

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**Aktuální stav technologie osvětlování pomocí  
zdrojů založených na LED**

**Current state of lighting technology based on LED  
sources**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Bc. Ondřej Bartoníček**

*Technická ekologie*

Vedoucí práce: doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

**Plzeň, 2016**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej BARTONÍČEK**  
Osobní číslo: **E14N0141P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Technická ekologie**  
Název tématu: **Aktuální stav technologie osvětlování pomocí zdrojů založených na LED**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Prověřte a rekapitulujte současný stav možností osvětlování pomocí zdrojů založených na technologii LED.

1. Popište základní principy a možnosti osvětlování pomocí technologie LED.
2. Navrhněte soubor reprezentativních měření vhodných pro porovnání technologie LED s tradičními zdroji a svítidly.
3. Proveďte vybraný soubor měření a porovnejte současné možnosti osvětlování pomocí LED podle rozložení světelného toku, jeho spektrálního barevného indexu, teploty a stability.
4. Učiňte závěrečné zhodnocení aktuální použitelnosti LED na základě provedených měření s uvažováním i hlediska ekonomického a ekologického.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

- 1. Linda, J.: Elektrické světlo 1., 2**
- 2. Habel, J.: Světelná technika**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá světelnou technikou, zejména světlem emitujícími diodami. V první kapitole jsou představeny základní světelně technické veličiny a světelné zdroje. Součástí této práce je také navržený soubor měření, jehož výsledky slouží k porovnání základních světelných zdrojů a jejich světelně technických parametrů. V další části jsem vytvořil návrh osvětlovací soustavy se zářivkovými a LED trubicemi. Tyto návrhy osvětlení posléze porovnávám. V závěrečné části jsem zhodnotil technologii LED a její užitečnost v praxi.

**Klíčová slova:** světelná technika, světelný zdroj, svítidlo, svítivost, světelný tok, prostorový úhel, jas, osvětlení, měrný výkon

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with the lighting technology, particularly light-emitting diodes. In the first chapter I introduce the basic photometric parameters and light sources. Included in this work is also a proposed set of measurements, whose results are used to compare the basic light sources and their light-technical parameters. In the next section I created a draft of a lighting system with LED and a draft of fluorescent tubes. Subsequently I compare the two drafts. In the final section, I evaluate LED technology and its usefulness in practice.

**Keywords:** lighting technology, light source, light fitting, luminosity, luminous flux, solid angle, brightness, lighting, specific power

## **PODĚKOVÁNÍ**

Mé poděkování patří vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph.D., za odborné vedení, ochotu a předání cenných zkušeností. Děkuji též Ing. Viktoru Mayerovi, Ph.D., za odborné konzultace. Velice si cením spolupráce s Ing. Rudolfem Bayerem při měření, které se konalo v prostorách ČVUT v Praze. Mé poděkování patří také Mgr. Miloslavě Jonové za přečtení práce a provedení korektur.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně  
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni 13. května 2016

.....  
Vlastnoruční podpis

## OBSAH

|   |    |
|---|----|
| SEZNAM ZKRATEK.....                                     | 3  |
| ÚVOD.....   | 4  |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST.....                                  | 5  |
| 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY SVĚTELNÉ TECHNIKY .....              | 5  |
| 1.1.1 Světelný zdroj.....                               | 5  |
| 1.1.2 Svítidlo.....                                     | 5  |
| 1.2 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY .....                   | 6  |
| 1.2.1 Světelný tok .....                                | 6  |
| 1.2.2 Prostorový úhel.....                              | 7  |
| 1.2.3 Svítivost .....                                   | 8  |
| 1.2.4 Osvětlenost.....                                  | 9  |
| 1.2.5 Jas.....  | 10 |
| 1.2.6 Teplota chromatičnosti .....                      | 12 |
| 1.2.7 Měrný výkon .....                                 | 13 |
| 1.3 VLASTNOSTI SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....                   | 14 |
| 1.3.1 Vjem barvy.....                                   | 14 |
| 1.3.2 Trichromatická soustava.....                      | 16 |
| 1.3.3 Všeobecný index podání barev .....                | 18 |
| 1.4 SVĚTELNÉ ZDROJE LED.....                            | 19 |
| 1.4.1 Princip.....                                      | 20 |
| 1.4.2 Historie .....                                    | 22 |
| 1.4.3 Přednosti a nedostatky LED.....                   | 24 |
| 1.4.4 Speciální typy diod (Laser, OLED).....            | 26 |
| 1.4.5 Oblasti použití zdrojů LED.....                   | 29 |
| 1.4.6 Vliv diod na zdraví .....                         | 35 |
| 1.5 ZÁKLADNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE.....                       | 37 |
| 1.5.1 Žárovky .....                                     | 37 |
| 1.5.2 Halogenové žárovky .....                          | 38 |
| 1.5.3 Zářivky .....                                     | 39 |
| 1.5.4 Vysokotlaká sodíková výbojka .....                | 41 |
| 1.6 NÁVRH MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH VELIČIN .....               | 42 |
| 1.6.1 Měření svítivosti.....                            | 44 |
| 1.6.2 Měření čar svítivosti.....                        | 46 |
| 1.6.3 Měření osvětlenosti .....                         | 48 |
| 1.6.4 Měření světelného toku .....                      | 49 |
| 1.6.5 Měření světelných parametrů spektrofotometry..... | 50 |
| 1.7 ZÁSADY PŘI NÁVRHU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY.....         | 51 |
| 1.7.1 Rozložení jasu .....                              | 52 |
| 1.7.2 Průměrná osvětlenost $E_m$ .....                  | 53 |
| 1.7.3 Rovnoměrnost osvětlení $U_0$ .....                | 53 |
| 1.7.4 Oslnění UGR.....                                  | 53 |
| 2 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ .....           | 54 |
| 2.1 MĚŘENÍ S POMOCÍ SPEKTROFOTOMETRU .....              | 54 |
| 2.2 PŘEDSTAVENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ.....                  | 55 |
| 2.2.1 Naměřené hodnoty .....                            | 58 |
| 2.2.2 Diagramy a spektra .....                          | 59 |

---

|                         |  |    |
|-------------------------|--|----|
| 2.2.3                   | Výsledky měření.....                             | 62 |
| 2.3                     | MĚŘENÍ S POMOCÍ GONIOFOTOMETRU.....              | 64 |
| 2.3.1                   | Polární graf .....                               | 66 |
| 2.3.2                   | Vyhodnocení měření .....                         | 67 |
| 2.4                     | MĚŘENÍ NA KULOVÉM INTEGRÁTORU .....              | 69 |
| 2.4.1                   | Postup měření.....                               | 69 |
| 2.4.2                   | Naměřené a další důležité hodnoty .....          | 70 |
| 2.4.3                   | Vyhodnocení měření .....                         | 71 |
| 3                       | NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY.....                  | 72 |
| 3.1                     | HRANIČNÍ HODNOTY PARAMETRŮ.....                  | 72 |
| 3.2                     | POSTUP PŘI NÁVRHU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY .....     | 73 |
| 3.3                     | NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - ZÁŘIVKY .....       | 76 |
| 3.4                     | NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - LED.....            | 80 |
| 3.5                     | SEZNAM POUŽITÝCH SVÍTIDEL .....                  | 82 |
| 3.6                     | EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV..... | 83 |
| 3.6.1                   | Grafy.....                                       | 84 |
| 3.6.3                   | Příklady výpočtů.....                            | 86 |
| 3.7                     | ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ.....                           | 87 |
| ZÁVĚR                   | .....  | 89 |
| SEZNAM LITERATURY       | .....  | 91 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK | .....  | 94 |
| PŘÍLOHY                 | .....  | I  |



**SEZNAM ZKRATEK**

|                      |   |
|----------------------|---|
| <i>ČSN</i>           | Česká technická norma   |
| <i>E</i>             | Intenzita osvětlení   |
| <i>E14, E27</i>      | Patice pro světelný zdroj, různého průměru                      |
| <i>I</i>             | Svítivost   |
| <i>L</i>             | Jas   |
| <i>LED</i>           | Light-emitting diode - Světlo emitující dioda                   |
| <i>OLED</i>          | Organic light emitting diode - Organická světlo emitující dioda |
| <i>R<sub>a</sub></i> | Index podání barev  |
| <i>λ</i>             | Vlnová délka  |
| <i>Φ</i>             | Světelný tok  |
| <i>Ω</i>             | Prostorový úhel   |
| <i>T<sub>c</sub></i> | Náhradní teplota chromatičnosti                                 |
| <i>η</i>             | Měrný výkon   |
| <i>U<sub>0</sub></i> | Rovnoměrnost osvětlení  |
| <i>UGR</i>           | Unified Glare Rating - oslnění                                  |

## Úvod

Světlo je nepostradatelnou částí života všech organismů na této planetě. Zpočátku se člověk musel spokojit s přírodními světelnými zdroji, mezi které patří zejména slunce a měsíc. Jakmile člověk ovládl oheň, nebyl již omezen denním světlem. Oheň mohl být použit v prostorách, do kterých by se sluneční záření nedostalo. Kromě toho, že oheň zahřívá a osvětluje okolní prostory, používal se k zahánění zvěře, opracovávání předmětů. Oheň jako zdroj světla a tepla vyžadoval poměrně náročnou údržbu, kterou bylo třeba vykonat. Objevení a následné používání elektřiny postupně odhalilo další možnosti způsobu osvětlení, a to vytvoření tzv. umělého světelného zdroje, čímž byla žárovka. Postupem času se objevovaly různé typy umělých světelných zdrojů, jejich cílem vždy bylo dosáhnout úspory elektrické energie, dosažení co největšího světelného toku a nejdelší životnosti. V 20. století se počet typů světelných zdrojů značně rozšířil. Různé typy světelných zdrojů mají své přednosti, ale také své specifické místo použití (nedá se použít všude). Již na počátku 20. století se objevily náznaky příchodu nového světelného zdroje na bázi elektroluminiscence, avšak přes značné komplikace bylo samotné objevení až v druhé polovině 20. století. Jedná se o světelné zdroje LED (light-emitting diode), které se díky neutuchajícímu vývoji dostávají téměř do všech oblastí lidských činností. Na počátku 21. století se o tomto světelném zdroji hovoří jako o zdroji budoucnosti, jenž by měl přinést značné úspory ve spotřebě elektrické energie spolu s výtečnými světelnými technickými parametry.

Tato diplomová práce se zabývá světelně emitujícími diodami. Zájem o toto odvětví energetiky ve mně podnítil předmět Elektrické světlo. Je neuvěřitelné, jak světlo, ať už přírodní nebo elektrické, zasahuje do našich životů.

## 1 TEORETICKÁ ČÁST

### 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY SVĚTELNÉ TECHNIKY

V této práci jsou velice často používány pojmy svítidlo, světelný zdroj.

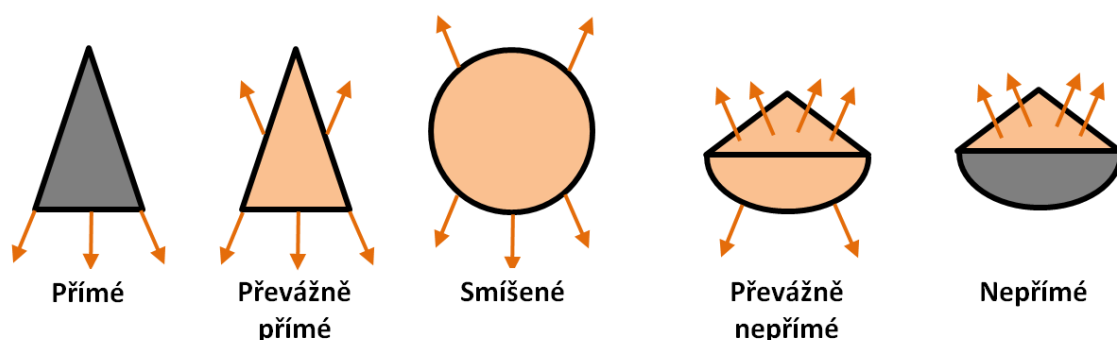
#### 1.1.1 SVĚTELNÝ ZDROJ

Světelné zdroje jsou základním prvkem osvětlovacích soustav. Jsou to tělesa vyzařující optické, zpravidla viditelné záření. Mohou být přírodní (slunce, měsíc apod.) nebo umělé (svíčka, žárovka, LED a další).

#### 1.1.2 SVÍTIDLO

Svítidlo je zařízení, které rozděluje, filtruje nebo upravuje světlo vyzařované jedním nebo více světelnými zdroji. Zahrnují v sobě samotné světelné zdroje, spoustu dílů zajišťujících připojení k elektrické síti, jejich upevnění a ochranu. Při použití svítidel v praxi je nutné zohlednit okolní prostředí, a to z pohledu elektrických a provozně-technických vlastností. Na svítidla je kladena řada požadavků, mezi které patří zejména jednoduchá montáž, snadná údržba, dlouhá životnost, spolehlivost a nesmí být nebezpečná pro své okolí. Nejdůležitější údaj pro svítidlo je ohledně charakteru jejich vyzařování světelného toku do okolního prostoru.

Svítidla lze zařadit do různých kategorií, a to podle jejich oblasti použití (vnitřní, venkovní, speciální) nebo jejich rozložení světelného toku (viz obrázek 1).



Obrázek 1 - Rozdělení svítidel podle rozložení světelného toku

## 1.2 SVĚTELNĚ TECHNICKÉ VELIČINY

„Zrak člověka není uzpůsoben k tomu, aby v mozkových centrech vidění vznikaly počítky reagující na souhrnné působení záření za určitou dobu. Pro proces vidění není proto důležitá energie vyzařená zdroji za určitý čas, ale rozhodující je výkon, tedy zářivý tok zdrojů a zejména jeho prostorové rozdělení. Při hodnocení kvality osvětlení se posuzuje, do jaké míry osvětlení napomáhá postupu přijetí a zpracování informace přinášené světlem a usnadňuje proces vidění a vznik zrakového vjemu. Proto se ve světelné technice neposuzují energetické veličiny, ale pracuje se s fotometrickými pojmy a veličinami, které respektují různou citlivost oka pozorovatele k záření o různých vlnových délkách. Pro zajištění jednotnosti světelně technických výpočtů se počítá s hodnotami spektrální citlivosti oka, tzv. normálního fotometrického pozorovatele.“ [1]

### 1.2.1 SVĚTELNÝ TOK

Světelný tok je základní světelně technická veličina, která odpovídá zářivému toku. Vyjadřuje schopnost zářivého toku umožnit zrakový počitek (vjem). Jednotkou světelného toku je lumen ( $lm$ ). Světelný tok monochromatického záření  $\Phi$  pro konkrétní vlnovou délku lze určit ze vztahu (1).

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (lm) \quad (1)$$

Veličina  $K(\lambda)$  vyjadřuje světelný účinek monochromatického záření. Lze vyjádřit součinem maximální hodnoty spektrálního průběhu  $K_m$  a poměrné světelné účinnosti monochromatického záření  $V(\lambda)$ , tj. vztahem (2).

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \quad (lm \cdot W^{-1}) \quad (2)$$

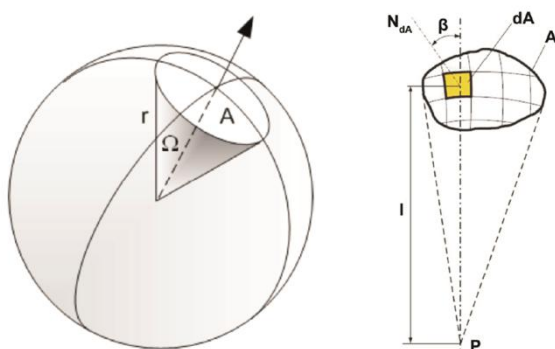
V soustavě SI se jednotky světelně technických veličin odvozují od základní jednotky svítivosti 1 kandela.

„Mezinárodní orgány CIE a ISO v souladu s definicí kandely schválily, že maximum  $K_m$  světelné účinnosti záření  $K(\lambda)$  odpovídající monofrekvenčnímu záření základní vlnové délky  $\lambda = \lambda_m = 555 \text{ nm}$ , dosahuje u normálního fotometrického pozorovatele při fotopickém (denním) vidění hodnoty  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ . Jedná se o důležitou konstantu, která spojuje fyzikální fotometrii a optickou radiometrii.“ [1]

### 1.2.2 PROSTOROVÝ ÚHEL

„Velikost prostorového úhlu je určena velikostí plochy vyřáté obecnou kuželovou plochou na povrchu jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prostorového úhlu) je totožný s vrcholem uvažované kuželové plochy.“ [1] Jednotkou prostorového úhlu je steradián ( $sr$ ), určený jednotkovou plochou ( $1 m^2$ ) na povrchu jednotkové koule o poloměru  $1 m$ . Prostorový úhel  $\Omega$ , pod nímž je ze středu koule o poloměru  $r$  zřejmá plocha  $A$  vyřátá na povrchu koule.

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (sr) \quad (3)$$



Obrázek 2 - Vymezení prostorového úhlu [2]

Prostorový úhel může nabývat největší hodnoty  $\Omega_{max} = 4\pi$ , pokud je plocha  $A$  rovna povrchu celé koule ( $A = 4\pi r^2$ ). Pro představu je zde uveden obrázek č. 2. V pravé části tohoto obrázku je uveden bod  $P$ , ve vzdálenosti  $l$  je znázorněna elementární ploška  $dA$  pod prostorovým úhlem  $d\Omega$ . Ve vztahu (4) je uveden úhel  $\beta$ , který svírá osa prostorového úhlu  $d\Omega$  s normálou  $N_{dA}$  uvažované plošky  $dA$ .

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2}, \quad (sr) \quad (4)$$

### 1.2.3 SVÍTIVOST

Svítivost je světelně technická veličina, jež popisuje rozložení světelného záření do prostoru. Jednotkou svítivosti je kandela (z latinského slova *candala* - svíčka). Tato jednotka patří mezi sedm základních jednotek soustavy SI. Jedna kandela je definována jako svítivost zdroje, jenž vyzařuje pod určitým úhlem monochromatické záření o kmitočtu  $540 \cdot 10^{12}$  Hz, přičemž zářivost zdroje v tomto směru je  $1/683$  wattu na steradián. Svítivost  $I_{\gamma\varepsilon}$  lze stanovit z prostorové hustoty vyzařovaného světelného toku  $d\Phi$  obsaženém v jednotkovém prostorovém úhlu  $d\Omega_{\gamma\varepsilon}$ , ve směru určeném úhly  $\gamma, \varepsilon$ .

$$I_{\gamma\varepsilon} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\varepsilon}}, \quad (cd) \quad (5)$$

Svítivost se stanovuje pro zdroj či svítidlo, ležící ve vrcholu prostorového úhlu  $d\Omega_{\gamma\varepsilon}$  (v jednom bodě). Z tohoto důvodu je svítivost definována pouze pro zdroj bodový (resp. svítidlo bodového typu). Bodový zdroj (resp. svítidlo) je charakteristický svými zanedbatelnými rozměry  $a$  v porovnání se vzdáleností  $r$  kontrolního bodu. V praxi by tento poměr ( $r \cdot a^{-1}$ ) měl být větší než pět, aby byl světelný zdroj (resp. svítidlo) chápán jako bodový.

*„Zjistí-li se hodnota svítivosti svítidla ve všech směrech prostoru a nanesou-li se prostorově od středu světelného zdroje jako radiusvektory, dostane se spojením všech koncových bodů těchto radiusvektorů fotometrická plocha svítivosti.“* [1] Při výpočtech se s prostorovým rozložením svítivosti dále nepracuje, dostačující je znalost některých řezů touto plochou, a to rovinami procházejícími bodovým zdrojem. V rovinách řezů tak vzniknou čáry (nebo též křivky) svítivosti v polárních souřadnicích. Počátek diagramu svítivosti je umístěn do světelného středu zdroje (resp. svítidla). Vztažný směr diagramu svítivosti se obvykle umísťuje do směru normály k hlavní vyzařovací ploše zdroje (resp. svítidla). Od této normály se volí úhly. Jednotlivé křivky svítivosti lze získat měřením na goniofotometru. Křivky svítivosti lze matematicky popsat vztahem (6).

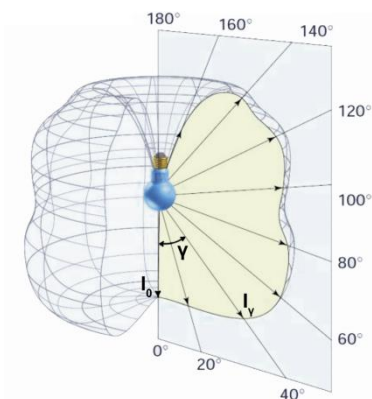
$$I_{\gamma} = I_0 \cdot f_I(\gamma), \quad (cd) \quad (6)$$

kde

$I_{\gamma}$  je svítivost z uvažovaného diagramu svítivosti, pod úhlem  $\gamma$  od vztažného směru;

$I_0$  je svítivost uvažovaného zdroje ve vztažném směru, tj. obvykle ve směru kolmém k hlavní vyzařovací ploše svítidla;

$f_I(\gamma)$  charakteristická funkce svítivosti (indikatrix), tj. funkce matematicky popisující uvažovanou křivku svítivosti.



Obrázek 3 - Vyobrazení celého fotometrického prostoru a řezu s vyznačenou křivkou svítivosti [2]

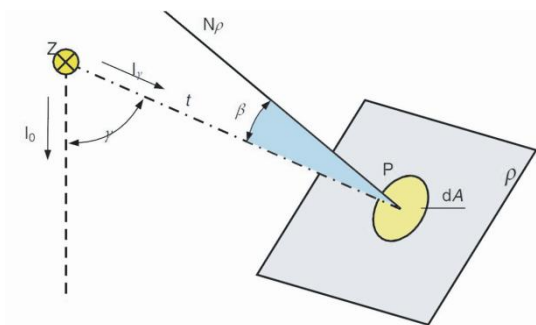
#### 1.2.4 OSVĚTLENOST

Osvětlenost nebo také intenzita osvětlení  $E$  rovinné plošky  $dA$ . Jedná se o plošnou hustotu světelného toku  $d\Phi_d$  dopadajícího na plošku  $dA$ . Jednotkou osvětlenosti je lux ( $lx$ ).

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (lm \cdot m^{-2}) = (lx) \quad (7)$$

Osvětluje-li se bodovým zdrojem  $Z$  ze vzdálenosti  $l$  ploška  $dA$  tvořící okolí bodu  $P$  v rovině  $\rho$  a zároveň svírá-li normála  $N_\rho$  roviny  $\rho$  úhel  $\beta$  s paprskem  $l$ , lze osvětlenost  $E_{P\rho}$  vyjádřit dle vztahu (8).

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cdot \beta \quad (lx) \quad (8)$$



Obrázek 4 - Definice osvětlenosti bodového zdroje [2]

### 1.2.5 JAS

Jas je Světelně technická veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán. Jde o veličinu obecně určenou prostorovou a plošnou hustotou světelného toku přenášeného paprsky.

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_n}, \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (9)$$

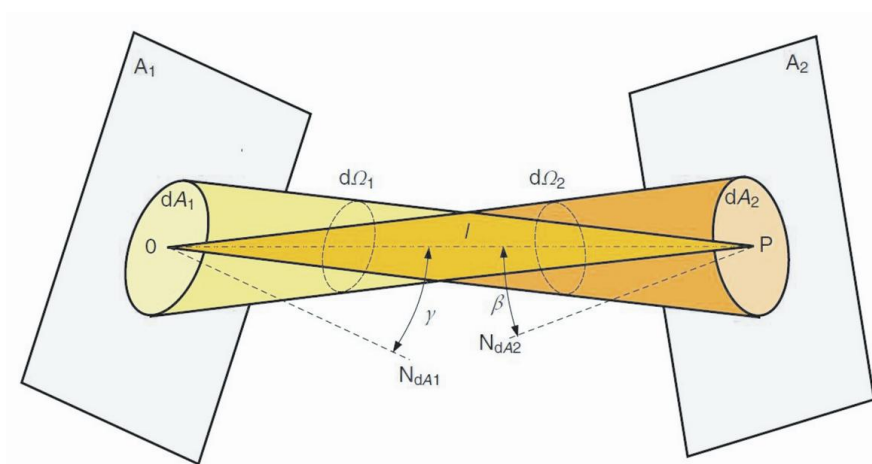
kde

$L_{OP}$  – jas svazku paprsků ve směru osy OP svazku;

$d\Omega$  – prostorový úhel, ve kterém se paprsky šíří;

$dA_n$  – je ploška kolmá k ose svazku paprsků, na níž se realizuje plošná hustota světelného toku.

„V prostředí, které pohlcuje, vyjadřuje či rozptyluje světlo, se mění světelný tok přenášený svazkem světelných paprsků od bodu k bodu a úměrně se změnou světelného toku se mění i jas svazku paprsků. Vymezí-li se svazek paprsků dvěma otvory o velikosti plochy  $dA_1$  a  $dA_2$  v libovolně umístěných stínítkách  $A_1$  a  $A_2$  a jsou-li rozměry otvorů  $dA_1$  a  $dA_2$  zanedbatelné ve srovnání se vzdáleností  $l$  mezi stínítky  $A_1$  a  $A_2$ , vyplývají vztahy (11), (13).“ [1]



Obrázek 5 - Svazky rozbíhajících se paprsků [2]

a) Jas svazku paprsků sbíhajících se v prostorovém úhlu  $d\Omega_1$  z plošky  $dA_1$  do plošky P

$$d\Omega_1 = dA_1 \cos y \cdot l^{-2} \quad (\text{sr}) \quad (10)$$



$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_2 \cos\beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1}, \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (11)$$

kde  $dE_N$  značí normálovou osvětlenost.

Tento vztah se používá k určení jasu zdroje ve směru oka pozorovatele, popřípadě ke zjištění jasu zdrojů neurčitých rozměrů.

b) Jas svazku paprsků rozbíhajících se v prostorovém úhlu  $d\Omega_2$  z bodu  $O$

$$d\Omega_2 = dA_2 \cos\beta \cdot l^{-2} \quad (\text{sr}) \quad (12)$$

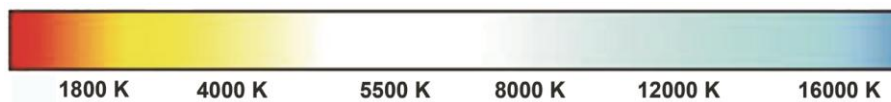
$$L_{OP} = L_\gamma = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 dA_1 \cos\gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cos\gamma} \quad (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (13)$$

### 1.2.6 TEPLOTA CHROMATIČNOSTI

Teplota chromatičnosti popisuje barevné vlastnosti světla. U teplotních světelných zdrojů (žárovek) odpovídá teplotě vlákna, u výbojových světelných zdrojů se používá pojem náhradní teplota chromatičnosti.

Tabulka 1 – Pojmenování jednotlivých stupňů teploty chromatičnosti [2]

| Pojmenování stupně     | $T_c$ [K]      |
|------------------------|----------------|
| Studené denní světlo   | 6 500 a více   |
| Denní světlo           | 5 400          |
| Jasná obloha           | 6 500          |
| Letní slunce v poledne | 5 500          |
| Studeně bílá           | 4 000          |
| Slunce při západu      | 3 500 až 4 000 |
| Teple bílá             | 2 700          |
| Plamen svíčky          | 1 800          |



Obrázek 6 - Teplota chromatičnosti [2]

U světelných zdrojů se rozlišují tři základní kategorie barvy světla v závislosti na teplotě chromatičnosti.

- Teple bílá barva ( $< 3\,300\text{ K}$ );
- Bílá barva ( $3\,300$  až  $5\,000\text{ K}$ );
- Denní barva ( $> 5\,000\text{ K}$ ).

**1.2.7 MĚRNÝ VÝKON**

Měrný výkon představuje míru přeměny elektrické energie na světelnou energii (kolik lze z jednoho wattu získat světelného toku). Tato veličina je dána podílem světelného toku  $\Phi$  a elektrického příkonu  $P$ .

U zdrojů bez předřadníků (např. žárovky) je udávaný výkon shodný s příkonem světelného zdroje, u světelných zdrojů s předřadníkem je nutno k tomuto výkonu přičíst výkon spotřebovaný předřadníkem.

$$\eta = \frac{\Phi}{P}, \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}) \quad (14)$$

kde

$\eta$  – měrný příkon světelného zdroje ( $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$ );

$\Phi$  – světelný tok ( $\text{lm}$ );

$P$  – elektrický příkon ( $\text{W}$ ).

Tabulka 2 - Měrný výkon u základních světelných zdrojů

| <b>Světelný zdroj</b>        | <b>Měrný výkon (<math>\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}</math>)</b> |
|------------------------------|---|
| Obyčejné žárovky             | 10 až 18  |
| Halogenové žárovky           | 20 až 30  |
| Světelné diody (LED)         | 60 až 200   |
| Vysokotlaké rtuťové výbojky  | 40 až 60  |
| Indukční výbojky             | 60 až 97  |
| Kompaktní zářivky            | 40 až 87  |
| Lineární zářivky             | 50 až 104   |
| Vysokotlaké sodíkové výbojky | 70 až 150   |
| Nízkotlaké sodíkové výbojky  | 100 až 200  |

### 1.3 VLASTNOSTI SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

#### 1.3.1 VJEM BARVY

Pojem vjem barvy označuje vlastnost zrakového počítka, jež umožňuje pozorovateli zjistit rozdíl mezi dvěma ploškami zorného pole, které mají stejnou velikost, tvar i strukturu, přičemž tento rozdíl má stejnou povahu jako rozdíl, jenž by vznikl změnou spektrálního složení světla. Pojem barva je zařazen do oblasti vjemové.

Pojem barva se přenáší i na vlastnost světla (resp. předmětů) a hovoří se o barvě světla (resp. předmětů). Přesnější je však barevné vlastnosti označovat názvem chromatičnost a barevné vlastnosti předmětů pojmem kolorita.

*„Chromatičnost je určena spektrálním složením záření vysílaném primárním zdrojem.“ [1]*

*„Kolorita je určena spektrálním složením záření zdroje osvětlujícího sledovaný předmět a spektrální odrazivostí či propustností materiálu předmětu.“ [1]*

Monofrekvenční složky jakéhokoliv záření ve viditelné oblasti (rozmezí vlnových délek  $\lambda$  380 až 780 nm) budí specifický barevný počitek.

**Barevný tón** představuje odlišnost vjemu jednotlivých spektrálních barev, vyjadřuje se názvy fialová, modrá, zelená apod. Záření každého kmitočtu je zastoupeno určitou spektrální barvou (tabulka 3). Pro různé pozorovatele je vnímání určitého barevného tónu odlišné, závisí totiž nejen na množství energie vyzařované v dané oblasti vlnových délek, ale také spektrální citlivosti oka.

Tabulka 3 - Vlnové délky spektrálních barev

| Rozmezí vlnových délek [nm] | Barevný tón  |
|-----------------------------|--------------|
| 380 až 430                  | Fialová      |
| 430 až 465                  | Modrofialová |
| 465 až 490                  | Modrá        |
| 490 až 500                  | Modrozelená  |
| 500 až 560                  | Zelená       |
| 560 až 575                  | Zelenožlutá  |
| 575 až 585                  | Žlutá        |
| 585 až 620                  | Oranžová     |
| 620 až 770                  | Červená      |

Barvy lze rozdělit na pestré a nepestré. „*Pestrá barva představuje takový vjem barvy, který má barevný tón. K pestrým barvám patří čisté spektrální barvy, purpurové barvy a jejich odstíny vzniklé míšením.*“ [1]

„*Spektrální barvy jsou syté (čisté). Sytost barvy udává podíl čisté spektrální či purpurové barvy v dané barvě na celkovém barevném počítku. Sytost se zmenší, smísí-li se spektrální barva např. s bílou barvou. Spektrální barvy mají sytost rovnou jedničce. Bílá, šedá a černá barva mají sytost nulovou. Nepestré barvy jsou vjemy barev, které nemají barevný tón a tvoří spojitou řadu od bílé přes šedou až po černou. Rozdíl mezi nepestrými barvami je jen v jejich intenzitě, tj. hodnotě světelného toku nebo jasů.*“ [1]

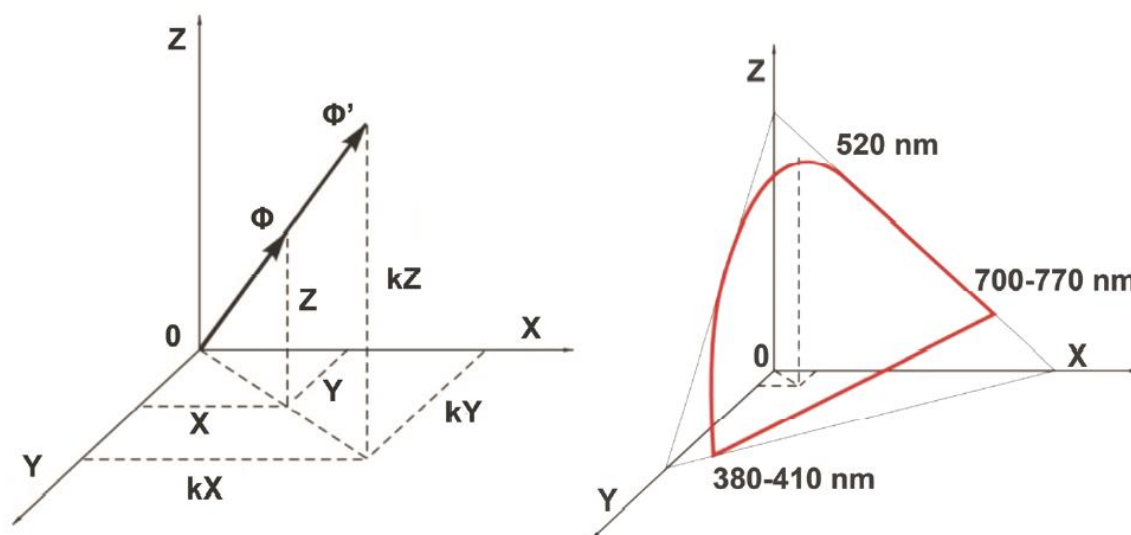
Barvy lze také rozdělit dle psychologického působení na teplé (např. červená, oranžová, žlutá) a studené (např. modrá, fialová, zelená).

### 1.3.2 TRICHROMATICKÁ SOUSTAVA

Trichromatická soustava se takto nazývá, protože k vytvoření jakékoliv barvy je použito tři základních barev, jež se míchají v různých poměrech. Jedná se o objektivní popis barev. Tato soustava byla stanovena Mezinárodní komisí pro osvětlování CIE. Soustava je definována třemi činiteli, kteří se označují malými písmeny  $x(\lambda)$ ,  $y(\lambda)$ ,  $z(\lambda)$ . Velkými písmeny  $(X, Y, Z)$  se v této soustavě značí trichromatické složky. Tyto složky udávají kolorimetrické množství všech tří barev, které vyvolají požadovaný barevný vjem.

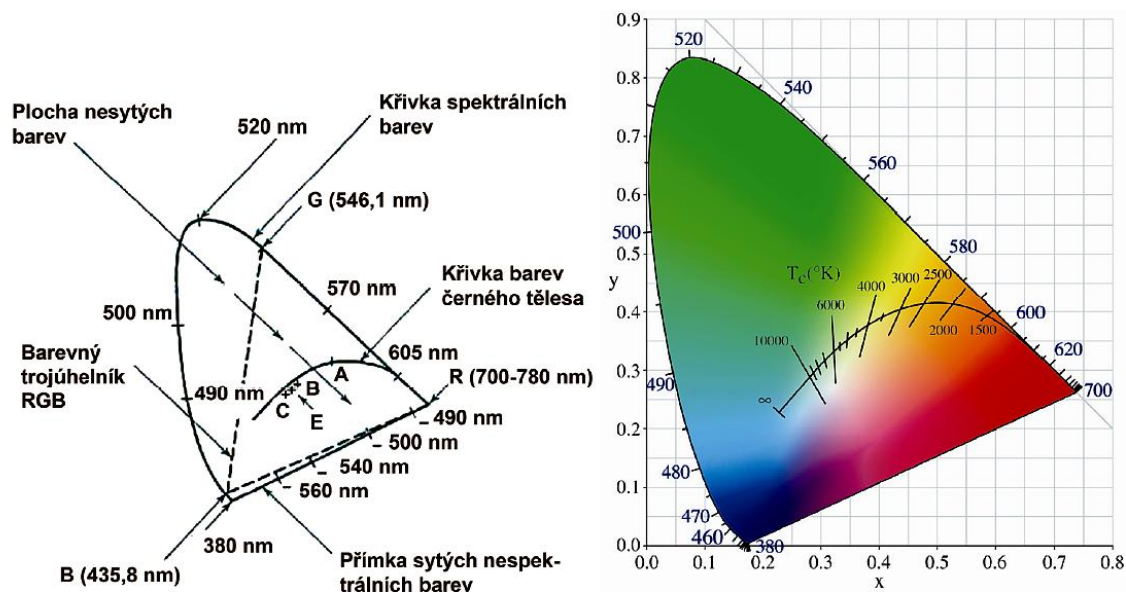
*„Barevný podnět je charakterizován barevným tónem, sytostí a intenzitou. Tyto tři údaje označené například  $X, Y, Z$ , se znázorní v třírozměrné soustavě souřadnic.“ [2]*

Intenzita barevného podnětu je dána součtem intenzit všech tří trichromatických složek  $(X + Y + Z)$  a samotné vyjádření intenzity je provedeno přímkami, jež procházejí počátkem.



Obrázek 7 - Zobrazení trichromatického trojúhelníku v prostoru [2]

Pokud je v trojrozměrné soustavě vytknuta oblast, která na osách vytýčí stejné úseky (například plocha  $X + Y + Z = 1$ ), výsledkem je kolorimetrický trojúhelník barev (obrázek 7). Červeně zobrazená křivka uvnitř tohoto trojúhelníku, představuje čisté spektrální barvy. Každý bod na této křivce představuje jednu barvu. Prostorové zobrazení je však nepraktické. Hodnotí-li se barevné podněty pouze z hlediska tónu a sytosti bez ohledu na intenzitu, stačí k jejich znázornění rovinný diagram se souřadnicemi  $x, y$  (obrázek 8).



Obrázek 8 - Kolorimetrický trojúhelník [2]

Křivka barev černého tělesa je zobrazena na obrázku 8, souhlasí s teplotou chromatičnosti.

### 1.3.3 VŠEOBECNÝ INDEX PODÁNÍ BAREV

*„Všeobecný index podání barev představuje kvalitu vjemu barev předmětu pozorovaného ve světle posuzovaného světelného zdroje v porovnání s vjemem téhož předmětu ve světle smluvního světelného zdroje. U posuzovaného světelného zdroje může být rozdílná věrnost rozlišování jednotlivých barev. Všeobecný index podání barev neposkytuje informaci o velikosti a směru barevného posunu vjemu jednotlivých barevných vzorků.“ [1]*

Hodnota této veličiny nabývá hodnot od nuly do sta. Hodnota rovná stu představuje ideální stav, při kterém se barvy dají rozlišit. Této hodnoty dosahují teplotní zdroje, mezi které patří např. žárovka. Naopak při nulové hodnotě se barvy nedají rozlišit, to je typické pro vysokotlaké sodíkové výbojky. Dle zdroje [1], při bezprostředním vizuálním porovnání dvou světelných zdrojů je rozlišitelný rozdíl  $\Delta R_a = 5$ . Pro většinu vnitřních prostorů je normou předepsaná hodnota indexu podání barev  $R_a \geq 80$ .

Hodnocení probíhá na základě porovnání osmi až čtrnácti barevných vzorků, u nichž je zaznamenán rozdíl vnímání barev. *„Barevné vzorky, sloužící jako etalon pro stanovení indexu podání barev, představují přesně dané barvy určené souřadnicemi dle CIE nebo Munsellova atlasu barev.“ [2]*

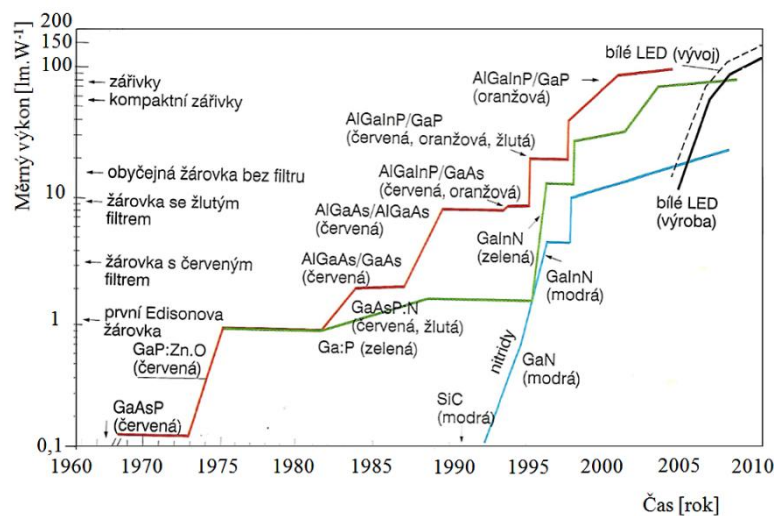


## 1.4 SVĚTELNÉ ZDROJE LED

Světelné zdroje LED (Light Emitting Diode) patří do skupiny elektro-luminiscenčních světelných zdrojů. Světelné diody jsou polovodičové součástky obsahující PN přechod, který emituje optické záření, je-li přiveden elektrický proud.

Světelné diody v posledních letech zaznamenávají nesmírně dynamický vývoj. Samotný princip byl objeven již v 20. letech minulého století. První použitelné diody se objevily teprve v roce 1962. Od doby uvedení na trh jsou neustále zdokonalovány technologické procesy vedoucí k zlepšení světelně technických parametrů (měrný výkon, doba života, stabilita během svícení, index podání barev apod.). Výrobci svítidel bohužel na trend LED zdrojů zareagovali se zpožděním, z tohoto důvodu se kvalitní svítidla (např. pro venkovní použití) objevují na trhu až v posledních letech.

V současné době své uplatnění naleznou ve všech oblastech osvětlovací techniky. Vzhledem ke svým výtečným světelně technickým parametrům dochází k vytlačování starších světelných zdrojů, které jsou neekonomické nebo nevyhovují svými světelnými parametry. Zdroje LED zaznamenávají podobný vzestup svých vlastností a snižování ceny jako svého času mikroprocesory. Tento typ zdrojů se velmi často vyrábí ve firmách produkující samotné polovodičové čipy, zejména kvůli náročnosti technologie výroby. Navíc tato kombinace má pak příznivější dopad na konečnou cenu produktu. Výrobci ostatních typů zdrojů nejsou tímto problémem zatíženi. V současné době je hlavním limitujícím faktorem cena krystalu polovodiče.

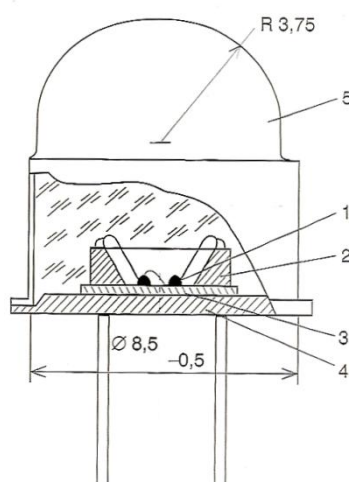


Obrázek 9 - Růst měrných výkonů s časem [1]

### 1.4.1 PRINCIP

Pro vytvoření polovodičového přechodu PN se používají zejména polovodiče vysoké čistoty, obohacené malým množstvím vhodných příměsí, které vytvářejí buď přebytek elektronů (materiály typu N), nebo jejich nedostatek a tedy přebytek děr (materiály typu P). V místě, kde se stýkají polovodiče obou typů, vzniká velmi úzký úsek nazývaný PN přechod. Přiložením stejnosměrného napětí správné polarity na PN přechod dojde ke vzájemnému přibližování elektronů a děr k místu kontaktu a následně dochází k jejich rekombinaci. „Při rekombinaci každého páru elektron-díra se uvolní určité kvantum energie, které se může vyzářit mimo krystal. Elektrická energie se tak mění přímo na světlo určité barvy. U diod LED jde o nekoherentní světlo na rozdíl od laserových diod, zde dochází ke stimulované emisi optického záření využívaného k zesilování světla.“ [1]

Nejdříve se objevily diody vyzářující světlo červené barvy, následovaly diody s emisí světla o barvě zelené, oranžové, žluté a nakonec modré. „Všechny typy diod se vyznačují velmi úzkou křivkou spektrálního složení zahrnující interval vlnových délek do několika desítek nanometrů.“ [1]

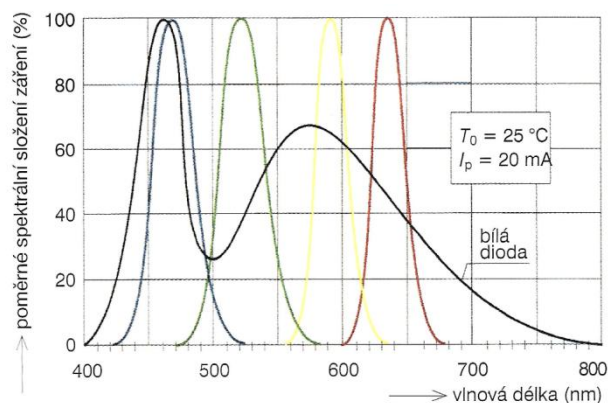


Obrázek 10 - Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly [1]

#### Legenda

- |  |                      |
|--|----------------------|
| 1 – polovodič s PN přechodem           | 4 – podložka         |
| 2 – reflektor                          | 5 – polokulová čočka |
| 3 – keramická destička pro odvod tepla |                      |

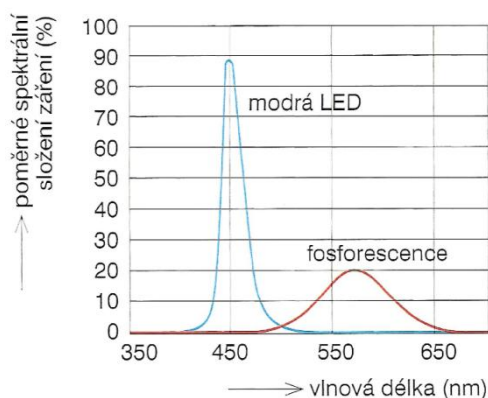
Doplnění sortimentu LED o modrou barvu umožnilo po krátké době objevit diody bílé, zářící v celé oblasti viditelného spektra. Tyto objevy přinesly nebývalý zájem o tyto zdroje a nastartovaly vývoj správným směrem. LED zdroje mohou vyzařovat v ultrafialové anebo infračervené oblasti spektra.



Obrázek 11 - Spektrum vybraných barevných LED [1]

Bílé světlo pomocí LED zdrojů lze získat dvěma způsoby.

- Smíchá-li se světla červené, modré a zelené LED. „K dosažení požadovaného výsledku je nutné mít k dispozici hardware a příslušný software. Výsledný jas je nižší a v důsledku nerovnoměrné degradace jednotlivých druhů čipu může v průběhu života docházet k nežádoucím posunům barvy vyzařovaného světla.“ [1]
- Fosforence luminoforů. Jedná se o obdobný princip vzniku světla jako v klasických zářivkách. Modrá dioda vyzařuje v oblasti ultrafialového spektra. Část světla je absorbována v luminoforu a znovu vyzařena o delší vlnové délce (viz obrázek 12).



Obrázek 12 - Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody) [1]

## 1.4.2 HISTORIE

### 1907 Pokus jménem světelná emise

Před samotným objevem tohoto zdroje byla objevena nejdříve elektroluminiscence britským experimentátorem Henrym Josephem Roundem v roce 1907. Round byl radiový inženýr a vynálezce, na konci kariéry jeho počet patentů dosáhl úctyhodných 117. Emitované „žluté“ světlo vzniklo stykem krystalu karbidu křemíku ( $\text{SiC}$ ) s elektrodami, zajišťujícími průchod proudu. Byl vytvořen Schottkyho kontakt. Přes objev nedošlo k velkému zájmu v této oblasti.

### 1921 – 1942 Studium světelné emise

V tomto období ruský fyzik Oleg Losev znovu studuje světelnou emisi. Cenným přínosem pro jeho studium jsou poznámky J. Rounda. Výsledkem Losevovy dlouhodobé práce byl důkladný popis elektroluminiscence.

### 1935 Losevovo světlo

Samotnou elektroluminiscencí se zabýval také francouzský fyzik George Destriau, který prý jako první použil pojem elektroluminiscence. Objevil světelnou emisi v sulfidu zinečnatém a na počest ruského fyzika je nazývána „Losevovo světlo“.

### 1950 – 1971 Červená, žlutá a zelená LED

Polovodičová technika zaznamenala velký rozmach od druhé poloviny 20. Století, zejména ve vývoji tranzistorů. Výroba v této době byla realizovaná zejména sloučeninami  $\text{GaAs}$  (arsenid galia) a  $\text{AlGaAs}$  (hliník arsenidu galia). Do roku 1962 byla vytvořena řada zdrojů LED, avšak vyzařovaly v oblasti infračerveného spektra. Až Nicku Holonyakovi se podařilo vytvořit zdroj LED, který byl schopen vyzařovat v oblasti viditelného spektra (červené). M. George Craford, jakožto bývalý student N. Holonyaka, vynalezl LED zdroj vyzařující žlutou barvu v roce 1972. Krátce poté byly vynalezeny další LED vyzařující oranžovou, zelenou barvu.

### 1980 – 1990 Pokusy o zlepšení parametrů

V tomto období se výzkum zaměřil především na zvýšení světelného toku, vývoji dalších zdrojů LED (modrá, bílá) a zvýšení jejich měrného výkonu.

**1990 – 2000 Modré a bílé světlo**

Rok 1993 je pro vývoj LED zásadní, neboť japonský vynálezce Shuji Nakamura objevil jasně modrý LED zdroj. Za tento objev byl spolu s I. Akasakim a H. Amanem v roce 2014 oceněn Nobelovou cenou za fyziku. Tito objevitelé využívali nitrid galia ( $GaN$ ), což je základ modře svítivých diod. Jedná se o odlišný materiál než u diod s červeným a zeleným světlem (sloučeniny galia, arsenu a fosforu).

Jelikož z principu funkce světelné diody totiž nelze získat bílé světlo, uvedení na trh bylo opožděno. Teprve příchod světelných diod s modrou barvou světla nastartoval vývoj. O pouhé dva roky později (1995) byla uvedena bílá LED, převážně díky modré LED. Bílého světla lze dosáhnout míšením světél (červená, zelená a modrá LED) nebo využitím modré diody s vhodnou vrstvou luminoforu.

**2006 Růst měrného výkonu**

Vyrobené světelné diody dosáhly měrného výkonu nad  $100 \text{ lm} \cdot W^{-1}$ . Tuto hodnotu zatím překračují plynové výbojky.

**2010 OLED a zlepšení parametrů**

Vynálezci z laboratoří hlásí překročení hranice měrného výkonu  $250 \text{ lm} \cdot W^{-1}$  pro světelné diody. Dalším milníkem v historii LED jsou organické světelné diody (OLED), které jsou považovány za technologii budoucnosti. Technologie OLED byla vyvinuta firmou Eastman Kodak již v roce 1987.

**Současnost a budoucnost**

Světelné diody si našly během let své příznivce. Vzhledem k úsporám energie jednotlivé státy zavádějí směrnice zakazující výrobu a použití neúčinných zdrojů. V současnosti je rozsah použití diod velice rozsáhlý, nalezneme je v domácnostech, průmyslu, ve veřejném osvětlení a dalších odvětvích. Neustálý přísun finančních prostředků do oblasti výzkumu přináší lepší hodnoty světelných parametrů, jako je třeba měrný výkon a světelný tok. Vzhledem také k současnému rozvoji baterek a solárních panelů se dočkáme nejspíše hybridních systémů, které spolu s LED zdroji přinesou značné úspory.

Informace jsem čerpal ze zdrojů [3], [4], [5].

### 1.4.3 PŘEDNOSTI A NEDOSTATKY LED

#### Přednosti LED

##### Elektrické a fotometrické parametry

- spojováním jednotlivých LED do série lze dosáhnout vyšších hodnot světelného toku;
- záření lze měnit napájecím napětím;
- velmi krátká doba náběhu, dokonce kratší než u obyčejných žárovek;
- oproti ostatním světelným zdrojům zajišťují energeticky úsporné osvětlení;
- vhodné při kombinaci se solárními články;
- stmívání beze změny barvy;
- vysoký jas;
- výborný měrný výkon, jehož hodnota v budoucnosti pro běžné použití může dosáhnout  $300 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , dle zdroje [1];
- výborný index podání barev, jenž u novějších zdrojů přesahuje hodnotu 80.

##### Kolorimetrické parametry

- lze získat velký počet barev;
- jedná se o téměř monochromatické záření;
- speciální typy LED mohou vyzařovat v ultrafialové, případně infračervené oblasti spektra.

##### Geometrické parametry

- konstrukce LED umožňuje vytvářet různé tvary svítidel.

##### Provozní parametry

- vysoká spolehlivost;
- oproti ostatním zdrojům mají vysokou životnost v porovnání s ostatními zdroji;
- poměrně široký teplotní interval použití, v literatuře [1] je uváděn mezi  $-30$  až  $+60^\circ\text{C}$ ;

- náklady na údržbu jsou nižší a samotný interval výměny zdrojů je delší;
- konstrukce je mechanicky odolná, lépe snáší vibrace.

#### **Vliv na životní prostředí**

- diody neobsahují rtuť, nezatěžují tak životní prostředí;
- nemají negativní vliv na životní prostředí, a to v provozu ani po ukončení životního cyklu, převážnou část použitých materiálů lze recyklovat.

#### **Nedostatky LED**

Podobně jako ostatní světelné zdroje jsou i LED zdroje silně závislé na okolních podmínkách. Umístí-li se zdroj do venkovního prostředí, je vystaven během dne velkým teplotním rozdílům. Při samotném provozu je také generováno odpadní teplo. Tyto negativní vlivy se mohou značně projevit na životnosti světelných zdrojů LED, což vzhledem k vysokým investičním nákladům např. pro venkovní osvětlení může negativně působit na technologii LED. V současné době se vyrábějí poměrně spolehlivá svítidla s výborným chlazením, která tento problém z převážné části řeší.

Další nevýhodou je barva vyzařovaného světla a vysoká hodnota oslnění *UGR*, oproti ostatním světelným zdrojům. Vzhledem k těmto nedostatkům může být narušena zraková pohoda pozorovatele.

Pro řadu koncových uživatelů jsou LED zdroje nezajímavé navzdory vysoké pořizovací ceně. Vzhledem k provozním nákladům a vysoké životnosti zdroje se investice může během krátké doby (rok) vrátit.

S vysokým úbytkem napětí v síti se životnost těchto zdrojů značně zkracuje.

Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal ze zdrojů [1], [2], [3]

#### 1.4.4 SPECIÁLNÍ TYPY DIOD (LASER, OLED)

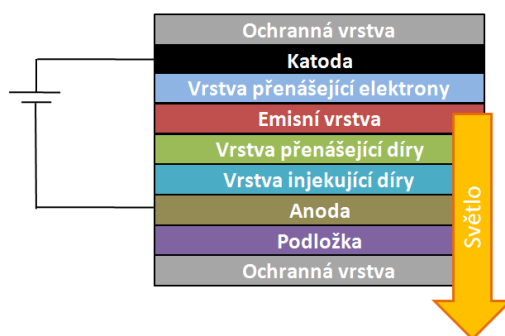
Kromě klasických světelných zdrojů LED existují také speciální diody, které se v současnosti používají.

##### OLED

Mezi speciální typy světelných zdrojů patří světelné zdroje OLED (Organic Light Emitting Diode). Jedná se o organické světelné diody tvořené polovodičovou součástkou emitující světlo s elektroluminiscenční vrstvou zhotovenou z organických sloučenin. V oblasti osvětlení je tento typ diod na samotném počátku. Tato technologie se používá i v měřicí technice a nahrazuje klasické LCD displeje.

Tyto zdroje mají obdobný princip jako LED, využívá se zde vodivosti typu P a N u polovodivých materiálů, na jejichž rozhraní nastává rekombinace elektronů a děr, při které se emituje světlo.

Konstrukční řešení může být v řadě případů odlišné, mezi anodou a katodou může být nanášeno i více jak deset velmi tenkých vrstev. Jednotlivé vrstvy mohou být nanášeny metodou vakuového napařování anebo metodou vylučování z vhodných roztoků. OLED umožňují vytvářet co do plochy podstatně větší a rozměrnější světelné soustavy při minimální tloušťce.



Obrázek 13 - Vrstvy OLED

Náročnější technologie výroby je vykoupena ještě vyšší cenou těchto zdrojů. Na druhou stranu tyto zdroje nabízejí lepší index podání barev blíží se k hodnotě 100, poměrně dobrého měrného výkonu ( $100 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  a více) a životnosti, nižší spotřebu energie, snížení hmotnosti. Ani tento typ diod neobsahuje škodlivé látky, které by zatěžovaly životní prostředí.



Použití OLED zajišťuje tvarovou flexibilitu, lze je ohnout do libovolného tvaru. Jejich jas i barevný odstín lze regulovat v širokém rozsahu. Mohou vytvářet dlouhé svítící pruty, jež mohou osvětlovat libovolnou plochu (strop, nábytek aj.). Jedná se o ideální prvek pro návrhy dekoračního osvětlení v obytných prostorách.



Obrázek 14 - Ohebná destička s technologií OLED [6]



Obrázek 15 - Plovoucí strop se zdroji OLED [7]

### Laserové diody

Jedná se o typ světelného zdroje, který je svým principem odlišným od klasických světelných zdrojů. Funkce je založena stejně jako lasery na procesu zvaném stimulované emise. Laserové optické záření je monochromatické (jednobarevné) koherentní (uspořádané) s malou divergencí (rozbíhavostí).

Laserové diody se využívají v telekomunikační technice, konkrétně v optických vlnovodech. Dále jsou hojně využívány pro měření vzdáleností, levnější typy jsou vhodné pro stavebnictví, velmi drahé typy se používají dokonce k měření vzdálenosti družic od Země. Využití také naleznou ve čtečkách čárových kódů, ukazovátkách a v tiskárnách.

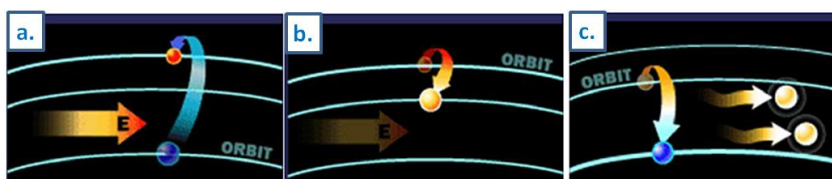


Obrázek 16 - Laserová dioda [9]

## Stimulovaná emise

Jestliže elektron, nacházející se na určité energetické hladině, pohltí vhodné kvantum energie, je touto dodanou energií přemístěn na vyšší energetickou hladinu (tomuto jevu se říká čerpání). Energie může být dodána například ve formě světla, fotonů.

Dojde-li ke stavu, kdy počet elektronů na vyšší energetické hladině převyší počet elektronů na základní hladině, nastává stav nazývaný inverze. V tomto stavu stačí nepatrný energetický impulz, který způsobí přechod elektronu z vyšší energetické hladiny na nižší.



Obrázek 17 - Stimulovaná emise, a - čerpání, b - inverze, c - pružná srážka [8]

Pokud do excitovaného elektronu naráží kvantová částice (např. foton o energii  $h\nu$ ), jedná se o pružnou srážku. Touto interakcí je excitovaný elektron „sražen“ na základní hladinu a přitom přejde energetický pás o energii  $\Delta W$ . Vyzáří odpovídající kvantum energie, foton o energii  $h\nu$ . Protože se jedná o srážku pružnou, primární foton o energii  $h\nu$  pokračuje dále a k němu se přidává foton generovaný přechodem elektronu, také o energii  $h\nu$ . Od tohoto okamžiku pokračují dva fotony. Ty srazí do základního stavu další dva excitované elektrony, budou pokračovat čtyři fotony, ty srazí další čtyři elektrony, bude pokračovat osm fotonů a proces takto pokračuje. Celý tento proces se nazývá stimulovanou emisí.

Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal ze zdrojů [1], [6], [7], [8], [9]

#### 1.4.5 OBLASTI POUŽITÍ ZDROJŮ LED

Přirozené prostředí je charakteristické pravidelným střídáním dne a noci. Během dne je hlavním zdrojem slunce, jehož záření dopadá na zemský povrch. Přirozeným zdrojem světla v noci je měsíc a hvězdy. S postupem času byly tyto zdroje pro člověka nedostatečné. Člověk chtěl využít i samotné noční období ke svým aktivitám a mít pod kontrolou své okolí. Přece jen ve tmě je člověk slepý a bez vycvičených smyslů je velice bezbranný. Z těchto důvodů se začalo využívat tzv. umělých světelných zdrojů, mezi něž lze zahrnout třeba samotné ohniště, pochodně a různé druhy lamp sloužících k osvětlení značných ploch. S pomocí elektřiny byl člověk schopen osvětlit značné plochy. Začátek 21. století je charakteristický úsporami a studii na téma životního prostředí. Za dvě stě let dokázal člověk bezohledně ničit ekosystémy, nehledě na životní prostředí. Je smutné, že nezájem většiny lidí k životnímu prostředí přetrvává dodnes. Pokud lidé nezačnou jednat včas, dostaneme se do bodu, ze kterého nebude cesty zpět. Snaha nahradit neobnovitelné zdroje obnovitelnými je v dohledné době nereálná. Proto se hledají cesty, jak omezit spotřebu elektrické energie. Technologie LED se jeví jako vhodná náhrada klasických zdrojů. Tato kapitola představuje různé oblasti použití.

V domácnostech připadá přibližně pět procent spotřeby elektrické energie světelnými zdroji z celkové spotřeby, dle internetových stránek [www.oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz). Pokud by se tyto jednotlivé díly sečetly v celé České republice, dostaneme ohromné množství spotřebované energie. Se stále rostoucí tendencí populace se předpokládá, že spotřeba elektrické energie bude také růst. Tento růst však v budoucnosti nebude možné pokrýt. Zvolením vhodného světelného zdroje lze dosáhnout v celkovém měřítku značným úsporám, nehledě na odlehčení zátěže elektráren v určité hodiny. Sice se tím náš problém úplně nevyřeší, ale bude to spíše náznak směru, kterým bychom se měli vydat.

Vzhledem k těmto skutečnostem jednotlivé státy zavádějí v legislativě jistá omezení, které zakazují využívání zdrojů s malým měrným výkonem. Mezi lety 2009 až 2012 mělo dojít ke stažení obyčejné žárovky, dle směrnice Evropského parlamentu a rady 2009/125/ES o ekodesignu. I přes toto nařízení jsou v současné době obyčejné žárovky v celosvětovém měřítku stále nejrozšířenějším světelným zdrojem. Další regulace světelného zdroje se týká rtuťové výbojky. Zákaz uvedení rtuťových výbojek na trh

Evropské unie vzešel v platnost v dubnu 2015, z důvodu horšího indexu podání barev, malého měrného výkonu a vlivu na životní prostředí.

|   | září 2009 | září 2010 | září 2011 | září 2012 | září 2013                  | září 2014 | září 2015 | září 2016 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Žárovky</b><br> | 15 W      | 15 W      | 15 W      | 15 W      | Zákaz všech čirých žárovek |           |           |           |
|   | 25 W      | 25 W      | 25 W      | 25 W      |                            |           |           |           |
|   | 40 W      | 40 W      | 40 W      | 40 W      |                            |           |           |           |
|   | 60 W      | 60 W      | 60 W      | 60 W      |                            |           |           |           |
|   | 75 W      | 75 W      | 75 W      | 75 W      |                            |           |           |           |
|   | > 100 W   | 100 W     | 100 W     | 100 W     |                            |           |           |           |

Obrázek 18 - Postupný zákaz obyčejných žárovek [11]

### Světelný zdroj v domácnosti

V domácnostech se dají tyto zdroje využít nejen k přímému nebo dekorativnímu osvětlení, ale také se používají běžně ve spotřebičích. Velmi dobře mají nakročeno do spotřebního zboží zdroje OLED, které přinášejí menší revoluci v oblasti televizorů, mobilů a dalších podobných spotřebičů.

Níže jsou uvedené starší typy světelných zdrojů LED, které byly součástí vzestupu LED zdrojů pro běžné použití. Tento vzestup je zaznamenán přibližně od roku 2009. Přes svoje nedostatky si našly tyto zdroje svoji oblast použití a oblibu mezi zákazníky. Na obrázku 19 je zdroj, který díky rozmístění LED je schopen vyzařovat světelný tok do prostoru pod poměrně velkým prostorovým úhlem. Tento zdroj by se dal třeba použít v kuchyňském lustru. Obrázek 20 představuje LED odlišné využití, veškerý světelný tok je soustředěn na menší plochu (nižší prostorový úhel), zato intenzivněji. Použití tohoto zdroje si umím představit jen v lampičce pro dodatečné osvětlení potřebné plochy. Jako hlavní zdroj k osvětlení je nevhodný.



Obrázek 19 - "Kukuřice" LED [12]



Obrázek 20 - LED podobný reflektoru [13]

V dnešních domácnostech se dají nalézt konstrukčně odlišné typy LED, mezi něž patří klasická „žárovka“ a svíčka. Součástí těchto zdrojů je většinou neprůhledné sklo, zajišťující příjemný rozptyl světelného záření. Hodí se téměř kdekoli v domácnosti (kuchyň, chodba, pokoje). Je důležité, aby člověk nebyl vystaven tomuto záření ve večerních hodinách příliš dlouhou dobu, protože by se později mohly projevit negativní vlivy.



Obrázek 21 - LED "svíčka"  
[14]



Obrázek 22 - LED "žárovka"  
[14]



Obrázek 23 - LED "žárovka" konstrukce  
[15]

Dalším oblíbeným dekoračním prvkem dnešní doby jsou tzv. LED pásy. Jsou rozšířené vzhledem ke své přijatelné ceně, velkému množství provedení (barev, velikostí) a jednoduché instalaci (libovolná délka, přilepení k nábytku nebo zdi). Barevnou scénu lze řídit např. bezdrátovými ovladači. Vzhledem k náročnějším požadavkům zákazníků výrobci rozšířili sortiment o pásy s různým stupněm krytí *IP*, chránící světelný zdroj před prachem a vodou. Stupeň krytí zajišťuje výplň čirým epoxidem nebo silikonem. V případě nejvyššího stupně krytí (*IP 68*) lze ponořit pásek do určité hloubky pouze na krátký čas, nikoliv trvale.



Obrázek 24 - Příklad LED pásků [16]

## Venkovní světelný zdroj

Samotné počátky veřejného osvětlení byly zaznamenány v tehdejší Antice, vše bylo řešeno pochodněmi a olejovými lampami zavěšenými na rozích domů. Důležitým pokrokem ve veřejném osvětlení bylo zavedení plynového osvětlení (v Praze 19. století). Další mezník představuje využití elektrických světelných zdrojů. Hlavním protagonistou v používání elektřiny k tomuto způsobu osvětlení byl na našem území František Křižík. V průběhu 20. století se postupně obloukové lampy nahrazovaly klasickými žárovkami, posléze vysokotlakými rtuťovými výbojkami. Od 70. let 20. století se začaly instalovat účinnější vysokotlaké sodíkové výbojky, které se pravidelně používají dodnes.

Venkovní osvětlení je důležité především z důvodu orientace v určitém prostředí, bezpečnosti osob a majetku.

Svítidla těchto zdrojů je třeba umístit na různé nosné konstrukce, jako jsou např. stožáry, ramena nebo přívěsná lana. Nosná konstrukce musí být zhotovena nejčastěji z oceli, betonu, hliníku, plastu či dřeva.

Od roku 2009 se začínají experimentálně používat zdroje LED ve veřejném osvětlení, ale vzhledem k nedokonalým svítidlům, parametrům LED a celkové ceně se hromadná výměna nekonala. Nicméně přibližně v roce 2011 se fotometrické parametry v této oblasti výrazně zlepšily a překonaly parametry dominujících vysokotlakých sodíkových výbojek. Výrobci neotáleli a zahájili sériovou výrobu, která umožnila stanovit přijatelnější cenu. Hromadná výměna se v brzké době zřejmě nebude konat, protože stále jde o poměrně nákladnou investici.

V této oblasti se používají dva typy světelných diod, výkonové (HP LED) a vícečipové (COB LED).

- Vícečipové diody COB se vyznačují větší vyzařovací plochou. Využívají se spolu se svítidly s jednoduchými optickými systémy, které usměrňují světelný tok do dolního poloprostoru. Dají se využít pro pěší zóny, náměstí atd.
- Výkonové diody HP mají menší vyzařovací plochu, často je vyžadován velký počet diod. Menší rozměry umožňují přesnější nasměrování světelného toku.

Dosažení světelně-technických parametrů výrobcem je podmíněno dodržением předepsaných teplotních poměrů. Výrobce musí dbát na vhodné chlazení a nabídnout tak uživateli co největší teplotní rozsah, při pokud možno stejném světelném toku. S rostoucí teplotou se světelný tok lineárně snižuje, navíc příliš velké rozdíly teplot mají nepříznivý vliv na životnost.

Kromě veřejného osvětlení na komunikacích našly zdroje LED uplatnění přímo na silnicích (přechody, jízdní pásy aj.). Toto osvětlení zlepšuje orientaci v prostoru a bezpečnosti.



Obrázek 25 - LED přímo v silnici [17]



Obrázek 26 - LED lampy u přechodů [18]

Obnovitelné zdroje energie jsou v 21. století velmi diskutovaným tématem, neboť zásoby neobnovitelných zdrojů (fosilní paliva) se tenčí. V současné době solární panely spolu s ostatními obnovitelnými zdroji nedokážou ani zdaleka pokrýt spotřebu, avšak svoji specifickou oblast použití mají. Vznikají tzv. ostrovní systémy, jež jsou nezávislé na dodávce elektřiny od dodavatele. Podařilo se mi nalézt zvláštní typ venkovního svítidla, které je párováno s baterií spolu s malým solárním panelem. Zatím se jedná pouze o experiment. Tento způsob osvětlení by mohl přinést značné úspory energie, ovšem na druhou stranu, by se musely pravidelně udržovat solární panely (nečistoty), což by mohlo být při velkém počtu panelů náročné.



Obrázek 27 - Kombinace LED lampy se solárním panelem [19]

### Světelný zdroj v průmyslu

Průmyslové haly jsou charakteristické svými obrovskými rozměry. Vzhledem k rozsahu je zde problém udržovat osvětlovací soustavu v krátkém intervalu (týdny, měsíce). Interval údržby se pro tyto případy většinou stanoví na 1 až 2 roky. Vzhledem k prostředí, ve kterém se nachází osvětlovací soustava, je vhodné použít odpovídající stupeň krytí IP. Vysoký stupeň krytí je schopen ochránit světelný zdroj (a tím i jeho intenzitu světelného toku) před nadměrnou prašností, vniknutím cizích částic či vodou.

Převážná většina osvětlení LED v průmyslu je realizovaná tzv. LED trubnicemi. Zvažuje-li uživatel výměnu např. zářivkového zdroje za LED, musí brát v úvahu výměnu samotného svítidla. Svítidla pro LED zdroje jsou poměrně drahá.



Obrázek 28 - Svítidlo pro LED s IP66 [20]



Obrázek 29 - LED trubice Osram [21]

Již delší dobu se zdroje LED využívají v signalizaci, např. ve vypínačích, kontrolních svítidlích indikujících konkrétní stav elektrického zařízení.

### Zdravotnictví

Zdroje LED našly uplatnění i v různých odvětvích zdravotnictví. Používají se např. ke kožním terapiím, dezinfekci vzduchu pomocí UV záření a vytvrzování hmot v zubařské technice.



### 1.4.6 VLIV DIOD NA ZDRAVÍ

Přestože tento typ světelných zdrojů má řadu příznivců, občas se objeví hlášení, že LED zdroje jsou škodlivé na lidský organismus. V této kapitole jsou uvedeny negativní vlivy, které mohou způsobit zdroje LED.

#### Škodlivost „modrého“ světla

V kapitole měření jsem měl možnost proměřit také LED zdroje, při analýze spektra LED zdrojů je zřejmé, že tento typ zdroje vyzařuje poměrně intenzivně i v oblasti ultrafialového záření (modrá část spektra). Intenzita v této části spektra není tak výrazná jako oblast viditelného spektra, zejména kvůli použitému množství luminoforu (přeměňuje UV záření na oblast viditelného záření), avšak na člověka má jistý vliv při nadměrné dávce.

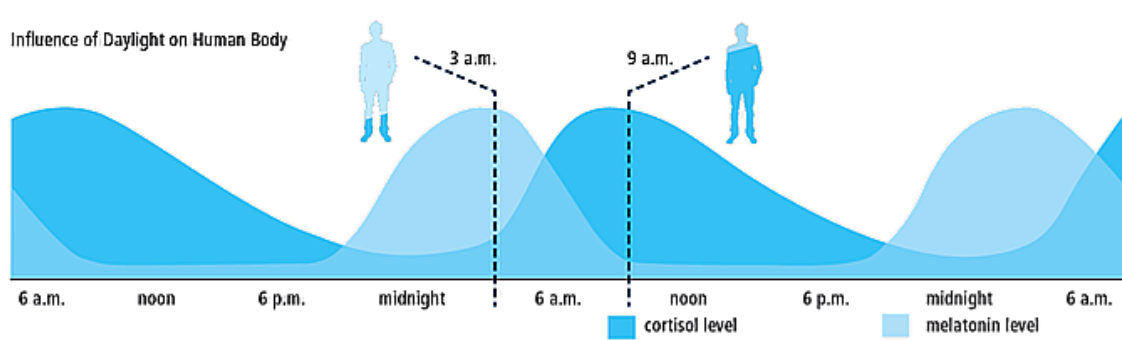
Během dne i samotné slunce vyzařuje v této části spektra. S nástupem noci se postupně zvyšuje hladina melatoninu v těle u spousty živočichů. Zvýšená hladina melatoninu způsobuje únavu a navazuje pocity ke spaní.

Pokud pro místo odpočinku zvolíte svícení těmito zdroji, zvýšení této hladiny je potlačeno a vybudí organismus k vyšší produktivitě. Při dlouhých expozicích může mít člověk problémy se spánkem, soustředěním a při velmi často se opakujících expozicích může způsobit i oslabení imunity, jež pak vedou k častějším nemocem, alergiím, ekzémům a řadě dalších onemocnění. Podle zdroje [24] při dlouhodobé expozici se člověk vystavuje riziku nádorových onemocnění. Z tohoto důvodu by každý měl před spaním snížit intenzitu světla a především omezit jeho modrou složku. Tento problém se netýká pouze LED zdrojů, ale většiny umělých světelných zdrojů.

#### Člověk a melatonin

Melatonin, nebo také hormon tmy a spánku, je pevně spojený se zdravým spánkem. Kromě toho má i další příznivé účinky, mezi které patří vliv na krevní oběh, krevní tlak, metabolismus cukrů, tuků a bílkovin. Dále má vliv na imunitu a samotné stárnutí.

Hladina melatoninu v krvi se zvyšuje po setmění a největší koncentrace je dosaženo uprostřed noci. Pokud není dopřáno organismu odpočinek od světla, hrozí potlačení této produkce. Ke snížení melatoninu tedy dochází v průběhu dne při slunečním záření a v našich domácnostech používáním umělých zdrojů.



Obrázek 30 - Vliv denního světla na lidský organizmus [33]

*„Lidský organismus v ranních hodinách produkuje hormon kortizol stimulující metabolismus. Jeho koncentrace v krvi dosahuje maxima kolem deváté hodiny ráno, pak po zbytek dne kontinuálně klesá. Melatonin vylučuje lidské tělo v noci, přičemž jeho koncentrace v lidském organismu kulminuje přibližně kolem třetí hodiny ráno.“ [24]*

Abychom si zajistili přirozenou tvorbu melatoninu, je doporučováno dodržovat pravidelné rytmy spánku a vstávání. Spánek by měl být ve tmě (zatažená okna žaluziemi, vypnutý zdroje světla). Pokud je třeba provádět činnosti večer, doporučuje se využít světelných zdrojů s minimálním, příjemně žlutým světlem.

Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal ze zdrojů [22, 23, 24]

## 1.5 ZÁKLADNÍ SVĚTELNÉ ZDROJE

Jelikož v následujících kapitolách provádím měření i s ostatními světelnými zdroji, tak je zde uveden souhrn základních světelných zdrojů. Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal ze zdrojů [1], [2]

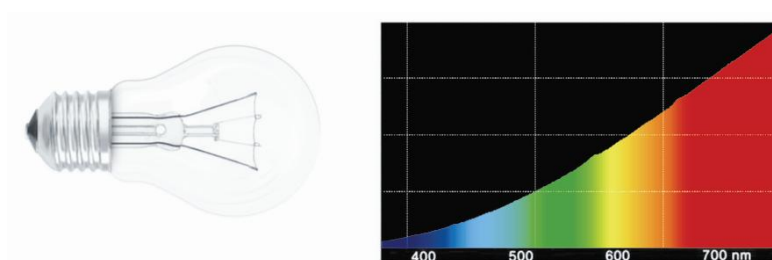
### 1.5.1 ŽÁROVKY

Žárovka je tepelný světelný zdroj, který je charakteristický ve většině případů vláknem, jež se průchodem proudu rozžhaví. Při tomto procesu se přemění až 95 % na teplo, zbylých 5 % na světelné záření. Tyto zdroje jsou charakteristické malým měrným výkonem (je potřeba větší výkon na přeměnu elektřiny na světelný tok), spojitým spektrem a index podání barev je přibližně roven 100.

Důvodů, proč se používá tento zdroj, je několik. V první řadě nemalou roli hraje pořizovací cena samotného zdroje, která je nastavena vzhledem k jednoduché konstrukci. Mezi další výhody patří jednoduchý způsob napájení (není potřeba předřadníků nebo jiného příslušenství), okamžitý start, stabilní svícení během celé životnosti, nejlepší hodnota indexu podání barev ( $R_a \approx 100$ ), nezávislost na teplotě okolí a široký rozsah napájecího napětí. Z pohledu životního prostředí neobsahují látky, které by enormně zatěžovaly životní prostředí.

Nevýhody žárovek spočívají v krátké době životnosti, výrazné závislosti světelných parametrů na stabilitě napájení a malém měrném výkonu v porovnání s ostatními zdroji.

Žárovky jsou tvořeny tenkým drátem z wolframu. Průměr drátku závisí na příkonu, např. 10  $\mu m$  odpovídá žárovka s příkonem 15 W a naopak 120  $\mu m$  odpovídá příkon 200 W.



Obrázek 31 - Obyčejná žárovka a spektrum [2]

### 1.5.2 HALOGENOVÉ ŽÁROVKY

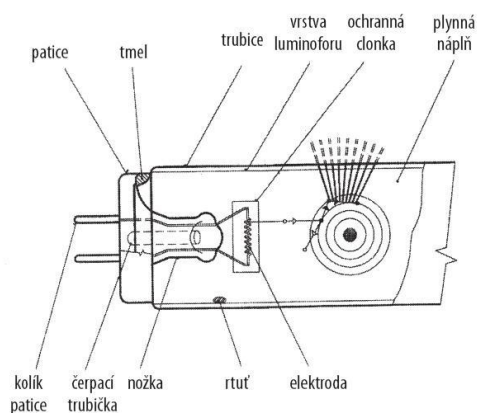
Ve své podstatě se jedná o žárovky plněné inertním plynem s příměsí halogenů (jód, brom, chlór) nebo jejich sloučenin, kde probíhá halogenový regenerační cyklus. S přechodem na tento typ žárovek se muselo využít teplotně i mechanicky odolnějších materiálů na výrobu baňky. U běžných žárovek se používala měkká sklovina, u halogenových zdrojů se začalo používat křemenné nebo tvrdé sklo s podstatně větší odolností. To umožnilo zvýšit tlak plynné náplně v baňce, což snižuje rychlost vypařování wolframového vlákna. Samotnou rychlost odpařování wolframu a jeho usazování na stěnách baňky také velmi ovlivňují halogenové příměsi. Atomy wolframu odpařující se z vlákna se v chladnějších místech baňky (stěny) slučují s halogenovým plynem a vytvářejí sloučeninu halogenid wolfram. Tato sloučenina se vrací zpět do místa s vyšší teplotou (vlákno).

Oproti obyčejným žárovkám se tyto zdroje vyznačují vyšší životností, lepší stabilitou světelného toku, menšími rozměry. Nevýhodou pak je vyšší cena, která je vykoupena náročnější technologií výroby. Povrch křemenného skla obyčejné a halogenové žárovky je velmi citlivý na mastnotu (třeba dotekem ruky), to má za následek výrazné snížení životnosti.

### 1.5.3 ZÁŘIVKY

Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, které vyzařují převážně v oblasti neviditelného ultrafialového záření. Vlivem elektrického pole mezi elektrodami jsou vybuzeny páry rtuti, ve kterých následně dochází k emisi tohoto záření. Nepostradatelnou součástí zářivek je luminofor, který se nanáší na vnitřní povrch trubice. Běžně se nanáší jedna vrstva, u speciálních typů se nanáší více vrstev. Luminofor umožňuje transformovat ultrafialové záření do oblasti viditelného spektra. V závislosti na typu použitého luminoforu lze dosáhnout různého barevného odstínu světla a indexu podání barev Ra.

Trubice je zhotovena z měkkého sodno-vápenatého skla a může mít různé geometrické tvary: hruškový, kulový, svíčkový aj. Na obou koncích trubice je zatavena wolframová elektroda, která je namontovaná na nožce sestávající se z talířku a čerpací trubičky. „Kolem elektrod je na neutrálním přívodu umístěna ochranná kovová clonka, která zabraňuje usazování vypařující se a rozprašující se emisní hmoty na vrstvě luminoforu. Omezuje tak neestetické černání konců a přispívá ke stabilizaci světelného toku během svícení.“ [1]



Obrázek 32 - Konstrukce zářivky [1]

Jako všechny výbojky se ani zářivky neobejdou bez předřadných přístrojů. Po zapálení výboje je napětí na zářivce nižší než síťové napětí. V případě použití magnetického předřadníku se na tlumivce vytvoří úbytek napětí, který omezí proud tekoucí zářivkou, v případě použití elektronického předřadníku je proud zářivky řízen elektronickými obvody. [2]

Životnost zářivek je silně ovlivněna počtem zapnutí. Nehodí se pro prostory s častým zapínáním a vypínáním. Při provozu s klasickým předřadníkem se životnost zářivky

pohybuje přibližně 10 000 *hodin*, oproti tomu zářivky s elektronickým předřadníkem se vykazují životností vyšší, a to až 18 000 *hodin*.

Velmi důležitou operací ve výrobě zářivek je dávkování rtuti. Vzhledem k toxicitě rtuti nastává problém již při samotné výrobě a následně při likvidaci zářivek. Pro správnou funkci zářivek je potřebná přítomnost pouze nepatrného množství rtuti, přibližně 3 *mg*.



Obrázek 33 - Lineární zářivka a její spektrum [2]

S využitím elektrických předřadníků lze provozovat zářivky na vysoké frekvenci. To má řadu předností, mezi které patří rychlý start bez blikání, stabilní svícení bez míhání, úplné potlačení stroboskopického jevu.

K hlavním přednostem zářivek patří vysoká účinnost přeměny elektrické energie na světelnou (vysoký měrný výkon). Všeobecný index podání barev  $R_a$  dosahuje hodnoty až 80 u speciálních typů s příslušenstvím (elektrické předřadníky) lze dosáhnout všeobecného indexu podání barev až hodnoty 98 dle zdroje [1]. Zářivky mají velmi široký sortiment příkonů (od 4 *W* do 200 *W*) a náhradní teplotou chromatičnosti (2 700 až 17 000 *K*). Další předností těchto zdrojů je vysoká životnost, u některých speciálních zářivek je vyšší než 20 000 *hodin*.

K nedostatkům patří závislost světelného toku na teplotě okolního prostředí. K provozu jsou nutné předřadné a startovací obvody, které částečně snižují měrný výkon osvětlovací soustavy. Dalším nedostatkem je závislost počtu zapnutí na životnosti světelného zdroje. Jelikož zářivky obsahují určité množství toxické rtuti, nelze je odkládat do komunálního odpadu, ale je nutné, abychom zářivky likvidovaly u pověřených organizací.

#### 1.5.4 VYSOKOTLAKÁ SODÍKOVÁ VÝBOJKA

Vysokotlaká sodíková výbojka je charakteristická výboji v parách sodíku, vyzařuje ve žluté oblasti viditelného spektra o vlnové délce  $\lambda = 589 \text{ nm}$ . Se zvyšujícím tlakem par sodíku dochází k výraznému rozšíření spektrálního vyzařování, spektrum je bohatší, což způsobí i lepší všeobecný index podání barev o hodnotě přibližně 25. Výsledkem dlouholetého vývoje se dosáhlo velmi vysoké hodnoty měrného výkonu, jehož hodnota dle zdrojů [1], [2] dosahuje až  $150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ .

Tyto světelné zdroje se používají zejména ve veřejném osvětlení. Výbojka neumožňuje opětovně teplý zápal, lze ji rozsvítit až po jejím vychladnutí. Na jmenovitý světelný tok nabíhá přibližně po *pěti minutách*, dle zdroje [2].

Vysokotlaké sodíkové výbojky je nutné provozovat v obvodu s tlumivkou a zapalovacím zařízením. Pokud jsou dodržovány provozní podmínky (např. kolísání napětí musí být menší než 5 %) životnost těchto výbojek dosahuje až *30 000 hodin*, což je spolu s měrným výkonem nepostradatelné pozitivum.

*„Ukončení života je dáno postupným nárůstem napětí na výboji. Při překročení určitého poměru tohoto napětí vzhledem k napájecímu napětí sítě výboj zhasne. Po vychladnutí se výboj znovu zapálí a celý cyklus se opakuje. Periodické zhasínání výbojek je příznakem konce životnosti a výbojku je nutné vyměnit.“* [2]



Obrázek 34 - Vysokotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra [2]

## 1.6 NÁVRH MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH VELIČIN

Účelem každého měření světelně-technických veličin je zjišťovat a ověřovat určité parametry světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav. Pomocí průběžných měření jsme schopni zachytit změny některých světelných veličin v průběhu provozu daného zařízení.

Měření světelných zdrojů lze rozdělit podle požadavku na přesnost:

### a) Přesná měření

Provádí se při tvorbě etalonů, při kalibracích nebo posuzování náročných osvětlovacích soustav. Tento typ měření je využíván ve výzkumných laboratořích. Odhad rozšířené nejistoty přesných měření je  $U \leq 8 \%$ .

### b) Provozní měření

Jedná se o obvyklé ověřování a porovnání parametrů světelných zdrojů, svítidel a osvětlovacích soustav. Odhad rozšířené nejistoty provozních měření je  $8 \% \leq U \leq 14 \%$ . Tento typ bude využit při následujících měřeních.

### c) Orientační měření

V tomto případě se jedná o ověření základních funkcí zařízení a dosažení zrakové pohody. Odhad rozšířené nejistoty orientačních měření je  $14 \% \leq U \leq 20 \%$ .

Metody měření světelně-technických veličin se dělí na:

### a) Vizuelní měření

Jedná se o subjektivní metody, při kterých se jako indikátor využívá zrak. Touto metodou lze dosáhnout vysoké přesnosti, avšak je nutné, aby pozorovatelé byli zkušení. Výsledky subjektivních měření také velmi závisí na individuálních vlastnostech zraku různých pozorovatelů a podmínkách pozorování. Vizuelní metoda se používá spíše v laboratorních podmínkách. Příkladem může být měření svítivosti na fotometrické lavici.



**b) Fyzikální měření**

Neboli objektivní metoda, jež využívá fyzikální čidla k měření. Ve většině případů se používá tato metoda. Využívá se přenosných objektivních přístrojů, vybavených kvalitními fotoelektrickými články.

Pokud požadujeme při světelně-technických měřeních, ať již vizuálních nebo fyzikálních měření, dosáhnout co největší přesnosti, je důležité dodržovat určité podmínky:

- Měření nesmí být ovlivněno rozptýleným světlem.
- Optické části fotometrů nesmí být zaprášené.
- Fotometrická vzdálenost, tj. vzdálenost od svítící části měřeného zdroje (svítidla), musí být dostatečně velká (nejméně *pětkrát*, nebo lépe *desetkrát* větší než největší rozměr vyzařovací plochy zdroje či svítidla), aby bylo možné takový zdroj považovat za bodový. To je zejména důležité při měření svítivosti světelných zdrojů.
- Závady, opotřebení fotometrických přístrojů, jež mají negativní vliv na samotná měření.
- Před každým měřením je třeba ponechat zkoušené zdroje a normály dostatečně dlouho zahořet, aby se ustálily jejich světelně-technické i elektrické parametry. Žárovky se obvykle zahořují asi *pět minut*, výbojové zdroje světla přibližně *dvacet minut* (záleží na náběhových charakteristikách).

Informace pro tuto kapitolu jsem čerpal ze zdroje [1].

**1.6.1 MĚŘENÍ SVÍTIVOSTI**

*„Svítivost jako fotometrická veličina se neměří přímo, ale převádí se při subjektivním měření na vizuální porovnávání jasů plošek pozorovaných v okuláru fotometru nebo při objektivním měření na měření osvětlenosti. Měření se vykonává na fotometrické lavici.“*

[1]

V případě vizuálního měření se svítivost měřeného zdroje  $I_z$  buď přímo porovnává s normálem svítivosti  $I_N$ , nebo se měří substituční metodou s použitím srovnávacího světelného zdroje. Nejprve je fotočlánek postupně osvětlován etalonem svítivosti (normálový zdroj) a následně zkoušeným zdrojem. *„Nejčastěji se měří při konstantní osvětlenosti čidla, kdy se vylučuje vliv nelineární závislosti fotoelektrického proudu fotočláneku na osvětlenosti. Mění se tedy poloha zkoušeného zdroje, až je údaj měřicího přístroje stejný jako při osvětlení etalonem svítivosti.“* [1] Hledaná svítivost zkoušeného zdroje se pak vypočítá ze vztahu (15).

$$\frac{I_z}{I_N} = \frac{l_z^2}{l_N^2}, \quad (-) \quad (15)$$

kde

$I_z$  – svítivost zkoušeného světelného zdroje;

$I_N$  – svítivost normálového světelného zdroje;

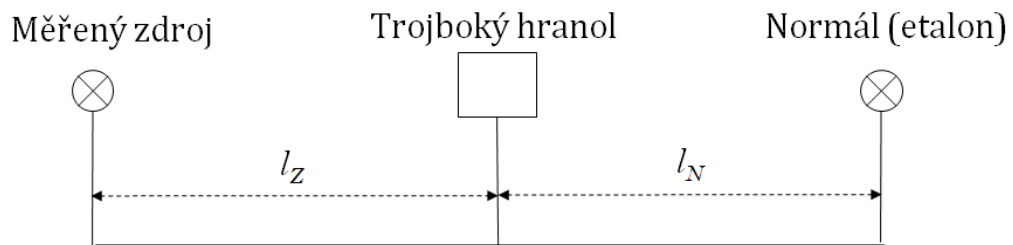
$l_z$  – vzdálenost mezi fotometrickou hlavicí a zkoušeným zdrojem;

$l_N$  – vzdálenost mezi fotometrickou hlavicí a normálovým světelným zdrojem.

K dosažení co nejpřesnějších výsledků měření je třeba vyloučit účinky rozptýleného světla na čidlo. Z tohoto důvodu se na fotometrickou lavici umísťují stínící clony (mezi zdroj a fotometr). Tím se docílí, že na fotočlánek bude dopadat světlo pouze z měřeného zdroje. Velikost otvorů v clonách musí být taková, aby žádná aktivní část zdroje nebyla zastíněna.

**Fotometrická lavice**

Fotometrická lavice je fotometrický laboratorní přístroj, který slouží především k měření svítivosti světelných zdrojů. Tato lavice se skládá z vodicích tyčí, na nichž se mohou volně pohybovat posuvné vozíky. Na vozících může být umístěn trojboký hranol, clony, nominální a měřený světelný zdroj. Délka fotometrické lavice je ve většině případů od tří do *osmi metrů*. Vodicí tyč lavice má délkové dělení s možností přesného odečtu vzdáleností (0,5 až 1 mm). Pro vyloučení dopadu cizího světla na měřicí člen je fotometrická lavice vybavena dostatečným počtem černých clon se sametově matným povrchem.



Obrázek 35 - Schéma fotometrické lavice

### 1.6.2 MĚŘENÍ ČAR SVÍTIVOSTI

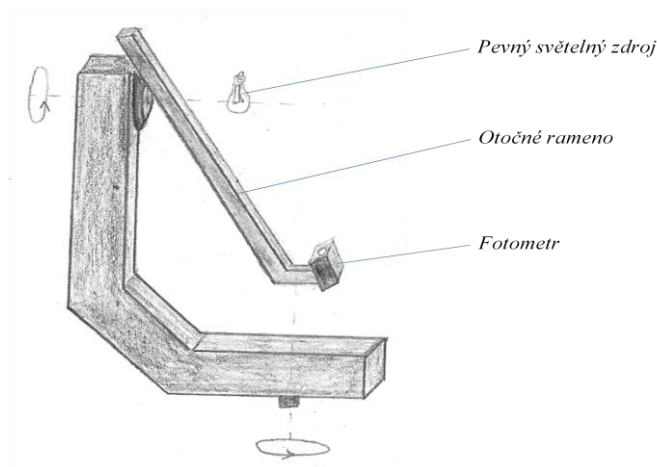
Čáry svítivosti svítidel jsou důležitým podkladem pro světelně-technické výpočty prováděné v rámci návrhu osvětlovacích soustav. Čáry svítivosti svítidel (resp. světelných zdrojů) se nejčastěji měří na přístroji zvaném goniofotometr. Goniofotometr je zařízení, na kterém lze měřit svítivost svítidla (resp. světelného zdroje) pod různými úhly a v různých fotometrických rovinách.

Goniofotometr může mít různá konstrukční uspořádání:

- Otočné svítidlo (zdroj) a pevný fotometr;
- Pevné svítidlo (zdroj) a otočný fotometr;
- Pevné svítidlo (zdroj) i fotometr a otočná zrcadlová soustava.

Goniofotometry s otočným svítidlem (zdrojem) nejsou vhodným řešením, protože u některých světelných zdrojů je světelný tok závislý na poloze zdroje.

V druhém případě je fotočlánek připevněn na rameni, jež se otáčí okolo svítidla (zdroje). Svítidlo je tedy zavěšeno v normální provozní poloze. Toto konstrukční uspořádání vyžaduje velký prostor, protože je nutné zajistit dostatečnou fotometrickou vzdálenost mezi měřeným svítidlem (zdrojem) a fotočlánekem. Tento typ goniofotometru se skládá z fotočlátku, který je upevněn na rameni. Rameno se otáčí okolo měřeného svítidla (zdroje). Čáry svítivosti svítidel (zdrojů) se měří v soustavě fotometrických rovin  $C - \gamma$ . S tímto typem jsem měřil v laboratoři světelné techniky ČVUT v Praze.

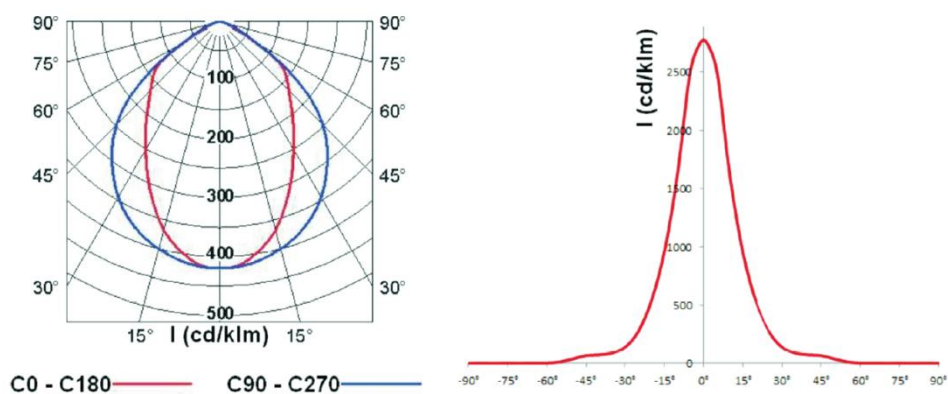


Obrázek 36 - Goniofotometr s pevným svítidlem (zdrojem) a otočným fotometrem

V případě pevného svítidla (zdroje) i fotometru je zapotřebí soustavy zrcadel. Z hlediska konstrukce se jedná o ještě větší nároky, než v předešlém případě.

Konstrukce všech typů goniofotometrů musí být dostatečně tuhá, aby během rotace nedocházelo ke kývání nosných částí. To by mohlo způsobit zbytečné přídavné chyby měření.

*„Svítivost se v různých směrech obvykle neměří absolutně. Stačí relativní měření, které dovoluje nakreslit tvar zjištěné křivky v polárních souřadnicích.“ [1]*



Obrázek 37 - Křivky svítivosti v polárních a pravoúhlých souřadnicích [2]

### 1.6.3 MĚŘENÍ OSVĚTLENOSTI

*„Měřením osvětlenosti lze objektivně ověřit, zda jsou v dané osvětlovací soustavě dodrženy základní požadavky na úroveň a rovnoměrnost hladiny osvětlenosti.“ [1]*

Osvětlenost lze měřit objektivními přístroji zvanými luxmetry. Luxmetr se skládá z přijímače s korigovaným fotoelektrickým článkem, jenž je opatřen kosinovým nastavcem. Fotočlánek je spojen s měřicím přístrojem pomocí stíněného kabelu. Součástí luxmetru je také vyhodnocovací systém s digitálním nebo analogovým výstupem. Při používání luxmetrů se postupem času mohou měnit jejich parametry (vlastnosti fotočlánků), proto je nutné provádět pravidelnou kalibraci. Snímací úhel luxmetru pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý k rovině, ve které se určuje osvětlenost.

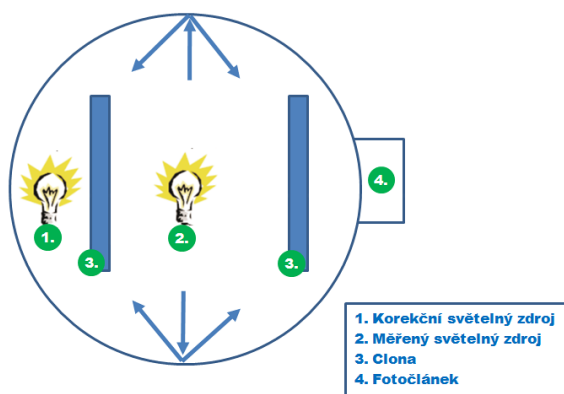


Obrázek 38 - Digitální luxmetr [1]

#### 1.6.4 MĚŘENÍ SVĚTELNÉHO TOKU

„Světelný tok světelných zdrojů či svítidel je možné stanovit graficko-početními metodami z naměřených křivek svítivosti nebo přímým měřením světelného toku v integrátoru s použitím normálu světelného toku.“ [1]

Integrátor může mít různé tvary (krychle, kvádr), nejčastěji se však používá tvar koule. Vnitřní povrch koule je opatřen bílým nátěrem s vysokým činitelem odrazu. Požaduje se barevně neselektivní nátěr. Těmto požadavkům vyhovují druhy zinkové či barytové běloby. Činitel odrazu by měl být v rozmezí hodnot 0,75 až 0,85. Integrátor se skládá z korekčního a měřeného světelného zdroje a z fotočlánku, jenž je umístěn na jedné straně koule. Strana s fotočlánkem musí být uvnitř integrátoru zakryta clonkou, aby na fotočlánek nedopadalo záření přímo ze zdroje. Samotný měřený světelný zdroj se umísťuje přibližně do středu koule. V průběhu měření dochází integrátoru k mnohonásobným odrazům a výsledná osvětlenost je teoreticky ve všech bodech vnitřního povrchu koule stejná.



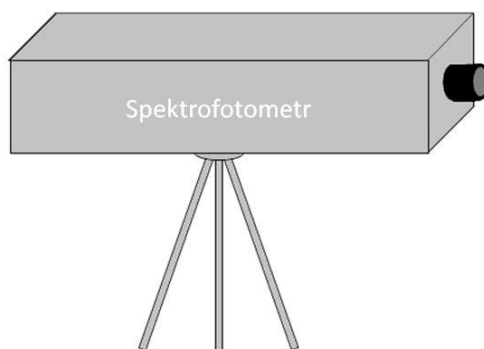
Obrázek 39 – Rozmístění světelných zdrojů v kulovém integrátoru



Obrázek 40 - Ukázka reálného kulového integrátoru [25]

### 1.6.5 MĚŘENÍ SVĚTELNÝCH PARAMETRŮ SPEKTROFOTOMETRY

Spektrofotometr je přístroj k měření spektra optického záření. Je založen na principu rozkladu světla na mřížce nebo hranolu. Spektrofotometr je schopný měřit parametry jako jsou osvětlenost, spektrální složení dopadajícího záření, trichromatické souřadnice  $(x, y, u, v)$ , náhradní teplotu chromatičnosti, dominantní vlnovou délku, index podání barev, kolorimetrickou čistotu a jas.



Obrázek 41 - Spektrofotometr



## 1.7 ZÁSADY PŘI NÁVRHU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY

Každá osvětlovací soustava splňuje kvantitativní a kvalitativní požadavky. Požadavky na osvětlení jsou určeny uspokojením základních lidských potřeb.

### **Zraková pohoda**

Jedná se o stav, ve kterém uživatel dobře vidí a rozlišuje potřebné detaily, zároveň se v tomto prostředí cítí příjemně a může podávat vyšší výkony. Zraková pohoda pozitivně působí na psychologickou pohodu lidí.

### **Zrakový výkon**

Při zrakovém výkonu uživatelé přijímají a zpracovávají informace zrakem za jednotku času, vykonávat tzv. zrakové úkoly. *„Jde o vytvoření předpokladů zejména pro potřebnou ostrost vidění, správné rozlišování tvaru a barev předmětů a jejich detailů i pro dostatečnou rychlost vnímání, aby fyziologická námaha a únava spojená s prací zraku byla co nejnižší a aby se v pracovních místech dosáhlo vysoké produktivity práce při minimální únavě.“* [31]

### **Bezpečnost**

Bezpečnost osvětlovací soustavy lze zajistit především zábranou proti vzniku oslnění, vyloučení stroboskopického jevu apod.

Mezi vlivy ovlivňující světelnou soustavu patří rozložení jasu, osvětlenost, rovnoměrnost osvětlení, oslnění *UGR*, míhání světla, směrovost osvětlení, stínivost a barevné vlastnosti osvětlení (index podání barev, barevný tón).

### 1.7.1 ROZLOŽENÍ JASU

*„Jas a jeho prostorové rozložení ovlivňuje vizuální vjem daného prostoru. Úroveň jasu, jeho velikost, souvisí s pocitem dostatečnosti osvětlení. Rozložení jasu, jeho rovnoměrnost, souvisí s celkovou atmosférou a subjektivním zážitkem z daného prostoru.“ [1]*

Rovnoměrné rozložení jasu, jež vzniká při vhodném rozptýleném osvětlení, vytváří velmi klidnou zrakovou atmosféru.

Výrazně nerovnoměrné rozložení jasu (osvětlení s ostrými jasovými přechody) zbytečně zatěžuje zrak, neboť se musí neustále adaptovat na odlišné jasové podmínky. Po delší době je pozorovatel v tomto prostoru unaven, dochází u něj ke zhoršení zrakového výkonu a zároveň zrakové pohody.

Úroveň jasu v prostoru přímo souvisí s adaptační úrovní zraku. Ta ovlivňuje zrakové funkce jako je kontrastní citlivost, ostrost vidění a účinnost zrakových funkcí.

*„Požadavky na prostorové rozložení jasu se liší podle typu prostoru. U pracovních prostorů, kde se zrakové úkoly provádějí po delší časové úseky a kde rozložení jasu ovlivňuje zrakový výkon i zrakovou pohodu, je třeba zajistit dostatečnou úroveň jasů, tak jejich vhodné rozložení. Interval přijatelných jasů je vymezen minimální a maximální úrovní jasu. Minimální úroveň jasu souvisí s dostatečností světla pro konkrétní časový úkol. Maximální úroveň jasu souvisí s oslněním.“ [1]*

**1.7.2 PRŮMĚRNÁ OSVĚTLENOST  $E_M$** 

Jedná se o průměrnou osvětlenost v místě zrakového úkolu, pod kterou nesmí skutečná hodnota osvětlenosti v průběhu provozu osvětlovací soustavy poklesnout.

Na základě mnoha výzkumů byla pro vnitřní prostory sestavena základní řada doporučených osvětleností, ze které se pak volí normativní hodnoty pro konkrétní zrakové úkoly.

20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 1 000 – 1 500 – 2 000 –  
– 3 000 – 5 000 lx [1]

**1.7.3 ROVNOMĚRNOST OSVĚTLENÍ  $U_0$** 

Rovnoměrnost osvětlení je definovaná jako poměr minimální a průměrné hodnoty osvětlenosti na hodnocené srovnávací rovině. Rovnoměrnost osvětlenosti bezprostředního okolí musí být  $U_0 \geq 0,4$  a pro pozadí  $U_0 \geq 0,1$ , dle zdroje [1].

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_m}, \quad (-) \quad (16)$$

**1.7.4 OSLNĚNÍ UGR**

*„Oslnění je nepříznivý stav zraku, k němuž dochází, je-li sítnice nebo její část vystavena jasů vyššímu, než na který je adaptován. Oslnění může zásadním způsobem ovlivnit požadovanou úroveň zrakového výkonu a zrakové pohody.“ [1]*

Pro hodnocení rušivého oslnění se zavedl tzv. jednotný systém hodnocení oslnění *UGR* (Unified Glare Rating), pomocí kterého se stanovují indexy oslnění *UGR*. Hodnoty *UGR* se stanovují v místech pracovního úkolu při obvyklých směrech pohledů. Navržená osvětlovací soustava nesmí přesáhnout hodnoty *UGR* stanovené v normě.

## 2 MĚŘENÍ SVĚTELNĚ TECHNICKÝCH PARAMETRŮ

### 2.1 MĚŘENÍ S POMOCÍ SPEKTROFOTOMETRU

Měření se spektrometrem mi umožnilo zjistit hodnotu několika parametrů, jako je např. osvětlenost, index podání barev, teplotu chromatičnosti, trichromatické souřadnice a spektrum vlnových délek. Součástí tohoto přístroje byl také software „Jeti“, který lze nainstalovat na libovolný počítač. Komunikace mezi počítačem a spektrometrem byla zajištěna kabelem. Software nabízí spoustu možností, např. tvorbu diagramů, grafů a převod hodnot do programu Microsoft Excel. Jednalo se o poměrně jednoduché měření, při kterém se však musely dodržovat jisté podmínky.

Spektrometr musí být umístěn v určité vzdálenosti od samotného světelného zdroje, aby se spektrometr nepoškodil (zejména při velmi vysoké svítivosti) a zároveň, aby přístroj neměřil zkresleně. Vhodnou vzdálenost od světelného zdroje jsem stanovil na 1 m, dle manuálu pro spektrometr.

Nejvhodnější prostor k měření světelných parametrů byla „černá komora“, ve které nejsou žádná okna. Stěny jsou pokryty černou barvou, aby se zamezilo přídavným odrazům a zároveň zkreslením samotného měření. V této místnosti je umístěna fotometrická lavice, na které se měří svítivost světelných zdrojů. Po drobných úpravách jsme tuto lavici využili pro naše měření.

K zajištění dostatečné přesnosti měření musela být hlavice spektrometru umístěna ve stejné výšce jako vyzařující zdroj.

Stabilita světelného zdroje, neboli ustálení světelných parametrů, byla zajištěna určitou dobou čekání. U některých zdrojů trvá, než dosáhnou svých pracovních parametrů. U žárovkových světelných zdrojů (s vláknem – tepelné) jsem čekal přibližně *pět minut*, naproti tomu výbojkové světelné zdroje vyžadovaly poměrně delší dobu od zahoření, a to přibližně *dvacet minut*.

## 2.2 PŘEDSTAVENÍ SVĚTELNÝCH ZDROJŮ

Tabulka 4 – Měřené světelné zdroje

| č.  | Typ zdroje                 | Příkon (W) | Doba života (hod) | $\Phi$ (lm) | $\eta$ (lm.W <sup>-1</sup> ) | Výrobce     | Požizovací cena (Kč) | Ra (-) | Tc (K) |
|-----|----------------------------|------------|-------------------|-------------|------------------------------|-------------|----------------------|--------|--------|
| 1.  | Žárovka                    | 40         | 1 000             | 340         | 8,5                          | Iskra       | 10                   | ≈ 100  | 2700   |
| 2.  | Žárovka                    | 60         | 1 000             | 600         | 10                           | Spectrum    | 10                   | ≈ 100  | 2700   |
| 3.  | Žárovka                    | 75         | 1 000             | 850         | 11,3                         | Spectrum    | 10                   | ≈ 100  | 2700   |
| 4.  | Žárovka                    | 100        | 1 000             | 1 250       | 12,5                         | Spectrum    | 10                   | ≈ 100  | 2700   |
| 5.  | Halogen                    | 28         | 2 000             | 370         | 13,2                         | Ecolite     | 49                   | ≈ 100  | 2700   |
| 6.  | Halogen                    | 53         | 2 000             | 900         | 17,0                         | Nedes       | 49                   | ≈ 100  | 2700   |
| 7.  | Zářivky                    | 9          | 6 000             | 432         | 48                           | Somogyi     | 89                   | ≥ 80   | 2700   |
| 8.  | Zářivky                    | 20         | 10 000            | 1 160       | 58                           | NBB Bohemia | 126                  | ≥ 80   | 2700   |
| 9.  | Vysokotlaká sodík. výbojka | 100        | 28 000            | 10 400      | 104                          | Osram       | 340                  | -      | 2000   |
| 10. | LED                        | 1,8        | 35 000            | 90          | 50                           | Conrad      | 260                  | -      | 3000   |
| 11. | LED                        | 1,8        | 35 000            | 90          | 50                           | Conrad      | 260                  | -      | 8100   |
| 12. | LED                        | 9          | 30 000            | 730         | 81,1                         | Bohemia eco | 350                  | -      | 3000   |
| 13. | LED                        | 12         | 15 000            | 1 055       | 87,9                         | Pila        | 180                  | -      | 2700   |
| 14. | Rtuť. výbojka              | 250        | -                 | -           | -                            | Tovos       | -                    | -      | -      |



Obrázek 42 - Žárovky (zdroje č. 1 až 4)



Obrázek 43 - Halogenová žárovka 28 W  
(zdroj č. 5)



Obrázek 44 - Halogenová žárovka 53 W  
(zdroj č. 6)



Obrázek 45 - Kompaktní zářivky  
(zdroje č. 7 a 8)



Obrázek 46 - Vysokotlaká sodíková výbojka  
(zdroj č. 9)



Obrázek 47 - LED 1, 8 W (zdroj č. 10 a 11)



Obrázek 48 - LED (zdroj č. 12 a 13)



Obrázek 49 - Rtuťová výbojka (zdroj č. 14)

## 2.2.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY

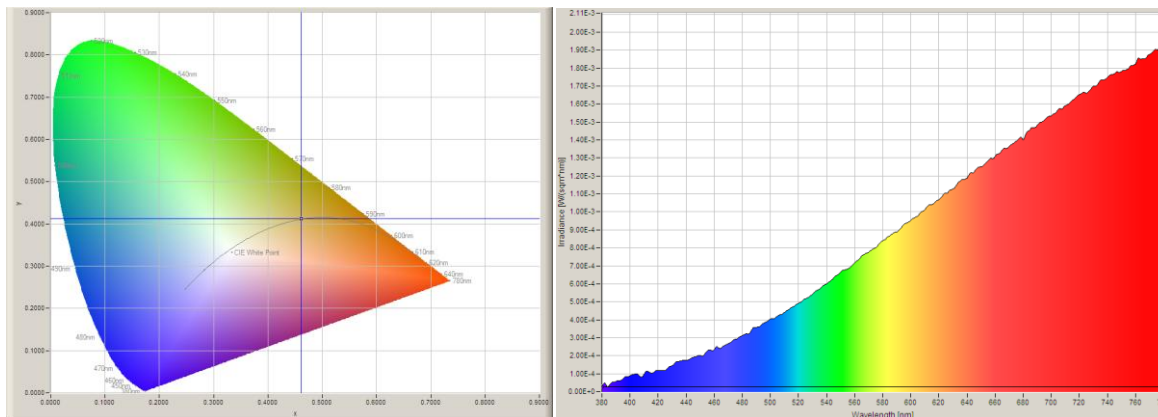
Tabulka 5 - Naměřené hodnoty všech světelných zdrojů

| Pořadí | Typ zdroje                   | P [W] | E [lx] | CCT [K] | Ra [-] |
|--------|------------------------------|-------|--------|---------|--------|
| 1.     | Žárovka                      | 40    | 27,16  | 2674    | 99,38  |
| 2.     | Žárovka                      | 60    | 38,47  | 2664    | 99,39  |
| 3.     | Žárovka                      | 75    | 53,03  | 2702    | 99,21  |
| 4.     | Žárovka                      | 100   | 96,84  | 2781    | 99,24  |
| 5.     | Halogen                      | 28    | 38,29  | 2756    | 99,36  |
| 6.     | Halogen                      | 53    | 90     | 2840    | 99,27  |
| 7.     | Zářivky                      | 9     | 48,03  | 2729    | 82,16  |
| 8.     | Zářivky                      | 20    | 86,19  | 2645    | 81,99  |
| 9.     | Vysokotlaká sodíková výbojka | 100   | 19,65  | 1975    | 19,6   |
| 10.    | LED                          | 1,8   | 12,31  | 3064    | 66,43  |
| 11.    | LED                          | 1,8   | 10,19  | 8163    | 79,79  |
| 12.    | LED                          | 9     | 68,68  | 2905    | 80,68  |
| 13.    | LED                          | 12    | 82,87  | 2698    | 81,07  |
| 14.    | Rtuťová výbojka              | 250   | 940    | 5300    | 19,2   |



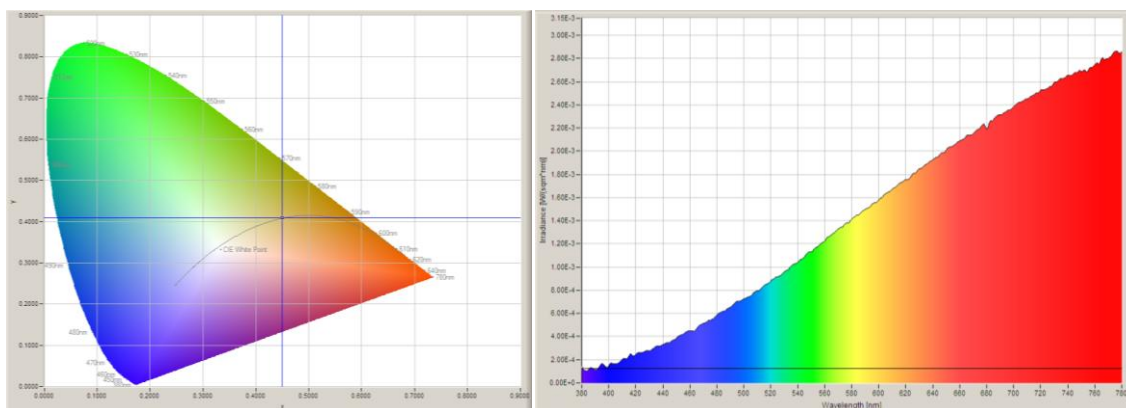
## 2.2.2 DIAGRAMY A SPEKTRA

### Obyčejná žárovka



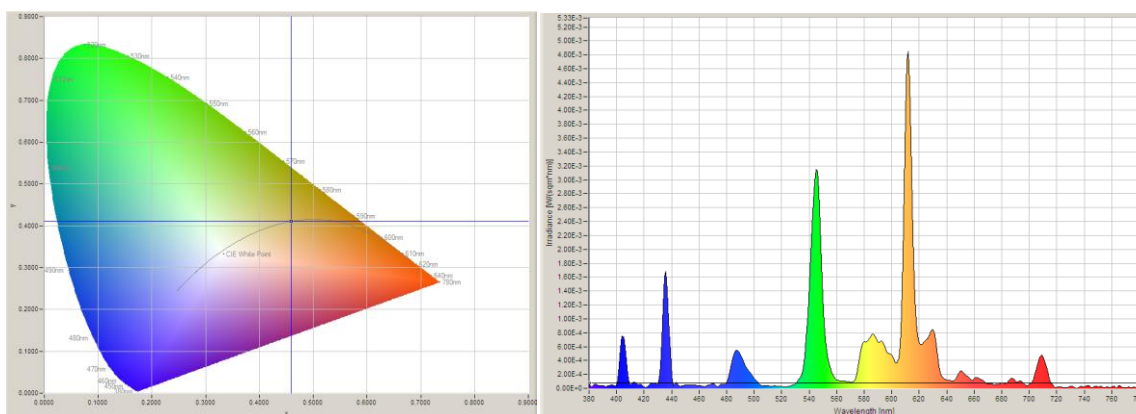
Obrázek 50 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 75 W

### Halogenová žárovka



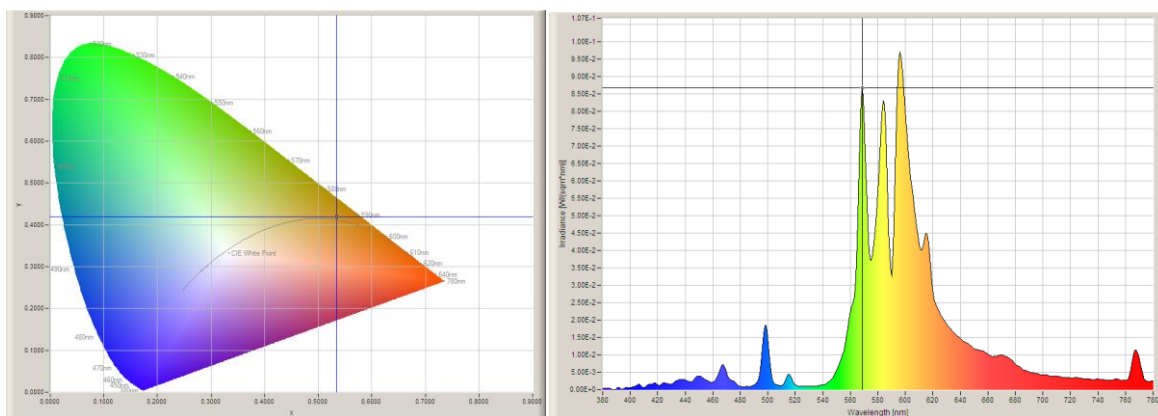
Obrázek 51 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 53 W

### Kompaktní zářivky



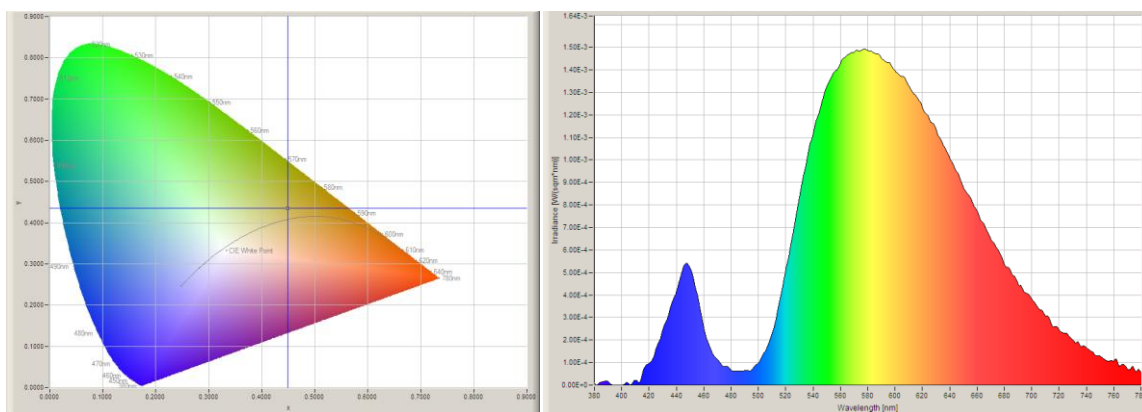
Obrázek 52 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 9 W

Vysokotlaká sodíková výbojka

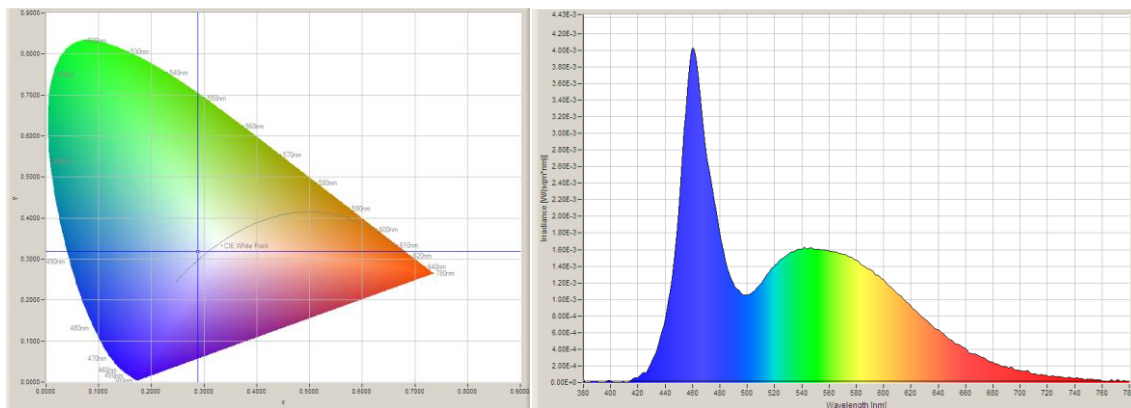


Obrázek 53 - Diagram chromatičnosti a spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W

LED zdroje

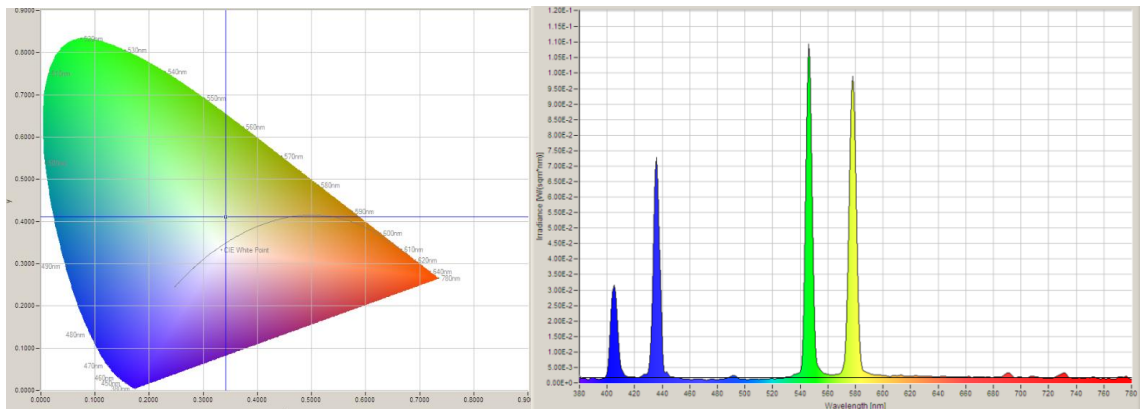


Obrázek 54 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 3 000 K)



Obrázek 55 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 8 100 K)

Rtuťová výbojka



Obrázek 56 Diagram chromatičnosti a spektrum rtuťová výbojka 250 W

### 2.2.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

#### Obyčejná a halogenová žárovka

Dle očekávání měly všechny žárovky spojitě spektrum vyzařovaného světla, majícího příjemný odstín teple bílé barvy pro pozorovatele, charakterizovaný teplotou chromatičnosti 2 600 až 2 800 K. Všeobecný index podání barev byl také vynikající, téměř roven hodnotě  $R_a = 100$ . Diagram chromatičnosti vyznačuje bod, který charakterizuje přesnou hodnotu náhradní teploty chromatičnosti. Náběh proběhl bez blikání. Po dobu měření jsem zaznamenal stabilní svícení bez míhání.

#### Zářivky

Zářivky neměly spojitě spektrum, vyzařují převážně v oblastech s vlnovou délkou 540 nm (zelená) a 610 nm (oranžová). Náhradní teplota chromatičnosti byla opět v oblasti příjemně teple bílé barvy. Všeobecný index podání barev mne vyšel přibližně  $R_a = 81$ . Většina zářivek na trhu má tento index lehce nad hodnotou  $R_a = 80$ , moje měřené zdroje nebyly výjimkou. Se speciální elektronikou (elektronické předřadníky) bychom dosáhli vysoké frekvence, čímž bychom dosáhli delší životnosti, lepší stability světelného toku a zamezili bychom blikání.

#### Vysokotlaká sodíková výbojka

Naměřené spektrum tohoto zdroje dosahovalo extrémů převážně ve žluté části viditelného spektra, mezi hodnotami vlnových délek 560 až 620 nm. Náhradní teplota chromatičnosti odpovídala hodnotě  $CCT = 1975 K$ , tedy příjemně vyzařovanému plamenu svíčky. Index podání barev byl  $R_a = 19,65$ , což je nepřijatelné téměř ve všech oblastech použití. Bohužel s tímto nedostatkem se potýkají všechny světelné zdroje tohoto typu, spolu se rtuťovými zdroji.

#### LED diody

Spektra těchto zdrojů mají stejný tvar. Extrémy jsem zaznamenal v oblastech modrého a žlutočerveného spektra. Modré světlo zajišťuje modrá LED dioda, zbylé spektrum je pak pokryto s pomocí luminoforu (záleží na jeho množství). Z grafů je patrné, že je potlačena zelená a červená složka, což se projevuje horším všeobecným indexem podání barev. Všeobecný index podání barev byl naměřen kolem hodnoty  $R_a = 80$ , výjimkou byl jeden

typ 1,8 W s náhradní teplotou chromatičnosti  $CCT = 3064 K$ , kde byla hodnota rovna  $R_a = 66,43$ .

### **Rtuťová výbojka**

Spektrum rtuťové výbojky je velice podobné úsporné zářivce, vyzařovalo v oblastech ultrafialového záření (modrá 405 nm a 435 nm) a části viditelného spektra (zelená 545 nm, žlutá 580 nm). Tyto oblasti jsou užší než u ostatních zdrojů. Bod náhradní teploty chromatičnosti je umístěn v oblasti podobné dennímu světlu. Index podání barev byl podle očekávání velmi nízký, srovnatelný s vysokotlakou sodíkovou výbojkou ( $R_a = 19,2$ ). Podobně jako u všech výbojkových světelných zdrojů byla doba „zahoření“ (ustálení světelně-technických parametrů) přibližně *dvacet minut*.

### 2.3 MĚŘENÍ S POMOCÍ GONIOFOTOMETRU

Toto měření bylo uskutečněno v Praze za spolupráce Českého vysokého učení technického. Výsledkem měření by měly být čáry svítivosti vynesené v polárních souřadnicích, které mají objasnit rozložení světelného toku v prostoru. Jelikož jsme nepoužili svítidlo, měřili jsme pouze podélnou rovinu. Co se týče konstrukčního uspořádání tohoto goniofotometru, zdroj (svítidlo) byl umístěn po celou dobu měření v jednom místě (pevný zdroj). Kolem tohoto zdroje se otáčelo rameno o délce 2 m s fotometrem. Co se týče světelných zdrojů, i zde jsme čekali jistou dobu na ustálení světelných parametrů („zahoření“ zdroje). Program „Gofosoft4“ zaznamenával jednotlivé hodnoty osvětlenosti  $E$  do textového souboru po kroku  $5^\circ$ . Tento výsledek nezahrnuje několik faktorů, např. o jaký světelný zdroj se jednalo a jaký byl rozsah měřeného přístroje. Výsledná osvětlenost musí zahrnovat veškeré vlivy působící na měření. Z tohoto důvodu jsem musel provést přepočítání, dle vzorce (17).

$$E_i = K_{dj} \cdot k_{2856i} \cdot E_{mer} , \quad (lx) \quad (17)$$

kde

$E_i$  – skutečná hodnota osvětlenosti;

$E_{mer}$  – naměřená hodnota osvětlenosti;

$k_{2856i}$  – korekční koeficient pro daný rozsah osvětlenosti;

$K_{dj}$  – korekční faktor jednotlivého typu zdroje.

Ing. Bayer mi předložil ověřovací list k tomuto zařízení, ze kterého jsem byl schopen určit neznámé koeficienty  $k_{2856i}$  a  $K_{dj}$ .

Tabulka 6 - Průměrný koeficient  $k_{2856i}$  pro různé rozsahy [27]

| Rozsah<br>20 (lx)                        | Rozsah<br>200 (lx) | Rozsah<br>2 000 (lx) | Rozsah<br>20 000 (lx) | Rozsah<br>100 000 (lx) |
|--|--------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| Průměrný korekční koeficient $k_{2856i}$ |                    |                      |                       |                        |
| 0,991                                    | 1,012              | 1,021                | 1,021                 | 1,018                  |

Tabulka 7 - Koeficient  $K_{dj}$  pro různé typy zdrojů [27]

| <b>Světelný zdroj</b>            | <b><math>K_{dj}</math></b> |
|----------------------------------|----------------------------|
| Světlo bílé zářivky              | 1,052                      |
| Světlo RVL výbojky s luminoforem | 0,985                      |
| Světlo sodíkové výbojky          | 0,980                      |
| Světlo denní                     | 0,995                      |

Po stanovení těchto koeficientů jsem dopočítal osvětlenost  $E$ , dle vzorce (18). Nyní jsem byl schopen dopočítat svítivost  $I$  pro kolmé osvětlení dané plochy ve vzdálenosti  $r$  od zdroje, dle vzorce (19).

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (lx) \quad (18)$$

Po úpravě

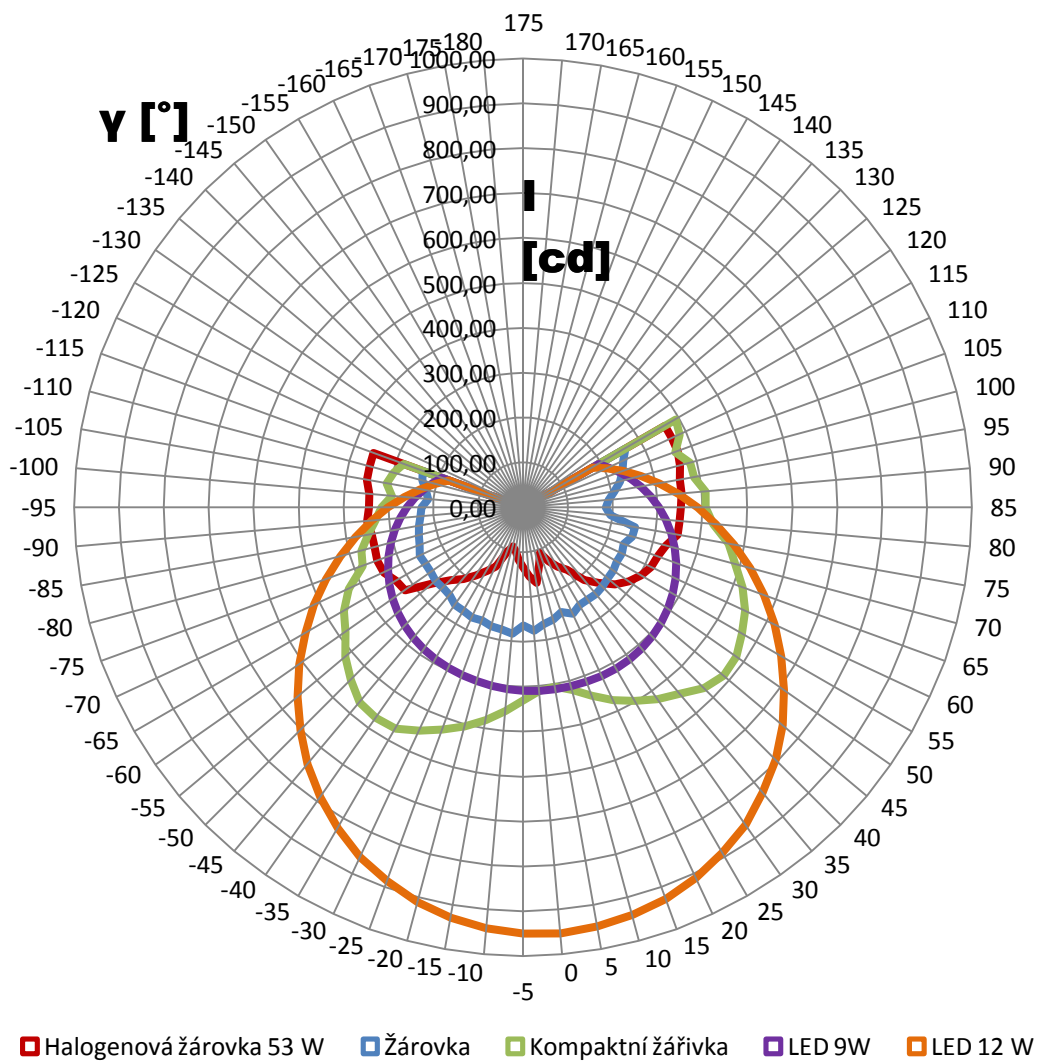
$$I = E \cdot r^2 \quad (cd) \quad (19)$$

Příklad výpočtu pro halogenovou žárovku 53 W (pro  $\gamma = 115^\circ$ )

$$E_i = K_{dj} \cdot k_{2856i} \cdot E_{mer} = 0,995 \cdot 1,012 \cdot 90,44 = 91,07 \quad (lx)$$

$$I = E_i \cdot r^2 = 91,07 \cdot 2^2 = 364,27 \quad (cd)$$

## 2.3.1 POLÁRNÍ GRAF



Obrázek 57 - Polární graf pro veškeré zdroje



### 2.3.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

#### Halogenová žárovka

Polární graf pro tento zdroj vyšel značně odlišně od ostatních měřených zdrojů, a to zejména rozložením světelného toku do bočních stran. Vyzařování svítivosti ve směru normály dosahovalo hodnot přibližně  $170\text{ cd}$ , což není ani polovina, co jsem naměřil v bočních stranách (více jak  $350\text{ cd}$ ). Za toto rozložení může tvar samotného zdroje uvnitř baňky. Podle tohoto rozložení si dovoluji tvrdit, že tento zdroj je nevhodný do místností nebo výrobních prostorů, kde jsou vyžadovány perfektní světelné podmínky. Slouží spíše pro dekorativní účely (lampičky nebo do svítidel na bočních zdech).



Obrázek 58 - Konstrukce halogenové žárovky uvnitř baňky



Obrázek 59 - Příklad použití - obývací pokoj [28]

#### Obyčejná žárovka 75 W

Svítivost tohoto zdroje je ve většině případů rovna  $I = 250\text{ cd}$ , což v porovnání s ostatními světelnými zdroji bylo nejméně. Nebýt poklesu svítivosti mezi úhly  $75^\circ$  až  $110^\circ$ , toto rozložení svítivosti bych mohl označit jako rovnoměrné. Díky rozložení svítivosti lze tento zdroj použít třeba v lustru.

#### Kompaktní zářivka 20 W

Svítivost pro kompaktní zářivku má tzv. srdcový tvar. Nedokážu vysvětlit, proč křivka svítivosti takto vyšla. Normálně takovýto průběh lze dostat např. z kancelářského svítidla, v němž jsou umístěny dvě tubové zářivky. Svítivost vyzařující pod světelný zdroj dosahuje hodnot až  $I = 600\text{ cd}$ , po bočních stranách je svítivost přibližně poloviční. Z tohoto důvodu bych umístil světelný zdroj do stropního svítidla (lustr), aby byl zdroj nejlépe

využit. Sice přímo pod svítidlem je pokles svítivosti o 200 *cd*, avšak umístí-li se zdroj do dostatečné výšky, tak by pozorovatel neměl zaznamenat velký rozdíl.

### **LED zdroje**

Polární grafy pro tyto dva zdroje jsou téměř shodné, jen se liší svítivostí vyzařovanou do prostoru. Svítivost je vyzařována převážně do spodní oblasti, kde zaznamenaná hodnota svítivosti byla přibližně rovna 200 *cd* (pro 9 *W* LED) a 950 *cd* (pro 12 *W* LED). Tyto zdroje jsou vhodné např. pro stropní svítidla.

## 2.4 MĚŘENÍ NA KULOVÉM INTEGRÁTORU

Jak název napovídá, jedná se o integrátor kulovitého tvaru. I toto měření se odehrávalo v Praze na univerzitě Českého vysokého učení technického (ČVUT). Na tomto zařízení jsem naměřil údaje, s pomocí kterých jsem mohl dopočítat světelný tok  $\Phi$  a měrný výkon  $\eta$ .

### 2.4.1 POSTUP MĚŘENÍ

Jelikož se jedná o poněkud náročnější postup měření, rozhodl jsem se jej sepsat do několika bodů.

- Nejprve jsem do kulového integrátoru vložil normál světelného toku. Spolu s Ing. Bayerem jsme se pokusili vybrat normál s podobným světelným tokem jako měřicí světelné zdroje.
- Při rozsvíceném normálu a zhasnutém korekčním zdroji jsem naměřil údaj  $E_N$ .
- Při zhasnutém normálu a rozsvíceném korekčním zdroji jsem naměřil údaj  $E_{kN}$ .
- Následovala výměna normálu za měřený zdroj, který prozatím zůstal zhasnutý, avšak korekční zdroj byl rozsvícen. Byl jsem schopen odečíst údaj  $E_{kx}$ .
- Zbývalo už jen rozsvítit měřený zdroj a zhasnout korekční zdroj. V tomto případě jsem byl schopen odečíst údaj  $E_x$ .

Z krabičky s normálem jsem odečetl hodnotu světelného toku normálu  $\Phi_N$ , kterou jsem potřeboval k výpočtu světelného toku měřeného zdroje  $\Phi_x$ . Výpočet jsem provedl ze vztahu (20).

$$\Phi_x = \Phi_N \cdot \frac{E_x}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kx}} \quad (lm) \quad (20)$$

Před začátkem každého měření jsem nechal světelné zdroje zahořet jistou dobu. Pro LED zdroje, obyčejné a halogenové žárovky jsem stanovil dobu zahoření *pět minut* a kompaktní zářivku *dvacet minut*. Tyto doby jsem stanovil z doporučené literatury [1].

### 2.4.2 NAMĚŘENÉ A DALŠÍ DŮLEŽITÉ HODNOTY

údaj  $E_N = 160,8 \mu W$  - rozsvícen normál a zhasnutý korekční zdroj

údaj  $E_{kN} = 160,5 \mu W$  - zhasnutý normál a rozsvícen korekční zdroj

Světelný tok normálu  $\Phi_N = 1\,838 \text{ lm}$

Výkon normálu  $P_N = 188 \text{ W}$

Měrný výkon normálu  $\eta_{en} = 9,78 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$

Tabulka 8 - Naměřené a vypočtené hodnoty

|                        | U (V)  | I (A)  | P <sub>x</sub> (W) | E <sub>x</sub> (μW) | E <sub>kx</sub> (μW) | Φ <sub>x</sub> (lm) | η <sub>x</sub> (lm·W <sup>-1</sup> ) |
|------------------------|--------|--------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------------|
| LED 12 W               | 230,10 | 0,0926 | 21,31              | 98,80               | 162,10               | 1118,17             | 52,48                                |
| LED 9 W                | 230,10 | 0,0740 | 17,03              | 67,60               | 162,80               | 761,78              | 44,74                                |
| žárovka 75 W           | 230,60 | 0,3182 | 73,38              | 56,50               | 163,60               | 633,58              | 8,63                                 |
| halogen. žárovka 53W   | 230,40 | 0,2454 | 56,54              | 72,30               | 163,00               | 813,74              | 14,39                                |
| Kompaktní zářivka 20 W | 230,10 | 0,1248 | 28,72              | 88,00               | 165,20               | 977,25              | 34,03                                |

#### Příklady výpočtů

##### Měrný výkon normálu

$$\eta_{en} = \frac{\Phi_N}{P_N} = \frac{1\,838}{188} = 9,777 \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$$

##### Světelný tok měřeného zdroje LED 12 W

$$\Phi_x = \Phi_N \cdot \frac{E_x}{E_N} \cdot \frac{E_{kN}}{E_{kx}} = 1\,838 \cdot \frac{98,8}{160,8} \cdot \frac{160,5}{162,1} = 1\,118,17 \quad (\text{lm})$$

##### Měrný výkon normálu

$$\eta_{en} = \frac{\Phi_x}{P_x} = \frac{1\,118,17}{188} = 5,948 \quad (\text{lm} \cdot \text{W}^{-1})$$

### 2.4.3 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Měření příkonu jsem požadoval co nejpřesnější, a proto jsme u klešťové sondy k měření proudu provedli pět závitů ke zpřesnění výsledků. Tento krok jsem musel zohlednit přepočítáním měřené hodnoty proudů. Naměřené hodnoty příkonů LED se značně liší od příkonů uváděných výrobcem. Tato skutečnost je ovlivněna účíníkem, který u těchto zdrojů je menší než jedna (u žárovek je roven jedné).

Světelný tok v případě LED zdrojů jsem zaznamenal vyšší, než udává výrobce. Naopak pokles oproti hodnotám od výrobce jsem zaznamenal u žárovky (75 W) a zářivky (20 W), kde světelný tok je nižší téměř o 200 lm. Hodnoty světelného toku u zbylých světelných zdrojů byly podobné.

Porovnání hodnot měrných výkonů byly v několika směrech odlišné s hodnotami uváděnými výrobcem. Opět mě zklamaly hodnoty LED zdrojů, kde naměřený měrný výkon byl na značně jiné úrovni, než slibuje výrobce. Přesto se z celého měření jeví jako nejlepší možné řešení. Nejlépe po LED zdrojích dopadla kompaktní žárovka. Dle očekávání nejhůře dopadly žárovky, jejichž měrný výkon se pohyboval kolem  $10 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ , což je v dnešní době nevhodné.

Výrobce během dne vyprodukuje nepředstavitelné množství zdrojů, bohužel nelze u každého zajistit udávané parametry. Vlivů na měřené parametry může být několik od samotného transportu, špatné manipulace nebo až po chybu ve výrobě. Hodnoty udávané výrobcem mohou být občas zavádějící.

### 3 NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY

V této práci jsem se zaměřil na ekonomické zhodnocení dvou osvětlovacích soustav. Nechtěl jsem provádět návrh jen imaginárně, proto jsem oslovil firmu TE Connectivity. Jakmile mi v tomto směru firma vyhověla, zvolil jsem vhodné místo pro návrh. Zvolený prostor slouží k montážním pracím. Návrh osvětlení by kromě samotných úspor mohl přinést i mnoho dalších výhod, mezi které lze započítat rovnoměrnost osvětlení na pracovištích, čímž lze dosáhnout nižší únavy, vedoucí posléze k vyšším výkonům zaměstnanců. Současná osvětlovací soustava je realizována zářivkovými trubicemi. Nejprve vytvořím návrh pro současnou soustavu osvětlení, abych ji mohl porovnávat s dalšími návrhy osvětlení (jiné zářivky, LED zdroje). Na základě recenzí a doporučení odborníků v této profesi jsem zvolil program zvaný Dialux, který kromě samotného návrhu umožňuje zobrazení prostoru v 3D.

#### 3.1 HRANIČNÍ HODNOTY PARAMETRŮ

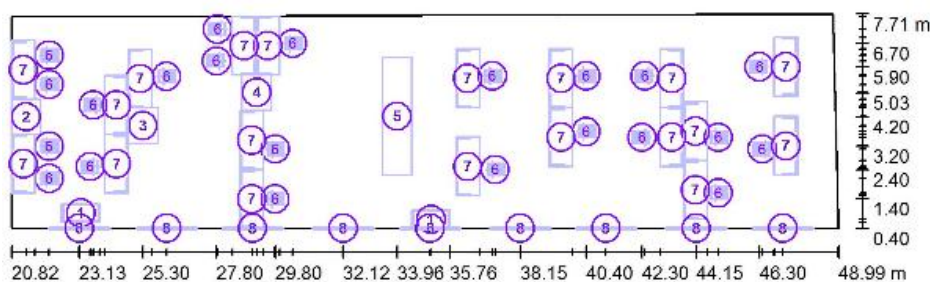
Před samotným návrhem bylo nezbytné prostudování normy ČSN EN 12464-1, ze které jsem použil tabulku uvedenou níže (Tabulka 9). Vzhledem k jednoduchým montážním pracím, které se v tomto prostoru provádějí, jsem tento prostor přiřadil ke středně náročným pracím. Tím pro mě byly stanoveny hraniční hodnoty jednotlivých parametrů ( $E_m$ ,  $U_0$ ,  $R_a$ ,  $UGR$ ) budoucí osvětlovací soustavy.

Tabulka 9 - Parametry pro elektrotechnické průmyslové činnosti [26]

| Druh prostoru, úkolu nebo činnosti                              | $E_m$<br>(lx) | UGR<br>(-) | $U_0$<br>(-) | $R_a$<br>(-) |
|---|---------------|------------|--------------|--------------|
| Montážní práce  |               |            |              |              |
| - hrubé, např. velké transformátory                             | 300           | 25         | 0,6          | 80           |
| - <b>střední, např. vypínače</b>                                | <b>500</b>    | <b>22</b>  | <b>0,6</b>   | <b>80</b>    |
| - jemné, např. telefony, rádia, počítače                        | 750           | 19         | 0,7          | 80           |
| - velmi jemné, např. měřicí přístroje, desky s tištěnými obvody | 1 000         | 16         | 0,7          | 80           |

### 3.2 POSTUP PŘI NÁVRHU OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY

Samotný návrh osvětlovací soustavy jsem realizoval s pomocí souboru dwg (plán výrobní haly v Autocadu), který poskytla firma TE connectivity. Tento formát lze snadno převést i do Dialuxu, výsledek následně slouží sice jen jako pozadí, ale co se týče práce na novém návrhu, tak ulehčí samotné ohraničení prostoru (nová verze umožňuje přichycení čar k tomuto pozadí) a poskytuje rozmístění pracovních pozic. Nezbytnou součástí tohoto prostředí jsou objekty (stoly, židle aj.), jež mají na osvětlovací soustavu nezanedbatelný vliv. Z tohoto důvodu jsem v prvním návrhu umístil i podobné objekty (stoly, židle a další vybavení), dle reálné předlohy. Rozmístění objektů v prostoru je patrné na obrázku 60. Výsledné hodnoty jednotlivých parametrů byly v tomto případě nepříznivé. Po konzultaci s odborníkem jsem tyto objekty z převážné části vymazal, protože při výpočtech se zohledňují i nepotřebné plochy, jež jsou hůře osvětlené (např. plocha pod stolem). V návrzích jsem vycházel tedy z prázdného prostoru s pracovními a okolními plochami, na kterých jsem zajistil hladiny jednotlivých parametrů dané normou ČSN EN 12464-1.



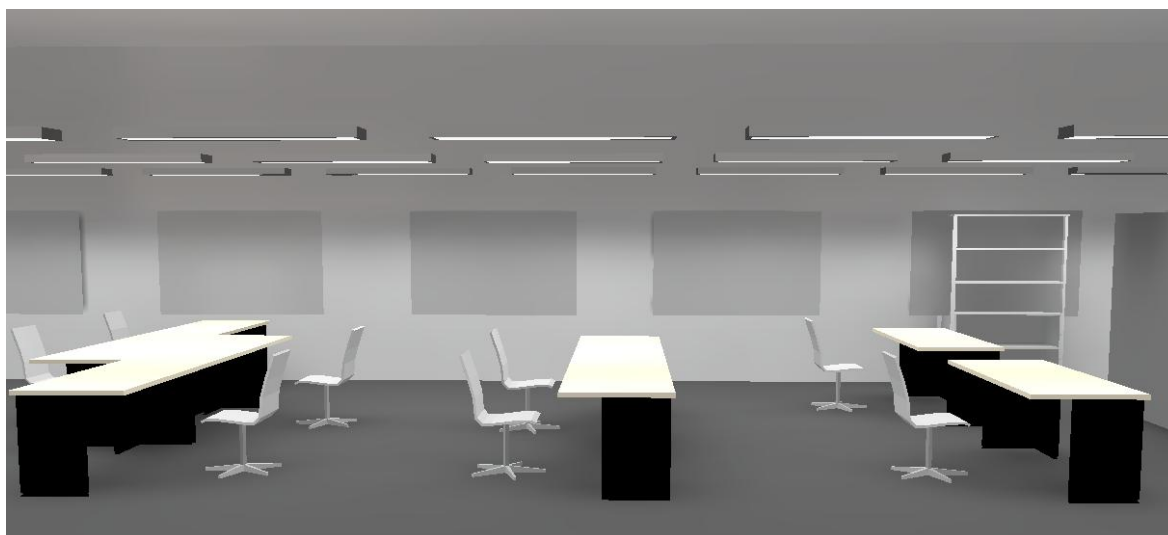
| Č. | ks | Označení                  |
|----|----|---------------------------|
| 1  | 2  | 130x200 Kancelářský regál |
| 2  | 1  | Modul CIRRIS              |
| 3  | 1  | Modul CIRRIS 2            |
| 4  | 1  | Modul sváření             |
| 5  | 1  | Modul sváření víček       |
| 6  | 22 | Otáčecí židle2            |
| 7  | 19 | Stůl P1                   |
| 8  | 9  | Okno                      |

Obrázek 60 - Rozmístění objektů v návrhu

Velkou výhodou tohoto programu je možnost zobrazení návrhu v 3D, což dává projektantovi lepší představu o svítidlech a rozložení křivek svítivosti do prostoru (viz obrázek 61 a 62).



Obrázek 61 - Zobrazení ručního pracoviště v 3D 1. část



Obrázek 62 - Zobrazení ručního pracoviště v 3D 2. část

#### **Svítlidla**

V současné době jsou použita svítidla s mřížkou, do kterého se umísťují dvě zářivkové trubice (58 W/840 o světelném toku 5 200 lm). Celkově toto svítidlo vyzařuje světelný tok o hodnotě 10 400 lm. Jelikož ve firmě nebyl záznam o použitém svítidle, zvolil jsem velmi podobné svítidlo Falcon se shodnými parametry, od českého výrobce svítidel Vyrtých. Řada výrobců svítidel ulehčuje práci projektantům, protože kromě katalogů nabízí speciální soubory do programů podobných jako je Dialux. V těchto souborech je záznam ohledně křivek svítivosti, výkonů a světelného toku a zbylých parametrů. Abych rozmístil svítidla dle reálné soustavy, vkládal jsem do návrhu svítidla jednotlivě.

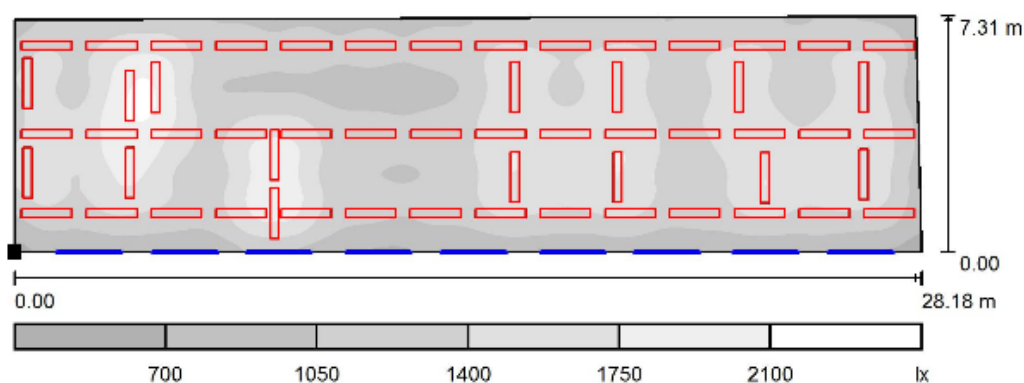


Nově navrhovaná soustava by měla být realizovaná s pomocí LED zdrojů. Jako nejvhodnější osvětlení bych zvolil tzv. LED trubice. Výměna těchto světelných zdrojů se neobejde bez pořízení nových svítidel. Pro soustavu LED jsem zvolil svítidla TELW od výrobce Modus.

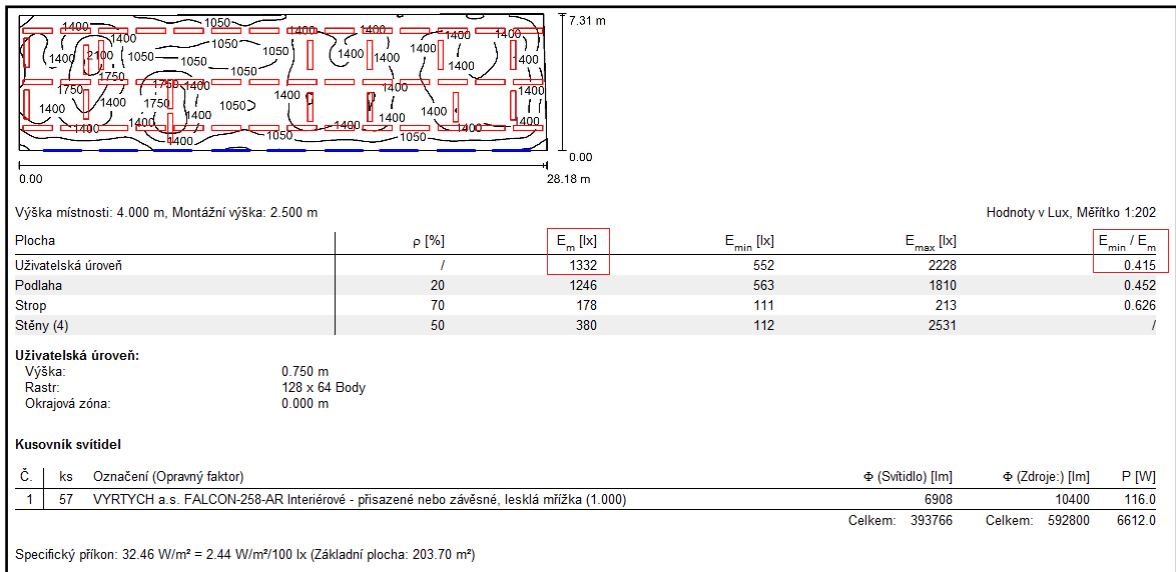
Po provedení prvního návrhu (dle reálné předlohy) jsem provedl pro porovnání ještě další dva návrhy (nové zářivky, LED zdroje), jež by měly vést nejen k výrazným úsporám spojeným s náklady na spotřebu elektrické energie, ale také na zrakovou pohodu pozorovatelů. Tyto návrhy jsem zhotovil, aby odpovídaly příslušné normě (ČSN EN 12464-1).

### 3.3 NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - ZÁŘIVKY

Nejdříve jsem provedl návrh podle současně rozmístěných svítidel. Pro první návrh jsem použil svítidlo Falcon ( $2 \times 58 \text{ W} / 840$  o světelném toku  $2 \times 5 \text{ 200 lm}$ ) od výrobce Vyrtych. Výsledné hodnoty rovnoměrnosti osvětlení pro uživatelskou úroveň byly nepříznivé, dosahovaly totiž hodnot nižších než 0,6. Vzhledem k normě by měla být průměrná osvětlenost  $E_m$  pro tento prostor rovna nejméně hodnotě  $500 \text{ lx}$ . Výsledná hodnota průměrné osvětlenosti  $E_m$  byla sice  $1 \text{ 332 lx}$ , ale pro tyto pracovní plochy je tato hodnota příliš vysoká. Nehledě na samotnou nepostradatelnou spotřebu elektrické energie, toto osvětlení negativně působí na pracovní výkony zaměstnanců. Na pracovních oblastech je podle obrázku 63 osvětlenost přibližně  $1 \text{ 000 lx}$ , což je pro klasické montážní práce zbytečné (vhodné do  $650 \text{ lx}$ ). Hodnotu této osvětlenosti bych přiřadil k montáži velmi jemných součástí či pájení. Projektant navrhující osvětlující soustavu má podobný cíl jako technolog výroby. Pokud technolog stanoví nevhodně dobu, za kterou má být vykonána činnost, tak s postupem času výkon zaměstnance klesá a jeho celkový výkon může být nedostatečný. Podobný úkol má před sebou i projektant, který musí navrhnout pro dané prostory vhodné hodnoty osvětlení. Pokud projektant zvolí pro konkrétní úsek příliš vysokou hodnotu osvětlení, podnítl zaměstnance k lepším výkonům, ale po několika hodinách práce mohou zaměstnanci pocítit únavu. V některých případech je vyšší hodnota osvětlenosti potřebná, zde jsou však nastaveny častější přestávky (třeba po dvou hodinách práce). Výsledná práce projektanta a technologa by měla zajistit zaměstnancům přijatelné podmínky pro práci.

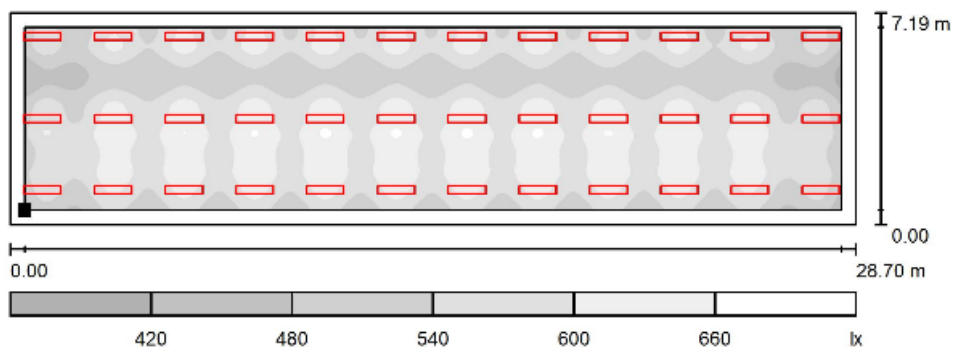


Obrázek 63 - Rozložení osvětlenosti v prostoru u prvního návrhu zářivkové osvětlovací soustavy

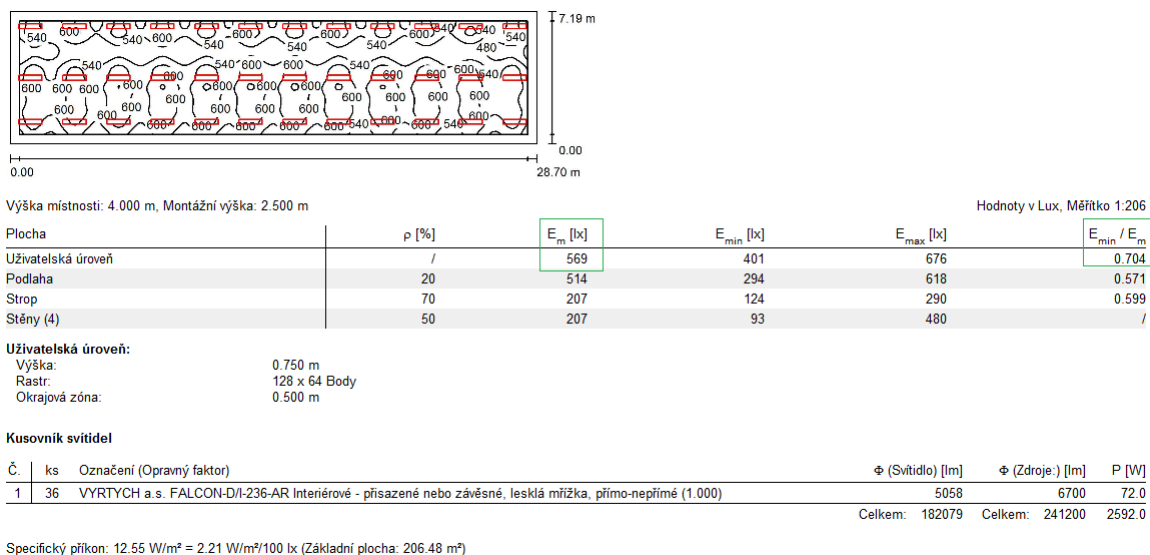


Obrázek 64 - Výsledek prvního návrhu zářivkové osvětlovací soustavy

S prvním návrhem jsem nebyl spokojen, a proto jsem vytvořil nový návrh opět se zářivkovými trubnicemi. Zvolil jsem méně intenzivní svítidlo Falcon ( $2 \times 36 \text{ W} / 840$  o světelném toku  $2 \times 3 \text{ 350 lm}$ ). Výsledné hodnoty rovnoměrnosti osvětlení, průměrného osvětlení a dalších parametrů byly v toleranci, udávané normou pro tento typ pracovišť (viz obrázek 66). Provedl jsem úsporu 21 svítidel oproti původnímu stavu, což přinese značné úspory. Rovnoměrná osvětlenost prostoru  $U_0$  a přijatelná hodnota průměrné osvětlenosti  $E_m$  zajistí zaměstnancům přijatelnější zrakové podmínky (zrak se nemusí stále adaptovat na odlišné světelné podmínky) a může vést k lepším pracovním výkonům. Průměrná osvětlenost v tomto návrhu (přibližně  $E_m = 600 \text{ lx}$ ) je pro srovnání poloviční oproti předchozímu návrhu.



Obrázek 65- Rozložení osvětlenosti v prostoru u druhého návrhu zářivkové osvětlovací soustavy

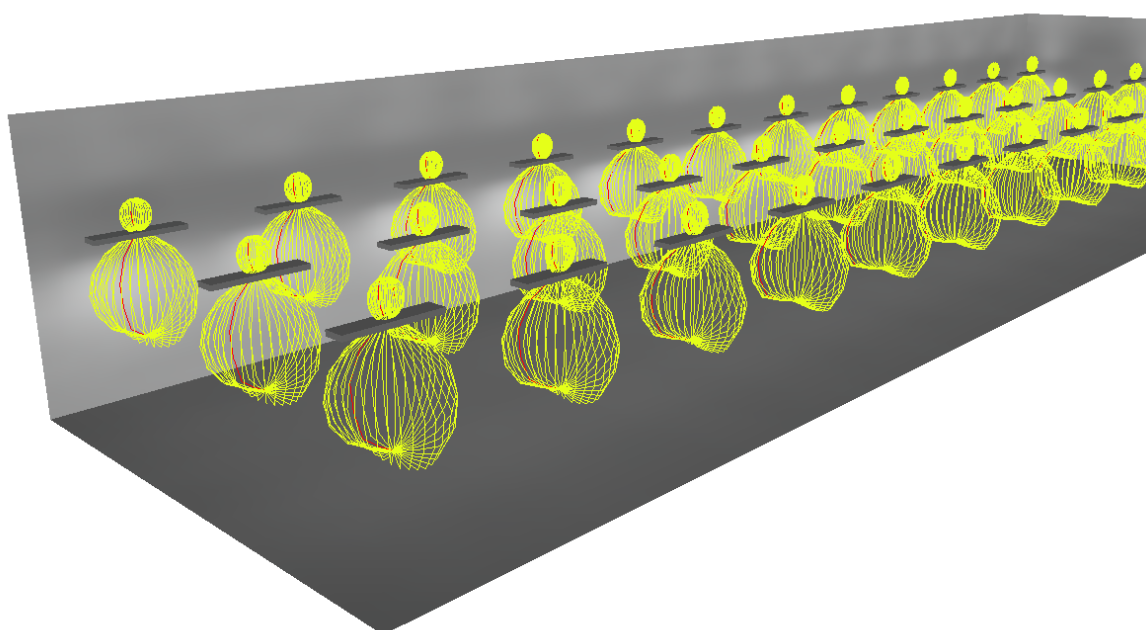


Obrázek 66 - Výsledek druhého návrhu zářivkové osvětlovací soustavy

Samotný návrh osvětlovací soustavy musí zahrnovat také způsob údržby svítidel. Každá osvětlovací soustava se postupem času znehodnocuje. Na znehodnocení se podílí zejména stárnutí spolu se znečištěním svítidel, včetně světelných zdrojů. Příznaky znehodnocování se projevují horším světelným tokem, problikáváním (u zářivek) apod. Pokud má projektant zajistit minimální hladinu osvětlenosti po určitou dobu, musí vhodně stanovit stupeň krytí (*IP XX*), jednotlivé intervaly týkající se právě údržby svítidel a zdrojů. Stupeň krytí *IP XX* stanoví úroveň krytí svítidla před vnikem pevných částí (první číslo) a vody (druhé číslo). Čím vyšší je hodnota tohoto stupně, tím by měla být zajištěna uvnitř svítidla lepší ochrana elektroniky (maximální hodnota *IP 68*). Dříve se jednalo o poněkud náročné a zdlouhavé výpočty, jejichž výsledkem měl být tzv. udržovací činitel, který má být roven nejméně hodnotě 0,7. V dnešní době lze výslednou hodnotu tohoto činitele získat okamžitě, neboť výpočet je součástí většiny programů pro návrh osvětlení, včetně Dialuxu. Činitel údržby zahrnuje stárnutí a funkční spolehlivost zdrojů, dále udržovací činitel svítidel a jejich povrchů. Tento činitel je ovlivněn také druhem prostoru a provozní dobou svítidel, v našem případě se jedná o prostor čistý při nepřetržitém provozu. Hodnota činitele údržby pro tento projekt byla příznivých 0,72 (viz obrázek 67).

| Výrobní hala / Plán údržby  |                                 |
|---|---------------------------------|
| <p>Pravidelná údržba je pro efektivní osvětlovací zařízení nezbytná, jen tak lze stářím podmíněný pokles použitelného světelného množství zařízení udržet v mezích. Minimální hodnoty intenzity osvětlení stanovené v normě EN 12464 jsou hodnoty údržby, tzn. zakládají se na nové hodnotě (při instalaci) a na stanovené údržbě. Totéž platí samozřejmě také pro hodnoty vypočítané v DIALux, proto mohou být dosaženy pouze tehdy, když tento předložený plán údržby bude důkladně realizován.</p> |                                 |
| <p><b>Všeobecné prostorové informace</b></p>  |                                 |
| Okolní podmínky místnosti:  | Čistý                           |
| Interval údržby místnosti:  | Ročně                           |
| <p><b>Jednotlivé přiřazení / VYRÝCH a.s. FALCON-D/I-236-AR Interiérové - přisazené nebo závěsné, lesklá mřížka, přímo-nepřímé</b></p>   |                                 |
| Vliv reflexe na plochy místnosti:   | střední ( $1.6 < k \leq 3.75$ ) |
| Typ osvětlení:  | Přímé/nepřímé                   |
| Interval údržby svítidel:   | Po půl roce                     |
| Typ svítidla:   | Uzavřené IP2X (podle CIE)       |
| Provozní doba za rok (v 1000 hodin):  | 8.76                            |
| Interval výměny žárovek:  | Ročně                           |
| Typ sv. zdroje:   | Trisvazková zářivka (podle CIE) |
| Neodkladná výměna nefunkčních sv. zdrojů:   | Ano                             |
| Činitel znečištění ploch místnosti:   | 0.92                            |
| Činitel znečištění svítidel:  | 0.92                            |
| Činitel stárnutí sv. zdrojů:  | 0.86                            |
| Činitel poklesu funkční spolehlivosti:  | 1.00                            |
| <b>Činitel údržby:</b>  | <b>0.72</b>                     |

Obrázek 67 - Plán údržby zářivkových svítidel Falcon

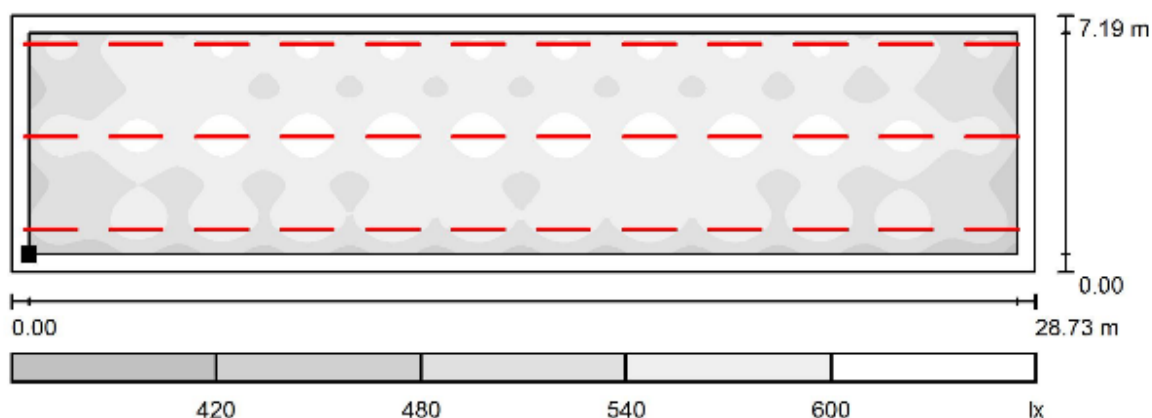


Obrázek 68 - Křivky svítivosti svítidel se zářivkami

Hodnoty oslnění (*UGR*) byly ve všech případech příznivé, resp. u žádného pracoviště nebyla přesáhnuta hodnota 22. Detailnější informace o tomto návrhu naleznete v příloze a přiloženém DVD, zde je uložen i výstup z programu Dialux (ve formátu PDF).

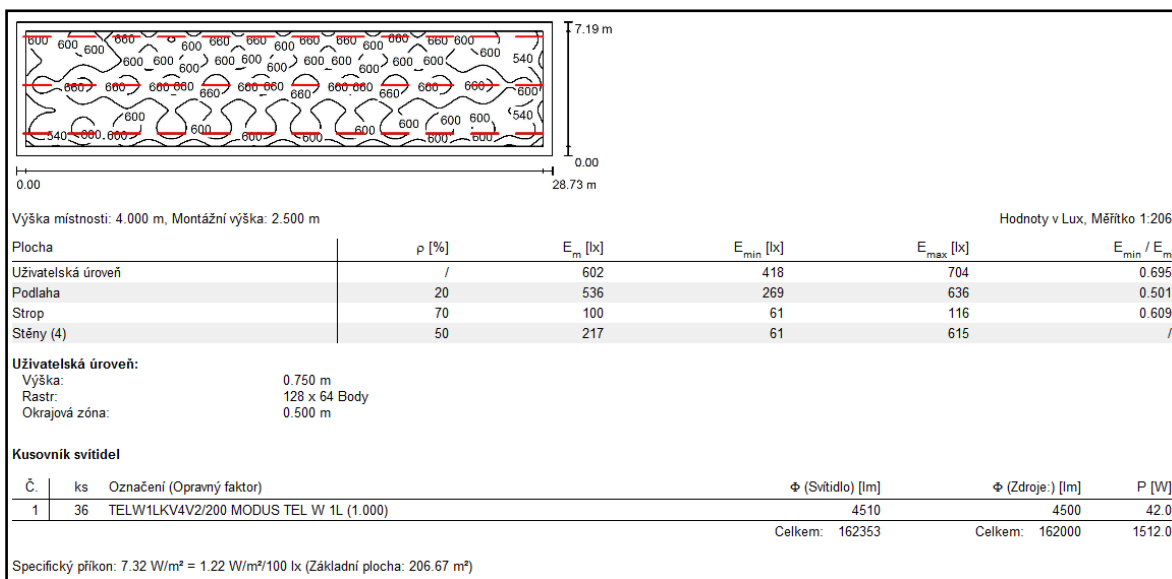
### 3.4 NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - LED

Výběr mezi LED svítidly je v dnešní době značný, avšak zvolit vhodné svítidlo splňující předepsané parametry, je občas velice náročné. Ze všech použitých svítidel LED se osvědčilo nejvhodněji svítidlo s označením TELW od dalšího českého výrobce Modus. Co se týče rozložení samotných svítidel, nejvíce se osvědčilo rozmístění jako v předešlém případě (tři řady po dvanácti svítidlech). Výsledné hodnoty parametrů byly výtečné, kromě oslnění *UGR*. Rovnoměrnost osvětlení byla v tomto případě vyšší než hodnota 0,6. Průměrná hodnota osvětlenosti pro uživatelskou úroveň byla 602 lx. Činitel údržby pro tuto soustavu svítidel byl stanoven nad hodnotou 0,7. Veškeré tyto parametry vzhledem k spotřebě jsou ideální, s výjimkou oslnění *UGR*, to dosahovalo hodnot v rozmezí 25 až 29. Hodnoty oslnění *UGR* byly ve všech případech nepříznivé a to i v případě použití odlišných svítidel LED. Jednou z příčin je výška, ve které jsou svítidla umístěna. Kdyby tato svítidla bylo možné umístit výše, mohli bychom dosáhnout hraniční hodnoty *UGR* dané normou, bohužel to není z konstrukčního hlediska možné.



Obrázek 69 - Rozložení osvětlenosti v prostoru pro návrh LED soustavy

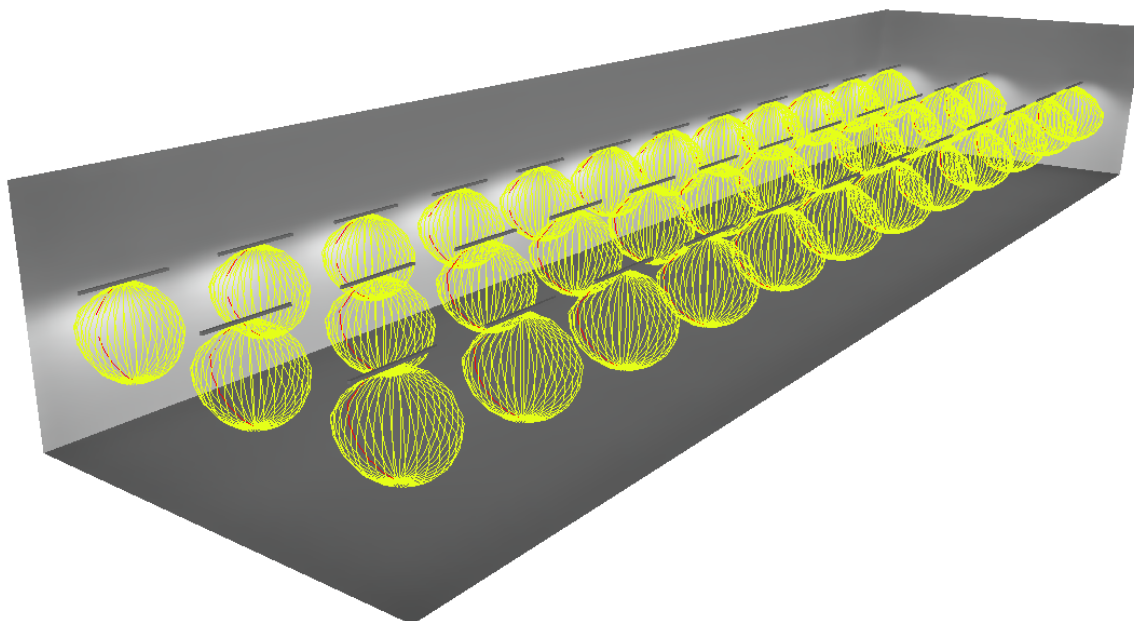
### 3 NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - NÁVRH OSVĚTLOVACÍ SOUSTAVY - LED



Obrázek 70 - Výsledek návrhu LED osvětlovací soustavy

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| <b>Všeobecné prostorové informace</b>                        |                                 |
| Okolní podmínky místnosti:                                   | Čistý                           |
| Interval údržby místnosti:                                   | každé 3.0 roky.                 |
| <b>Jednotlivé přiřazení / TELW1LKV4V2/200 MODUS TEL W 1L</b> |                                 |
| Vliv reflexe na plochy místnosti:                            | střední ( $1.6 < k \leq 3.75$ ) |
| Typ osvětlení:   | Přímé                           |
| Interval údržby svítidel:                                    | Ročně                           |
| Typ svítidla:  | Uzavřené IP2X (podle CIE)       |
| Provozní doba za rok (v 1000 hodin):                         | 8.76                            |
| Interval výměny žárovek:                                     | Ročně                           |
| Typ sv. zdroje:  | Třívazková zářivka (podle CIE)  |
| Neodkladná výměna nefunkčních sv. zdrojů:                    | Ano                             |
| Činitel znečištění ploch místnosti:                          | 0.96                            |
| Činitel znečištění svítidel:                                 | 0.88                            |
| Činitel stárnutí sv. zdrojů:                                 | 0.86                            |
| Činitel poklesu funkční spolehlivosti:                       | 1.00                            |
| <b>Činitel údržby:</b>                                       | <b>0.72</b>                     |

Obrázek 71- Plán údržby LED svítidel TELW



Obrázek 72 - Křivky svítivosti svítidel s LED zdroji

### 3.5 SEZNAM POUŽITÝCH SVÍTIDEL

#### Zářivková svítidla Falcon

Označení:

57x FALCON-Z-258-AR-K 2x58 W – realizovaná soustava

36x FALCON- FALCON- D/I-236-AR 2x 36 W – nově navrhnutá soustava

V obou případech s jedná o svítidlo s mřížkou pro dvě zářivkové trubice, se stupněm krytí *IP 2X*. Toto svítidlo nabízí firma Vyrtých a je určeno pro přímé osvětlení nejen v komerčních prostorách, ale také ve školách a kancelářích. Toto svítidlo je umístěno přímo na kabelovém roštu ve výšce 2,5 m.

#### LED svítidlo TELW

Označení: 36x TELW1LKV4V2/200 1x 42 W

Toto svítidlo je vhodné do průmyslových prostor. LED čipy jsou překryty opálovým krytem zajišťujícím vhodné rozložení světelného toku. K dispozici u tohoto svítidla byly i kryty, které umožňovaly svítidlu vyzařovat co nejvíce do prostoru. Stupeň krytí byl zvolen opět *IP 2X*.



Obrázek 73 - Zářivkové svítidlo Falcon [20]



Obrázek 74 - Svítidlo LED TELW [29]



## 3.6 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV

Požizovací cena světelné soustavy bývá ve většině případů pro uživatele rozhodujícím faktorem, což není vždy vhodné. Kromě spotřeby a pořizovací ceny by měl projektant hledět na zdraví uživatelů pod touto soustavou. Zároveň jsem provedl ekonomické zhodnocení všech projektů, které vyjadřuje celkové finanční náklady za rok. Veškeré výpočty nezahrnují náklady na montáž. Podle zdroje [30] jsem stanovil cenu za 1 *KW.hod* na 4 Kč.

Tabulka 10 - Ekonomické zhodnocení soustav

| Návrh   | 1 - současný stav | 2 - nový návrh | 3 - nový návrh |                   |
|---|-------------------|----------------|----------------|-------------------|
| Typ svítidel  | Zářivky           | Zářivky        | LED            | Parametry soustav |
| Celkový počet svítidel (ks)                                   | 57                | 36             | 36             |                   |
| Celkový počet světelných zdrojů (ks)                          | 114               | 72             | 36             |                   |
| Životnost zdrojů (hod)  | 20 000            | 20 000         | 40 000         |                   |
| Životnost zdrojů (měsíce)                                     | 27                | 27             | 55             |                   |
| Příkon 1x svítidla (W)  | 116               | 72             | 42             |                   |
| Celkový příkon svítidel (kW)                                  | 6,61              | 2,59           | 1,51           |                   |
| Spotřeba za rok (kWh)   | 57 921            | 22 706         | 13 245         |                   |
| Provozní doba zdroje za rok (h/rok)                           | 8760              |                |                |                   |
| Cena 1 ks svítidla (Kč)                                       | 1 292             | 1 208          | 1 600          | Ceny              |
| Cena za všechna svítidla (Kč)                                 | 73 644            | 43 488         | 57 600         |                   |
| Cena 1 ks světelného zdroje (Kč)                              | 80                | 80             | -              |                   |
| Cena za všechny světelné zdroje (Kč)                          | 9 120             | 5 760          | -              |                   |
| Celková investice   | 82 764            | 49 248         | 57 600         |                   |
| Provozní náklady za spotřebu (Kč.rok <sup>-1</sup> )          | 231 684           | 90 824         | 52 980         | Výpočty           |
| Požizovací náklady zdrojů za rok (Kč)                         | 3 995             | 2 523          | -              |                   |
| Celkové provozní náklady za rok (Kč) <i>bez svítidel</i>      | 235 679           | 93 347         | 52 980         |                   |
| Úspora provozních nákladů oproti současnému stavu za rok (Kč) | -                 | 140 861        | 178 704        |                   |
| <b>Návratnost investic (měsíce)</b>                           | -                 | <b>4</b>       | <b>4</b>       |                   |

Výrobce Modus nabízí LED svítidla TELW a jejich LED zdroje jsou ve formě LED pásku pevně spojeny se svítidlem. V případě ukončení životnosti světelných zdrojů je nutné vyměnit i samotné svítidlo. Z tohoto důvodu v tabulce 10 není uvedena cena za LED zdroje.

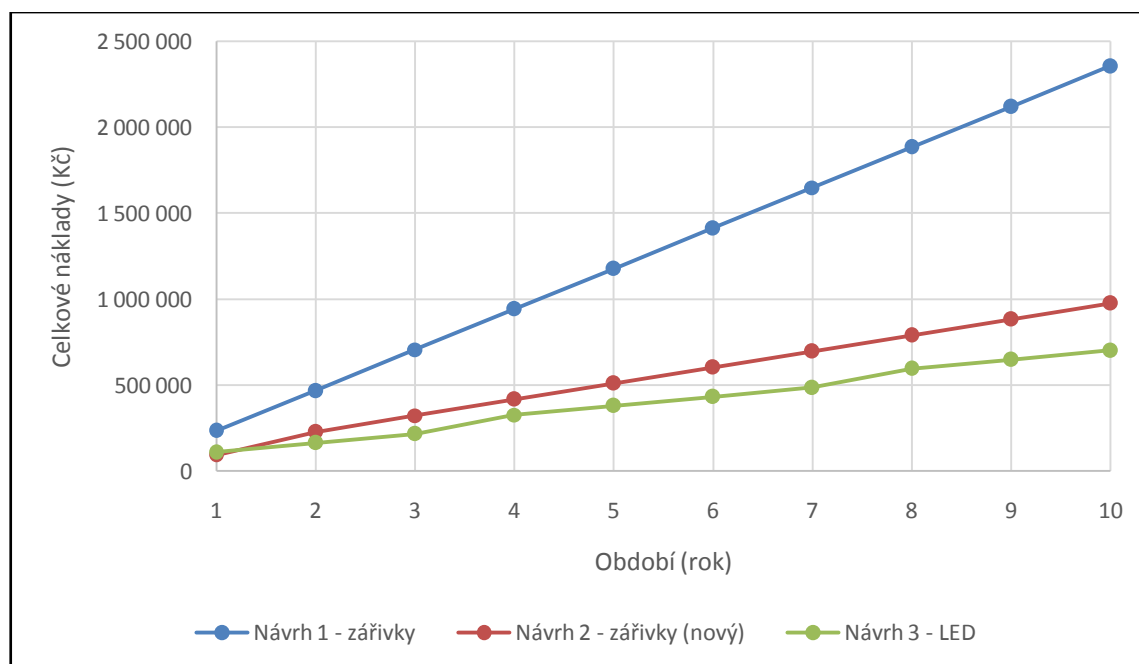
## 3.6.1 GRAFY

S pomocí získaných dat a výpočtů jsem mohl stanovit celkové náklady. Pro názornost jsem vytvořil graf (viz obrázek 75), ve kterém jsou zohledněny celkové náklady za období *deseti let*.

Tabulka 11 - Odhad provozních nákladů na období deseti let

|                                      |           | Provoz osvětlovací soustavy [roky] |         |         |         |           |
|--------------------------------------|-----------|------------------------------------|---------|---------|---------|-----------|
| Návrh                                |           | 1                                  | 2       | 3       | 4       | 5         |
| Celkové provozní náklady za rok (Kč) | 1 Zářivky | 235 679                            | 471 358 | 707 037 | 942 716 | 1 178 395 |
|                                      | 2 Zářivky | 93 347                             | 230 181 | 323 528 | 416 874 | 510 221   |
|                                      | 3 LED     | 110 580                            | 163 561 | 216 541 | 327 122 | 380 102   |

|                                      |           | Provoz osvětlovací soustavy [roky] |           |           |           |           |
|--------------------------------------|-----------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Návrh                                |           | 6                                  | 7         | 8         | 9         | 10        |
| Celkové provozní náklady za rok (Kč) | 1 Zářivky | 1 414 074                          | 1 649 753 | 1 885 432 | 2 121 111 | 2 356 790 |
|                                      | 2 Zářivky | 603 567                            | 696 914   | 790 260   | 883 607   | 976 954   |
|                                      | 3 LED     | 433 083                            | 486 063   | 596 644   | 649 624   | 702 605   |



Obrázek 75 - Odhad celkových nákladů v následujících letech

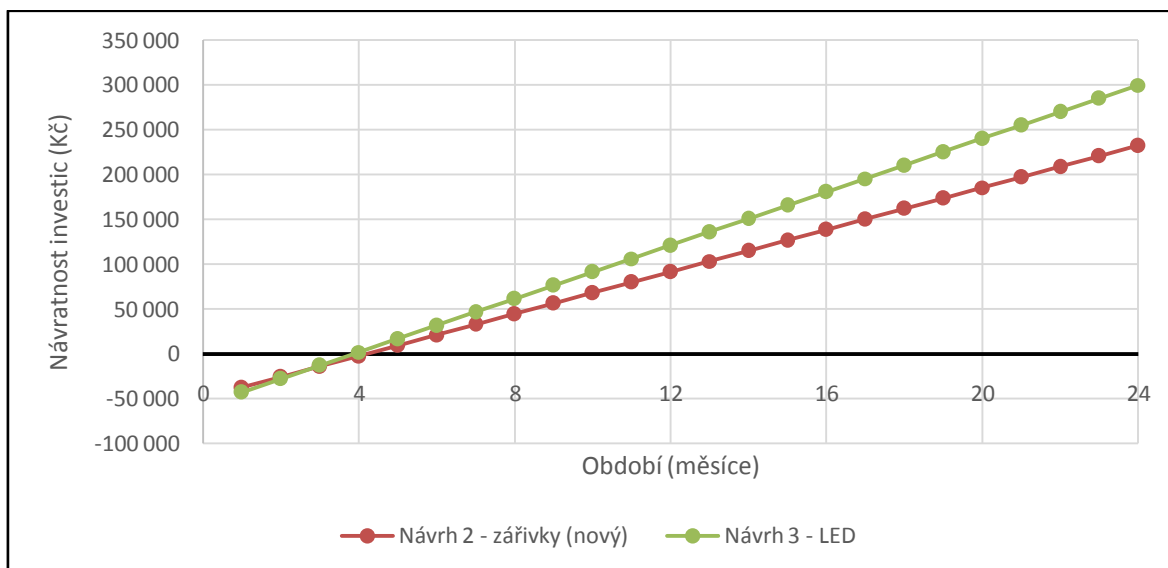
Každý návrh osvětlovací soustavy by měl zahrnovat návratnost investic. Pro nově navržené osvětlovací soustavy (zářivky a LED) je přibližný odhad návratnosti investic po čtyřech měsících nepřetržitého provozu svítidel, oproti původní zářivkové soustavě.

Tabulka 12 - Návratnost investic nových návrhů

|                          |         | Období (měsíc) |         |         |        |        |        |        |        |
|--------------------------|---------|----------------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| varianta                 |         | 1              | 2       | 3       | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
| Návratnost investic (Kč) | Zářivky | -37 510        | -25 771 | -14 033 | -2 294 | 9 444  | 21 182 | 32 921 | 44 659 |
|                          | LED     | -42 708        | -27 816 | -12 924 | 1 968  | 16 860 | 31 752 | 46 644 | 61 536 |

|                          |         | Období (měsíc) |        |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------|---------|----------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| varianta                 |         | 9              | 10     | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16      |
| Návratnost investic (Kč) | Zářivky | 56 398         | 68 136 | 79 874  | 91 613  | 103 351 | 115 090 | 126 828 | 138 566 |
|                          | LED     | 76 428         | 91 320 | 106 212 | 121 104 | 135 996 | 150 888 | 165 780 | 180 672 |

|                          |         | Období (měsíc) |         |         |         |         |         |         |         |
|--------------------------|---------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| varianta                 |         | 17             | 18      | 19      | 20      | 21      | 22      | 23      | 24      |
| Návratnost investic (Kč) | Zářivky | 150 305        | 162 043 | 173 782 | 185 520 | 197 258 | 208 997 | 220 735 | 232 474 |
|                          | LED     | 195 564        | 210 456 | 225 348 | 240 240 | 255 132 | 270 024 | 284 916 | 299 808 |



Obrázek 76 - Návratnost investic nových návrhů

**3.6.3 PŘÍKLADY VÝPOČTŮ****Výpočet provozních nákladů  $N_p$  za rok pro druhý návrh (zářivky)**

$$N_p = P_r \cdot p = 22\,706 \cdot 4 = 90\,824, \quad (\text{Kč. rok}^{-1})$$

kde

$P_r$  - roční spotřeba energie (kW.hod);

$p$  - cena za kW.hod.

Jelikož v předešlých provozních nákladech nejsou uvedeny náklady spojené s koupí světelných zdrojů, tak jsem ještě spočítal tzv. pořizovací náklady světelných zdrojů za rok  $N_{poř}$ , které poté přičtu k již spočítaným provozním nákladům za spotřebu  $N_p$ . Tím získám pro jednotlivé soustavy přehled o celkových nákladech za rok  $N_c$ .

**Příklad výpočtu pořizovacích nákladů  $N_{poř}$  za rok pro druhý návrh (zářivky)**

$$N_{poř} = \frac{t_0 \cdot n \cdot p_{sz}}{T_{\frac{z}{2}}} = \frac{8\,760 \cdot 72 \cdot 80}{20\,000} = 2\,523, \quad (\text{Kč})$$

kde

$t_0$  – celková provozní doba světelného zdroje za rok;

$n$  – počet světelných zdrojů;

$p_{sz}$  – cena za 1 ks světelného zdroje;

$T_{\frac{z}{2}}$  – doba životnosti světelného zdroje udávaná výrobcem.

**Příklad výpočtu celkových nákladů za rok  $N_c$  pro druhý návrh (zářivky)**

$$N_c = N_p + N_{poř} = 93\,347 \quad (\text{Kč})$$

### 3.7 ZHODNOCENÍ NÁVRHŮ

Výsledkem této kapitoly jsou tři návrhy osvětlovacích soustav, včetně jejich ekonomického zhodnocení.

Nejhorší výsledky jsem zaznamenal u prvního návrhu osvětlení, který byl realizován zářivkovými trubicemi. Podle mého názoru se jedná o předimenzovanou soustavu, jež kromě vysokého počtu svítidel používá světelné zdroje s příkonem 58 W zbytečně. Všechny tyto aspekty vedou k vyšší spotřebě elektrické energie a narušení zrakové pohody v prostoru (nerovnoměrnost osvětlení, vysoké hodnoty průměrného osvětlení). Tuto soustavu bych proto nedoporučoval.

Naopak nejlépe se jeví na první pohled osvětlovací soustava realizovaná LED zdroji. Dle ekonomického hlediska je tato volba nejvhodnější. S postupem času tato soustava přináší značné úspory. Vzhledem k nepřetržitému provozu svítidel (resp. zdrojů) je návratnost investic odhadována přibližně na čtyři měsíce. Odhadovaná životnost těchto zdrojů je výrobcem stanovena na 55 měsíců. Dá se předpokládat, že zbylých 51 měsíců by byla soustava s LED zdroji ekonomickým přínosem pro provozovatele. Po ukončení života LED zdrojů je zapotřebí vyměnit celé svítidlo, nikoliv jen světelný zdroj. Jedná se o poměrně snadnou operaci, avšak provozovatel soustavy musí s touto výměnou počítat, neboť pořizovací náklady budou opět značné. Z mého hlediska je soustava LED pro tyto prostory nevhodná, vzhledem k vysoké hodnotě oslnění  $UGR$ . Tento parametr LED zdrojů stále přesahoval doporučené meze ( $UGR_{max} = 22$ ) i přes snahu použít různé typy svítidel. Vysoká hodnota by mohla nevhodně působit na pracovní činnosti zaměstnanců a jejich zdraví. Z výše uvedených důvodů bych soustavu s LED zdroji nedoporučoval.

Upravený návrh osvětlovací soustavy se zářivkami splňuje veškeré požadavky udávané normou ČSN 12464-1. V tomto případě jsem nezaznamenal překročení doporučených hranic jednotlivých parametrů, jako tomu bylo u LED soustavy. Oproti LED soustavě jsou pořizovací náklady přibližně poloviční. Odhadovaná návratnost investic je dle výpočtů odhadována již po čtyřech měsících nepřetržitého provozu této soustavy. Provozní náklady za rok jsou poloviční oproti původní soustavě s těmito zdroji. V případě ukončení životnosti těchto zdrojů, lze vyměnit pouze zdroj, jehož pořizovací cena je značně nižší (přibližně 80 Kč) než svítidlo s LED zdroji (1 600 Kč). Provozovatel tak není zatížen

v budoucnosti opět značnou investicí. Tato soustava ve všech směrech vyniká oproti ostatním, a proto bych pro navrhovaný úsek tuto soustavu doporučoval.

Z těchto návrhů plyne, že není vhodné všude uplatňovat jeden typ světelného zdroje. Zároveň není vhodné se řídit poučkou „Čím více (zdrojů), tím lépe (osvětlenost)“.

## ZÁVĚR

V úvodní kapitole jsem se zmínil o světelných zdrojích LED, které v posledních letech zaznamenaly pokrok nejen ve svých světelně technických parametrech, ale i oblastech použití. Nedílnou součástí této práce je také popis základních světelných parametrů, které doprovázejí celou tuto práci. Jelikož v následující kapitole provádím měření se základními světelnými zdroji, proto jsem provedl i stručný popis těchto zdrojů, mezi něž patří klasické žárovky, halogenové žárovky, zářivky a vysokotlaké výbojky. Samotná měření jsem navrhl tak, aby splňovala body zadání této práce. V průběhu diplomové práce jsem se rozhodl vytvořit návrh osvětlovací soustavy pro firmu TE Connectivity, jenž by přinesl možné úspory, a příznivě ovlivnil zaměstnance. Před zhotovením návrhu jsem prostudoval samotná kritéria osvětlovacích soustav. Velkým přínosem pro první kapitolu byly zdroje [1], [2], ze kterých jsem citoval řadu odstavců.

V druhé kapitole jsem zaznamenal průběh a výsledky jednotlivých měření. S pomocí těchto měření jsem se naučil pracovat se základním (luxmetr) i složitějším měřicím zařízením (kulový integrátor, goniofotometr). Výsledky jednotlivých měření byly porovnány s jednotlivými světelnými zdroji. Co se týče křivek svítivosti, tak nejlepší výsledky byly zaznamenány u zdroje LED 12 W, neboť do prostoru vyzařoval světelný tok nejvíce. Zajímavým přínosem bylo i spektrální rozložení zdrojů, jimiž jsem si ověřil velikost vyzařování LED zdrojů v oblasti UV záření. Zklamal mě samotný měrný výkon u dražšího 12 W LED zdroje (300 Kč), jehož hodnota byla rovna pouze  $52 \text{ lm.W}^{-1}$ . Vzhledem k současnému trendu jsem očekával u zdrojů LED alespoň hodnotu  $80 \text{ lm.W}^{-1}$ . Každopádně při porovnání výsledků všech měření s ostatními světelnými zdroji si vedly zdroje LED nejlépe. Svítivost zdrojů jsem chtěl také měřit na fotometrické lavici, ale bohužel jsme v učebně neměli k dispozici vhodný normálový světelný zdroj, jenž by odpovídal LED zdrojům. Tato měření probíhala také ve spolupráci s univerzitou Českého vysokého učení technického (ČVUT) v Praze.

Velice zajímavým přínosem pro mne byl návrh světelných soustav v programu Dialux. Podařilo se mi vytvořit tři odlišné návrhy, z nichž návrh se svítidly LED byl z hlediska ekonomického nejvhodnější. Největší problém pro LED návrh bylo oslnění (*UGR*). Použil jsem spoustu různých svítidel tohoto typu, ale výsledná oslnění vždy přesáhla hranice udávané normou. Při dlouhodobém působení vysoké hodnoty oslnění by se

u zaměstnanců mohla projevit nevolnost, zvýšená únava, jež by mohla způsobit pracovní úraz. Z toho důvodu jsem doporučil upravený návrh světelné soustavy se zářivkovými trubicemi. Tento návrh je oproti LED řešení méně úsporný, ale nepřekračuje žádné mezní hodnoty jednotlivých parametrů. Tyto návrhy pro mě byly velkým přínosem, protože jsem získal cenné zkušenosti a naučil se pracovat s programem Dialux.

V současné době je technologie LED prezentována výrobcí jako nejlepší možné řešení, které se dá použít „všude“. Výsledkem této diplomové práce je, že tomu tak doopravdy není. Technologie LED sice přináší značné úspory, a to jak v domácnostech, tak i v průmyslu, avšak použití LED se musí navrhnout do vhodných prostor. Samotní uživatelé by měli převážně hledět na lidské zdraví, nikoliv jen na spotřebu a pořizovací cenu. Je prokázáno, že při dlouhodobé expozici záření z LED zdrojů v noci se potlačuje tvorba melatoninu, která může v budoucnosti způsobit zdravotní komplikace. Technologie LED přináší řadu výhod, které při vhodném použití přinesou spoustu výhod. Pokud bude vývoj i nadále takto intenzivní, dočkáme se nejspíše v brzké době zdrojů LED s lepšími parametry (měrný výkon), včetně potlačení negativních vlivů. Jako velice nadějnou vidím technologii OLED, která v následujících letech může přinést malou revoluci ve spotřební elektronice (televize, monitory, mobily aj.).



**SEZNAM LITERATURY**

- [1] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3
- [2] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9
- [3] SCHUBERT, E. Fred. *Light-emitting diodes*. Cambridge University: Cambridge University Press, 2006.
- [4] *Stručný pohled na historii LED diod* [online]. Osram [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/novinky-a-znalosti/led-domov/technicke-informace/zakladni-prehled-led/historie-led/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/novinky-a-znalosti/led-domov/technicke-informace/zakladni-prehled-led/historie-led/index.jsp)
- [5] DVOŘÁČEK, Ing. Vladimír. *Nobelova cena za fyziku do Japonska za modrou světelnou diodu*. *Časopis Světlo* [online]. 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/clanek/nobelova-cena-za-fyziku-do-japonska-za-modrou-svetelnou-diodu--749>
- [6] NAJMAN, Lukáš. *Ohebné displeje OLED*. *Aldebaran* [online]. 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2014\\_18\\_led.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2014_18_led.php)
- [7] *Amazing OLED Kinetic Luminaires* [online]. 2013 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://captivist.com/lighting/selux-manta-rhei-amazing-oled-kinetic-luminaires.html>
- [8] DOC.ING. MACH CSC., Pavel. *Přednášky z předmětu Výkonové součástky a technologie*. Praha: ČVUT, 2013.
- [9] Laserová dioda. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserová\\_dioda](https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserová_dioda)
- [10] Fotometrická lavice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. 2007 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotometrická\\_lavice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotometrická_lavice)
- [11] GEIBLER, O. *Směrnice 2009/125/ES o výrobcích spojených se spotřebou energie (ErP)* [online]. Mnichov, 2009 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://www.oes-shop.cz/download/418-erp\\_tim\\_prezentace-2010-01-18.pdf](http://www.oes-shop.cz/download/418-erp_tim_prezentace-2010-01-18.pdf)

- [12] *HISTORIE, SOUČASNOST a TECHNICKÉ POJMY LED ZDROJŮ SVĚTLA* [online]. RETRAST TRADE, s.r.o, 2012 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://www.retrast.cz/downloads/Manual\\_LED\\_PARAMETRU\\_M02\\_08082012\\_3.pdf](http://www.retrast.cz/downloads/Manual_LED_PARAMETRU_M02_08082012_3.pdf)
- [13] *LED žárovky spotřebují méně než desetinu energie proti klasickým* [online]. Idnes, 2009 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://hobby.idnes.cz/led-zarovky-spotrebuji-mene-nez-desetinu-energie-proti-klasickym-p99-/hobby-domov.aspx?c=A090428\\_071846\\_hobby-domov\\_lud](http://hobby.idnes.cz/led-zarovky-spotrebuji-mene-nez-desetinu-energie-proti-klasickym-p99-/hobby-domov.aspx?c=A090428_071846_hobby-domov_lud)
- [14] *LED žárovky Philips* [online]. Levné led pásky [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.levne-led-pasky.cz/32-led-zarovky-philips>
- [15] *Konstrukce LED žárovky* [online]. ELKO LIGHTING, s.r.o. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.elkolighting.cz/dokument/co-je-LED>
- [16] *Nabídka LED pásků* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.paskyled.cz/ledpasky/eshop/8-1-Led-pasky/>
- [17] *Osvětlené přechody pro chodcov* [online]. 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.nitralive.sk/doprava/2186-na-krizovatke-wilsonovo-nabrezie-kmetkova-pribudnu-osvetlene-priechody-pre-chodcov>
- [18] *Osvětlené přechody uleví chodcům i řidičům* [online]. Královéhradecký kraj: Policie České republiky, 2013 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.policie.cz/clanek/osvetlene-prechody-ulevi-chodcum-i-ridicum.aspx>
- [19] *Solární LED venkovní osvětlení* [online]. LED Solution [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://eshop.ledsolution.cz/led-verejne-osvetleni>
- [20] *Svítilno FALCON* [online]. Vyrtych [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.vyrtych.cz/Default.aspx?tabid=118>
- [21] *LED trubice* [online]. Osram [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://www.osram.cz/osram\\_cz/produkty/svetelne-zdroje/svetelne-zdroje-led/led-trubice/substitube-em/substitube-advanced-ultra-output/index.jsp](http://www.osram.cz/osram_cz/produkty/svetelne-zdroje/svetelne-zdroje-led/led-trubice/substitube-em/substitube-advanced-ultra-output/index.jsp)
- [22] *Pozor na LED osvětlení* [online]. Idnes, 2012 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: [http://bydleni.idnes.cz/led-osvetleni-0da-/uspory-energii.aspx?c=A121219\\_173841\\_uspory-energii\\_rez](http://bydleni.idnes.cz/led-osvetleni-0da-/uspory-energii.aspx?c=A121219_173841_uspory-energii_rez)

- [23] *Světelné znečištění a vliv na lidské zdraví* [online]. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://svetelneznecesteni.cz/co-je-svetelne-znecesteni/lidske-zdravi/>
- [24] GOMBIKOVÁ, Zuzana. *Kvalita osvětlení a její vliv na naše zdraví* [online]. 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <https://freyaled.com/cs/blog/kvalita-osvetleni-a-jeji-vliv-na-nase-zdravi>
- [25] *Integrating Sphere for measuring radiant power and luminous flux* [online]. Instrument systems [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.biofotonica.it/pdf/Componenti/SfereIntegratrici/ISP2000.pdf>
- [26] ČSN EN 12464-1 *Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. Česká republika, 2012.
- [27] *Ověřovací list pro Goniofotometr*. In: Praha.
- [28] *Navod'te halogenovým osvětlením atmosféru podle svých představ* [online]. Philips [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.philips.cz/c-m-li/halogenove-zarovky>
- [29] *Svítilno TELW* [online]. Modus [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://modus.cz/cze/index.php?section=catalogue&action=lighting\\_catalogue&id=276&groupType=1&pageDesc=modus-tel](http://modus.cz/cze/index.php?section=catalogue&action=lighting_catalogue&id=276&groupType=1&pageDesc=modus-tel)
- [30] *Přehled cen elektrické energie* [online]. tzb info, 2016 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi/14-prehled-cen-elektricke-energie#d02>
- [31] *Podklady k předmětu Elektrické světlo 1: Nejdůležitější zásady osvětlování* [online]. ČVUT [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/A5M15ES1/A5M15ES1-08-Zasady.pdf>

## SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1 - Rozdělení svítidel podle rozložení světelného toku .....                                     | 5  |
| Obrázek 2 - Vymezení prostorového úhlu [2] .....   | 7  |
| Obrázek 3 - Vyobrazení celého fotometrického prostoru a řezu s vyznačenou křivkou<br>svítivosti [2]..... | 9  |
| Obrázek 4 - Definice osvětlenosti bodového zdroje [2] .....  | 9  |
| Obrázek 5 - Svazky rozbíhajících se paprsků [2] .....  | 10 |
| Obrázek 6 - Teplota chromatičnosti [2] .....   | 12 |
| Obrázek 7 - Zobrazení trichromatického trojúhelníku v prostoru [2].....                                  | 16 |
| Obrázek 8 - Kolorimetrický trojúhelník [2] .....   | 17 |
| Obrázek 9 - Růst měrných výkonů s časem [1].....   | 19 |
| Obrázek 10 - Základní konstrukční uspořádání světelné diody se dvěma krystaly [1] .....                  | 20 |
| Obrázek 11 - Spektrum vybraných barevných LED [1] .....  | 21 |
| Obrázek 12 - Emisní spektrum bílé LED (luminofor buzený světlem modré diody) [1] ....                    | 21 |
| Obrázek 13 - Vrstvy OLED.....  | 26 |
| Obrázek 14 - Ohebná destička s technologií OLED [6] .....  | 27 |
| Obrázek 15 - Plovoucí strop se zdroji OLED [7] .....   | 27 |
| Obrázek 16 - Laserová dioda [9] .....  | 27 |
| Obrázek 17 - Stimulovaná emise, a - čerpání, b - inverze, c - pružná srážka [8].....                     | 28 |
| Obrázek 18 - Postupný zákaz obyčejných žárovek [11] .....  | 30 |
| Obrázek 19 - "Kukuřice" LED [12] .....   | 30 |
| Obrázek 20 - LED podobný reflektoru [13].....  | 30 |
| Obrázek 21 - LED "svíčka" [14].....  | 31 |
| Obrázek 22 - LED "žárovka" [14] .....  | 31 |
| Obrázek 23 - LED "žárovka" konstrukce [15] .....   | 31 |
| Obrázek 24 - Příklad LED pásků [16] .....  | 31 |
| Obrázek 25 - LED přímo v silnici [17] .....  | 33 |
| Obrázek 26 - LED lampy u přechodů [18].....  | 33 |
| Obrázek 27 - Kombinace LED lampy se solárním panelem [19].....   | 34 |
| Obrázek 28 - Svítidlo pro LED s IP66 [20].....   | 34 |
| Obrázek 29 - LED trubice Osram [21].....   | 34 |
| Obrázek 30 - Vliv denního světla na lidský organizmus [33] .....   | 36 |
| Obrázek 31 - Obyčejná žárovka a spektrum [2] .....   | 37 |
| Obrázek 32 - Konstrukce zářivky [1].....   | 39 |
| Obrázek 33 - Lineární zářivka a její spektrum [2].....   | 40 |
| Obrázek 34 - Vysokotlaká sodíková výbojka a příklad jejího spektra [2].....                              | 41 |
| Obrázek 35 - Schéma fotometrické lavice .....  | 45 |
| Obrázek 36 - Goniofotometr s pevným svítidlem (zdrojem) a otočným fotometrem .....                       | 46 |
| Obrázek 37 - Křivky svítivosti v polárních a pravoúhlých souřadnicích [2] .....                          | 47 |
| Obrázek 38 - Digitální luxmetr [1] .....   | 48 |
| Obrázek 39 - Rozmístění světelných zdrojů v kulovém integrátoru.....                                     | 49 |
| Obrázek 40 - Ukázka reálného kulového integrátoru [25].....  | 49 |
| Obrázek 41 - Spektrofotometr .....   | 50 |
| Obrázek 42 - Žárovky (zdroje č. 1 až 4) .....  | 55 |
| Obrázek 43 - Halogenová žárovka 28 W (zdroj č. 5) .....  | 56 |
| Obrázek 44 - Halogenová žárovka 53 W (zdroj č. 6) .....  | 56 |

|  |     |
|--|-----|
| Obrázek 45 – Kompaktní zářivky (zdroje č. 7 a 8).....  | 56  |
| Obrázek 46 – Vysokotlaká sodíková výbojka (zdroj č. 9).....  | 56  |
| Obrázek 47 – LED 1, 8 W (zdroj č. 10 a 11) .....   | 56  |
| Obrázek 48 – LED (zdroj č. 12 a 13).....   | 56  |
| Obrázek 49 - Rtuťová výbojka (zdroj č. 14) .....   | 57  |
| Obrázek 50 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 75 W .....                                    | 59  |
| Obrázek 51 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 53 W.....                          | 59  |
| Obrázek 52 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 9 W.....                            | 59  |
| Obrázek 53 - Diagram chromatičnosti a spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W.....               | 60  |
| Obrázek 54 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 3 000 K).....                        | 60  |
| Obrázek 55 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 8 100 K).....                        | 60  |
| Obrázek 56 Diagram chromatičnosti a spektrum rtuťová výbojka 250 W .....                             | 61  |
| Obrázek 57 - Polární graf pro veškeré zdroje.....  | 66  |
| Obrázek 58 - Konstrukce halogenové žárovky uvnitř baňky .....  | 67  |
| Obrázek 59 - Příklad použití - obývací pokoj [28] .....  | 67  |
| Obrázek 60 - Rozmístění objektů v návrhu .....   | 73  |
| Obrázek 61 - Zobrazení ručního pracoviště v 3D 1. část .....   | 74  |
| Obrázek 62 - Zobrazení ručního pracoviště v 3D 2. část .....   | 74  |
| Obrázek 63 - Rozložení osvětlenosti v prostoru u prvního návrhu zářivkové osvětlovací soustavy ..... | 76  |
| Obrázek 64 - Výsledek prvního návrhu zářivkové osvětlovací soustavy .....                            | 77  |
| Obrázek 65- Rozložení osvětlenosti v prostoru u druhého návrhu zářivkové osvětlovací soustavy .....  | 77  |
| Obrázek 66 - Výsledek druhého návrhu zářivkové osvětlovací soustavy.....                             | 78  |
| Obrázek 67 - Plán údržby zářivkových svítidel Falcon .....   | 79  |
| Obrázek 68 - Křivky svítivosti svítidel se zářivkami.....  | 79  |
| Obrázek 69 - Rozložení osvětlenosti v prostoru pro návrh LED soustavy .....                          | 80  |
| Obrázek 70 - Výsledek návrhu LED osvětlovací soustavy .....  | 81  |
| Obrázek 71- Plán údržby LED svítidel TELW .....  | 81  |
| Obrázek 72 - Křivky svítivosti svítidel s LED zdroji .....   | 81  |
| Obrázek 73 - Zářivkové svítidlo Falcon [20] .....  | 82  |
| Obrázek 74 - Svítidlo LED TELW [29].....   | 82  |
| Obrázek 75 - Odhad celkových nákladů v následujících letech.....                                     | 84  |
| Obrázek 76 - Návrh investic nových návrhů.....   | 85  |
| Obrázek 77 - Diagram chromatičnosti (vlevo) a spektrum (vpravo) žárovky 40 W .....                   | I   |
| Obrázek 78 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 60 W .....                                    | I   |
| Obrázek 79 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 75 W .....                                    | I   |
| Obrázek 80 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 100 W .....                                   | II  |
| Obrázek 81 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 28 W.....                          | II  |
| Obrázek 82 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 53 W.....                          | II  |
| Obrázek 83 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 9 W.....                            | III |
| Obrázek 84 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 20 W.....                           | III |
| Obrázek 85 - Diagram chromatičnosti a spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W.....               | III |
| Obrázek 86 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 3 000 K).....                        | IV  |
| Obrázek 87 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 8 100 K).....                        | IV  |
| Obrázek 88 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 9 W .....   | IV  |
| Obrázek 89 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 12 W .....  | V   |

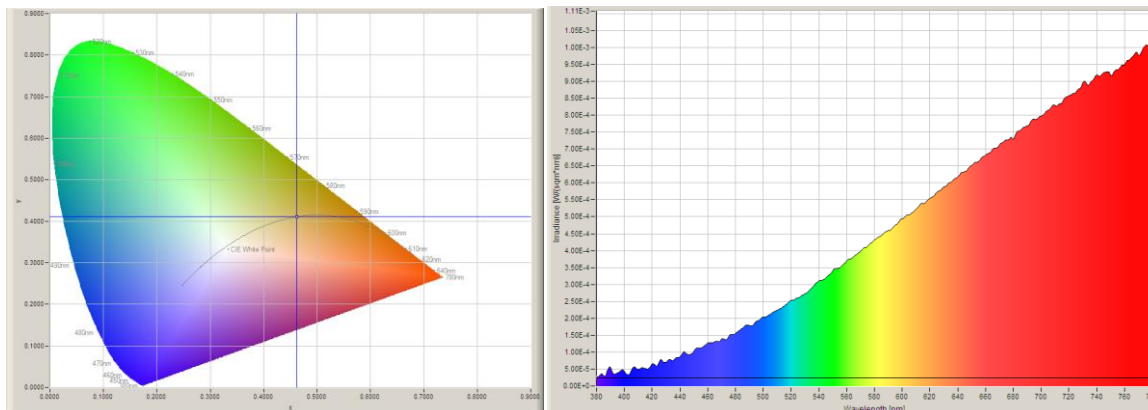
---

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 90 - Diagram chromatičnosti a spektrum rtuťová výbojka 250 W .....   | V  |
| Tabulka 1 – Pojmenování jednotlivých stupňů teploty chromatičnosti [2] ..... | 12 |
| Tabulka 2 - Měrný výkon u základních světelných zdrojů .....                 | 13 |
| Tabulka 3 - Vlnové délky spektrálních barev.....                             | 14 |
| Tabulka 4 – Měřené světelné zdroje .....                                     | 55 |
| Tabulka 5 - Naměřené hodnoty všech světelných zdrojů .....                   | 58 |
| Tabulka 6 - Průměrný koeficient $k_{2856i}$ pro různé rozsahy [27] .....     | 64 |
| Tabulka 7 - Koeficient $K_{dj}$ pro různé typy zdrojů [27] .....             | 65 |
| Tabulka 8 - Naměřené a vypočtené hodnoty .....                               | 70 |
| Tabulka 9 - Parametry pro elektrotechnické průmyslové činnosti [26].....     | 72 |
| Tabulka 10 - Ekonomické zhodnocení soustav .....                             | 83 |
| Tabulka 11 - Odhad provozních nákladů na období deseti let .....             | 84 |
| Tabulka 12 - Návratnost investic nových návrhů .....                         | 85 |

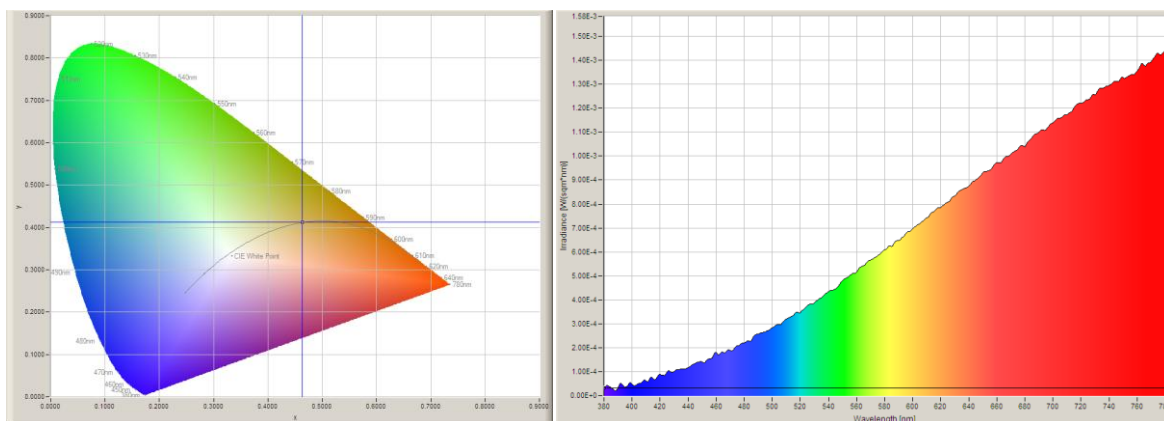
## PŘÍLOHY

## I. Veškeré diagramy a spektra ze spektrofotometru

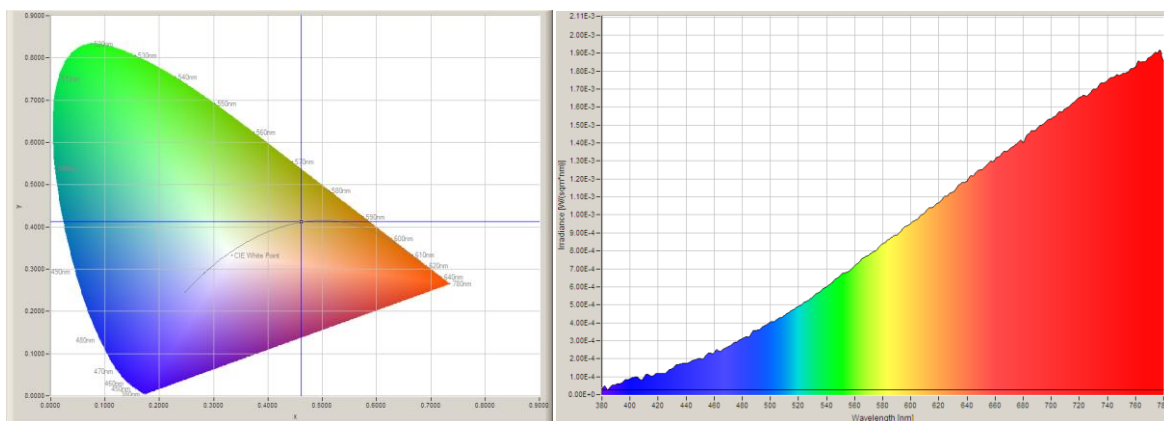
## Obyčejná žárovka



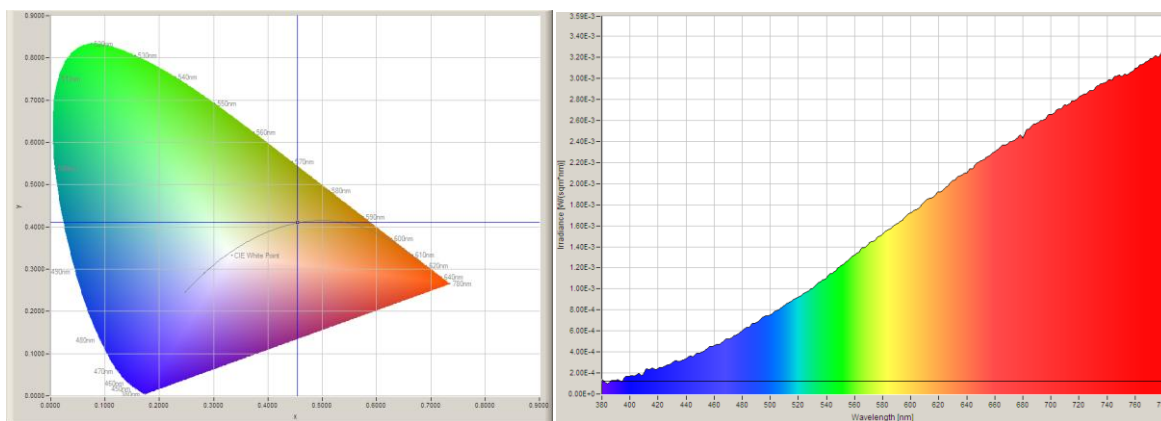
Obrázek 77 - Diagram chromatičnosti (vlevo) a spektrum (vpravo) žárovky 40 W



Obrázek 78 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 60 W

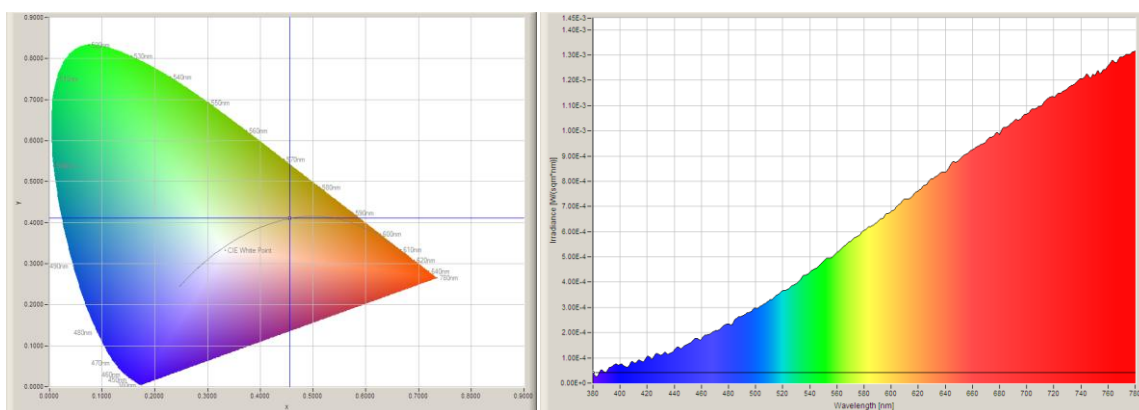


Obrázek 79 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 75 W

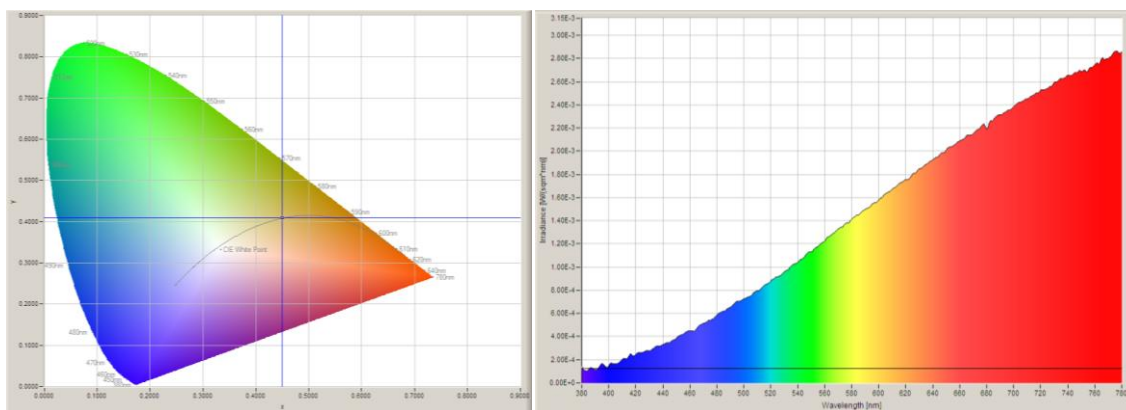


Obrázek 80 - Diagram chromatičnosti a spektrum žárovky 100 W

### Halogenová žárovka



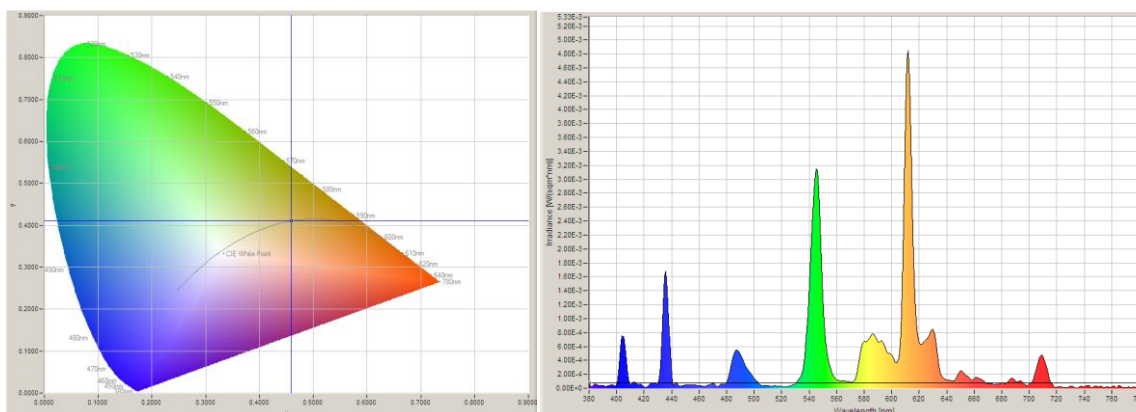
Obrázek 81 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 28 W



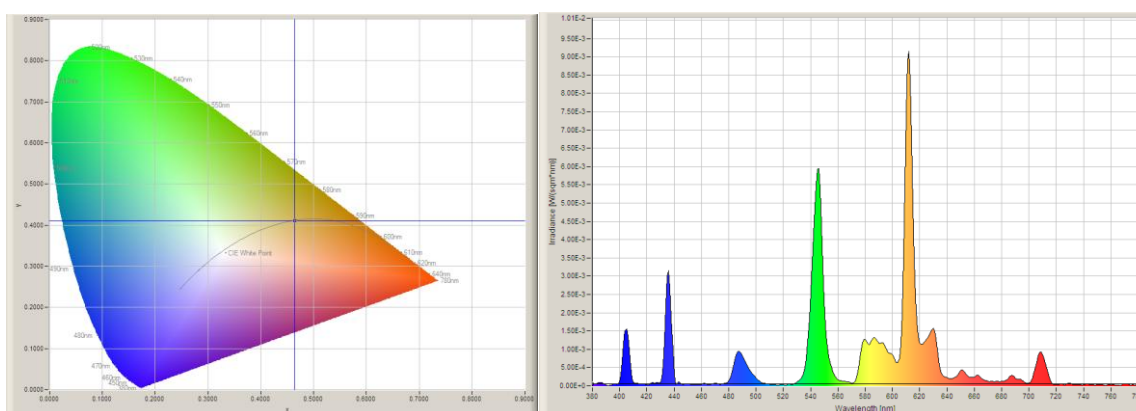
Obrázek 82 - Diagram chromatičnosti a spektrum halogenové žárovky 53 W



## Kompaktní zářivky

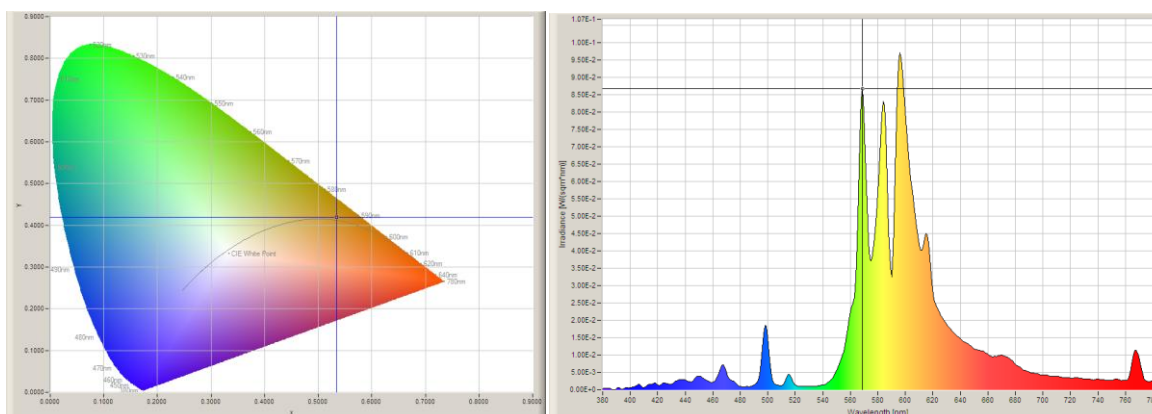


Obrázek 83 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 9 W



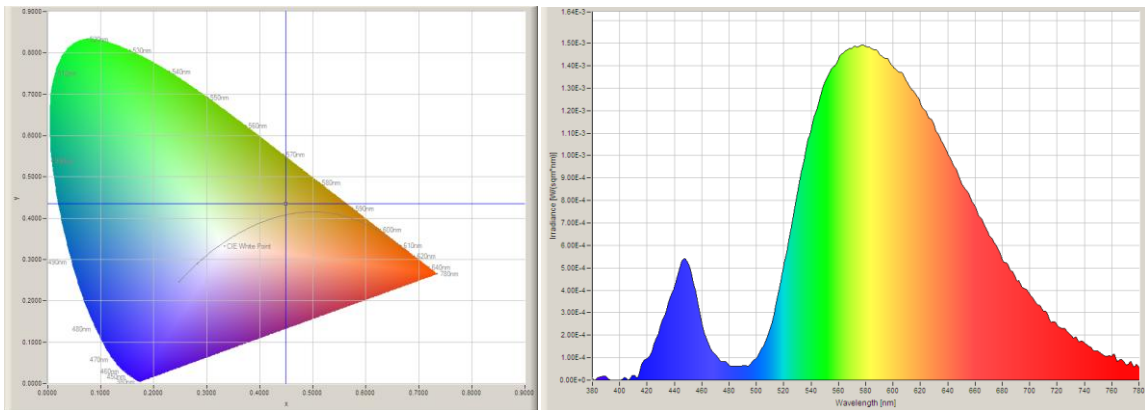
Obrázek 84 - Diagram chromatičnosti a spektrum kompaktní zářivky 20 W

## Vysokotlaká sodíková výbojka

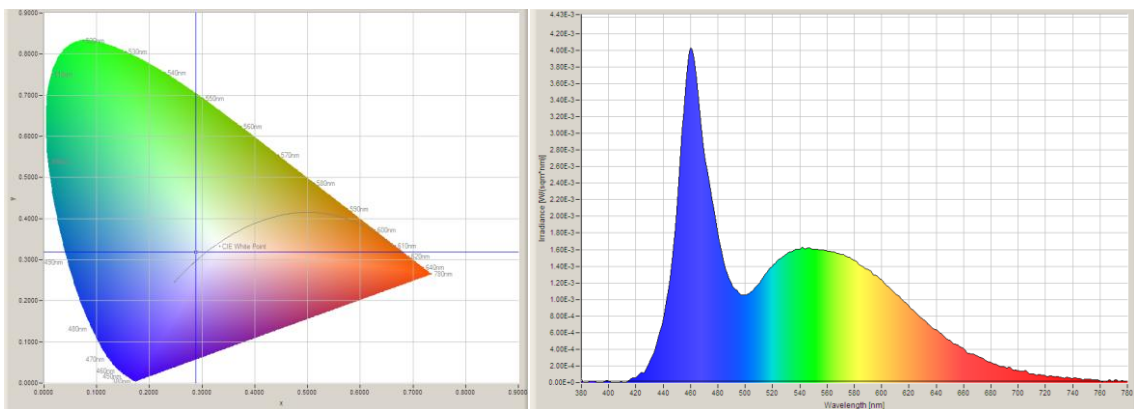


Obrázek 85 - Diagram chromatičnosti a spektrum vysokotlaké sodíkové výbojky 100 W

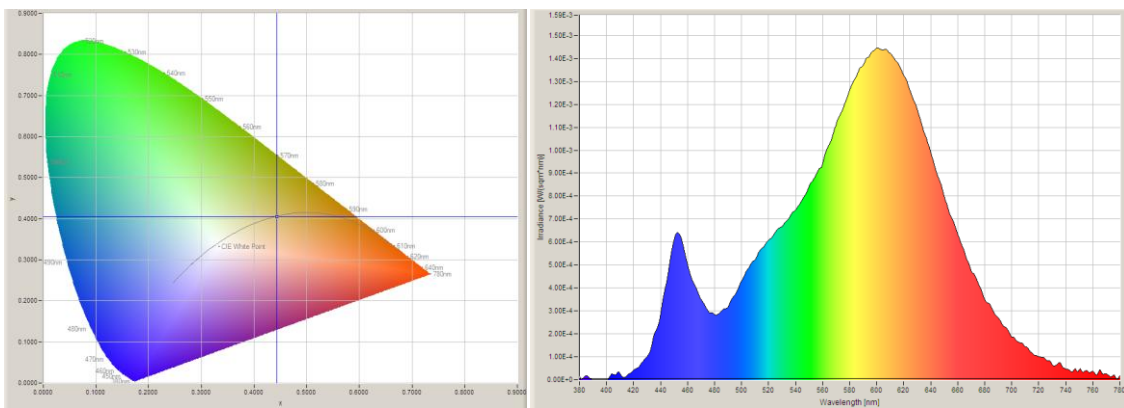
LED zdroje



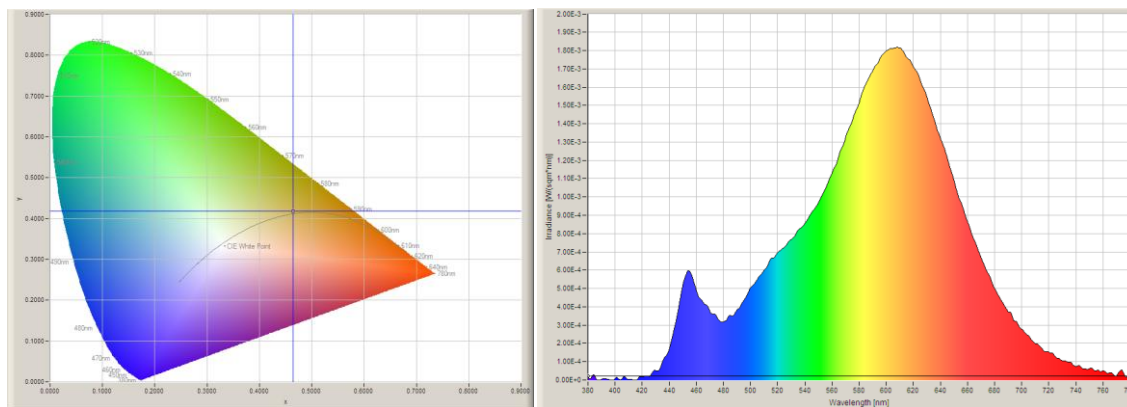
Obrázek 86 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 3 000 K)



Obrázek 87 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 1,8 W (CCT = 8 100 K)

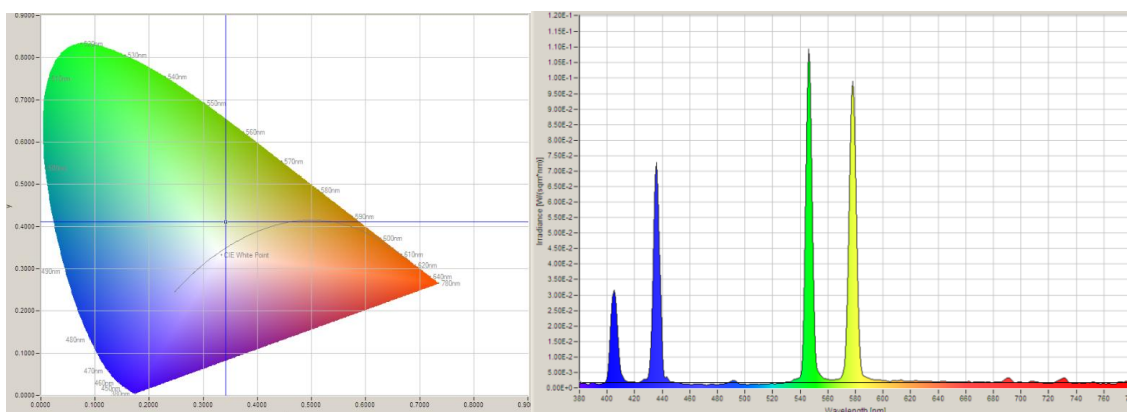


Obrázek 88 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 9 W



Obrázek 89 - Diagram chromatičnosti a spektrum LED 12 W

### Rtuťová výbojka



Obrázek 90 - Diagram chromatičnosti a spektrum rtuťová výbojka 250 W

## II. Tabulky naměřených hodnot z goniometru

## Halogenová žárovka 53 W

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| 120          | 0,00      | 0,00    | 0,00   |
| 115          | 90,44     | 91,07   | 364,27 |
| 110          | 90,64     | 91,27   | 365,08 |
| 105          | 90,84     | 91,47   | 365,88 |
| 100          | 89,68     | 90,30   | 361,21 |
| 95           | 87,88     | 88,49   | 353,96 |
| 90           | 87,84     | 88,45   | 353,80 |
| 85           | 87,12     | 87,72   | 350,90 |
| 80           | 86,72     | 87,32   | 349,29 |
| 75           | 86,64     | 87,24   | 348,97 |
| 70           | 81,56     | 82,13   | 328,50 |
| 65           | 79,04     | 79,59   | 318,35 |
| 60           | 77,92     | 78,46   | 313,84 |
| 55           | 75,12     | 75,64   | 302,57 |
| 50           | 71,20     | 71,69   | 286,78 |
| 45           | 66,16     | 66,62   | 266,48 |
| 40           | 58,96     | 59,37   | 237,48 |
| 35           | 52,36     | 52,72   | 210,89 |
| 30           | 42,00     | 42,29   | 169,17 |
| 25           | 37,76     | 38,02   | 152,09 |
| 20           | 32,68     | 32,91   | 131,63 |
| 15           | 26,84     | 27,03   | 108,11 |
| 10           | 33,36     | 33,59   | 134,37 |
| 5            | 42,32     | 42,61   | 170,45 |
| 0            | 38,32     | 38,59   | 154,34 |

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| -5           | 33,28     | 33,51   | 134,04 |
| -10          | 29,20     | 29,40   | 117,61 |
| -15          | 24,56     | 24,73   | 98,92  |
| -20          | 22,24     | 22,39   | 89,58  |
| -25          | 25,96     | 26,14   | 104,56 |
| -30          | 36,04     | 36,29   | 145,16 |
| -35          | 40,60     | 40,88   | 163,53 |
| -40          | 45,92     | 46,24   | 184,95 |
| -45          | 51,64     | 52,00   | 207,99 |
| -50          | 56,84     | 57,23   | 228,94 |
| -55          | 65,28     | 65,73   | 262,93 |
| -60          | 79,88     | 80,43   | 321,74 |
| -65          | 81,16     | 81,72   | 326,89 |
| -70          | 85,16     | 85,75   | 343,00 |
| -75          | 86,00     | 86,60   | 346,39 |
| -80          | 85,16     | 85,75   | 343,00 |
| -85          | 85,20     | 85,79   | 343,17 |
| -90          | 86,76     | 87,36   | 349,45 |
| -95          | 85,40     | 85,99   | 343,97 |
| -100         | 85,52     | 86,11   | 344,45 |
| -105         | 87,88     | 88,49   | 353,96 |
| -110         | 88,04     | 88,65   | 354,60 |
| -115         | 88,24     | 88,85   | 355,41 |
| -120         | 0,00      | 0,00    | 0,00   |

## Obyčejná žárovka 75 W

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| 120          | 0,00      | 0,00    | 0,00   |
| 115          | 65,16     | 65,61   | 262,45 |
| 110          | 60,92     | 61,34   | 245,37 |
| 105          | 58,28     | 58,68   | 234,74 |
| 100          | 55,32     | 55,70   | 222,82 |
| 95           | 51,08     | 51,43   | 205,74 |
| 90           | 47,32     | 47,65   | 190,59 |
| 85           | 45,60     | 45,92   | 183,67 |
| 80           | 48,36     | 48,70   | 194,78 |
| 75           | 62,72     | 63,16   | 252,62 |
| 70           | 62,32     | 62,75   | 251,01 |
| 65           | 59,04     | 59,45   | 237,80 |
| 60           | 60,08     | 60,50   | 241,99 |
| 55           | 59,68     | 60,09   | 240,38 |
| 50           | 60,72     | 61,14   | 244,57 |
| 45           | 60,92     | 61,34   | 245,37 |
| 40           | 61,80     | 62,23   | 248,92 |
| 35           | 62,44     | 62,87   | 251,49 |
| 30           | 62,08     | 62,51   | 250,04 |
| 25           | 62,20     | 62,63   | 250,53 |
| 20           | 64,80     | 65,25   | 261,00 |
| 15           | 61,52     | 61,95   | 247,79 |
| 10           | 64,08     | 64,52   | 258,10 |
| 5            | 65,44     | 65,89   | 263,58 |
| 0            | 68,44     | 68,91   | 275,66 |

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| -5           | 65,24     | 65,69   | 262,77 |
| -10          | 70,08     | 70,57   | 282,27 |
| -15          | 68,52     | 69,00   | 275,98 |
| -20          | 68,04     | 68,51   | 274,05 |
| -25          | 66,52     | 66,98   | 267,93 |
| -30          | 67,16     | 67,63   | 270,50 |
| -35          | 66,04     | 66,50   | 265,99 |
| -40          | 65,84     | 66,30   | 265,19 |
| -45          | 63,36     | 63,80   | 255,20 |
| -50          | 62,84     | 63,28   | 253,10 |
| -55          | 63,32     | 63,76   | 255,04 |
| -60          | 62,40     | 62,83   | 251,33 |
| -65          | 62,48     | 62,91   | 251,65 |
| -70          | 63,20     | 63,64   | 254,55 |
| -75          | 61,08     | 61,50   | 246,02 |
| -80          | 59,84     | 60,26   | 241,02 |
| -85          | 58,64     | 59,05   | 236,19 |
| -90          | 57,16     | 57,56   | 230,23 |
| -95          | 56,36     | 56,75   | 227,00 |
| -100         | 52,88     | 53,25   | 212,99 |
| -105         | 54,76     | 55,14   | 220,56 |
| -110         | 57,84     | 58,24   | 232,97 |
| -115         | 59,28     | 59,69   | 238,77 |
| -120         | 0,00      | 0,00    | 0,00   |

## Kompaktní zářivka 20 W

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I [cd] |
|--------------|-----------|---------|--------|
| 120          | 0,00      | 0,00    | 0,00   |
| 115          | 92,04     | 97,99   | 391,95 |
| 110          | 90,24     | 96,07   | 384,29 |
| 105          | 84,56     | 90,02   | 360,10 |
| 100          | 90,32     | 96,16   | 384,63 |
| 95           | 90,72     | 96,58   | 386,33 |
| 90           | 95,68     | 101,86  | 407,45 |
| 85           | 95,36     | 101,52  | 406,09 |
| 80           | 99,68     | 106,12  | 424,49 |
| 75           | 109,00    | 116,04  | 464,18 |
| 70           | 114,76    | 122,18  | 488,71 |
| 65           | 122,00    | 129,88  | 519,54 |
| 60           | 128,00    | 136,27  | 545,09 |
| 55           | 132,00    | 140,53  | 562,12 |
| 50           | 136,00    | 144,79  | 579,16 |
| 45           | 136,80    | 145,64  | 582,56 |
| 40           | 133,60    | 142,23  | 568,94 |
| 35           | 127,20    | 135,42  | 541,68 |
| 30           | 122,40    | 130,31  | 521,24 |
| 25           | 116,80    | 124,35  | 497,39 |
| 20           | 111,20    | 118,39  | 473,54 |
| 15           | 104,80    | 111,57  | 446,29 |
| 10           | 98,80     | 105,18  | 420,74 |
| 5            | 95,16     | 101,31  | 405,24 |
| 0            | 96,28     | 102,50  | 410,01 |

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I [cd] |
|--------------|-----------|---------|--------|
| -5           | 100,88    | 107,40  | 429,60 |
| -10          | 106,84    | 113,74  | 454,98 |
| -15          | 112,92    | 120,22  | 480,87 |
| -20          | 118,56    | 126,22  | 504,89 |
| -25          | 123,60    | 131,59  | 526,35 |
| -30          | 128,80    | 137,12  | 548,49 |
| -35          | 133,60    | 142,23  | 568,94 |
| -40          | 134,40    | 143,09  | 572,34 |
| -45          | 133,20    | 141,81  | 567,23 |
| -50          | 127,60    | 135,85  | 543,38 |
| -55          | 121,60    | 129,46  | 517,83 |
| -60          | 113,60    | 120,94  | 483,77 |
| -65          | 108,40    | 115,41  | 461,62 |
| -70          | 100,80    | 107,31  | 429,26 |
| -75          | 89,44     | 95,22   | 380,88 |
| -80          | 87,72     | 93,39   | 373,56 |
| -85          | 82,52     | 87,85   | 351,41 |
| -90          | 77,68     | 82,70   | 330,80 |
| -95          | 74,28     | 79,08   | 316,32 |
| -100         | 69,04     | 73,50   | 294,01 |
| -105         | 72,64     | 77,33   | 309,34 |
| -110         | 70,28     | 74,82   | 299,29 |
| -115         | 66,60     | 70,90   | 283,62 |
| -120         | 0,00      | 0,00    | 0,00   |

## LED 9 W

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| 120          | 0,00      | 0,00    | 0,00   |
| 115          | 48,16     | 48,49   | 193,98 |
| 110          | 52,16     | 52,52   | 210,09 |
| 105          | 56,80     | 57,19   | 228,78 |
| 100          | 61,48     | 61,91   | 247,63 |
| 95           | 66,12     | 66,58   | 266,32 |
| 90           | 70,68     | 71,17   | 284,68 |
| 85           | 75,04     | 75,56   | 302,24 |
| 80           | 79,20     | 79,75   | 319,00 |
| 75           | 83,08     | 83,66   | 334,63 |
| 70           | 86,68     | 87,28   | 349,13 |
| 65           | 89,96     | 90,58   | 362,34 |
| 60           | 92,84     | 93,48   | 373,94 |
| 55           | 95,36     | 96,02   | 384,09 |
| 50           | 97,56     | 98,24   | 392,95 |
| 45           | 99,36     | 100,05  | 400,20 |
| 40           | 100,76    | 101,46  | 405,84 |
| 35           | 101,80    | 102,51  | 410,03 |
| 30           | 102,48    | 103,19  | 412,76 |
| 25           | 102,80    | 103,51  | 414,05 |
| 20           | 102,76    | 103,47  | 413,89 |
| 15           | 102,48    | 103,19  | 412,76 |
| 10           | 102,24    | 102,95  | 411,80 |
| 5            | 102,04    | 102,75  | 410,99 |
| 0            | 101,80    | 102,51  | 410,03 |

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| -5           | 101,40    | 102,10  | 408,41 |
| -10          | 100,84    | 101,54  | 406,16 |
| -15          | 100,16    | 100,86  | 403,42 |
| -20          | 99,36     | 100,05  | 400,20 |
| -25          | 98,68     | 99,36   | 397,46 |
| -30          | 97,88     | 98,56   | 394,24 |
| -35          | 96,96     | 97,63   | 390,53 |
| -40          | 95,80     | 96,46   | 385,86 |
| -45          | 94,36     | 95,01   | 380,06 |
| -50          | 92,64     | 93,28   | 373,13 |
| -55          | 90,56     | 91,19   | 364,75 |
| -60          | 88,20     | 88,81   | 355,25 |
| -65          | 85,52     | 86,11   | 344,45 |
| -70          | 82,56     | 83,13   | 332,53 |
| -75          | 79,40     | 79,95   | 319,80 |
| -80          | 75,92     | 76,45   | 305,79 |
| -85          | 72,28     | 72,78   | 291,13 |
| -90          | 68,44     | 68,91   | 275,66 |
| -95          | 64,48     | 64,93   | 259,71 |
| -100         | 60,40     | 60,82   | 243,28 |
| -105         | 56,20     | 56,59   | 226,36 |
| -110         | 52,04     | 52,40   | 209,60 |
| -115         | 48,04     | 48,37   | 193,49 |
| -120         | 0,00      | 0,00    | 0,00   |

## LED 12 W

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| 120          | 0,00      | 0,00    | 0,00   |
| 115          | 43,84     | 44,54   | 178,15 |
| 110          | 50,80     | 51,61   | 206,43 |
| 105          | 58,52     | 59,45   | 237,80 |
| 100          | 66,76     | 67,82   | 271,28 |
| 95           | 75,76     | 76,96   | 307,86 |
| 90           | 85,40     | 86,76   | 347,03 |
| 85           | 95,60     | 97,12   | 388,48 |
| 80           | 106,00    | 107,68  | 430,74 |
| 75           | 117,24    | 119,10  | 476,41 |
| 70           | 128,80    | 130,85  | 523,39 |
| 65           | 140,40    | 142,63  | 570,53 |
| 60           | 152,00    | 154,42  | 617,66 |
| 55           | 163,20    | 165,79  | 663,18 |
| 50           | 174,40    | 177,17  | 708,69 |
| 45           | 185,60    | 188,55  | 754,20 |
| 40           | 195,60    | 198,71  | 794,84 |
| 35           | 204,00    | 207,24  | 828,97 |
| 30           | 212,40    | 215,78  | 863,10 |
| 25           | 218,40    | 221,87  | 887,49 |
| 20           | 224,00    | 227,56  | 910,24 |
| 15           | 228,40    | 232,03  | 928,12 |
| 10           | 231,20    | 234,87  | 939,50 |
| 5            | 233,20    | 236,91  | 947,63 |
| 0            | 234,40    | 238,13  | 952,50 |

| $\gamma$ [°] | Emer [lx] | Ei [lx] | I[cd]  |
|--------------|-----------|---------|--------|
| -5           | 233,60    | 237,31  | 949,25 |
| -10          | 231,60    | 235,28  | 941,13 |
| -15          | 228,40    | 232,03  | 928,12 |
| -20          | 224,00    | 227,56  | 910,24 |
| -25          | 218,00    | 221,47  | 885,86 |
| -30          | 211,60    | 214,96  | 859,85 |
| -35          | 203,20    | 206,43  | 825,72 |
| -40          | 194,00    | 197,08  | 788,33 |
| -45          | 184,00    | 186,92  | 747,70 |
| -50          | 172,80    | 175,55  | 702,19 |
| -55          | 161,60    | 164,17  | 656,67 |
| -60          | 150,00    | 152,38  | 609,54 |
| -65          | 138,00    | 140,19  | 560,77 |
| -70          | 126,80    | 128,82  | 515,26 |
| -75          | 115,20    | 117,03  | 468,12 |
| -80          | 104,00    | 105,65  | 422,61 |
| -85          | 93,44     | 94,93   | 379,70 |
| -90          | 83,56     | 84,89   | 339,55 |
| -95          | 74,40     | 75,58   | 302,33 |
| -100         | 65,56     | 66,60   | 266,41 |
| -105         | 57,40     | 58,31   | 233,25 |
| -110         | 50,08     | 50,88   | 203,50 |
| -115         | 43,40     | 44,09   | 176,36 |
| -120         | 0,00      | 0,00    | 0,00   |