby většina zářivých rekombinací proběhla v P vrstvě, se N vrstva značně dopuje příměsí (N+). Fotony, které se však přesto vyzáří v N vrstvě, jsou buď absorbovány materiálem, nebo jsou odraženy a vyzářeny z PN přechodu. Jestli dojde k absorpci nebo vyzáření, záleží na struktuře povrchu, šířce vrstvy a substrátu. Pro co nejsnazší opuštění emitovaných fotonů z PN vrstvy se P vrstva konstruuje co nejužší, aby se snížila možnost opětovné absorpce v materiálu. Obrázek 2.1. b) prezentuje LED strukturu, kde je P vrstva vytvořena přímo v N vrstvě, a to za pomoci příměsí, které jsou rozptýleny v materiálu epitaxiální N vrstvy [12].



Obr. 2.1 Struktura LED vrstev
 a) postupná epitaxe; b) epitaxe pomocí rozptýlení příměsí - podle [14].

Jak bylo dříve zmíněno, u LED dochází k vyzařování tepla, proto se nové konstrukce jako SMD LED (*Surface mount diode*, viz obr. 2.2.) snaží zlepšit možnosti chlazení diody a tím dosahovat vyšších hodnot světelného toku. Aby toho bylo dosaženo, umísťuje se PN přechod přímo na kovovou či keramickou podkladovou desku. Ta má větší tepelnou vodivost a větší plochu, a tak dochází snáze a rychleji k odvodu tepla. Takto připravené LED se následně připevňují na desku plošného spoje, která slouží jako podklad pro upevnění více diod. Přechod je pak na straně emitujícího záření kryt plastovým pouzdrém (nejčastěji se používá epoxid), případně ještě následnou vrstvou luminoforu. Kromě odvodu tepla toto konstrukční řešení také umožňuje zmenšení rozměrů diody při konstantních rozměrech PN přechodu a tím zvýšení vyzářeného světelného toku z jednotkového povrchu přechodu [12].



Obr. 2.2 Konstrukce SMD LED - podle [12].

2.1.2 Stanovení životnosti a degradace LED

I když je životnost LED zdrojů značná, časem dochází k postupné degradaci, jež je ovlivněna několika faktory, z nichž mezi nejvýznamnější patří:

- provozní teplota;
- životnost zdroje;
- kvalita použitých materiálů.

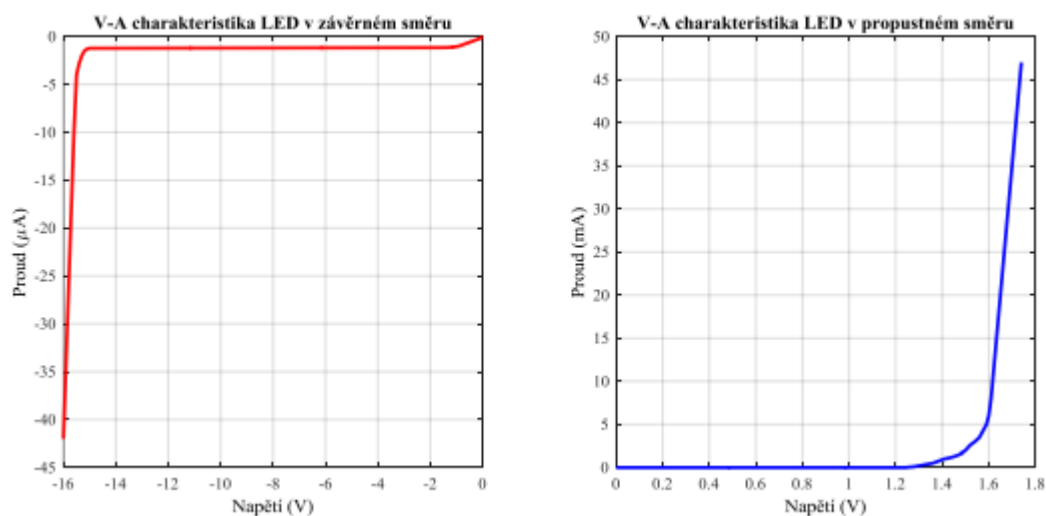
Degradace se na LED zdroji projevuje poklesem světelného toku, změnou teploty chromatičnosti, nebo dokonce úplným selháním během provozu. LED aplikace dnes mají již široké spektrum využití, a tak je rozhodujícím faktorem pro LED požadovaná funkce v daném provozu. To z ohledu jak velký bude protékat proud, parametry prostředí jako například teplotní změny, chemické složení atmosféry, vzdušná vlhkost, možné mechanické vlivy a jiné. U obecného světelného zdroje pak ale určíme životnost jako počet odsvícených hodin při definovaném poklesu světelného toku bez těchto faktorů. Většinou se životnost uvádí pro pokles na 70 % nebo 40 % počátečního světelného toku. Nesmí být však opomenuto, že jednotlivé zdroje nejsou totožné, a tak je potřeba testovat více vzorků a následně pomocí statistiky stanovit střední hodnotu s výpočetní odchylkou. LED testování se řídí dle norem IEC 62717 *LED modules for general lighting* pro obecné osvětlení a IEC 6272-2-1 *Luminaire performance* pro zvláštní požadavky na LED [13, 15].

2.1.3 Napájení LED

Světelné diody jsou spotřebiči elektrické energie, a tak jsou jejich elektrické parametry zásadní z hlediska návrhu, provozu, životnosti i připojení ke zdroji. V zásadě platí, že LED zdroje využívají stejnosměrný proud, avšak kvůli tomu, že v síti běžně teče proud střídavý, je nutné LED doplnit předřadníkem obsahujícím usměrňovač, který mění střídavé napájení na stejnosměrné, a může měnit jeho hodnotu. Množství proudu se většinou pohybuje řádově ve stovkách miliampér a funguje i jako parametr určující příkon LED čipu. Příkony LED se pohybují řádově v desetinách až jednotkách watt. Přířičný proud se na LED přivádí buď za pomoci napětového, nebo proudového zdroje. Napětový zdroj není možné napojit přímo na síťové napětí, ale musí se nejprve snížit obvykle na 5, 12 nebo 24 V a pomocí

předřadného prvku dovést na LED požadovaný proud udávaný výrobcem. Úspornější variantou pak je proudový zdroj, jelikož nedochází ke ztrátě výkonu na předřadníku. Výstupem zdroje je přímo požadovaný proud [12, 16].

Stejnosměrný proud se na LED diodu může zapojit buď v propustném, nebo nepropustném směru. O propustném směru mluvíme tehdy, je-li na polovodič typu N (katodu) přiveden záporný pól zdroje a k polovodiči typu P (anodě) je připojen pól kladný. Příklad V-A charakteristiky LED zapojení v propustném a závěrném směru je znázorněn na obrázku 2.3. Pracovní oblast LED se nachází v propustném směru za kolenem křivky. Tato charakteristika se však může měnit v závislosti na druhu použité diody a provozních parametrech, zejména pak na teplotě samotného PN přechodu, kterou ovlivňuje jak průchod proudem diodou, tak i okolní teplota [13].



Obr. 2.3 V-A charakteristika LED zapojení v závěrném a propustném směru [13].

V reálných svítidlech se LED nepoužívají samostatně, ale s ohledem na jejich rozměry a velikost emitovaného záření se obvykle spojují do různých sériově-paralelních zapojení. Sériové zapojení se jeví výhodnější i z hlediska připojení k napájecím obvodům stejnosměrného napětí – LED předřadníkům. Ty je (jak již bylo zmíněno) důležité připojovat k LED z důvodu přeměny střídavého proudu na jednosměrný. Při zapojení LED v sérii jich pak můžeme napájet několik za sebou, protože napájecí napětí LED dosahuje řádu jednotek voltů a výstupní hodnota předřadníku je napětí v řádu desítek voltů. Paralelní zapojení s sebou nese vysoké nároky na provedení LED a jejich elektrických vlastností. Pokud budou mít LED diody odlišné elektrické parametry v jednotlivých větvích, dojde k nerovnoměrnému zatěžování některých větví obvodu, což může zapříčinit další degradaci elektrických vlastností nebo až vést k poruše svítidla [12].

2.1.4 Předřadná zařízení

Předřadná zařízení jsou důležitou součástí svítidla, jelikož zajišťují jeho správnou a spolehlivou funkci po dobu jeho života. Jedná se o elektrické zařízení, které je zapojeno mezi napájením a jednou, nebo více výbojkami a omezuje jejich proud na požadovanou hodnotu. Předřadník jakožto nezbytná součást svítidla značně ovlivňuje parametry zdroje a efektivní provoz soustavy [2].

Předřadná zařízení pro světelné diody

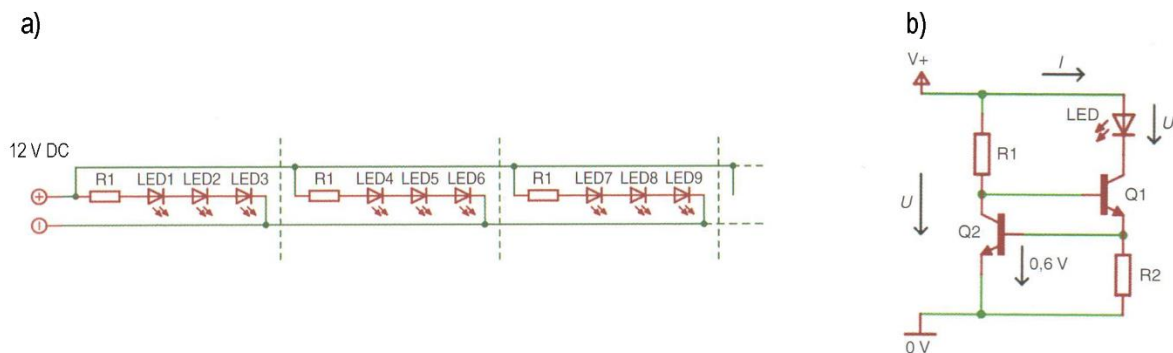
V současné době existují předřadníky pro světelné LED diody a organické světelné diody OLED. S ohledem na zaměření práce bude další popis věnován předřadníkům pro LED. Pro jednoduché elektrické zapojení s předřadným rezistorem se k napájení využívá napěťový zdroj. Odpor rezistoru je pro každou barvu i pro každou velikost napájecího napětí jiný. To je dáno tím, že se úbytky na diodách pro různé barvy a velikosti liší. Provozní proud LED se také mění v závislosti na kolísání napětí, a to poté ovlivňuje vyzařovaný světelný tok. Jako další nevýhoda tohoto řešení se řadí malá účinnost, protože nepotřebná energie v rezistoru se přemění v teplo. Zapojení s předřadným rezistorem se v praxi používá u pevných nebo pružných lineárních modulů LED, kde jsou diody v sériově paralelním zapojení, v němž jsou skupiny sériově spojených diod se společným předřadným rezistorem paralelně připojeny k napájecímu napětí. Moduly je tak možné zkracovat, nebo nastavovat dle potřeby. Minimální délka modulu je však rovna délce jedné skupiny. Délku modulu pak uvádí výrobce a je omezena maximálním proudem, který je možné přenášet měděnými dráty na moduly. Toto zapojení je znázorněno na obrázku 2.4 a). K napájení světelných diod je výhodnější použít zdroj proudu místo zdroje napětí. Zdroj proudu dodává definovaný proud, který není závislý na úbytku napětí na LED či na velikosti napájecího napětí a má definovaný výstupní proud a maximální výstupní napětí. Proudové zdroje se využívají u tzv. výkonných LED, které se běžně vyrábějí pro provozní proudy 350 mA a 700 mA. Pro napájení většího počtu LED z jednoho proudového zdroje se diody zapojí do série, kde maximální množství sériově řazených LED je stanoveno podílem mezi maximálním napětím zdroje a úbytkem napětí na jedné diodě. Jednoduché zapojení zdroje proudu pro napájení světelných diod je znázorněno na obrázku 2.4 b). Sériovým zapojením LED, tranzistoru Q1 a rezistoru R2 prochází proud I. Proud způsobí na rezistoru R2 úbytek napětí otevírající tranzistor Q1. Pokud je proud příliš velký, Q2 se více otevře a tím přivře tranzistor Q1 a proud klesne. K otevření Q2 je potřebné napětí o hodnotě přibližně 0,6 V a proud se pak ustálí na hodnotě dané vztahem (2.1) podle [2]. Ze vztahu plyne, že proud nezávisí ani na napájecím napětí, ani na úbytku napětí na diodě [2].

$$I = \frac{0,6}{R_2} \quad (2.1)$$

kde: I [A] je ustálený proud při napětí 0,6 V;
 R_2 [Ω] je rezistor.

Stmívání

Světelné diody lze stmívat na škále 0 až 100 %. Stmívat se změnou amplitudy napájecího napětí vzhledem ke strmému průběhu voltampérové charakteristiky není vhodné. Do určité hodnoty napájení světelná dioda nesvítí, po překročení této hodnoty pak ale i velmi malé změny napětí vyvolají velké změny proudu a tím pádem i světelného toku. K účelu stmívání tak byla navržena pulsně šířková modulace (*PWM – pulse with modulation*). Princip spočívá v setrvačnosti lidského oka. Provozní doba diody se rozdělí na úseky, během kterých se mění poměr času, kdy dioda svítí, kdy ne. Pokud je časový úsek kratší než 10 ms, nedochází k efektu blikání, jelikož lidské oko není schopno zaregistrovat tak velmi krátké zhasnutí světelného zdroje. Kmitočet přerušování tak bude kratší než 100 Hz. Pulsně šířkovou modulací lze stmívat diody napájené napěťovým i proudovým zdrojem [2].



Obr. 2.4 – a) znázorněné zapojení lineárního modulu LED napájeného napětiovým zdrojem; b) schéma zdroje proudu pro napájení LED [2].

2.1.5 Ostatní elektrické parametry

- **Příkon P** je základním parametrem pro určení energetické náročnosti svítidla. Jak již bylo zmíněno, LED zdroje využívají ke svému provozu předřadné přístroje, a tak příkon svítidla je vlastně elektrický příkon odebíraný z napájecí sítě pro provoz LED a na krytí ztrát v předřadných přístrojích v zapnutém stavu. Na svítidle se většinou uvádí příkon světelného zdroje a příkon celkový se uvádí pouze v katalogovém listu. V případě, že je svítidlo osazeno stmívatelným předřadníkem a zapíná se a vypíná pomocí řídicího signálu (např. DALI), je přístroj neustále připojen k napájecímu napětí. V tomto případě se do celkového příkonu musí započítat i takzvaný parazitní příkon P_c , který svítidlo odebírá i ve vypnutém stavu.
- **Měrný výkon svítidla** udává míru přeměny elektrické energie na energii emitovaného záření. Zbytek energie, tzv. ztrátové, se přemění na teplo. Kvůli spektrální charakteristice emitovaného záření, která se u různých zdrojů světla liší, může být účinnost zavádějící, jelikož stejné množství energie přeměněné na záření rozdílných vlnových délek způsobí odlišnou hodnotu světelného toku. Z tohoto důvodu se ve světelné technice zavedl pojem měrný výkon. Ten se obvykle značí jako M_z (nebo v anglickém jazyce jako E pro *efficacy*). Měrný výkon vyjadřuje světelný tok, který je u daného zdroje získán ze spotřebovaného elektrického výkonu a je dán vztahem (2.2) podle [12].

$$M_z = \frac{\Phi}{P} \quad (2.2)$$

kde: M_z [$\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$] je měrný výkon;
 Φ [lm] je světelný tok;
 P [W] je spotřebovaný elektrický příkon.

Světelný výkon se značně liší nejen podle principu emise světelného záření, ale i v rámci jednoho druhu. Například u LED se měrný výkon výrazně liší pro jednotlivé barvy, konstrukční provedení či provozní podmínky. V tabulce 2.1 jsou znázorněny měrné výkony pro různé druhy skupin osvětlení.

- *Účinnost svítidla* charakterizuje, jaká část světelného toku světelného zdroje, který je instalován ve svítidle, je vyzařována do okolního prostoru. Rozlišuje se účinnost optická, provozní a pracovní. Optická účinnost je podíl celkového světelného toku za daných podmínek a světelného toku, který vyzařují optické zdroje uvnitř svítidla. Světelný tok zdrojů uvnitř svítidla však nelze přesně určit, a tak se používá v praxi takzvaná provozní účinnost. Provozní účinnost R_{LO} je podíl světelného toku svítidla měřeného za daných podmínek s příslušnými světelnými zdroji a předřadníky a součtu jednotlivých toků těchto zdrojů, svítících se stejnými předřadníky mimo svítidlo za daných podmínek (vztah 2.3). Občas se účinnost značí také jako tzv. LOR. Kromě celkové provozní účinnosti se někdy uvádí i dolní účinnost svítidla R_{DLO} a horní účinnost svítidla R_{HLO} . Při uvádění provozní účinnosti může nastat i paradoxní situace, kdy její hodnota bude větší než 1. Účinnost větší než 1 neboli větší než 100 % může nastat například u svítidel s lineárními zářivkami s krytem. Způsobuje to fakt, že tok zářivek mimo svítidlo je měřen při dané teplotě 25 °C, kdežto teplota uvnitř svítidla během měření odpovídá zhruba 35 °C a dosahuje tak vyššího světelného toku. Světelný zdroj tak má při skutečném provozu ve svítidle větší světelný tok. Poslední pracovní účinnost se značí jako R_{LOW} a je dána podílem celkového světelného toku svítidla, měřeného za daných podmínek s příslušnými světelnými zdroji a předřadníky, a součtu jednotlivých toků těchto zdrojů, svítícími s referenčními předřadníky mimo svítidlo za daných podmínek [2, 12].

Stanovení provozní účinnosti je dáno vztahem (2.3) podle [2]:

$$R_{LO}=LOR=\frac{\Phi_{sv}}{\Phi_z} \quad (2.3)$$

kde: R_{LO} [-] je provozní účinnost;
 Φ_{sv} [lm] je světelný tok svítidla;
 Φ_z [lm] součet jednotlivých toků zdrojů svítidla.

Tab. 2.1 [2] Měrný výkon základních skupin světelných zdrojů.

| Světelný zdroj | Měrný výkon [lm/W] |
|------------------------------|--------------------|
| Obyčejná žárovka | 10 až 18 |
| Halogenová žárovka | 20 až 30 |
| Světelné diody (LED) | 60 až 160 |
| Směsové výbojky | 20 až 28 |
| Vysokotlaké rtuťové výbojky | 40 až 60 |
| Indukční výbojky | 60 až 97 |
| Kompaktní zářivky | 40 až 87 |
| Lineární zářivky | 50 až 104 |
| Halogenidové výbojky | 50 až 130 |
| Sírné výbojky | 135 |
| Vysokotlaké sodíkové výbojky | 70 až 150 |
| Nízkotlaké sodíkové výbojky | 100 až 200 |

3 ZALÉVACÍ HMOTY

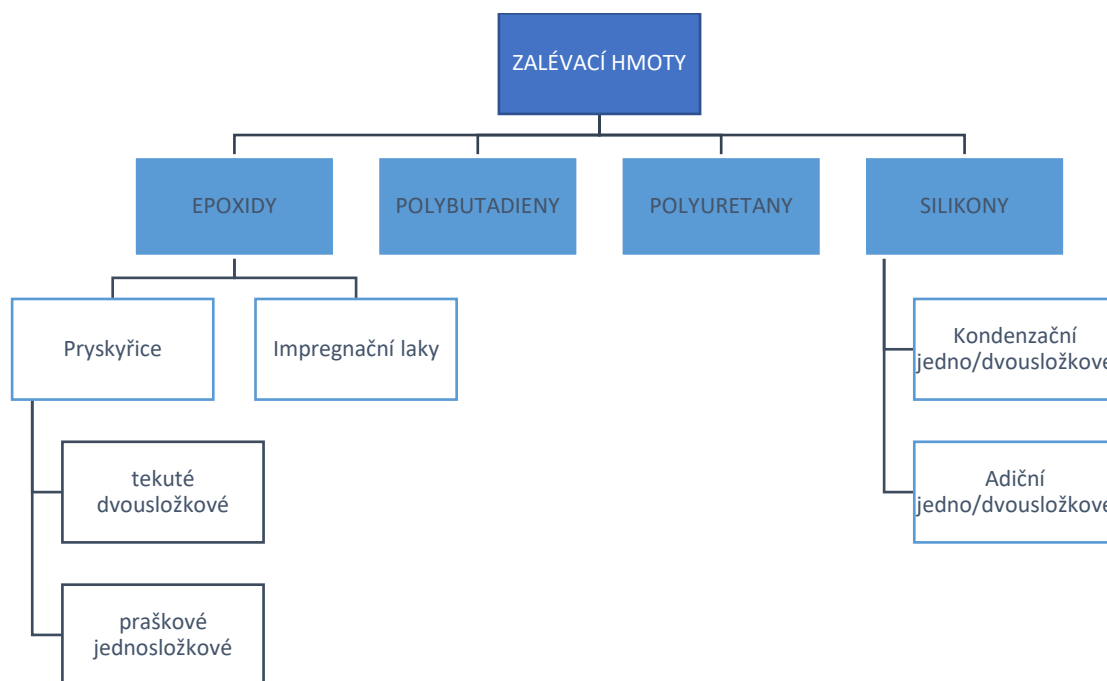
Zalévací hmoty jsou většinou látky nejprve v kapalném stavu, po aplikaci a vytvrzení však změny svoje skupenství na pevné. Tyto hmoty se používají pro ochranu částí elektroniky před nepříznivými okolními vlivy, jako jsou vlhkost, částice vodivého prachu, agresivní plyny a jiné. Zalévací hmota tak zvyšuje mechanickou odolnost zalité elektroniky a v ideálním případě i odvod tepla.

Využití v praxi

Konkrétně zalévací hmoty se používají například pro zalévání osazených součástek plošných spojů, zalévání a zapouzdrnění celých elektronických bloků, transformátorů a elektromotorů. U transformátorů se transformátor s plechovým jádrem vloží do krabičky a následně se zalije tak, aby zůstaly nezalité pouze přípojovací kontakty. Kromě zvýšení mechanické odolnosti také následná vytvrzená hmota zvyšuje odvod tepla a při použití speciálních příměsí působí také jako samozhášivá. U motorů se vhodným epoxidem či polyuretanem zalévá jak rotor, tak i stator. Důvodem je opět lepší odvod tepla plus ochrana před vlhkostí. Dále vytvrzená hmota zpevňuje vinutí motoru, čímž se zvýší mechanická odolnost. Pro motory, které se využívají k čerpání, se stator zalévá do speciální hmoty, která ho chrání před vlhkostí, plyny a i kyselinami. V neposlední řadě se zalévací hmoty používají k zalévání elektroniky jako třeba plošné spoje nebo LED pásy. Zalitá drobná elektronika se často využívá například v automobilovém průmyslu, kde na ni působí oleje, prach, zimní posyp, velké teplotní změny a podobně [17].

Druhy zalévacích hmot

Zalévací hmoty jsou buď jednosložkové, nebo většinou dvousložkové. Dvěma složkami jsou hmota a tvrdidlo, které se smíchají v poměru daném výrobcem. Po smíchání vznikne zalévací hmota, která má omezenou dobu, po kterou s ní jde pracovat, jelikož se časem vytvrzuje. Při míchání složek hmoty a vytvrzovací látky dochází k exotermické reakci, u polyuretanů se hmota může zahřát až na 70 °C, u epoxidů pak až na 120 °C. Tento fakt musíme zohlednit při zalévání elektroniky, která je citlivá na vysokou teplotu, aby se její součástky nepoškodily. U míchání složek je velmi důležité dodržet stanovený poměr složek, pokud by bylo do směsi přidáno málo tvrdidla, vzniklo by ve směsi více menších molekul namísto ideální jedné a to je nežádoucí. Navenek by materiál působil stejným dojmem jako při smíchání správného poměru složek, ale po provedení zkoušek by se zjistilo, že má výsledný materiál horší vlastnosti. V případě smíchání tvrdidla ve větším poměru by vznikly izokyanáty, které reagují s okolím a způsobují hrudkovitý povrch, nebo může dojít ke zvětšení objemu. V praxi se využívá míchání strojové, aby se eliminoval prvek lidské chyby [18].



Obr. 3.1 Dělení zalévacích hmot - podle [18].

3.1 Epoxidy

Polymer obsahující nezreagované epoxidové jednotky se nazývá polyepoxid nebo epoxidová pryskyřice (epoxid). Epoxidy jsou dobře odolné chemicky, mechanicky i teplotně. Tvrdosti většinou dosahují Shore D 80-90 a používají se v náročných aplikacích, kde dlouhodobě působí vyšší teploty, chemicky agresivní prostředí atd. Při vytvrzování narůstá teplota a klesá viskozita, hmota se tak stává více tekutou. Během vytvrzování však viskozita značně roste, což může časem vést k mechanickému napětí mezi zalitými prvky. Emise epoxidů jsou chemicky agresivní a doporučená provozní teplota je do 155 °C [18].

3.1.1 Impregnační laky

Využívají se k impregnaci vinutí motorů, transformátorů a cívek. Impregnace má za účel chránit před chemickými vlivy, prachem, vlhkostí a sloužit ke zlepšení odvodu tepla a zlepšení vinutí. Impregnované stroje jsou pak méně náročné na údržbu, mají vyšší spolehlivost a lze je využívat i za extrémních podmínek. K samotné impregnaci dochází minimálně dvakrát, a to namáčením, stříkáním či pod tlakem ve vakuu. K následné impregnaci dochází vždy po vytvrzení předcházející vrstvy. Kvalitou impregnace se rozumí, kolik laku se dostalo do vinutí. To lze zjistit díky váhovému přírůstku na součásti před impregnací a po ní. Impregnovaný lak se také kontroluje vizuálně kvůli detekci vzduchových bublin. Část laku se vyřízne a zkoumá pod mikroskopem. Tato kontrola se provádí na pokusných dílech, aby se zjistilo, zda je stroj správně nastaven [19].

3.1.2 Pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou definovány jako molekuly obsahující více než jednu velmi reaktivní epoxidovou (oxiranovou) skupinu. Tato velká reaktivita skupiny je zapříčiněna energeticky bohatým epoxidovým kruhem, který se ochotně otevírá, reaguje s velkým počtem látek, což vede k zesíťovaným makromolekulárním produktům. Při vytvrzování se neodštěpují žádné vedlejší produkty a dochází jen k velmi malému smrštění. Vytvrzené produkty mají skvělou přilnavost ke kovům, sklu, keramice a dřevu. Dobře snášejí velkou škálu teplot, patří k látkám s nejlepšími mechanickými a elektrickými vlastnostmi. K velké výhodě patří i odolnost vůči vodě, roztokům kyselin a alkálií a řadě rozpouštědélů. Epoxidové pryskyřice jsou bezbarvé nebo lehce nažloutlé a za normálních teplot mají téměř neomezenou skladovatelnost. Epoxidové hmoty se vyrábí alkalickou kondenzací dianu s hydroxylovou skupinou fenolu a epihalogenhydrinem, zejména s epichlorhydrinem. Vlastnosti epoxidových pryskyřic:

- vytvrzování – je proces, kde se pomocí chemických reakcí převádějí nízkomolekulární, rozpustné a tavitelné epoxidové monomery a oligomery na netavitelné a nerozpustné polymery s převážně trojrozměrnou strukturou. Provádí se za pomoci tzv. tvrdidel, která reagují s epoxidovými pryskyřicemi různými způsoby: a) polyadice probíhající na epoxidových skupinách, b) polykondenzace probíhající na přítomných hydroxylových skupinách a za c) polymerace epoxidových skupin;
- chemická odolnost – epoxidové pryskyřice mají obecně dobrou chemickou odolnost. Výborně odolávají alkáliím i zředěným organickým a anorganickým kyselinám. Chemická odolnost epoxidových pryskyřic stoupá s délkou řetězce molekuly a se stupněm zesílení a závisí na počtu funkčních skupin ve vytvrzeném produktu;
- teplotní odolnost – teplotní odolnost epoxidových pryskyřic do značné míry záleží na druhu použitého tvrdidla a na stupni zesílení. Tvrdidla s alifatickými řetězci dodávají menší odolnost než tvrdidla s aromatickým jádrem. Dále hraje roli struktura pryskyřice. Třífunkční a čtyřfunkční pryskyřice dodává o 20–40 °C vyšší odolnost než pryskyřice bifunkční;
- elektroizolační vlastnosti – epoxidové pryskyřice mají výborné elektroizolační vlastnosti, které jim dodávají tvrdidla s aromatickými jádry jako například anhydrid kyseliny ftalové;
- smrštitivost – smrštitivost u epoxidových pryskyřic je velmi malá. Kromě tvrdidla ji ovlivňují i vytvrzovací podmínky [20].

Pryskyřice tekuté dvousložkové

Jsou vhodné k ochraně elektrických komponent a k izolaci proti vlhkosti. Poměr míchání je jednoduchý, což zajišťuje bezproblémové zpracování a aplikaci. Zalévací pryskyřice mohou být na bázi epoxidu či polyuretanu. Chemicky je lze navrhnout tak, aby byly buď velmi tvrdé a odolné proti nárazu nebo měkké a pružné. Aby byla pryskyřice správně nanesena, je potřeba komponent dobře očistit a odmastit, je-li to potřeba. Pro lepší zatékání pryskyřice je možné komponent předeheřt. U aplikací, kde je požadována vyšší odolnost vůči teplotním šokům, je možné využít plnidla [18, 21].

Pryskyřice jednosložková prášková

Používají se jako drážková izolace menších elektromotorů. Směs se dodává již namíchaná pro zaručení rovnoměrnosti a homogenity aplikace. Pryskyřice se nanáší ponořováním stroje, ručním stříkáním a elektrickým naprašováním. Pro správnou aplikaci je potřeba komponent očistit, odmastit a u některých typů pryskyřice i předeřhřát, aby se pryskyřice roztavila [19].

3.2 Polybutadieny

Využívají se například v automobilové technice pro zalévání tlakových senzorů v pneumatikách. Jde o měkké materiály Shore A 30–70, s minimálním smrštěním a roztažností. Mají vysokou chemickou odolnost. Teplota skelného přechodu je $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, to odpovídá teplotě, při níž látka ztrácí své krystalické vlastnosti, dochází k měknutí materiálu a skokově se zhoršují její parametry [18].

3.3 Polyuretany

Využití polyuretanů je univerzální, jelikož jich existuje velké množství. Mají dobré dielektrické vlastnosti, vysokou teplotní odolnost běžně až do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale ojediněle i až do $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mají nízkou viskozitu i za pokojových teplot, a tak není potřebné předeřhřívát komponenty a udržovat určitou teplotu okolí. Oproti epoxidům mají výhodu, že se nehodnotí jako nebezpečný odpad. Polyuretany existují od měkkých materiálů (tvrdost gumy) po materiály, které se tvrdostí vyrovnají epoxidům. Při skladování se musí jak složka hmoty, tak tvrdidla skladovat mimo dosah vlhkosti a teploty pod $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud by byl materiál vystaven teplotám nižším než $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ začaly by se tvořit krystalky a materiál by se znehodnotil. Při dlouhodobém skladování vznikají usazeniny, a tak se před použitím musí hmota dobře promíchat a zkontrolovat její hustota [18].

3.4 Silikony

Mají výborné elektroizolační vlastnosti, odolávají UV záření, chemickému působení a vlhkosti. Celkem snadno se zpracovávají a mají nízkou toxicitu.

Kondenzační silikony

Při tvrzení tohoto typu silikonů se využívá vzdušné vlhkosti z atmosféry. Jelikož má kolísání teploty nepříznivý vliv na vytvrzování, je proto potřeba ho provádět v místnosti se stálou teplotou. Kondenzačními silikony nelze zalévat vrstvy vyšší než 10 mm, protože by vrchní rychleji zatvrdlá vrstva bránila přísunu vlhkosti do spodnějších vrstev hmoty, a tak by došlo ke špatnému vytvrzení. Pro elektroniku jsou vhodnější jednosložkové silikony, které neobsahují zasíťující katalyzátory, které jsou škodlivé pro elektroniku. Jednosložkové silikony navíc není nutné míchat a tím pádem se eliminuje možnost namíchání ve špatném poměru [19].

Adiční silikony

Ke svému vytvrzení potřebují platinový katalyzátor. Oproti kondenzačním silikonům mohou být vytvrzovány i při hermetickém uzavření. Stejně jako kondenzační

silikony se dělí na jednosložkové a dvousložkové. Jednosložkové není nutné při přípravě míchat a lze je použít v tenké i silné vrstvě a mají dobrou mechanickou pevnost. Nevýhodou pak je, že se při vytvrzování musí dosahovat vyšších než pokojových teplot v místnosti. Hůře se spojují s jinými prvky a mají omezenou dobu použitelnosti. Dvousložkové adiční silikony se také mohou použít v silnějších vrstvách, být hermeticky uzavřené a málo se smršťují. Zvýšením teploty se uspíší doba tuhnutí a při míchání se musí dát pozor na poměr míchaných materiálů [19].

4 PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce proběhla ve spolupráci s firmou Lamberga, která se zabývá inovací a výrobou LED osvětlení.

Množství pigmentu bylo určováno za pomoci objemové smluvní jednotky υ , jejíž přesnou hodnotu nelze zveřejnit z důvodu citlivosti údajů, neboť patří do podnikového *know-how*.

4.1 Požadavky na zalévací hmotu

Pro správný výběr zalévací hmoty je potřebné zvolit požadované parametry, které má daná hmota splňovat a stanovit si, za jakých provozních podmínek se výsledný produkt bude používat. Přehled základních parametrů, na které může být kladen důraz při výběru hmoty, je zpracován v tabulce číslo 4.1.

Tab. 4.1 [22] Přehled požadovaných parametrů pro zalévací hmoty.

| Parametr | Jednotka | Rozsah typických hodnot | Poznámka |
|--|-------------------------|----------------------------------|--|
| Zpracování zalévací hmoty ve výrobním procesu | | | |
| Dynamická viskozita | (mPa · s) | 100 až 300 000 | Důležité z hlediska míchání a dávkování |
| Počet složek | - | 1 až 3 | Důležité z hlediska míchání a dávkování |
| Specifická hmotnost (hustota) | (kg · m ⁻³) | 1 000 až 1 500 | Důležité z hlediska míchání směsi a dávkování jednotlivých složek |
| Vlastnosti zalévací hmoty po smísení nebo aplikaci | | | |
| Dynamická viskozita | (mPa · s) | 100 až 300 000 | Čím vyšší viskozita, tím horší zatékavost |
| Barva | - | Různé barvy včetně transparentní | Rovnoměrné vybarvení, často se využívá ke kontrole promíchání |
| Specifická hmotnost (hustota) | (kg · m ⁻³) | 1 000 až 1 500 | Důležité z hlediska míchání a dávkování |
| Doba použitelnosti | (h) | 0,1 až 24 | Většinou doba, za kterou se viskozita směsi zvýší na dvojnásobek |
| Doba vytvrzení a podmínky vytvrzení | (h) | 0,1 až 24 | Dobu vytvrzení lze většinou urychlit vytvrzovacími či okolními parametry jako je teplota, vlhkost atd. |

| Elektrické vlastnosti zalévací hmoty po vytvrzení | | | |
|---|--|------------------------|--|
| Dielektrická pevnost | $(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1})$ | 10 až 80 | |
| Objemová měrná rezistivita | $(\Omega \cdot \text{cm})$ | 1 011 až 1 017 | |
| Povrchová měrná rezistivita | (Ω) | 1 012 1 016 | |
| Permitivita | - | 2,1 až 6 | Důležité pro vysokofrekvenční aplikace |
| Ztrátový faktor | - | 0,00015 až 0,2 | Důležité pro vysokofrekvenční aplikaci |
| Fyzikální vlastnosti zalévací hmoty po vytvrzení | | | |
| Tvrдост | (Shore A, D) | 10 až 90 | Shore A se užívá u měkčích materiálů (např. silikony), Shore D je pro tvrdší materiály (např. polyuretany), u gelů se měří penetrace |
| Součinitel teplotní roztažnosti (CTE), (lineární či objemový) | (K^{-1}) | 10^{-4} až 10^{-6} | Rozdílné CTE u komponentů sestavy může za určitých podmínek vést k jejímu poškození |
| Tepelná vodivost | $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 0,1 až 1,2 | Čím vyšší, tím lépe vede teplo |
| Mez pevnosti v tahu | $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 0,2 až 65 | Vliv na mechanickou pevnost sestavy |
| Mez pevnosti v trhu | $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$ | 2,7 až 25 | Vliv na mechanickou pevnost sestavy |
| Prodloužení | (%) | 0 až 700 | Důležité u sestav s rozdílným CTE při kolísání provozních teplot |
| Specifická hmotnost (hustota) | $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 1 000 2 000 | Ovlivňuje hmotnost sestavy |
| Další možné požadavky: | | | |
| - barva vytvrzené hmoty | | - optické vlastnosti | |

| | |
|---|---|
| - tixotropní nebo roztékavá | - adheze na různé typy materiálu |
| - uvolňování těkavých složek z vytvrzené ZH | - odolnost proti olejům, palivům, organickým rozpouštědlům apod. |
| - možnost odstranění vytvrzené ZH, její opravitelnost | - současné působení vysoké vlhkosti a teploty |
| - samozhášivost (UL94) | - odolnost proti mechanickým vlivům (vibrace, náraz apod.) |
| - teplotní odolnost zalévaných materiálů | - minimální a maximální provozní teplota, odolnost proti tepelným šokům |
| - nutnost maskování při zalévání (přepínače, ladící prvky, konektory apod.) | - mechanická konstrukce zalévaných elektronických sestav (např. dutiny) |
| - min a max tloušťka vrstvy | - a další |

Ne všechny parametry, které jsou uvedeny v tabulce 4.1, výrobce uvádí ve svých katalogových listech. Aby bylo možné výrobcem doporučit nejvhodnější zalévací hmotu pro aplikaci, je potřebné specifikovat požadavky na zalévací hmotu a jaké budou následné provozní podmínky svítidla.

Požadavky na zalévací hmotu pro výrobu zkušebních svítidel:

- počet složek a složitost míchání – míchání nebude provedeno automatizovaně, proto je důležitá jednoduchost míchání, aby pravděpodobnost lidské chyby byla co nejmenší. Pro míchání bude použita KERN počítačí váha CPB s kalibračním listem;
- teplotní parametry – svítidla jsou plánovaná pro venkovní použití, a tak je potřeba počítat s širokou škálou teplot prostředí. Dále by měla mít hmota dobrou tepelnou vodivost kvůli odvodu tepla do okolí vyprodukovaného LED čipy;
- odolnost svítidla – jak již bylo zmíněno, svítidla jsou plánovaná pro venkovní použití. Je proto potřebné, aby měla hmota požadovanou tvrdost kvůli mechanické odolnosti. Dále je potřebná chemická odolnost a odolnost proti vlhkosti;
- zalévací profil – hmota se bude zalévat do hliníkových profilů, a tak je potřebné, aby měla dobrou adhezi ke kovům. Hmotu musí být možno zalévat do námi stanovené výšky zalití, aniž by došlo k přílišnému uvolnění tepla, které by mohlo poškodit LED pásy.

4.2 Výběr zalévací hmoty

Pro účely diplomové práce byli osloveni čtyři dodavatelé epoxidových hmot, kteří na základě stanovených parametrů doporučili zkušební materiál. Následně proběhlo prvotní zalití těchto materiálů (A, B, C a D) pro výběr nejvhodnější hmoty.

HMOTA A

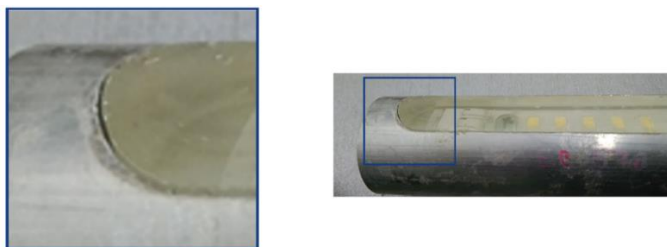
Povrch hmoty A se lidským okem a na dotek nejevil dostatečně hladce (viz obr. 4.1). To způsobilo, že se po zapojení do elektrické sítě svítidlo zdálo lehce nehomogenní.



Obr. 4.1 Vytvrzená hmota A (nerovný povrch).

HMOTA B

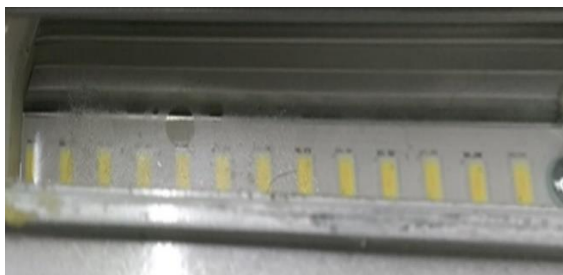
Jak je patrné z obrázku číslo 4.2, po vytvrzení se vytvořila mezi hmotou B a profilem z hliníkové slitiny mezera. Lze tedy předpokládat, že má hmota příliš malou adhezi ke kovům.



Obr. 4.2 Vytvrzená hmota B (nedostačující přilnavost k hliníku).

HMOTA C

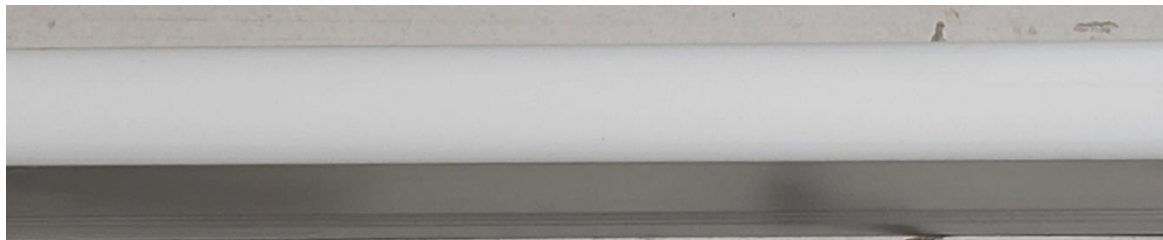
Po vytvrzení u hmoty C docházelo k tvorbě povlaku, což je patrné z obrázku číslo 4.3.



Obr. 4.3 Vytvrzená hmota C (tvorba povlaku na povrchu hmoty).

HMOTA D

Hmota D vykazovala dobrou adhezi k hliníkové slitině a nebyly patrné žádné nedostatky pozorovatelné lidským okem (viz obr.4.4). Byla tedy vybrána jako nejvhodnější hmota pro následné testování.



Obr. 4.4 Vytvrzená hmota D.

4.3 Výroba vzorků pro venkovní dlouhodobý test

4.3.1 Vlastnosti materiálu a podmínky skladování

Jako výsledná byla vybrána hmota s označením D, jejíž parametry obdržené od dodavatele jsou zaznamenány v tabulce číslo 4.2. Jedná se o opticky čistou a dokonale transparentní epoxidovou licí hmotu, vhodnou pro použití v elektrotechnice s možností pigmentace.

Tab. 4.2 Vlastnosti zalévací hmoty dodané výrobcem XY.

| | |
|-------------------------|--------------------------------|
| Viskozita směsi (20 °C) | 470–520 mPa · s |
| Hustota směsi | 1,03 – 1,07 g·cm ⁻³ |
| Zpracovatelnost | 2–4 hodiny |
| Tvrдость | 76 Shore D |
| Doba vytvrzení | 48 hodin |

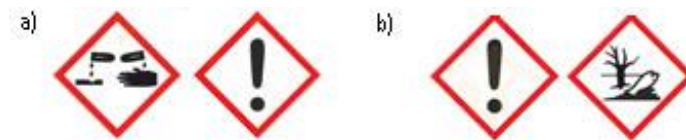
Skladování materiálu probíhá v místnosti při 20 °C po dobu max. 12 měsíců mimo přímé sluneční záření.

4.3.2 Bezpečnost práce

Zalévací hmota se míchá ze dvou složek:

- epoxidová hmota – je zdraví škodlivá při styku s kůží a při vdechování. Způsobuje podráždění kůže, vážné podráždění očí a může vyvolat alergickou reakci. Je toxická pro vodní organismy s dlouhými účinky (viz obr. 4.5);

- tvrdidlo – je škodlivé pro vodní organismy s dlouhodobými účinky. Způsobuje těžké poleptání kůže a poškození očí. Může vyvolat alergickou reakci (viz obr. 4.6)



Obr. 4.5 Značení na obalu – a) tvrdidla, b) epoxidové hmoty [23].

Při práci se zalévací hmotou a jejími složkami je nutné:

- používat ochranné pomůcky – ochranné brýle, gumové rukavice, respirátor;
- je potřeba zajistit dobrou ventilaci místnosti;
- provést kurz první pomoci, kde je vysvětleno, jak postupovat při kontaktu kůže nebo očí s žíravinou atd.;
- proškolit pracovníka na téma bezpečnosti práce.



Obr. 4.6 Místo, kde došlo ke kontaktu zalévací hmoty s kůží.

4.3.3 Příprava profilů pro zalévání

1. Profily ze slitiny hliníku je potřeba zkrátit na požadovanou délku. Délka byla stanovena dle volené délky LED pásky s přidáním 10 mm na každé straně pro snadnější manipulaci při pájení LED pásky k vodičům.
2. Připevní se víčka bočních stran profilu a utěsní silikonem, aby nedošlo k vytékání hmoty a počká se do vyschnutí silikonu.
3. LED pásky se umístí do přichystaného profilu a připájí se k nim vodiče.

4.3.4 Zpracování zalévací hmoty

1. Na základě objemu zalévaných profilů se vypočítá, kolik zalévací hmoty je potřeba připravit.
2. Na váhu se umístí nádoba, ve které dojde k míchání a pozorně se odlije požadované množství epoxidové pryskyřice a následně tvrdidla.
3. Následuje důkladné promíchání hmot. Postupně se přidává pigment.
4. Promíchaná hmota se nechá alespoň 10 minut odstát, aby došlo k odvodušnění a nevyskytovaly se v ní vzduchové bubliny.
5. Připravený profil je následně zalit hmotou na vodorovném povrchu.

4.3.5 Vytvrzení hmoty

Doba nutná k vytvrzení hmoty se pohybuje mezi 24 až 48 hodinami. Ovlivňují ji dva faktory:

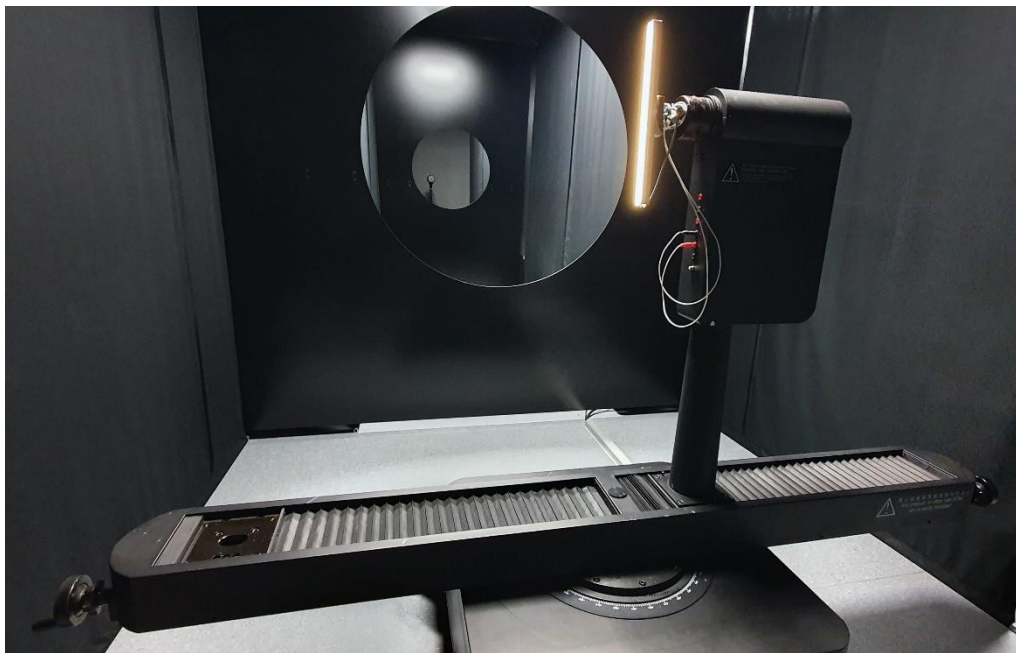
- teplota – snížená teplota pod 20 °C výrazně snižuje dobu vytvrzení. Naopak zvýšená teplota dobu zkracuje;
- množství a tloušťka odlitého materiálu – materiál odlitý v silných vrstvách vytvrzuje rychleji a lépe než tenké vrstvy.

5 MĚŘENÍ SVÍTIDEL VE FOTOMETRICKÉ LABORATOŘI

5.1 Měření křivky svítivosti na goniofotometru

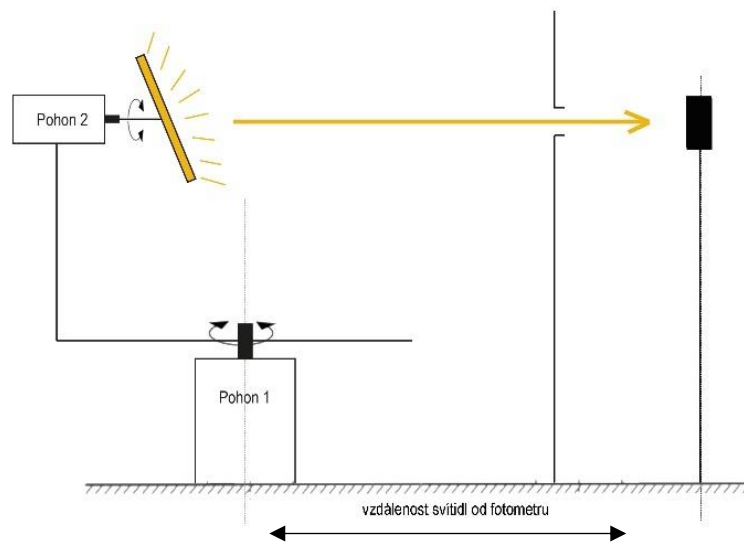
Fotometrický gonioometr je laboratorní zařízení, které slouží pro měření prostorového rozložení svítivosti v různých rovinách a úhlech. Existuje několik konstrukčních provedení:

- otočný zdroj a pevný fotometr (pro účely diplomové práce byl využit gonioometr této konstrukce od společnosti Everfine, který je znázorněn na obrázku 5.1);
- pevný zdroj a otočný fotometr;
- pevný zdroj i fotometr a otočný systém zrcadel.



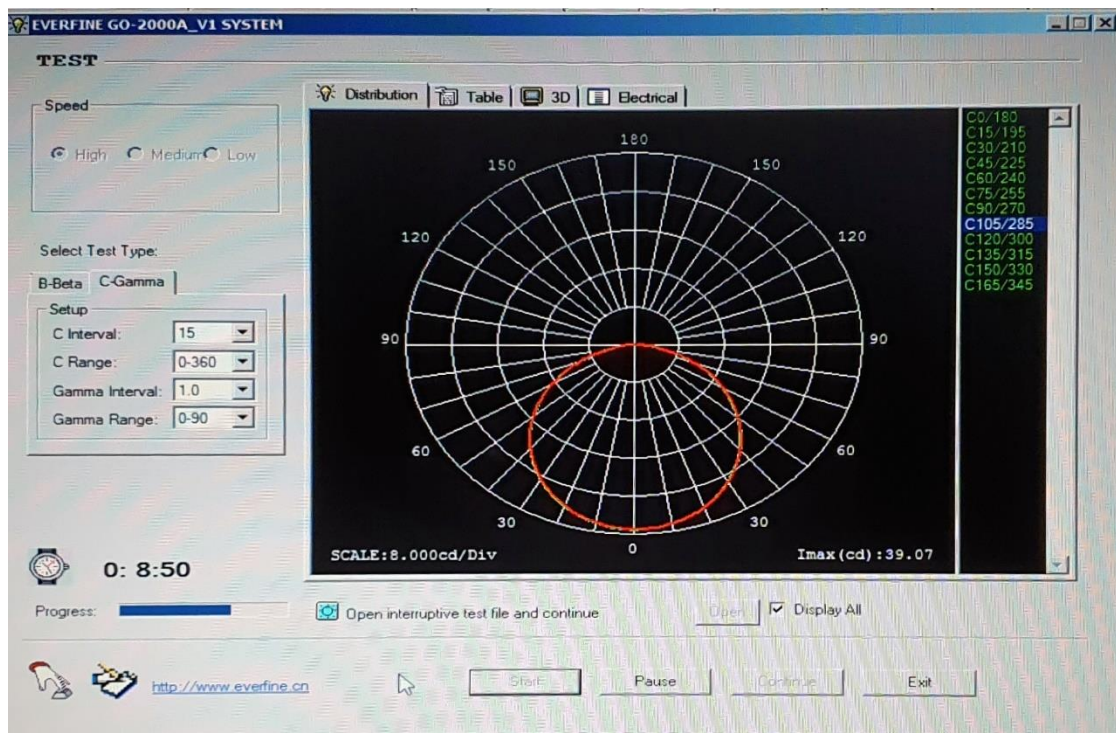
Obr. 5.1 Fotometrický gonioometr s upevněným liniovým svítidlem.

U konstrukce goniofotometru s pohyblivým zdrojem (schéma znázorněno na Obr. 5.2) je pohon 1 pro rotaci ramene v rovině C ($0-345^\circ$). Na tomto ramenu je dále umístěn pohon 2, který provádí rotaci světelného zdroje pod úhlem gama ($0-180^\circ$). Svítidlo se tedy otáčí kolem svislé i vodorovné osy, zatímco fotometr zůstává na místě. V této sestavě je nedílnou součástí ještě clona. Clona tvoří zorné pole tak, aby na fotometr nedopadaly žádné jiné paprsky než paprsky ze svítidla [24].



Obr. 5.2 Fotometrický goniometr s upevněným liniovým svítidlem.

Pro měření bylo využito měřícího programu od společnosti Everfine (viz obr. 5.3) nainstalovaného v počítači, který byl propojen s goniometrem. Po zaznamenání hodnot program zpracuje naměřená data. Výsledné křivky svítivosti se udávají v polorovinách, nejčastěji v souřadném systému C- γ a přepočítají se na světelný tok 1 000 lm, aby udávané křivky svítivosti byly nezávislé na světelném toku použitého zdroje světla [24].

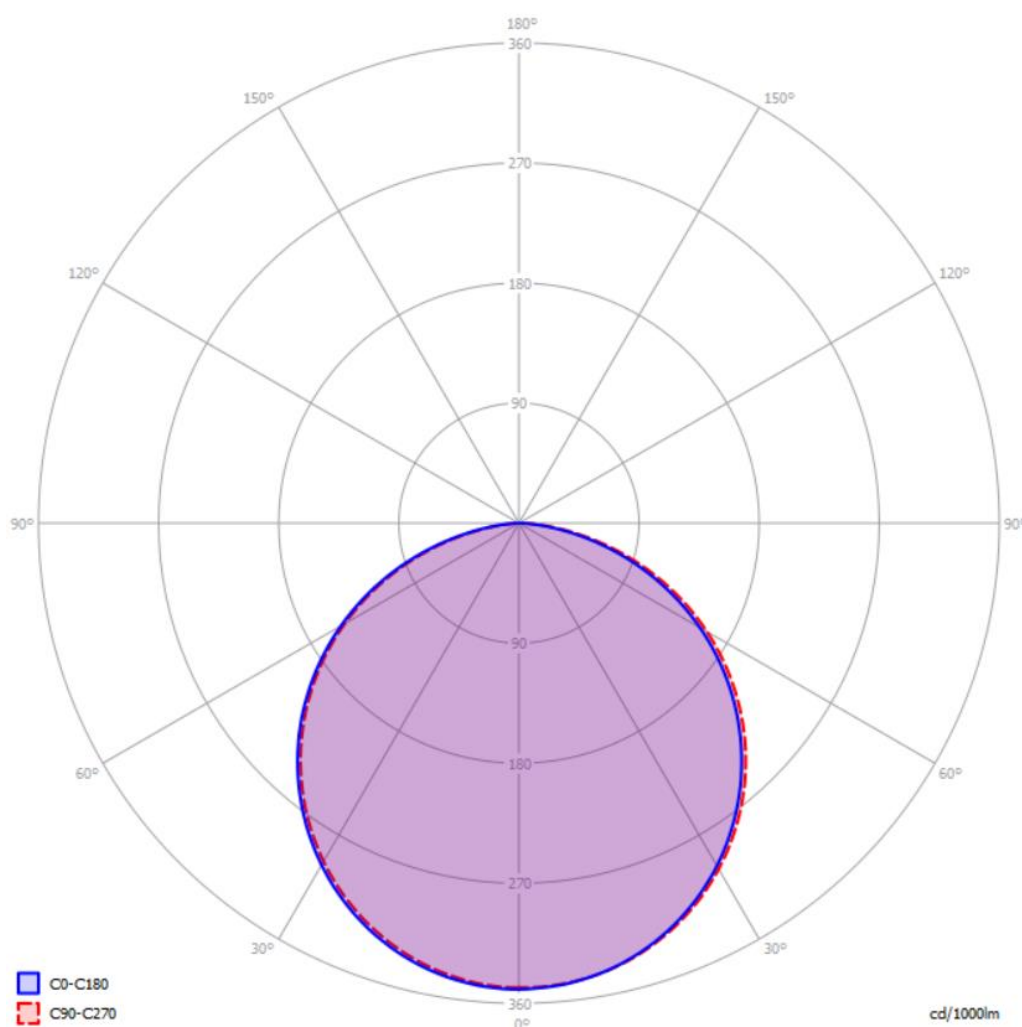


Obr. 5.3 Snímek obrazovky používání programu pro počítání křivky svítivosti.

Měření proběhlo pro svítidlo, jehož parametry jsou uvedené v tabulce 5.1. Výsledná křivka svítivosti je vykreslená na obrázku 5.4.

Tab. 5.1 Parametry měřeného světla svítidla.

| | |
|----------------------------------|----------|
| Délka modulu | 420 mm |
| Délka LED pásku | 400 mm |
| Teplota chromatičnosti LED pásku | 2 700 K |
| Množství pigmentu | 11 μ |

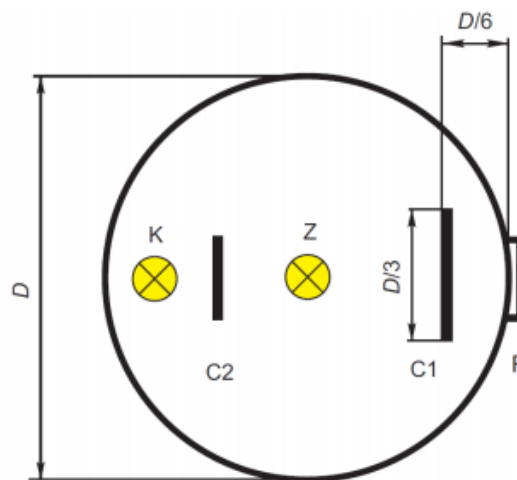


Obr. 5.4 Křivka svítivosti pro liniové svítidlo.

Z křivky svítivosti lze určit, že se jedná o svítidlo přímé, pro které platí že 100–90 % světelného toku vyzařuje do dolního poloprostoru a 0–10 % vyzařuje do horního poloprostoru.

5.2 Měření světelného toku v kulovém integrátoru

Kulový integrátor má schopnost mnohonásobně rozptýlně odrážet světelný tok, což vytvoří rovnoměrné rozložení osvětlenosti (i jasu) na vnitřní stěny integrátoru bez ohledu na prostorové rozložení světelného toku zdroje. Tento rozptýlený tok je následně měřen fyzikálním čidlem spektrometru. Díky tomu není nutné komplikované integrování pro výpočet světelného toku. Náčrt kulového integrátoru je znázorněn na obrázku 5.5. Kulový integrátor o průměru 2,5 m obsahuje rozmístěné clony C1 a C2 tak, aby nepronikalo přímé nerozptýlené světlo do měřícího zařízení F. Clony jsou kruhovitěho tvaru o třetinové délce průměru koule. Clonou je oddělen i měrný světelný zdroj Z s korekčním normálem K [25].



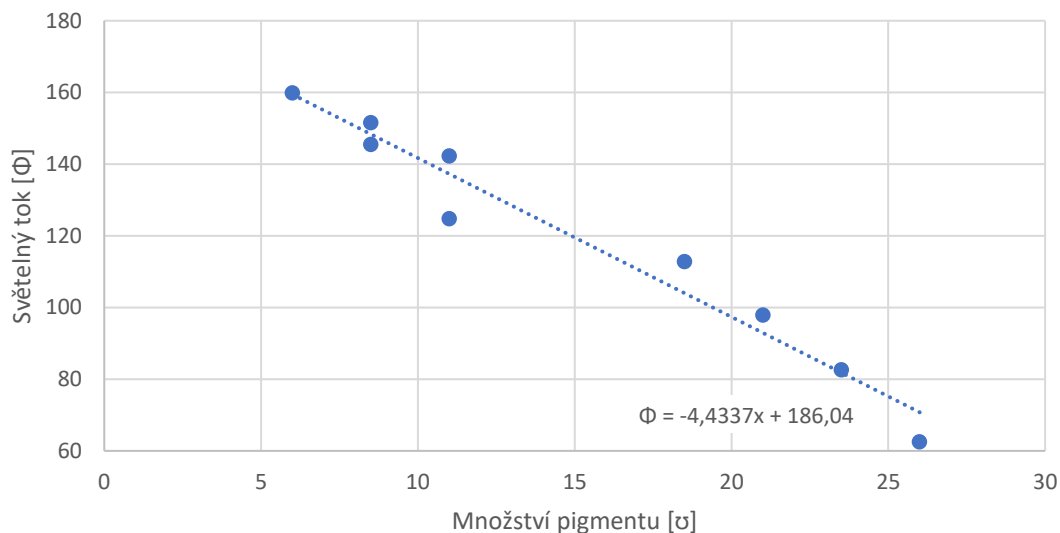
Obr. 5.5 Schéma rozložení kulového integrátoru [25].

Měření bylo provedeno pro 11 vzorků svítidel, jejichž parametry a výsledné hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 5.2.

Tab. 5.2 Parametry a hodnoty světelného toku svítidla.

| Číslo vzorku | Světelný tok Φ [lm] | Množství pigmentu [μ] |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|
| 1 | 159,94 | 6 μ |
| 2 | 151,62 | 8,5 μ |
| 3 | 145,54 | 8,5 μ |
| 4 | 142,32 | 11 μ |
| 7 | 124,78 | 11 μ |
| 8 | 112,89 | 18,5 μ |
| 9 | 97,939 | 21 μ |
| 10 | 82,619 | 23,5 μ |
| 11 | 62,589 | 26 μ |

Závislost světelného toku na množství použitého pigmentu je znázorněna na obrázku 5.6. Z grafu vyplývá, že světelný tok s množstvím použitého pigmentu lineárně klesá. Tato lineární křivka je dána rovnicí 5.1. S využitím rovnice lze určit, jaký bude výsledný světelný tok pro použité množství pigmentu. Koeficient korelace je -0,97914.



Obr. 5.6 Závislost světelného toku na množství použitého pigmentu.

Stanovení světelného toku v závislosti na množství pigmentu je dáno vztahem (5.1).

$$\Phi = -4,4337x + 186,04 \quad (5.1)$$

kde: Φ [lm] světelný tok;
 x [ϖ] množství použitého pigmentu

5.3 Změna teploty chromatičnosti

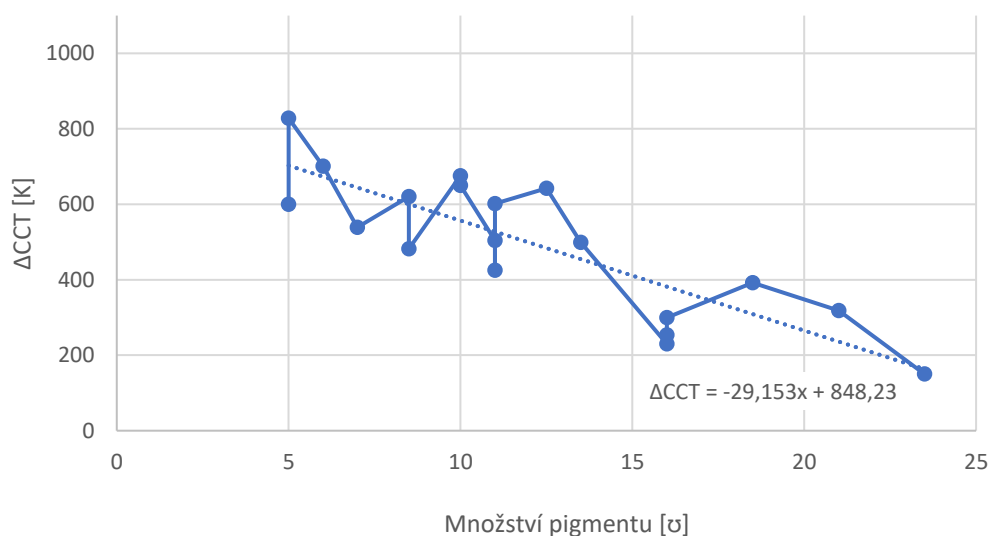
Měření proběhlo pro 19 vzorků svítidel, jejichž parametry a výsledné hodnoty měření jsou zaznamenány v tabulce 5.3.

Tab. 5.3 Parametry a hodnoty teploty chromatičnosti svítidla.

| Číslo vzorku | Teplota chromatičnosti LED pásku CCT [K] | Teplota chromatičnosti svítidla CCT [K] | Množství pigmentu | Δ CCT [K] |
|--------------|--|---|-------------------|------------------|
| 1 | 3 000 | 3600 | 5 ϖ | 600 |
| 2 | 3 000 | 3828 | 5 ϖ | 828 |
| 3 | 2 700 | 3401 | 6 ϖ | 701 |
| 4 | 3 000 | 3539 | 7 ϖ | 539 |
| 5 | 3 000 | 3620 | 8,5 ϖ | 620 |
| 6 | 3 000 | 3482 | 8,5 ϖ | 482 |

| | | | | |
|----|-------|------|--------|-----|
| 7 | 2 700 | 3375 | 10 ů | 675 |
| 8 | 2 700 | 3350 | 10 ů | 650 |
| 9 | 4 000 | 4504 | 11 ů | 504 |
| 10 | 3 000 | 3425 | 11 ů | 425 |
| 11 | 2 700 | 3302 | 11 ů | 602 |
| 12 | 4 000 | 4642 | 12,5 ů | 642 |
| 13 | 2 700 | 3199 | 13,5 ů | 499 |
| 14 | 4 000 | 4230 | 16 ů | 230 |
| 15 | 3 000 | 3254 | 16 ů | 254 |
| 16 | 3 000 | 3300 | 16 ů | 300 |
| 17 | 4 000 | 4392 | 18,5 ů | 392 |
| 18 | 3 000 | 3318 | 21 ů | 318 |
| 19 | 3 000 | 3150 | 23,5 ů | 150 |

Závislost změny teploty chromatičnosti na množství použitého pigmentu je znázorněna na obrázku 5.7. Z grafu vyplývá, že ΔCCT lineárně klesá. Tato lineární křivka je dána rovnicí 5.2. S využitím rovnice lze určit, o kolik se zvýší teplota chromatičnosti LED pásku pro použité množství pigment a tím jaká bude teplota chromatičnosti vyrobeného svítidla. Koeficient korelace je -0,83914.



Obr. 5.7 Závislost změny teploty chromatičnosti na množství použitého pigmentu.

Stanovení hodnoty změny teploty chromatičnosti na množství pigmentu je dáno vztahem (5.2).

$$\Delta\text{CCT} = -29,153x + 848,23 \quad (5.2)$$

kde: ΔCCT [K] posun teploty chromatičnosti;
 x [ů] množství použitého pigmentu.

6 TESTOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI VZORKŮ

6.1 Zkouška vysokým gradientem teplot

Zkouška se provádí pro zjištění odolnosti proti vystavení náhlým výrazným rozdílům teplot.

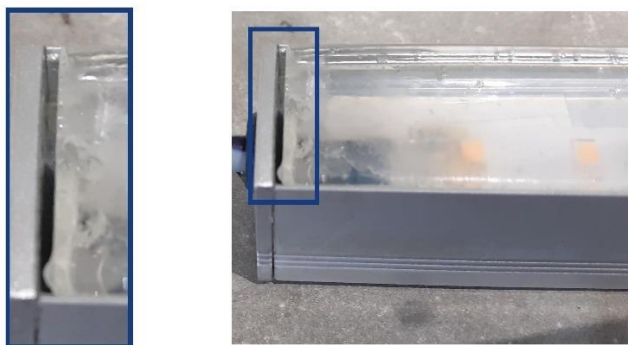
V rámci zkoušky proběhlo deset cyklů, kde postup během každého cyklu byl následující:

1. několikahodinové zmražení vzorků na teploty -22 až -25 °C;
2. test funkčnosti svítidla;
3. opětovné zmražení vzorků na několik minut na teploty -22 až -25 °C;
4. okamžité ponoření celého vzorku na 15 minut do vroucí vody (teploty 95 až 100 °C);
5. stabilizace vzorku na pokojovou teplotu ponořením vzorku do vody o teplotě 20 až 23 °C;
6. vysušení vzorků;
7. test funkčnosti svítidla;
8. vizuální zhodnocení a případné měření posunu vytvrzené hmoty.

Tab. 6.1 Naměřené hodnoty v průběhu zkoušky vysokým gradientem teplot.

| Číslo cyklu: | | Vzorek 1 | Vzorek 2 | Vzorek 3 |
|--------------|-----------|-------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Svítil: | ano | ano | ano |
| | Odtržení: | na jedné straně profilu, cca 0,5 mm | na jedné straně profilu cca 0,5 mm | na jedné straně profilu cca 0,6 mm |
| 2 | Svítil: | ano | ano | ano |
| | Odtržení: | na obou stranách profilu, cca 1 mm | na obou stranách profilu, cca 1 mm | na obou stranách profilu, cca 1,1 mm |
| 3 | Svítil: | ano | ano | ano |
| | Odtržení: | cca 1,5 mm | cca 1,5 mm | cca 1,6 mm |
| 4 | Svítil: | ano | ano | ano |
| | Odtržení: | cca 2 mm | cca 2,0 mm | cca 2,1 mm |

Na základě měření lze konstatovat, že epoxidové hmoty se během každého cyklu smrští o zhruba 0,23 % své délky. Dochází k viditelnému žloutnutí barvy, které je způsobeno degradací materiálu vlivem vysokých teplot.



Obr. 6.1 Fotografie svítidla po zakončení testování vysokým gradientem teploty (Ize vidět smrštění hmoty).

Vlivem smrštění materiálu dojde k vystoupení materiálu nad hranu profilu, což je znázorněno na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 Vystoupení hmoty nad hranici profilu.

6.2 Venkovní dlouhodobý test

Během venkovního dlouhodobého testu byla světla vystavena klimatickým činitelům, mezi které patří:

- teplota – je základní fyzikální veličinou soustavy SI a jednotkou je kelvin. Vedlejší jednotkou je stupeň Celsia. Teplota souvisí s mnoha fyzikálními jevy a závisí na ní makroskopické mechanické, elektromagnetické i chemické vlastnosti látek. Zvýšení a snížení teploty může způsobit změnu rozměru zkoušených svítidel. Jelikož je teplotní roztažnost pro zalévací hmotu po vytvrzení a LED pásek rozdílná, mohlo by dojít při velkých přeměnách až k natržení LED pásku, a tím ke zničení svítidla;
- srážky – voda se ve vzduchu vyskytuje nejvíce ve formě vodní páry. Pro vznik srážek je pak důležitá teplota, při které se vodní pára začne srážet na okolních předmětech, tzv. rosný bod. Do vertikálních srážek kromě deště dále patří sníh (kde místo kapek vody dopadají krystalky ledu) a kroupy, což je extrémní případ, ke kterému dochází výjimečně. V případě krup dopadají na zem velké kusy ledu kulovitěho tvaru o různém průměru. Dále jsou srážky horizontální, kam patří mlha, rosa, jinovatka a námraza. Zkoušená světla byla vystavena tomuto prostředí a otestovalo se, zda jsou dostatečně voděodolná pro běžný provoz;
- sluneční záření – je elektromagnetické vlnění. Sluneční spektrum se obvykle dělí na tři hlavní části – ultrafialové (UV), viditelné a infračervené. S ohledem na

degradaci materiálu je nejdůležitější UV záření. Z celkových slunečních paprsků se 34 % odrazí v atmosféře, 19 % je pohlceno a na zem dopadne kolem 47 %, z čehož 5 % je UV záření. UV záření se skládá z 95 % UVA a 5 % UVB, přesný poměr se však trochu liší s ohledem na roční období a denní dobu. UV záření je nejúčinnější činitel degradace polymerů. Makromolekula se po absorpci světelného záření o vlnové délce 300 nm stane aktivní a její energie vzroste o zhruba 377 kJ. Takováto molekula následně může přenést získanou energii nárazem na jinou molekulu, nebo ji může vyzařovat zářením o vyšších vlnových délkách, jako třeba fluorescence nebo uvolnění tepla. Nejčastěji se však započne fotochemická reakce. Aby se projevila degradace není potřebné, aby bylo svítidlo vystaveno přímému slunečnímu záření, jelikož degradace probíhá i ve stínu. K degradaci materiálu dochází okamžitě se světelnou expozicí, viditelné změny s fyzikálními však nastávají až po určité době [26];

- vliv atmosférických nečistot – atmosféra obsahuje tuhé i plynné nečistoty. Tuhé nečistoty jako písek, prach, saze a jiné mohou mechanicky poškodit povrch svítidel spolu s působením větru. Postupným lehkým omíláním povrchu se může narušit povrch materiálu. Plynné látky v atmosféře jako uhlovodíky, oxidy síry a dusíku jsou nebezpečné pro polymery, které podléhají hydrolyze.

Svítidla pro testování byla umístěna na vodorovný povrch na střeše, aby byla vystavena přímo světelnému záření a nebyla chráněna před povětrnostními podmínkami a srážkami vody. Umístění svítidel je zachyceno na obrázku 6.3. Svítidla byla automaticky zapnuta a vypnuta každý den ve stejném čase jako veřejné osvětlení.



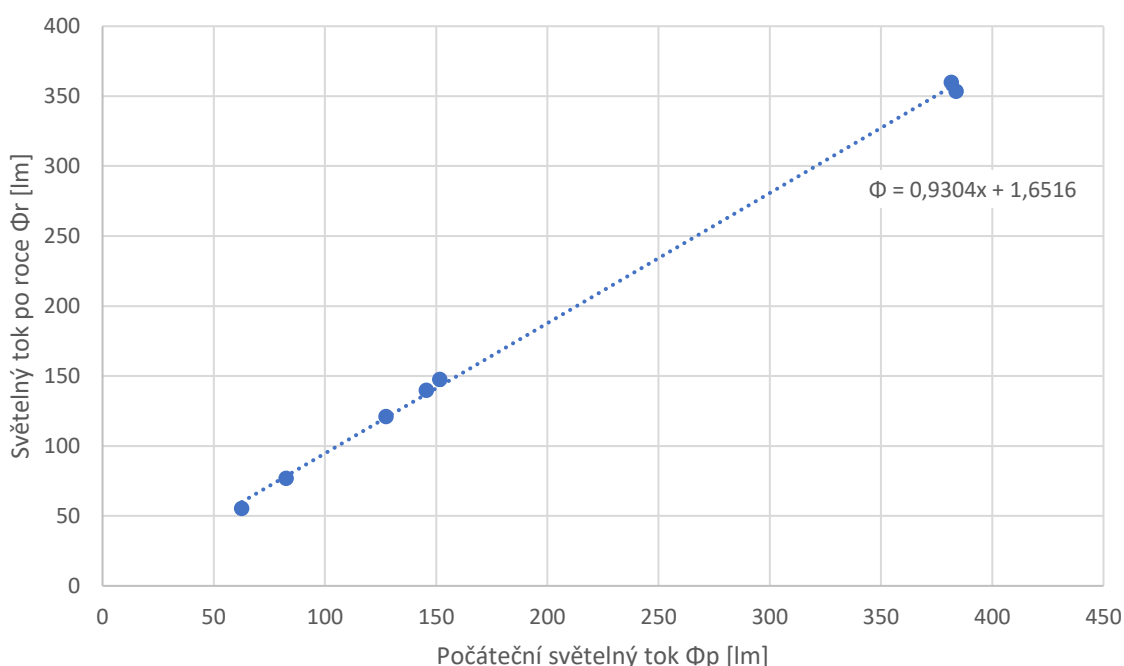
Obr. 6.3 Umístění svítidel na střeše pro venkovní dlouhodobý test.

Tab. 6.2 Parametry a naměřené hodnoty svítidel na začátku dlouhodobého venkovního testu a po roce.

| Značení vzorku | Světelný tok Φ [lm] | CCT [K] | CCT led pásku [K] | Ochranný lak | Délka svítidla [mm] | Délka LED pásku [mm] |
|----------------|--------------------------|---------|-------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| 1 | 381,59 | 3181 | 3000 | Ano | 1520 | 1500 |
| po roce | 359,79 | 3158,33 | | | | |
| 2 | 383,71 | 3154 | 3000 | Ne | 1520 | 1500 |
| po roce | 353,44 | 3056,67 | | | | |
| 3 | 82,619 | 3150 | 3000 | Ano | 420 | 400 |
| po roce | 76,91 | 3132,67 | | | | |
| 4 | 62,589 | 2926 | 3 000 | Ano | 420 | 400 |
| po roce | 55,27 | 2913,33 | | | | |
| 5 | 151,62 | 3620 | 3 000 | Ano | 420 | 400 |
| po roce | 147,52 | 3587 | | | | |
| 6 | 145,54 | 3182 | 2 700 | Ano | 420 | 400 |
| po roce | 139,83 | 3171,67 | | | | |
| 7 | 127,46 | 9312 | 6 000 | Ne | 420 | 400 |
| po roce | 120,95 | 9097 | | | | |

6.2.1 Pokles světelného toku

Z grafu na obrázku 6.4 vyplývá, že světelný tok s časem lineárně klesá. Tato závislost je dána rovnicí 6.1. Za předpokladu, že průběh degradace bude i v dalších letech lineární, lze určit, jaký světelný tok bude po dvou letech provozu. Provede se tak, že za výchozí hodnotu k výpočtu považujeme naměřený světelný tok po roce provozu.



Obr. 6.4 Graf závislosti světelného toku po roce na počátečním světelném toku.

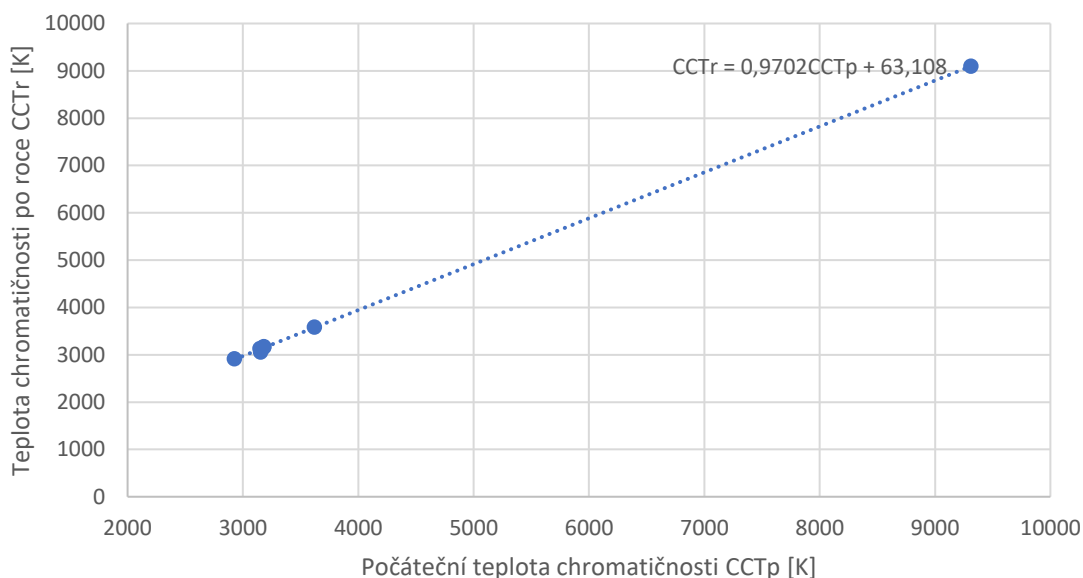
Stanovení světelného toku po roce provozu je dáno vztahem (6.1).

$$\Phi_r = 0,9304 \cdot \Phi_p + 1,6516 \quad (6.1)$$

kde: Φ_r [lm] světelný tok po roce provozu
 Φ_p [lm] počáteční světelný tok

6.2.2 Změna teploty chromatičnosti

Z grafu na obrázku 6.5 vyplývá, že teplota chromatičnosti s časem lineárně klesá, kde tato závislost je dána rovnicí 6.2. Za předpokladu, že průběh degradace bude i v dalších letech lineární, lze určit, jaká teplota chromatičnosti bude po dvou letech provozu. Provede se tak, že za výchozí hodnotu k výpočtu považujeme naměřenou teplotu chromatičnosti po roce provozu.



Obr. 6.5 Graf závislosti teploty chromatičnosti na počáteční teplotě chromatičnosti.

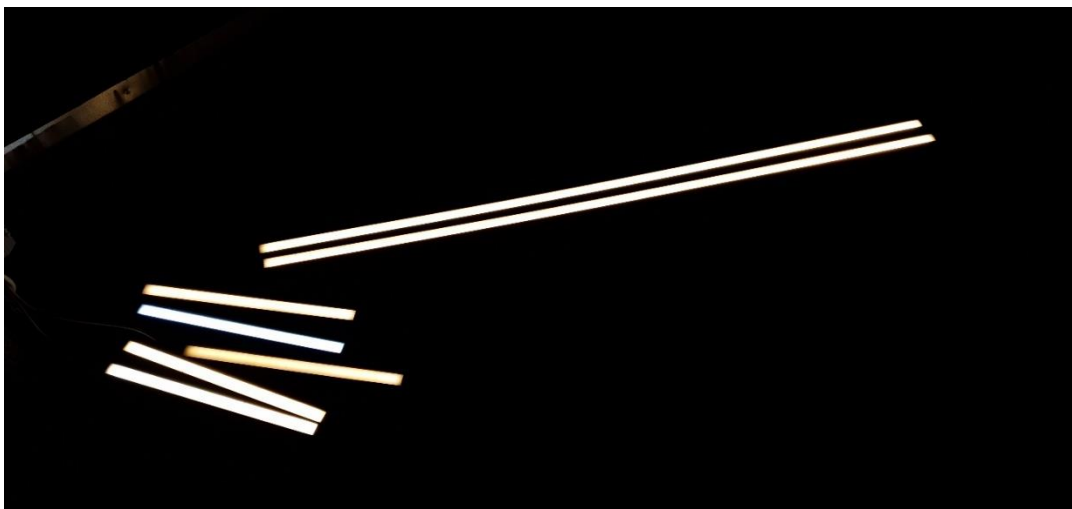
Stanovení teploty chromatičnosti po roce provozu je dáno vztahem (6.2).

$$CCT_r = 0,9702 \cdot CCT_p + 63,108 \quad (6.2)$$

kde: CCT_r [K] teplota chromatičnosti po roce provozu
 CCT_p [K] počáteční teplota chromatičnosti

6.2.3 Vizualní zhodnocení funkčnosti vzorků

V průběhu roku docházelo 1x měsíčně ke kontrole funkčnosti vzorků a jejich vizuálnímu posouzení. Dvě z kontrol jsou vyobrazeny na obrázku 6.6. a 6.7.



Obr. 6.6 Kontrola funkčnosti svítidel (bez závad).



Obr. 6.7 Vizuální kontrola svítidel (v zimním období).

Navzdory výsledkům ze zkoušky vysokým gradientem teplot nedošlo u žádného svítidla v průběhu roku k odtržení hmoty od strany profilu (viz obr. 6.8).



Obr. 6.8 Detail boční strany svítidla (nedošlo ke smrštění a odtržení hmoty od profilu).

7 JASOVÁ ANALÝZA

Jasová analýza byla provedena na Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně a prováděla se na speciálně upraveném fotoaparátu značky Nikon (technické parametry jsou uvedeny v tabulce 7.1), který přenáší data do počítače. Data jsou následně zpracována v programu LumiDISP vyvinutém na VUT speciálně pro tento typ přístroje.



Obr. 7.1 Zabalený jasový analyzátor.

Informace o LDA (*Luminance Distribution Analyser*):

- HW koncept – jádrem přístroje je laboratorně kalibrovaný digitální fotoaparát, který podporuje plnou softwarovou kontrolu a po propojení kabelem do počítače ho lze dálkově ovládat. U fotoaparátu lze měnit objektivy a filtry pro změnu rozsahu zorného pole a citlivosti na jas;
- SW koncept – použitý software LumiDISP je vyvíjen speciálně pro tento typ přístroje a převádí „surová“ data z fotoaparátu na jasovou informaci. Z těchto informací pak vytvoří tzv. jasovou mapu, nad kterou je možné provést různé typy výpočtů, jako třeba jasové řezy, histogramy, výpočty kontrastů a jiné. Pomocí softwaru je možné dálkové plně ovládat fotoaparát včetně ostření a živého náhledu;
- aplikační využití – analyzátor lze využít v celé řadě úloh ve fotometrické technice i mimo ni. Převyšuje ostatní běžné analyzátoři i díky speciálnímu počítačovému softwaru, který nabízí měření a hodnocení oslnění i dle metodiky UGR, což ostatní analyzátoři neumožňují [27].

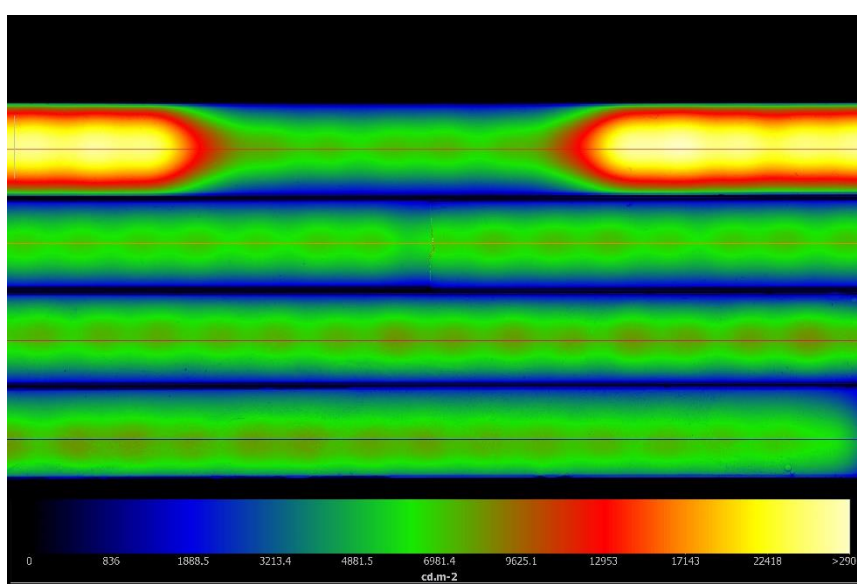
Tab. 7.1 [27] Technické specifikace jasoměru

| Typ fotoaparátu | Nikon D7200 |
|--|------------------------------|
| Počet obrazových bodů: | 24,2 milionů |
| Typ snímače: | CMOS Nikon DX 23,5 x 15,6 mm |
| A/D převodník: | 12 bitů / 4096 úrovní |
| Vyhodnocování softwaru: | LumiDISP verze 3.0 |
| Operační systém Windows: | 7/8/10 |
| Dynamický rozsah měření jasu: | 1 : 1 000 na jedno měření |
| Úplný rozsah jasu pro f=18 mm (bez filtru) | 1 : 3 200 000 000 |

Tab. 7.1 [26] Technické specifikace jasoměru

| Značení vzorku | Světelný tok Φ [lm] | CCT [K] | Množství pigmentu |
|----------------|--------------------------|---------|-------------------|
| 1 | 97,939 | 3 318 | 21 μ |
| 2 | 142,32 | 3 504 | 11 μ |
| 3 | 159,94 | 3 701 | 6 μ |
| 4 | 381,59 | 3 346 | 16 μ |

Na obrázku 7.2 je jasová mapa. Princip spočívá na přiřazení barvy každému bodu na snímku, která odpovídá jasu daného bodu. V dolní části obrázku se nachází stupnice jasů, díky které lze určit, jak velkou hodnotu jasu barva představuje.

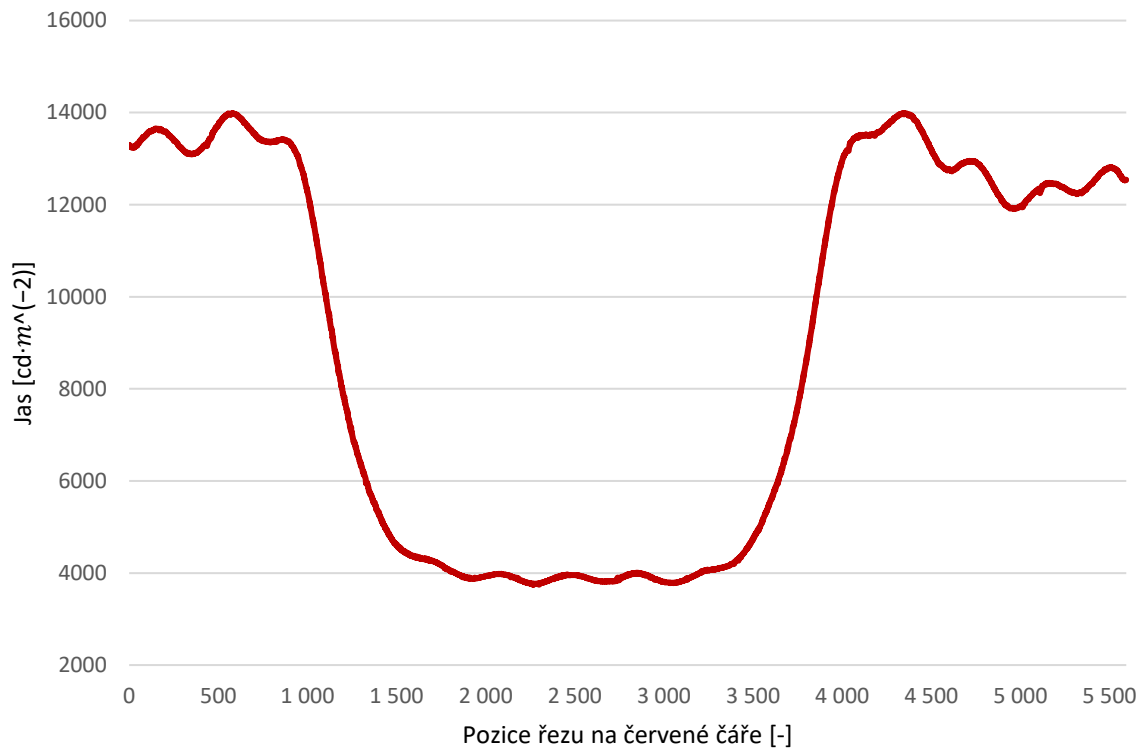


Obr. 7.2 Jasová mapa.

Sestupně od vrchu se nachází vzorek číslo 1, 2, 3 a 4. Každý ze vzorků byl v softwaru proložen jasovým řezem. Ten se v obrázku zobrazuje v levé části jako kolmice na růžovou čáru. Tento řez odečetl pro všechny čtyři svítidla zjištěná data po celé délce čáry. Data byla následně zpracována v excelu a byl vytvořen graf pro každé svítidlo (viz obr. 7.3, 7.4, 7.5 a 7.6).

Jasová analýza vzorku číslo 1

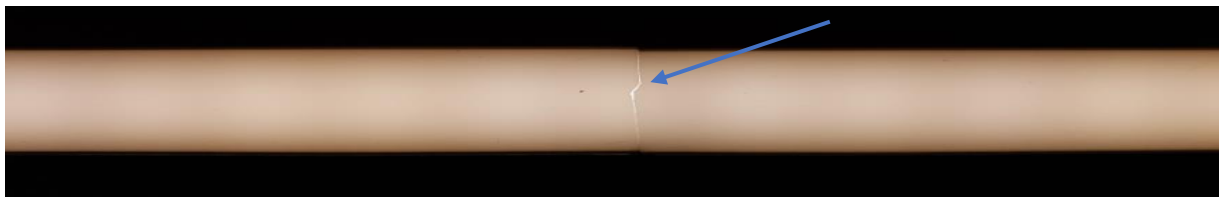
Vzorek číslo 1 byl vytvořen z poškozeného LED pásku. Jelikož je LED pásek paralelně zapojen, nefunkčnost jednoho úseku zapříčinila vyšší napájení zbylých segmentů pásku. Z obrázku 7.1 lze předpokládat, že velmi vysoký světelný tok na krajích svítidla, kde je LED pásek funkční, dostatečně prosvítil materiál, a tak i v nefunkčním místě pásku hodnota jasu dosahovala podobných hodnot jako ostatní svítidla. Z grafu na obrázku číslo 7.3 lze vidět, že v nefunkčním místě pásku dosahuje jas hodnot okolo $4\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$. Těchto jasů dosahuje i svítidlo 2 a 3.



Obr. 7.3 Graf hodnot jasu pro svítidlo č.1.

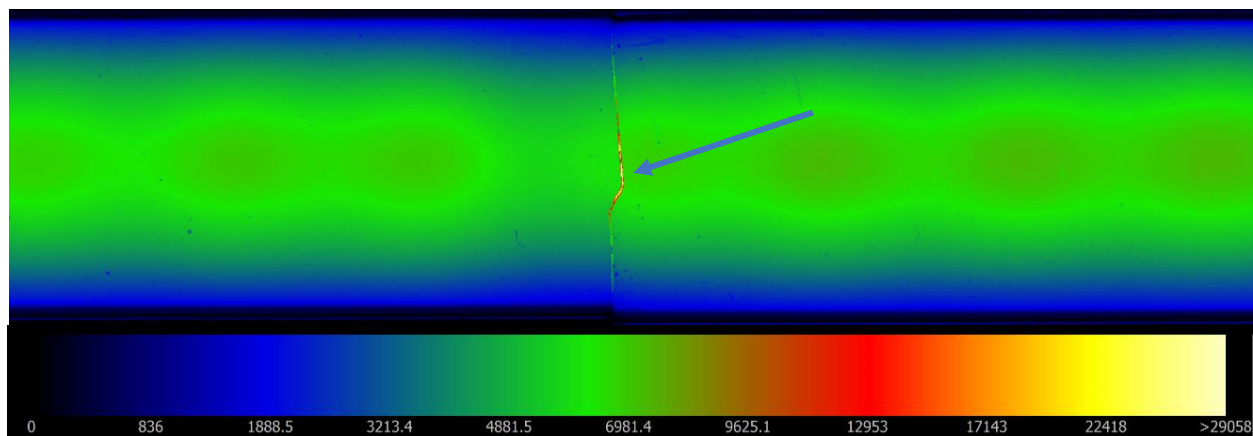
Jasová analýza vzorku 2

Vzorek číslo 2 byl po vytvrzení hmoty úmyslně poškozen za účelem vytvoření praskliny v materiálu (viz obr. 7.4).

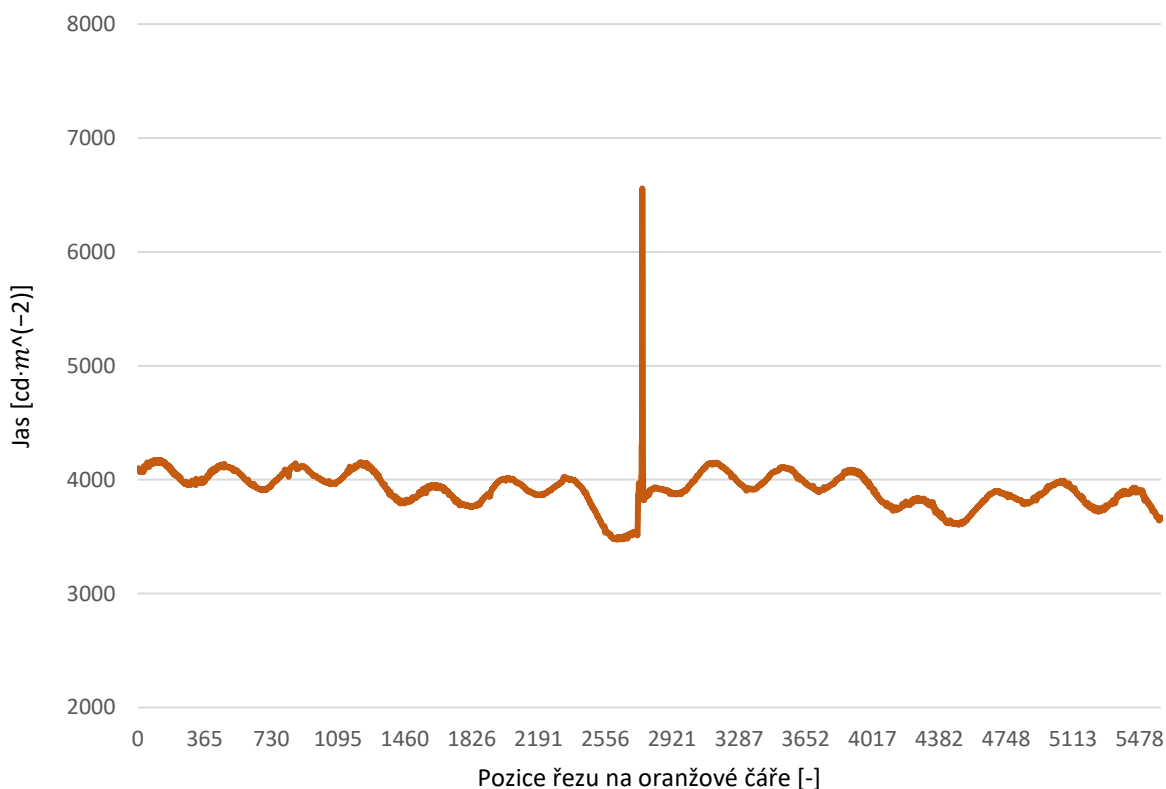


Obr. 7.3 Svítidlo 2.

Na obrázku 7.5. je detail jasové mapy s místem praskliny. V tomto místě se vyskytuje nejvyšší hodnota jasu. Jelikož se však jedná o celkem malou plochu tohoto vyzařování, tak po zprůměrování na celou šířku svítidla 2 jas dosahuje pouze lehce nad $6\,500\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ (viz hodnoty v grafu na obrázku 7.4), kdežto jas svítidla 1 dosahuje až k $14\,000\text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ (viz obr. 7.3).



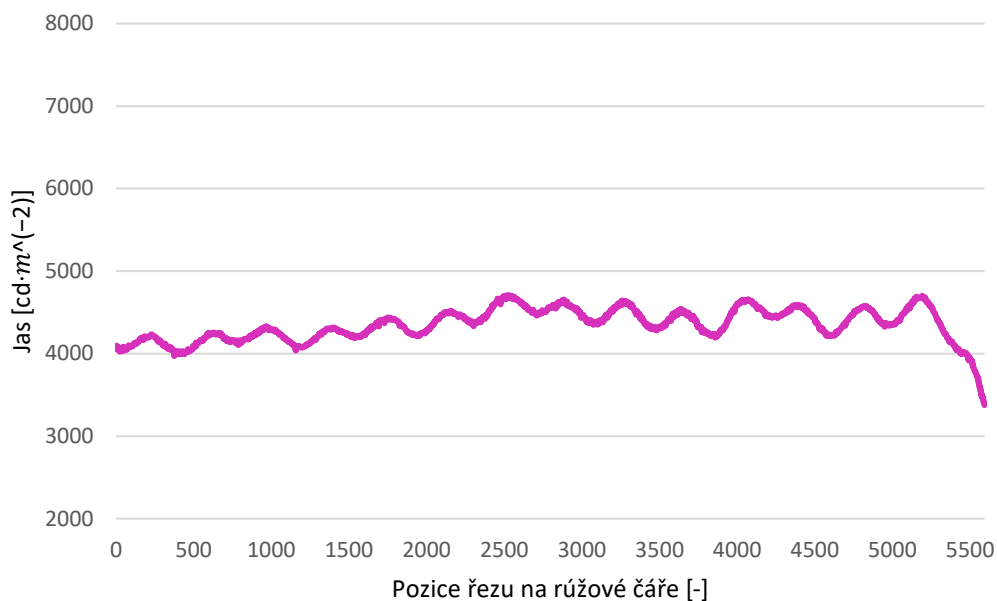
Obr. 7.3 Detail jasové mapy s místem praskliny svítidla 2.



Obr. 7.4 Graf hodnot jasu pro svítidlo 2.

Jasová analýza vzorku číslo 3

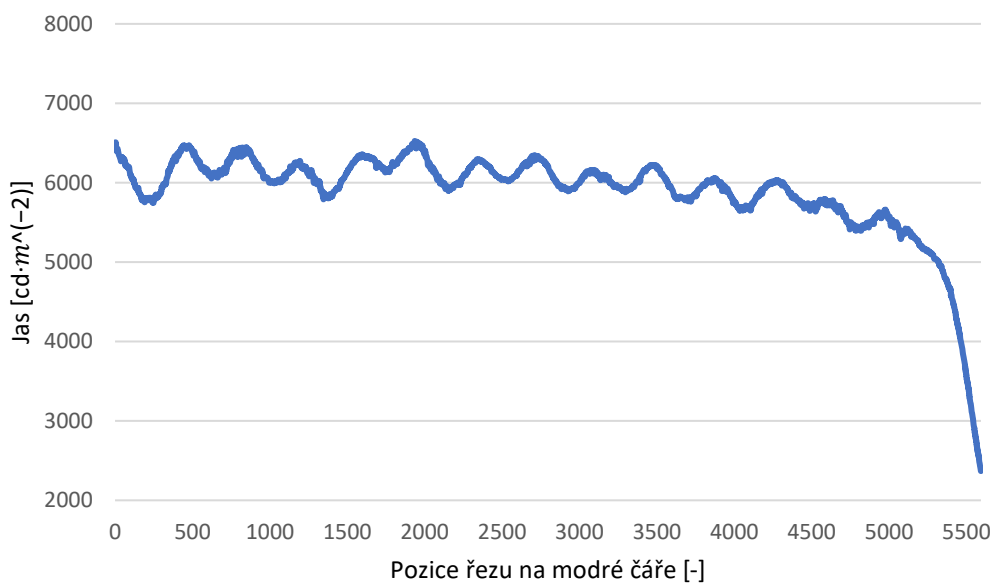
Vzorek číslo 3 byl zarovnan hranou s koncem jasové mapy. Lze tak pozorovat v grafu na obrázku 7.5, že v místě mezi koncem LED pásku a boční stěnou svítidla jas nijak výrazně neklesnul.



Obr. 7.5 Graf hodnot jasu pro svítidlo 3.

Jasová analýza vzorku číslo 4

Vzorek číslo 4 byl zarovnán hranou s koncem jasové mapy. Lze tak pozorovat v grafu na obrázku 7.6, že v místě mezi koncem LED pásku a boční stěnou svítidla jas výrazně klesá k hodnotě až 2 250 $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$.



Obr. 7.6 Graf hodnot jasu pro svítidlo 4.

Na základě jasové analýzy vyplývá, že lepší homogenita je u svítidla číslo 3, avšak dosahuje nižších jasů než svítidlo číslo 4.

9 ZÁVĚR

V rámci diplomové práce byla analyzována moderní liniová LED svítidla se zvýšenou ochranou proti atmosférickému a mechanickému zatížení v externích podmínkách. Tato práce definovala řadu experimentálních zkoušek a technických veličin, jak kvantifikovat světelné a další vlastnosti tohoto druhu svítidel, chráněných vrstvou epoxidové hmoty s různým množstvím pigmentu. Množství pigmentu má na řadu vlastností světla významný vliv, protože ovlivňuje světelný tok a teplotu chromatičnosti.

Na základě provedených krátkodobých zkoušek vyplývá:

- optická ztráta svítidla je závislá na množství použitého pigmentu, světelný tok s množstvím pigmentu lineárně klesá;
- teplota chromatičnosti lineárně klesá s množstvím použitého pigmentu;
- při vystavení epoxidové hmoty prudkým teplotním gradientům dojde k smrštění délky zhruba 0,23 %;

Na základě provedené dlouhodobé zkoušky vyplývá:

- daná technologie potvrdila plnou funkčnost svítidel po celou dobu konání zkoušek (více než 380 dnů bez přerušení);
- během této zkoušky nebylo pozorováno objemové smrštění epoxidové hmoty;
- na základě této zkoušky lze odhadovat funkčnost svítidla minimálně několik let.

Obecně lze konstatovat, že tato technologie je v praxi využitelná a ekonomicky přijatelná. V současnosti již probíhá implementace výsledků do sériové výroby.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BAXANT, P. Světelná technika [online]. Brno, 2013 [vid. 2020-10-18]. Dostupné z:
http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MSVT/Ucebni_text_MSVT.pdf. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
2. HABEL, J. Světlo a osvětlování. Praha: FCC Public, 2013. 622 s. ISBN:978-80-86534-21-3.
3. B - ŠKODA, Jan. *Měření prostorového úhlu* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-02-17]. Dostupné z:
http://www.svetelnalaborator.cz/files/sylabus/72_Mereni_prostoroveho_uhlu.pdf. Podklady pro laboratorní cvičení. Vysoké učení technické v Brně.
4. PORTUŽÁK, R. Světelná technika [online]. 2011, , 255 [vid. 2020-10-18]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/CVUT-6-Svetelna.pdf>
5. ERNSTOVÁ, Tereza. *Vliv virtuální textury na vnímání barevné odchylky*. Liberec, 2009. Dostupné také z:
https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/4087/bc_17147.pdf?sequence=1&isAllo wed=y. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Michal Vík, Ph.D.
6. VIK, Michal. Měření barevnosti a vzhledu – 1. část. *Světlo: časopis pro světlo a osvětlení* [online]. FCC Public, 2001, (1) [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/mereni-barevnosti-a-vzhledu-1-cast--16955>
7. VIK, Michal a Martina VIKOVÁ. *Základy KOLORISTIKY*. Liberec. Podklady ke studiu. Technická univerzita v Liberci
8. Barva světla (teplota chromatičnosti) u LED osvětlení. *T-LED* [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: www.t-led.cz/blog/barva-svetla/
9. BARVA SVĚTLA - ANEB CO TO JE TEPLOTA CHROMATIČNOSTI? *Štoll* [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: https://stoll.cz/blog/post/teplota_chromaticnosti.html
10. VECKO, Jakub. *Osvětlení pracovišť při rozdílných požadavcích uživatelů*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jan Zálešák
11. JANÍK, Daniel. *ZDROJE SVĚTLA*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. MARIE HAVLÍKOVÁ, Ph.D.
12. PAVELKA, Tomáš. *Provozní vlastnosti LED a jejich modelování*. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
13. MALÍŘ, Jakub. *Vliv vybraných složek provozního prostředí na svítivost elektroluminiscenčních diod*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení v Praze. Vedoucí práce doc., Ing. Jan Kudláček, CSc.
14. KASAP, Safa. *Junction devices and light emitting diodes* [online]. Kanada, 2001 [cit. 2021-5-3]. Dostupné z:
<http://www.phy.olemiss.edu/~cremaldi/PHYS417/PNJunctionDevices.pdf?fbclid=IwAR1z1NJ0vllXt0-ZAQy4YywKlteZjonirBS4fq2sABtMcx-dBmj7UNOERA8>
15. VAŇKO, Adam. *Svítidla a aplikace s power LED zdroji*. Brno, 2011. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

16. VYSOUDIL, Martin. *Fotometrie a spektrometrie zapouzdřených LED čipů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
17. PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVA. *Design of Rotating Electrical Machines* [online]. John Wiley & Sons, 2008 [cit. 2021-5-9]. ISBN 978-0-470-69516-6. Dostupné z: https://www.academia.edu/36119607/Design_of_Rotating_Electrical_Machines_By_Juha_Pyrhonen_and_Tapani_Jokinen_and_Valeria_Hrabovcova_1
18. ŠTAJNER, David. *Zalévací hmoty pro výkonovou elektroniku*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Adam Vašíček.
19. CHUDÁ, Kateřina. *Testování zalévacích hmot pro elektrické stroje*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
20. HANAČÍK, Radim. *Expozice epoxidových pryskyřic ve ztížených klimatických podmínkách*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Frk. Ph.D.
21. VK LOŽISKA [online]. [cit. 2021-5-9]. Dostupné z: <http://www.vkloziska.cz/zalevacipryskyrice>
22. KOZELKA, Pavel. Zalévací hmoty pro elektroniku: Základní kritéria pro jejich výběr. *Světlo* [online]. 2010, (4), 1 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40876.pdf>
23. Traiva-shop. *Traiva-shop* [online]. [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.traiva-shop.cz/>
24. KUTÝ, Tomáš. *Blízká fotometrie*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
25. VÁGN, Richard. *Měření fotometrických parametrů světelných zdrojů pro interaktivní panel*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.
26. SKOPCOVÁ, Anna. *Degradace výrobků z polymerních materiálů vlivem UV záření*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Jakub Hruža, Ph.D.
27. LDA - LumiDISP [online]. Brno [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://www.lumidisp.eu/>
28. Garoma [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/>
29. HotAir [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/>
30. Levnetmely.cz [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: <https://www.levnetmely.cz/produkt/michadlo-pro-epoxidove-a-pur-lici-systemy/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka/Symbol | Jednotka | Popis |
|------------------|---------------------------------|---|
| A | | Plocha vyřatá na povrchu koule prostorovým úhlem |
| M_z | $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ | Měrný výkon |
| R_{LO} | - | Účinnost svítidla |
| A | m^2 | Plocha vyřatá na povrchu koule |
| CCT | K | Correlated color temperature |
| CCT _p | K | Počáteční teplota chromatičnosti |
| CCT _r | K | Teplota chromatičnosti po roce užívání |
| CIE | | International commission on illumination |
| CMYK | | Cyan, Magenta, Yellow, black |
| CTE | | Součinitel teplotní roztažnosti |
| E | lx | Osvětlenost |
| H | $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ | Světlení |
| I | A | Proud |
| I_y | cd | Svítivost |
| K | $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ | Světelný účinek monochromatického zářen |
| L | $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ | Jas |
| LED | | Lighting Emitted Diode |
| NCS | | Natural Colour System |
| T_c | K | Teplota chromatičnosti |
| OLED | | Organic Lighting Emitted Diode |
| P | W | Příkon |
| <i>PWM</i> | | <i>Pulse Width Modulation</i> |
| r | m | Poloměr koule |
| R | Ω | Rezistor |
| R _a | - | Index podání barev |
| R_{DLO} | - | Dolní účinnost svítidla |
| S | m^2 | Plocha |
| SMD LED | | Surface mount diode |
| x | ∅ | Množství pigmentu |
| ZH | | Zalévací hmota |
| λ | nm | Vlnová délka |
| Φ | lm | Světelný tok |
| Φ_e | W | Spektrální zářivý tok o jedné specifické vlnové délce λ |
| Φ_{sv} | lm | Světelný tok svítidla |
| Φ_z | lm | Součet jednotlivých toků zdrojů svítidla |
| $\Phi(\lambda)$ | lm | Světelný tok monochromatického zářen o vlnové délce λ |
| Ω | sr | Prostorový úhel |