

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA MĚŘENÍ



## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh směrového jasového analyzátoru

Praha, 2018

Autor: Bc. Daniel Gola



## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Marku Bálskému, Ph. D. za jeho cenné rady a pomoc při tvorbě diplomové práce. Děkuji také rodině, která mě při mém studiu významně podporuje.

## **Abstrakt**

Hlavním cílem této diplomové práce je navrhnout model směrového jasového analyzátoru pro měření směrových charakteristik osvětlení prostoru. Nejdříve je nutné analyzovat nabídku dostupných senzorů pro měření jasových poměrů při osvětlení prostoru. Dále je potřeba zaměřit se na výběr vhodného řídicího modulu a s tím související volbu komunikačního protokolu. Dalším cílem je praktická realizace jasového směrového analyzátoru optimálního tvaru, který bude možný upevnit na stativovou hlavu pro lepší možnosti měření charakteristik. Výslednou funkci směrového analyzátoru je potřeba otestovat dosavadními metodami měření směrových charakteristik osvětlení prostoru.

## **Klíčová slova**

Světlo, světelná technika, osvětlenost, jas, analyzátor, světelný vektor, směrové charakteristiky, senzor, I<sup>2</sup>C sběrnice.

## **Abstract**

The aim of this diploma thesis is to design a model of directional luminance analyzer to measure the directional characteristics of the space illumination. First of all, it is necessary to analyze the range of available sensors to measure the luminance of the room lighting. In addition, it is necessary to focus on selecting a suitable control module and the choice of a communication protocol. Another objective is the practical implementation of a luminance directional analyzer of optimal shape, which can be attached to a tripod head for better options measuring characteristics. The resulting directional analyzer function has to be tested by the current methods of measuring the directional characteristics of the space illumination.

## **Keywords**

Light, light technology, illumination, luminance, analyzer, light vector, directional characteristic, sensor, I<sup>2</sup>C bus.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gola** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **393149**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh směrového jasového analyzátoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Design of directional luminance meter**

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte směrový jasový analyzátor pro měření směrových charakteristik osvětlení prostoru. Při realizaci směrového jasového analyzátoru se zaměřte na výběr vhodných a dostupných senzorů pro měření jasových poměrů při osvětlení prostoru a zejména na možnost digitálního výstupu naměřených dat ve formátu vhodném pro další zpracování dat výpočetními programy pro návrh osvětlení interiérů. Ověřte funkci realizovaného směrového jasového analyzátoru dosavadními metodami měření směrových charakteristik osvětlení prostoru.

Seznam doporučené literatury:

- [1] J. H. Klems, J. L. Warner, Measurement of Bidirectional Optical Properties of Complex Shading Device, Lawrence Berkley Laboratory, University of California, Berkley, 1995.
- [2] ČSN EN 12454-1 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory.
- [3] J. Habel a kol., Světlo a osvětlování, Praha: FCC Public, 2013

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Marek Bálský, Ph.D., katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce letního semestru 2018/2019**

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

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta





# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Struktura práce . . . . .                                       | 2         |
| <b>2</b> | <b>Teorie osvětlování</b>                                       | <b>3</b>  |
| 2.1      | Elektromagnetické záření . . . . .                              | 3         |
| 2.1.1    | Viditelné světlo . . . . .                                      | 6         |
| 2.2      | Světelně technické veličiny a pojmy . . . . .                   | 7         |
| 2.2.1    | Světelný tok . . . . .  | 8         |
| 2.2.2    | Prostorový úhel . . . . .                                       | 9         |
| 2.2.3    | Svítivost . . . . .   | 10        |
| 2.2.4    | Osvětlenost . . . . .   | 11        |
| 2.2.5    | Jas svazku světelných paprsků . . . . .                         | 12        |
| 2.3      | Integrální charakteristiky světelného pole . . . . .            | 14        |
| 2.3.1    | Světelné pole . . . . .   | 14        |
| 2.3.2    | Světelný vektor . . . . .                                       | 14        |
| 2.3.3    | Střední krychlová osvětlenost . . . . .                         | 16        |
| <b>3</b> | <b>Senzory</b>  | <b>17</b> |
| 3.1      | Senzory s analogovým výstupem . . . . .                         | 18        |
| 3.2      | Senzory s digitálním výstupem . . . . .                         | 19        |
| <b>4</b> | <b>Testování senzorů</b>  | <b>21</b> |
| 4.1      | Měření svítivosti . . . . .                                     | 22        |
| 4.2      | Tabulky naměřených hodnot . . . . .                             | 23        |
| 4.2.1    | Tabulka naměřených hodnot normalu . . . . .                     | 23        |
| 4.2.2    | Tabulka naměřených hodnot analogovým senzorem AMS 302 . . . . . | 24        |
| 4.2.3    | Tabulka naměřených hodnot digitálního senzoru BH1750 . . . . .  | 26        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.3      | Tabulky vypočtených hodnot senzorů . . . . .   | 27        |
| 4.3.1    | Tabulky vypočtených hodnot svítivosti analog. senzoru AMS302. . .                          | 27        |
| 4.3.2    | Tabulky vypočtených hodnot svítivosti dig. senzoru BH1750. . . .                           | 29        |
| 4.4      | Grafy výsledků . . . . .   | 31        |
| 4.4.1    | Graf svítivosti změřené analogovým senzorem AMS302 v závislosti na vzdálenosti . . . . .   | 31        |
| 4.4.2    | Graf svítivosti změřené analogovým senzorem AMS302 v závislosti na úhlu natočení . . . . . | 32        |
| 4.4.3    | Graf svítivosti změřené digitálním senzorem BH1750 v závislosti na vzdálenosti . . . . .   | 33        |
| 4.4.4    | Graf svítivosti změřené digitálním senzorem BH1750 v závislosti na úhlu natočení . . . . . | 34        |
| 4.5      | Zhodnocení výsledků testování . . . . .  | 35        |
| <b>5</b> | <b>Komunikační rozhraní</b>  | <b>37</b> |
| 5.1      | Digitální senzory komunikující po I <sup>2</sup> C sběrnici . . . . .                      | 38        |
| 5.1.1    | Řešení v podobě multiplexoru . . . . .   | 38        |
| 5.2      | Master - Slave komunikace . . . . .  | 39        |
| 5.3      | I <sup>2</sup> C sběrnice . . . . .  | 41        |
| 5.4      | Řídící jednotka . . . . .  | 42        |
| 5.4.1    | Výsledné zapojení . . . . .  | 43        |
| 5.5      | Program a ukládání do souboru . . . . .  | 44        |
| 5.5.1    | Ukázka souboru po průběhu měření . . . . .   | 44        |
| <b>6</b> | <b>Realizace analyzátoru</b>   | <b>45</b> |
| 6.1      | 3D model . . . . .   | 46        |
| 6.2      | Box . . . . .  | 46        |
| 6.3      | Víko . . . . .   | 47        |
| 6.4      | 3D tisk . . . . .  | 48        |
| 6.5      | Upevnění na stativ . . . . .   | 49        |
| 6.6      | Propojení s PC . . . . .   | 49        |
| 6.7      | Reálný model . . . . .   | 49        |
| <b>7</b> | <b>Měření analyzátozem</b>   | <b>51</b> |
| 7.1      | Naměřené hodnoty . . . . .   | 52        |
| 7.2      | Vypočtené hodnoty . . . . .  | 53        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.2.1    | Korekce luxmetru na rozsah . . . . .                                | 53         |
| 7.3      | Grafy . . . . .   | 56         |
| 7.3.1    | Graf hodnot osvětlenosti ve vzdálenosti 1,00 m od normálu . . . . . | 56         |
| 7.3.2    | Graf hodnot osvětlenosti ve volném prostoru . . . . .               | 57         |
| 7.3.3    | Graf směrů vektorů osvětlenosti . . . . .                           | 59         |
| <b>8</b> | <b>Závěr</b>  | <b>61</b>  |
|          | <b>Literatura</b>   | <b>65</b>  |
| <b>A</b> | <b>Manuál k programu ANALYZATOR</b>                                 | <b>I</b>   |
| <b>B</b> | <b>Obsah přiložených souborů</b>                                    | <b>III</b> |



# Kapitola 1

## Úvod

V dnešním stále se zrychlujícím světě jsou nepřetržitě kladeny vyšší požadavky na pracovní činnost, výroba se optimalizuje a je kladen mnohem větší důraz na kvalitu práce a především života. Při současných požadavcích na osvětlení není možné si vystačit jen s přirozeným osvětlením, a proto se navrhuje umělé osvětlení. Většina lidí na planetě se setkává s umělým osvětlením dennodenně při běžném životě. Snaha každého správného zaměstnavatele by mělo být vytvoření adekvátních světelných podmínek na pracovišti, protože světlo působí na člověka nejen po psychické stránce, ale i po stránce fyzické. Optimální variantou je dosažení zrakové pohody, která přispívá k lepšímu pracovnímu výkonu, zvýšení bezpečnosti a hlavně snížení únavy organismu. Při snaze o vytvoření zrakové pohody hraje roli nejen dostatečně výkonný světelný zdroj, závisí to na mnoha dalších aspektech: např. umístění zdroje, barva světla (teplota chromatičnosti), odstín a materiál přilehlých konstrukcí, kvalita ovzduší, apod. Z důvodu těchto skutečností potřebujeme přesnější nástroje pro analýzu daného prostoru, ať už se jedná o vnitřní prostory, jako například obytné místnosti, operační sály, třídy ve školách, kanceláře, výrobní prostory, nebo o venkovní prostory, například veřejné komunikace, sportovní stavby a letištní plochy. Reálné scény představují různorodé prostředí a především nerovnoměrné světelné podmínky, které vyžadují mnohem přesnější návrhy projektantů, účinnější, a hlavně co nejméně energeticky náročné světelné zdroje. Právě energetická náročnost, ať už světelných zdrojů, nebo obecně každého elektrického přístroje je trend posledních pár let. Osvětlovací soustavy tvoří totiž nemalou část v elektrické rozvodné síti a do budoucna musíme více přemýšlet o navyšování elektrické spotřeby osvětlovacích soustav. Díky výše zmíněným skutečnostem jsem si toto téma vybral pro zpracování diplomové práce a doufám, že bude mít přínos pro společnost.

## 1.1 Struktura práce

V kapitole 2 rozebírám teorii osvětlování. Věnuji se zde elektromagnetickému spektru a zaměřuji se především na viditelné světlo v podkapitole 2.1.1 a jeho působení na člověka. Poté v následujících podkapitolách 2.2 a 2.3 rozebírám teoretickou podstatu světla z hlediska světelné techniky, především vymezením technických pojmů, definováním vztahů pro následné výpočty a techniku měření. Následně, v kapitole 3, porovnávám rozdíly mezi senzory s analogovým výstupem a senzory s digitálním výstupem. V kapitole 4 testuji oba dva druhy senzorů osvětlenosti a následně vyhodnocuji výhody jednoho druhu senzorů. Komunikační rozhraní pro směrový jasový analyzátor spolu s charakteristikou komunikace po sběrnici navrhuji v kapitole 5, kde popisuji i implementovaný program pro řídicí jednotku, kterým zpracovávám hodnoty osvětlenosti ze senzorů a poté je ukládám do souboru. V této kapitole rozebírám rovněž podstatu a princip komunikace po sběrnici. Dále v kapitole 6 popisuji realizaci směrového jasového analyzátoru. V poslední kapitole 7 ověřuji naměřená data směrovým jasovým analyzátozem pomocí certifikovaného luxmetru Krochmann. V první části porovnávám hodnoty z měření na fotometrické lavici a v druhé části pak porovnávám hodnoty umístěného analyzátoru a luxmetru do volného prostoru. Na úplný závěr zobrazuji výsledné spočtené vektory osvětlenosti pro analyzátor a pro luxmetr.

# Kapitola 2

## Teorie osvětlování

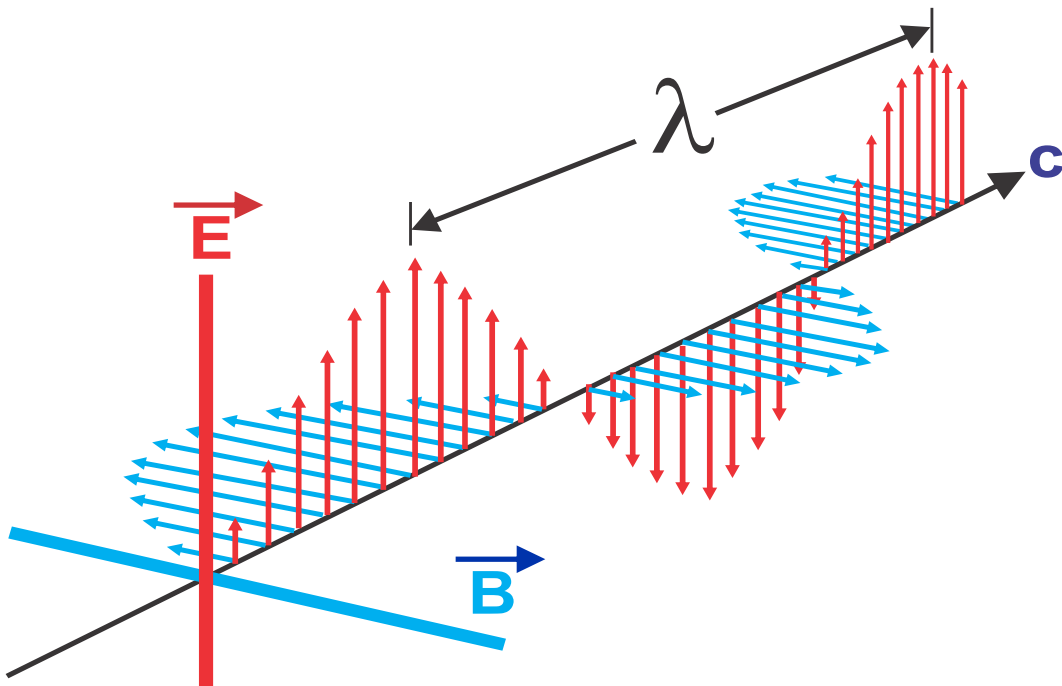
### 2.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření, které často bývá označováno rovnocenným termínem elektromagnetické vlnění, je kombinace příčného a postupného vlnění dvou polí, resp. elektrického a magnetického. [22] Pomocí pohybu těchto dvou polí dochází k přenosu energie ve formě elektromagnetických vln či hmotných částic. Záření vzniká pomocí kmitání částic s elektrickým nábojem. Spektrum zahrnující elektromagnetické vlnění všech vlnových délek se nazývá Maxwellova duha [26].

Během 19. století bylo provedeno několik experimentů v oblasti elektromagnetických vln známými fyziky, jako například Michaellem Faradayem, Andre Amperem, či Wilhelmem Weberem. V důsledku provádění experimentů objevili silný vztah mezi elektřinou a magnetismem. James Clark Maxwell všechny poznatky a výsledky sepsal do knihy s názvem *Treatise on Electricity and Magnetism* (v překladu *Pojednání o elektřině a magnetismu*, vydáno 1873) a uvedl čtyři základní vztahy nesoucí jeho jméno.[27] Pomocí těchto čtyř tzv. Maxwellových rovnic, které představují soustavu lineárních parciálních diferenciálních rovnic prvního řádu zapsaných v diferenciálním nebo integrálním tvaru, jsme schopni popsat pohyb nabitých částic v elektrickém a magnetickém poli a jejich chování v daných polích. Velmi důležitým předpokladem je, že dvojice elektrické a magnetické složky vlny se může šířit společně rychlostí světla (ve vakuu). Maxwellovy rovnice se staly základním pilířem v teorii elektromagnetického pole, jelikož jsou v nich skryty všechny fyzikální zákony, se kterými se můžete setkat v elektřině či magnetismu (Coulombův, Ohmův, Kirchhoffův, Faradayův, atd.) [8][33].

Na obrázku 2.1 vidíme, že každá elektromagnetická vlna má dvě složky, které předsta-

vují jednotlivé vektory. Elektrickou složku (červenou) představuje vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  a magnetickou složku představuje vektor magnetické indukce  $\vec{B}$ . Obě složky oscilují kolmo na směr šíření vlnění, mají souhlasnou fázi a ještě jsou na sebe navzájem kolmé. Tento typ vlnového pohybu se nazývá příčné vlnění a uplatňují se u něj jak vlastnosti vlnové, tj. odraz, lom, interference, difrakce, polarizace, tak i vlastnosti kvantové, tj. fotoelektrický jev. Výhodou tohoto vlnění je fakt, že není nutné médium k šíření prostorem, tudíž se elektromagnetická vlna může volně pohybovat vakuem [8].



Obrázek 2.1: Oscilace složek elektromagnetické vlny šířící se rychlostí světla  $c_0$  ve směru osy  $x$ .  
Zdroj obrázku: [28].

Libovolné záření lze rozložit na složky se sinusovým průběhem, kde každou složku charakterizuje jediná vlnová délka  $\lambda$ , či frekvence  $f$ , a platí pro ni následující vztah [20]:

$$c = \lambda \cdot \nu, \quad (2.1)$$

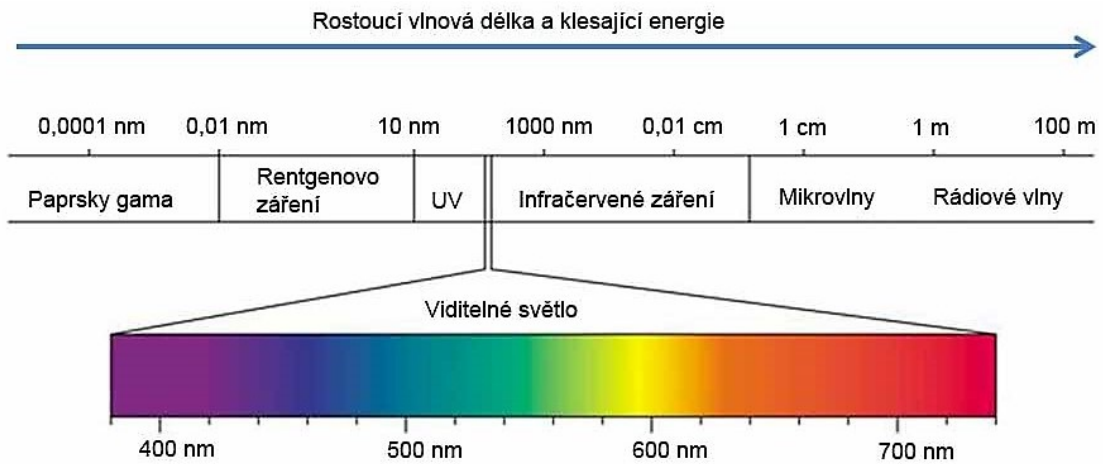
kde:

- $c$  je rychlost šíření [km/s] shodná s rychlostí světla ve vakuu  $c_0 = 299792$  km/s,
- $\lambda$  je vlnová délka [nm],



- $\nu$  je frekvence kmitání [Hz].

Z rovnice 2.1 vyplývá, že záření s vyšší vlnovou délkou má nižší frekvenci a naopak záření s nižší hodnotou vlnové délky má vyšší frekvenci. Záření všech vlnových délek bývá označováno jako elektromagnetické spektrum (viz obrázek 2.2). Naproti tomu pokud záření obsahuje pouze jeden druh vlnové délky, je nazýváno jako monochromatické záření. Podle jednotlivých vlnových délek elektromagnetického vlnění rozlišujeme několik druhů. Jednotlivé hranice nejsou ostře vymezeny. Přejechy jsou plynulé, některé oblasti se dokonce částečně překrývají. Elektromagnetické spektrum obsahuje tyto druhy záření: záření gama, rentgenové záření, ultrafialové záření, viditelné světlo, infračervené záření, mikrovlnné záření a rádiové vlny [20].

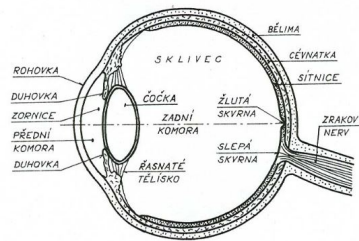


Obrázek 2.2: Elektromagnetické spektrum.

Zdroj obrázku: [23].

### 2.1.1 Viditelné světlo

Viditelné světlo je část elektromagnetického světla nacházející se mezi ultrafialovým a infračerveným zářením, kterou je člověk schopen zaznamenat pomocí svého oka. Lidské oko má rozeznávací schopnost barev světla až 128 tónů s přihlédnutím na určitou toleranci k jedinečnosti každého člověka. Vlnové délky v rozsahu  $\lambda = 380 - 760$  nm, jak můžeme vidět na obrázku 2.3, procházejí nejprve rohovkou, pomocí duhovky je řízena intenzita procházejícího světla, dále prochází čočkou, šíří se sklivcem a dopadají na fotoreceptory (tyčinky a čípky) umístěné na sítnici lidského oka. Ty přenesou informaci pomocí zrakového nervu do mozku, kde dochází k nervovým vzruchům, přenosu do mozkových center vidění a nakonec vzniká zrakový počitek. Výsledkem většího počtu počitků a jejich syntézou vzniká zrakový vjem [20][27][9].



Obrázek 2.3: Složení lidského oka.

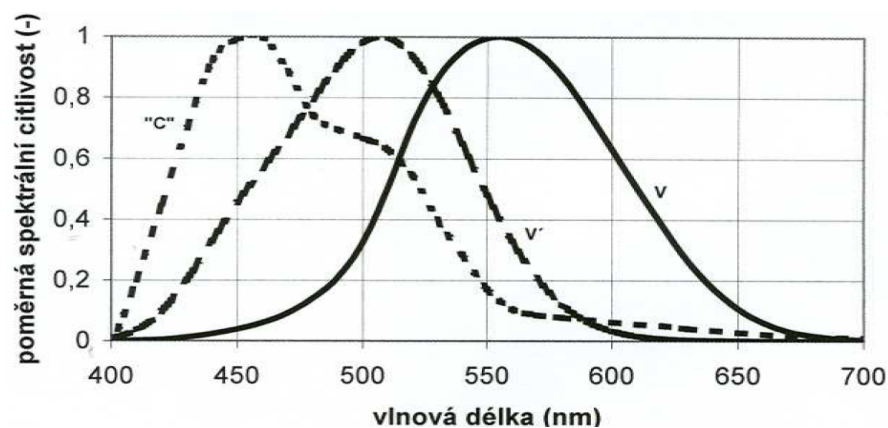
Zdroj obrázku: [20].

Na obrázku 2.2 vidíme rozložení jednotlivých barev (spektra) obsažených právě ve viditelném světle. Na levém kraji viditelného světla se nachází fialová barva s nejkratší vlnovou délkou a na druhém konci, tj. vpravo se nachází barva červená s nejdelší vlnovou délkou.

Světlo samo o sobě je zcela klíčové pro život nejen člověka, ale i pro všechny přírodní organismy. Pomocí světla je například rostlinám poskytována energie k výrobě organických látek během fotosyntézy, bez které by neměly šanci přežít. U člověka zdroj viditelného světla představuje zásadní roli. Ovlivňuje zrakové vnímání a hlavně celkovou duševní pohodu. Pokud má člověk dobré osvětlení, tzv. zrakovou pohodu, napomáhá to k vyšší produktivitě, vyšší bezpečnosti, snazší regeneraci a zpomaluje se proces únavy. Naproti tomu, když jsou špatné světelné podmínky, roste počet chyb, narůstá pravděpodobnost úrazu a zvyšuje se únava jak zraku, tak i celková únava. V další fázi, při špatných podmínkách, dochází ke zhoršení schopnosti soustředění, vzniká stres, zvyšuje se hladina cholesterolu, snižuje se produkce tvorby vitamínů A, D a tím se urychluje

stárnutí organismu. Jak již bylo řečeno výše, světlo pro člověka hraje nepostradatelnou roli v každodenním životě. Právě viditelné světlo řídí biologické pochody v lidském těle pomocí tzv. cirkadiánního (čtyřiaacetihodinového) cyklu, v závislosti na otáčení Země kolem Slunce [20]. Lidské oko je uzpůsobené vnímat světlo, které je přímo závislé na barevném složení dopadajících paprsků. Maximum citlivosti zrakového orgánu odpovídá záření o vlnové délce  $\lambda = 555$  nm představující žlutozelenou barvu. Citlivost lidského oka se výrazně mění během dne (denního světla vs. nočním vidění), jak můžeme vidět na obrázku 2.4. Přes den se člověk nachází v aktivní fázi a v noci zase v klidové fázi. Během těchto fází dochází ke změnám např. v tělesné teplotě, krevnímu tlaku, tepové frekvenci, látkovému metabolismu, imunitní funkci, sexuální funkci, fyzické a duševní aktivitě [24].

Na obrázku 2.4 vidíme průběhy různých křivek spektrálních citlivostí. Citlivost zrakového orgánu, obecně přijímače, k záření o jedné vlnové délce, tzv. monofrekvenčnímu, vyjadřujeme pojmem spektrální citlivost  $s(\lambda)$  [20].



Obrázek 2.4: Poměrná spektrální citlivost cirkadiánního čidla (křivka „C“) zraku v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí očí průměrného člověka při denním (křivka V) a nočním (křivka V') vidění.

Zdroj obrázku: [20].

## 2.2 Světelně technické veličiny a pojmy

Díky faktu, že oko nemůže zaznamenávat informace o přicházejícím světle po určitou dobu, není nutné počítat či znát celkové množství světelné energie, kterou vyzáří dané

zdroje za určitý čas. Důležitý je výkon odpovídající zářivému toku zdrojů distribuovaných do prostoru. Při posuzování kvality osvětlení v oblasti světelné techniky se zabýváme především konečnými důsledky dopadajícího záření na lidské oko. Z tohoto důvodu nejsou tolik důležité veličiny energetické (zářivý tok, zářivost, apod.), ale pracuje se s veličinami fotometrickými. Fotometrické veličiny popisují subjektivní vnímání vizuálního vjemu záření, které se opírá o proměnlivou citlivost oka pozorovatele. Pro zavedení fotometrických veličin je nutné definovat standardního pozorovatele, tzv. normálního fotometrického pozorovatele, který následně definuje referenční hodnoty spektrální citlivosti oka. Jak už bylo konstatováno v podkapitole 2.1.1, zrakový orgán má proměnlivou spektrální citlivost během dne, a proto byly zavedeny standardní citlivosti pro denní světlo, tzv. fotoskopická citlivost a citlivost pro noční vidění, tzv. skotopická citlivost [20][11].

### 2.2.1 Světelný tok

Světelný tok je světelně technická veličina představující množství světelné energie světelného zdroje (zářivého výkonu) vyzářenou do prostoru, resp. vyjadřuje schopnost zářivého toku způsobit zrakový vjem [20].

Značka světelného toku monofrekvenčního záření, resp. záření o jedné vlnové délce je  $\Phi$ , hodnoty jsou vyjadřovány v lumenech [lm] a určí se podle vztahu [20]:

$$\begin{aligned}\Phi(\lambda) &= K(\lambda) \cdot \Phi_c(\lambda) \quad , \\ &= K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_c(\lambda) \quad , \\ &= 683 \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_c(\lambda) \quad ,\end{aligned}\tag{2.2}$$

kde:

- $K(\lambda)$  je světelný účinek monofrekvenčního záření rovný poměru světelného toku  $\Phi$  a odpovídajícího zářivého toku  $\Phi_c$  [20]:

$$K(\lambda) = \frac{\Phi(\lambda)}{\Phi_c(\lambda)} \quad .\tag{2.3}$$

Při fotoskopickém vidění je světelný účinek monofrekvenčního záření  $K(\lambda)$  roven své maximální hodnotě  $K_m(\lambda)$  pro záření tzv. základní vlnové délky  $\lambda_m = 555 \text{ nm}$ . Pro případ normálního fotometrického pozorovatele je možné pracovat s hodnotou  $K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$  [20].

- $V(\lambda)$  je poměrná hodnota světelné účinnosti monofrekvenčního záření, kterou vyjádříme vztahem [20]:

$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_m} = \frac{K(\lambda)}{683} \quad . \quad (2.4)$$

Vzhledem k uvedeným rovnicím můžeme konstatovat, že světelný tok odpovídá zářivému toku zhodnocenému okem normálního fotometrického pozorovatele při denním světle.

### 2.2.2 Prostorový úhel

Důležitým pojmem a zároveň veličinou v oblasti světelné techniky je prostorový úhel. Velikost prostorového úhlu je dána velikostí plochy, vyřaté obecnou kuželovou plochou na povrch jednotkové koule, jejíž střed (vrchol prost. úhlu) je shodný s vrcholem uvažované kuželové plochy [20].

Prostorový úhel se značí  $\Omega$  a základní jednotkou je steradián [sr], který je určen jednotkovou plochou ( $1 \text{ m}^2$ ). Velikost prostorového úhlu, pod kterým je ze středu koule o poloměru  $r$  vidět plocha  $A_k$  vyřatá na povrchu koule, vypočítáme podle vztahu [20]:

$$\Omega = \frac{A_k}{r^2} \quad . \quad (2.5)$$

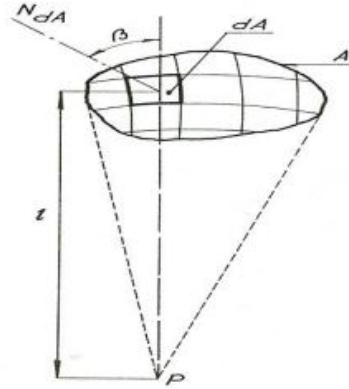
Prostorový úhel může nabývat hodnot maximálně  $\Omega_{max} = 4 \pi$ , které značí plochu  $A_k$  rovnou povrchu celé koule, tj.  $A_k = 4 \pi r^2$ .

Pokud pozorujeme obecnou plochu  $A$  ze vzdálenosti  $l$  z bodu  $P$ , pak prostorový úhel  $d\Omega$  vypočteme podle následujícího vztahu [20]:

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos\beta}{l^2} \quad , \quad (2.6)$$

kde:

- $dA$  je elementární plocha [ $\text{m}^2$ ],
- $\beta$  je úhel, který svírá osa prostorového úhlu  $d\Omega$ , tj. paprskem  $l$ , s normálou  $N_{dA}$  elementární plochy  $dA$  [rad].



Obrázek 2.5: Zobrazení schématického náčrtku pro výpočet prostorového úhlu  $d\Omega$ .

Zdroj obrázku: [20].

Výslednou plochu  $A$  můžeme spatřit z bodu  $P$  pod prostorovým úhlem  $\Omega$ , který získáme součtem všech elementárních prostorových úhlů z bodu  $P$  (viz obrázek 2.5), ze kterých jsme schopni spatřit všechny elementární plochy  $dA$ . Matematicky vyjádřeno [20]:

$$\Omega = \iint_A \frac{\cos\beta}{l^2} dA \quad . \quad (2.7)$$

### 2.2.3 Svítivost

Svítivost je základní fotometrická veličina vyjadřující prostorovou hustotu světelného toku v různých směrech. Je možné ji stanovit pouze pro bodový zdroj, tj. jehož rozměry jsou prakticky zanedbatelné v porovnání se vzdáleností zdroje od kontrolního bodu.

Základní jednotkou svítivosti  $I$  je jedna kandela [cd], která patří mezi základní jednotky SI. Pro představu jedné kandelu můžeme použít obyčejnou svíčku, jejíž svítivost se přibližně rovná právě jedné kandelu. Pro svítivost  $I$  bodového zdroje ve směrech  $\gamma$  a  $\zeta$  platí následující vztah [20]:

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad , \quad (2.8)$$

kde:

- $d\Phi$  je element světelného toku zdroje, který vyzařuje do prostorového úhlu  $d\Omega_{\gamma\zeta}$  [lm],
- $d\Omega_{\gamma\zeta}$  je prostorový úhel, jehož osa leží ve směru určeném úhly  $\gamma, \zeta$  [sr].

### 2.2.4 Osvětlenost

Osvětlenost, nebo-li intenzita osvětlení, je světelně technická veličina vyjadřující podíl světelného toku  $d\Phi$  a elementem plochy  $dA$ . Určitě ze života víme, že pokud světelný zdroj vzdalují od místa, tak dochází k rychlému poklesu právě intenzity osvětlení vzhledem k narůstající vzdálenosti světelného zdroje. Intenzitu osvětlení značí se  $E$  s jednotkou jeden lux [lx], můžeme matematicky zapsat ve tvaru [20]:

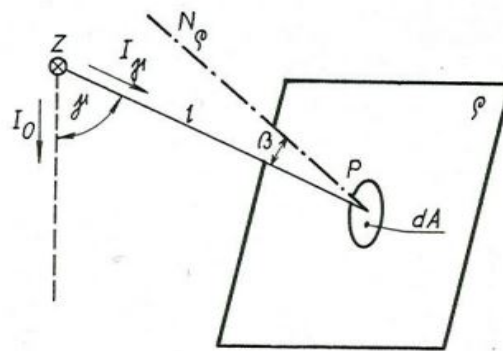
$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad . \quad (2.9)$$

Pokud plošku  $dA$  (viz obrázek 2.6), která je okolím bodu P v rovině  $\rho$ , osvětluje bodovým zdrojem Z ze vzdálenosti  $l$ , a pokud normála  $N_\rho$  roviny  $\rho$  svírá úhel  $\beta$  s paprskem  $l$ , můžeme pomocí rovnic 2.6, 2.8 a 2.9 odvodit nový vztah pro osvětlenost  $E_{P\rho}$  v bodě P roviny  $\rho$  za předpokladu přítomnosti bodového zdroje ve tvaru [20]:

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos \beta \quad , \quad (2.10)$$

kde:

- $I_\gamma$  je svítivost bod. zdroje, který má směr paprsku  $l$ , což odpovídá směru pod úhlem  $\gamma$  od předem zvoleného směru vztažné svítivosti  $I_0$ .



Obrázek 2.6: Zobrazení schématického náčrtku pro výpočet osvětlenosti

$E_{P\rho}$ .

Zdroj obrázku: [20].

S intenzitou osvětlení souvisí ještě jeden důležitý pojem, který nazýváme tzv. normálová osvětlenost  $E_N$ . Jak si můžeme všimnout, osvětlenost bodovým zdrojem je přímo úměrná kosinu úhlu  $\beta$  dopadu paprsků (Lambertův kosinusový zákon) a nepřímo úměrná

kvadrátu vzdálenosti (zákon čtverce vzdálenosti) osvětlované plochy od bodového zdroje. Maximum osvětlenosti elementární plochy  $dA$  ve směru  $N_\rho$  (za předpokladu  $dA \perp l$  a úhel  $\beta = 0$ ) nazýváme právě normálovou osvětleností, pro kterou platí následující vztah [20]:

$$\begin{aligned} E_{P\rho,\beta=0} &= E_N \longrightarrow \\ E_N &= \frac{I_\gamma}{l^2} . \end{aligned} \quad (2.11)$$

Z uvedené rovnice je patrné, že osvětlenost je funkcí orientovaného směru.

S intenzitou osvětlení nejčastěji přijdeme do styku při návrhu osvětlení do vnitřních prostor. Z normy [2] pro osvětlení vnitřních prostor vyplývají určitá kritéria, resp. minimální hodnoty osvětlenosti pro různá místa, např. pro kanceláře, nemocnice, školy, školky, komunikační zóny, veřejné prostory, apod. Pro představu - pro dobré rozlišení lidského obličeje je nutná hodnota osvětlenosti srovnávací roviny 200 lx, kde srovnávací rovina je dána místem zřakového úkolu a může být vodorovná, svislá nebo nakloněná. [20].

### 2.2.5 Jas svazku světelných paprsků

Jas světelných paprsků je definován jako měrná veličina svítivosti, která se udává v jednotkách zvaných kandely na metr čtverečný [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]. Pokud svazek paprsků prochází dvěma otvory  $dA_1$  a  $dA_2$  (viz obrázek 2.7), které jsou volně umístěny na stínítkách  $A_1$  a  $A_2$ , pak vypočteme výsledný jas  $L_{OP}$  svazku paprsků ve směru osy OP podle vztahu [20]:

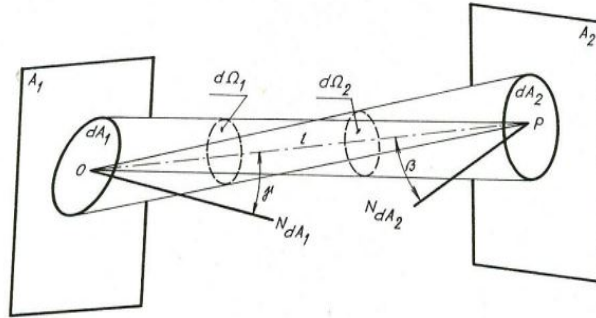
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_n} , \quad (2.12)$$

kde:

- $d^2\Phi$  je plošná hustota světelného toku [ $\text{lm}$ ],
- $(d\Omega \cdot dA_n)$  je prostorová hustota světelného toku [ $\text{sr} \cdot \text{m}^2$ ].

U rovnice 2.12 vycházíme z několika předpokladů. Za prvé, prostředí, kudy svazek paprsků prochází, musí být homogenní, nerozptylující a nepohlcující. Za druhé, vzdálenost mezi stínítky musí výrazně převyšovat rozměry otvorů  $dA_1$  a  $dA_2$  na stínítkách, a proto můžeme vlastní rozměry otvorů zanedbat.



Obrázek 2.7: Zobrazení schématického náčrtku pro výpočet jasu  $L_{OP}$ .

Zdroj obrázku: [20].

Při výpočtu jasu svazku světelných paprsků se můžeme setkat s dvěma základními případy, tj. jas svazku paprsků, které se sbíhají v prostorovém úhlu nebo jas svazku paprsků, které se rozbíhají v prostorovém úhlu. Pak dojde k jisté úpravě rovnice 2.12. Pro první případ, tj. jas sbíhajících se paprsků, dostaneme vztah 2.13 [20] a pro druhý případ jasu rozbíhajících se paprsků dostaneme vztah 2.14 [20]:

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad , \quad (2.13)$$

$$L_{OP} = L_\gamma = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 \cdot dA_2 \cdot \cos \gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cdot \cos \gamma} \quad , \quad (2.14)$$

kde:

- $d\Omega_1$  je prostorový úhel z plochy  $dA_1$  pro paprsky sbíhající se do bodu P [sr],
- $dE_N$  je tzv. normálová osvětlenost nebo-li osvětlenost průměru plochy  $dA_2$  do roviny kolmé k paprsku  $l$  [lm],
- $d\Omega_2$  je prostorový úhel rozbíhajících se paprsků z bodu O [sr].

Jas je veličina, se kterou velice rychle interaguje lidské oko. Člověk vnímá změny jasu v prostředí jak v závislosti na jeho postavení vůči zdroji a odražených paprsků, tak i na úhlu jeho pohledu, na tzv. orientovaném směru [20].

## 2.3 Integrální charakteristiky světelného pole

K popisu světelného pole si můžeme vybrat mezi několika nástroji, které nám poskytnou určitou zprávu o vlastnostech zkoumaného pole. Každá metoda má své výhody a zároveň jisté nevýhody pro daný typ měření. Jedním z nástrojů na popis světelného pole jsou tzv. fotometrické plochy, díky kterým získáme informace o rozložení jasu či osvětlenosti v rámci celého pole. Dalším nástrojem je světelný vektor (popsán v podkapitole 2.3.2). Poslední zmíněnou metodou jsou skalární integrální charakteristiky [20].

Skalární integrální charakteristiky vystihují určité prostorové vlastnosti světelného pole v daném bodě souhrnně (integrálně) jedinou hodnotou, a proto se nazývají integrální charakteristiky světelného pole. Mezi tyto charakteristiky můžeme zařadit světelný vektor, střední kulovou osvětlenost, střední krychlovou osvětlenost, střední válcovou osvětlenost, střední polokulovou osvětlenost a střední poloválcovou osvětlenost [20].

### 2.3.1 Světelné pole

Termínem světelné pole rozumíme část světelného prostoru, ve kterém probíhá určitý světelný děj, resp. přenos světelné energie. Ve světelném poli nezkoumáme podstatu záření, vznik záření či elektrické a magnetické síly, ale zajímají nás rozdělené toky energie v definovaných časových intervalech za předpokladu plynulé změny veličiny světelného toku mezi definovanými body světelného pole [20].

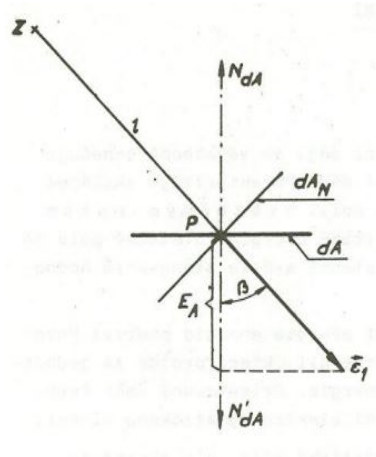
### 2.3.2 Světelný vektor

Světelný vektor je analogií k Poyntingově vektoru, se kterým se setkáváme v oblasti elektromagnetického pole a pomocí něj posuzujeme přenos energie právě v elektromagnetickém poli [8]. Ve světelném poli je nahrazen světelným vektorem, který určuje měrný výkon přenosu světelné energie. Velikost vektoru je určena rozdílem normálových osvětleností jedné a druhé strany plochy umístěné v daném bodě kolmo na směr šíření záření nebo-li je určena energií prošlou jednotkovou plochou kolmou na směr šíření záření za jednotku času. Výsledný orientovaný směr vektoru odpovídá směru přenosu světelné energie v daném bodě (shodný se směrem paprsku  $l$ , s orientací od zdroje Z k bodu P, viz obrázek 2.9). Matematicky světelný vektor  $\vec{\epsilon}_1$  vyjádříme pomocí vztahu 2.15 [20]:

$$\vec{\epsilon} = \int_0^{4\pi} L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta} \quad , \quad (2.15)$$

kde:

- $L_{\vartheta\zeta}$  je jas [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ],
- $d\Omega_{\vartheta\zeta}$  je prostorový úhel [sr],
- $L_{\vartheta\zeta} \cdot d\Omega_{\vartheta\zeta}$  je normálová osvětlenost [lx].



Obrázek 2.8: Zobrazení schématického náčrtku pro výpočet světelného vektoru  $\vec{\epsilon}_1$ .

Zdroj obrázku: [20].

Pokud se světelný vektor nachází v prostoru o několika světelných zdrojích, pak je v každém bodě definován vektorovým součtem jednotlivých světelných vektorů, které charakterizují pole každého ze světelných zdrojů v daném bodě. Pokud nastane situace, že světelné paprsky ze zdrojů dopadají pouze na jednu stranu určitého povrchu v daném bodě pole, pak je průmět světelného vektoru do normály v daném bodě k uvažovanému povrchu roven přímo hodnotě osvětlenosti daného povrchu v okolí bodu [20].

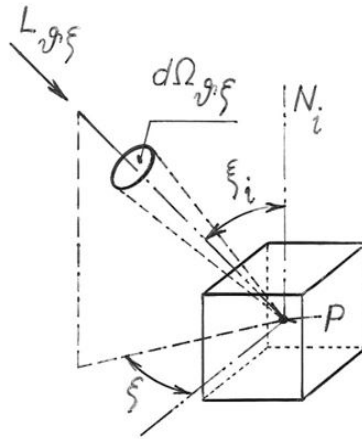
Z obecné rovnice 2.15 světelného vektoru vyplývá, že světelný vektor je určen integrací jasů všech světelných zdrojů v prostoru a tudíž analyzátor pro výpočet světelného vektoru je vlastně směrovým jasovým analyzátozem.

### 2.3.3 Střední krychlová osvětlenost

Střední krychlovou osvětleností  $E_{06}$  rozumíme střední hodnotu osvětlenosti šesti stěn modelové krychle, kterou jsem realizoval v této rámci této diplomové práce a je dále popsána v kapitole 6. Matematicky vyjádřenou střední krychlovou osvětlenost získáme pomocí obecného vztahu 2.16 nebo konkrétně pro krychli 2.17 [20]:

$$E_{06} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \left[ \int_0^{2\pi} \cos \xi_i \cdot L_{\vartheta\xi} \cdot d\Omega_{\vartheta\xi} \right] , \quad (2.16)$$

$$E_{06} = \frac{1}{6} (E_{+x} + E_{-x} + E_{+y} + E_{-y} + E_{+z} + E_{-z}) , \quad (2.17)$$



Obrázek 2.9: Zobrazení schématického náčrtku pro výpočet světelného vektoru  $\vec{\epsilon}_1$ .

Zdroj obrázku: [20].

# Kapitola 3

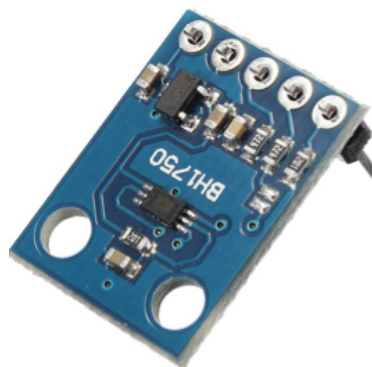
## Senzory

Senzor je dle definice zařízení, modul nebo podsystém, jehož účelem je detekovat nějakou událost či změnu ve svém prostředí, reagovat na ni a přeposílat zaznamenané události další elektronice.[4] Nejčastěji je přenášena informace v podobě nějakého elektrického signálu, který ji zpracovává dále v řídicím systému. Senzory jsou zapojovány jako vstupy řídicího systému. Obecné provedení snímačů můžeme rozdělit do tří částí. První část, vstupní, obsahuje většinou nějakou formu ochrany před nežádoucími vlivy, např. pouzdro a samozřejmě snímací část (čidlo). V další části, vnitřní, je zabudována elektronika pro zpracování a úpravu signálu (zesilovače, převodníky). Ve třetí části najdeme rozhraní pro připojení a přenos dat do řídicího systému v podobě připojeného kabelu, nebo v bezdrátové variantě formou např. WI-FI, Bluetooth. Senzory můžeme rozdělit podle mnoha kritérií, např. podle měřené veličiny, způsobu přenosu informace, média sloužícímu k přenosu, principu měření, průběhu výstupního měření, apod. V této diplomové práci se věnuji dvěma skupinám sensorů, a to sensorům s analogovým výstupem a sensorům s digitálním výstupem. [19][32][17]



Obrázek 3.1: Senzor Panasonic AMS302.

Zdroj obrázku: [31].



Obrázek 3.2: Senzor Ambient BH1750.

Zdroj obrázku: [6].

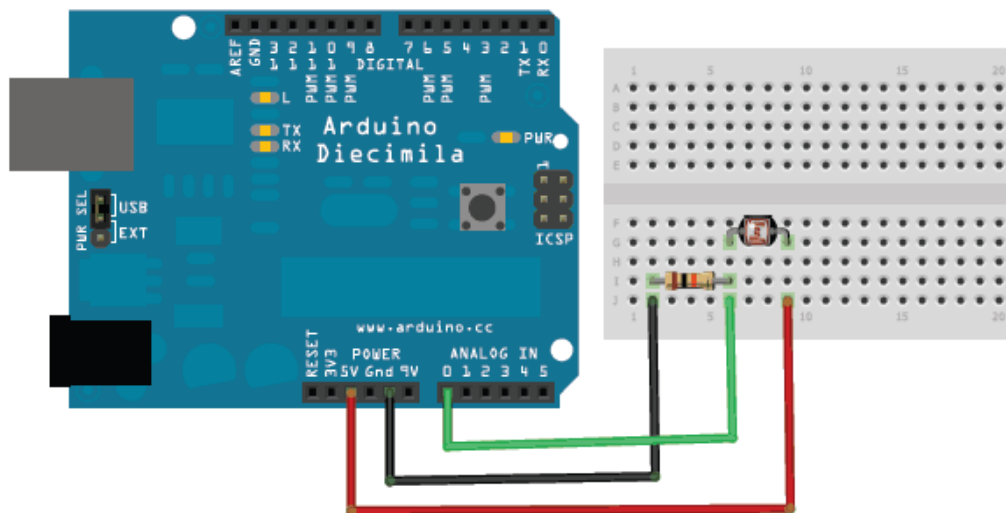
Se senzory přicházíme do styku každý den, např. při odchodu z domova v provedení senzoru pohybu v garáži, zavírání dveří u výtahu, či senzoru tlaku umístěného také ve výtahu kvůli přetížení, při regulaci osvětlení na lampičce v podobě dotykového senzoru, při měření teploměrem jakožto senzorem teploty a mnoho dalších. Největší koncentraci senzorů na jednom místě najdeme ve výrobním průmyslu, tj. v továrnách, výrobních linkách a v dopravě, tj. v letadlech, autech, raketách, dále pak v medicíně, robotice, atd. Tato malá zařízení hrají nepostradatelnou roli v oblasti automatizace, kde představují zpětnou vazbu pro vyhodnocení aktuálního stavu systému a následného řízení. [16]

### 3.1 Senzory s analogovým výstupem

Snímače s analogovým výstupem se řadí mezi tzv. vícestavové, tj. výstupní signál může mít více než dvě hodnoty. Analogovým výstupem se přenáší informace zpravidla pomocí úrovně napětí či proudu, která je spojitá v čase (spojitost v amplitudě -> spojitý signál).[30] Klasickým příkladem je standardizovaná komunikace RS485 a jeho masové využití v průmyslových aplikacích. Největší výhodou analogového signálu je rychlost přenosu, jelikož rychlost signálu v kabelu se blíží rychlosti světla. Bohužel tento způsob přenosu informace je poměrně zastaralý. Dříve se využíval především z hlediska ceny, ale díky rozšíření digitálních senzorů tento aspekt upadl. Jednou ze zásadních nevýhod analogového signálu je náchylnost k rušení od okolních signálů, impedančnímu nepřizpůsobení a parametrům kabelu. Přesto existují určité situace, kdy je mnohem vhodnější použít analogový přenos. Jednou ze situací je oblast automatizace, kde optimální varianta řešení by měla být nejjednodušší, nejpřesnější a zároveň nejspolehlivější. A to analogové

řešení může přinést. [17] [30]

V této diplomové práci jsem testoval senzor Panasonic AMS302, jakožto zástupce skupiny senzorů s analogovým výstupem. Důvodem zvolení senzoru AMS302 byla vysoká citlivost snímače a hlavně spektrální citlivost optického filtru, která je velice podobná spektrální citlivosti lidského oka. Fotočlánky (s křemíkovými čipy) umístěné v senzoru mají lineární výstup úměrný osvětlení v prostoru. [13] Pomocí vyhodnocovacího modulu Arduino UNO byly změřeny jednotlivé charakteristiky (viz. podkapitola 4). Zapojení bylo realizováno přes nepájivé pole (viz. obrázek 3.3) dle schématu obsaženého v datasheetu senzoru AMS302. [17]



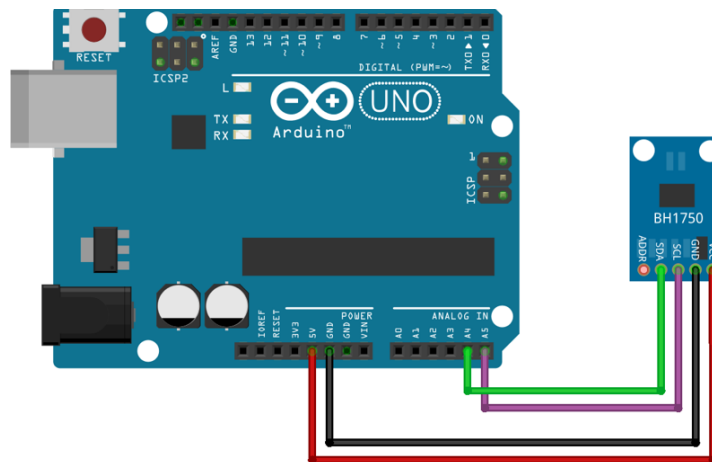
Obrázek 3.3: Schéma zapojení senzoru Panasonic AMS 302 k modulu Arduino Uno.

## 3.2 Senzory s digitálním výstupem

Senzory s digitálním výstupem spadají do kategorie dvoustavových snímačů, tzn. mají dvouúrovňový výstup (binární). Předávají informaci pouze o tom, zda snímaná veličina je pod nebo nad nastavenou úrovní. Rozdílem oproti analogového výstupu je nespojitý výstup v čase. Jedná se o tzv. diskretní signál, který může být dvojího typu. Prvním typem je vzorkovaný signál, tj. přicházející signál tvoří posloupnost vzorků, které nabývají libovolné hodnoty. Tento signál vzniká většinou vzorkováním analogového signálu za

předpokladu dodržení tzv. Shannonova teorému, aby nedocházelo k aliasingu, apod. [30] V případě druhého typu mluvíme o tzv. kvantovaném signálu, který se mění skokově a nabývá určitého počtu úrovní. Ve většině případů ho dosáhneme pomocí kvantováním analogového signálu A/D převodníkem. V praxi se setkáme s digitálním signálem, který je kombinací obou typů. Příkladem digitálního přenosu může být standard digitálního televizního vysílání DVB-T. Největší výhodou oproti analogovému signálu je odolnost vůči rušení a jednoduchost zpracování na počítačích. Pro reprezentaci informace se používá binární systém (0 a 1) a z tohoto důvodu je přenos dat spolehlivější a přesnější.[7]

Ze skupiny senzorů s digitálním výstupem jsem vybral pro následné testování senzor Ambient BH1750 (viz 3.1), který má snadné použití. Tento senzor komunikuje přes rozhraní  $I^2C$  a převádí naměřenou intenzitu světla na digitální výstup ve formě číselné hodnoty. Tato hodnota je udávána přímo v jednotce osvětlení (luxech) a může nabývat rozsahu 1 až 65535 [12]. Jako vyhodnocovací modul byl použit modul Arduino UNO spolu s knihovnamy určenými pro senzor BH1750. Princip zapojení vidíme na obrázku 3.4. [17]



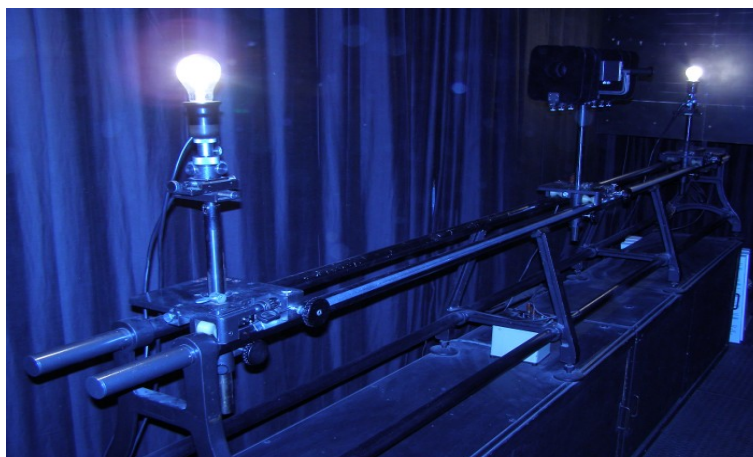
Obrázek 3.4: Princip zapojení senzoru Ambient BH1750 k modulu Arduino Uno.



# Kapitola 4

## Testování senzorů

Jednotlivé testování senzorů a měření charakteristik probíhalo v laboratoři světelné techniky na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Dejvicích na fotometrické lavici. Fotometrická lavice je laboratorní přístroj sloužící ke kalibraci přístrojů a měření optických veličin, zejména k měření svítivosti. Lavice je tvořena vodícími ocelovými tyčemi, na nichž se pohybují posuvné vozíky. Na vozíky můžeme umístit světelný zdroj (normál), senzor, clony, čočky, apod. Délka lavice v Dejvicích je 300 cm. Z boku vodící tyče je lavice opatřena rytou stupnicí pro odečítání přesné vzdálenosti. Komora, kde se nachází fotometrická lavice, obsahuje mnoho černých clon se sametově černým povrchem, aby se minimalizoval dopad cizího záření na senzor [17].



Obrázek 4.1: Fotometrická lavice v laboratoři G1-21a na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Dejvicích.

Zdroj obrázku: [29].

## 4.1 Měření svítivosti

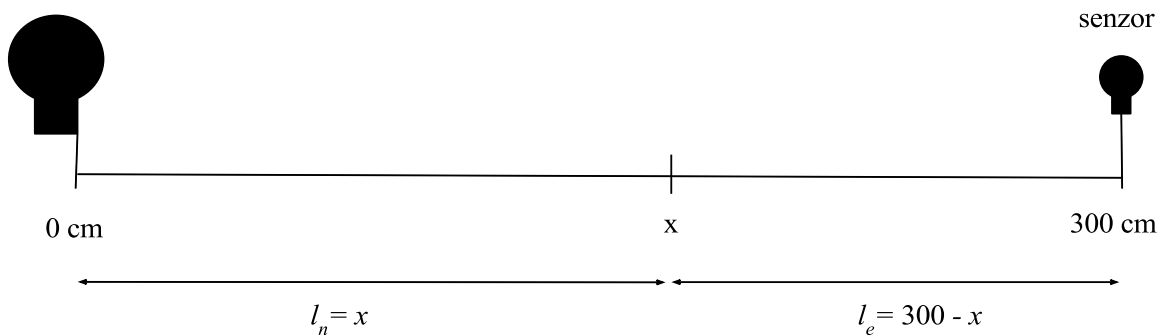
Princip měření svítivosti, naznačeného na obrázku 4.2, je založen na umístění normalu a senzoru do optické osy. V prvním kroku jsem měřil osvětlenost pomocí oceňovaného luxmetru, typ PRC Krochmann Radiolux 111. Luxmetr, který se skládá z fotočlánku, měřicího a vyhodnocovacího systému, měří fotoproud závislý na principu samotného fotočlánku. Z přístroje odečítáme hodnoty osvětlenosti  $E$ , zvané *luxy* [lx]. V celé práci bylo uvažováno s korekčním činitelem, viz kapitola 7. Jestliže známe přesnou vzdálenost  $r$  mezi zdrojem světla a luxmetrem, za předpokladu kolmého dopadu světla na luxmetr, platí pro svítivost  $I_0$  následující vztah 4.1 a pro případ variabilního úhlu dopadu světla na luxmetr platí pro svítivost  $I_\gamma$  vztah [20]:

$$I_0 = E \cdot r^2, \quad (4.1)$$

$$I_\gamma = I_0 \cdot \cos \gamma, \quad (4.2)$$

kde:

- $I_0$  je svítivost ve vztázném směru, tzn. při kolmém dopadu paprsků na senzor ( $\gamma = 0^\circ$ ) [cd],
- $I_\gamma$  je svítivost při daném úhlu natočení senzoru [cd],
- $\gamma$  je úhel natočení senzoru vzhledem k normalu [ $^\circ$ ].
- $E$  je osvětlenost [lx],
- $r = x$  je vzdálenost [m].



Obrázek 4.2: Schéma fotometrické lavice na měření svítivosti.

## 4.2 Tabulky naměřených hodnot

### 4.2.1 Tabulka naměřených hodnot normalu

Tabulka 4.1: Hodnoty normálu, tj. zdroje světla.

| jednotka   | hodnota       |
|------------|---------------|
| $U_n$ [V]  | 230           |
| $I_0$ [cd] | $429 \pm 4\%$ |
| $T_c$ [K]  | 3000          |
| $P$ [W]    | 205           |

Tabulka 4.2: Naměřené hodnoty luxmetrem Krochmann a vypočtené hodnoty svítivosti.

| měření 1      | měření 2      | prům. osvětlenost | vzdálenost | svítivost  |
|---------------|---------------|-------------------|------------|------------|
| $E_{1n}$ [lx] | $E_{2n}$ [lx] | $E_{avg_n}$ [lx]  | $r$ [m]    | $I_n$ [cd] |
| 53,3          | 52,6          | 52,95             | 3,00       | 476,55     |
| 62,7          | 62,7          | 62,70             | 2,75       | 474,17     |
| 75,5          | 75,9          | 75,70             | 2,50       | 473,13     |
| 92,0          | 93,2          | 92,60             | 2,25       | 468,79     |
| 116,4         | 115,3         | 115,85            | 2,00       | 463,40     |
| 147,5         | 150,3         | 148,90            | 1,75       | 456,01     |
| 198,7         | 200,1         | 199,40            | 1,50       | 448,65     |
| 283,5         | 286,9         | 285,20            | 1,25       | 445,65     |
| 437,1         | 439,0         | 438,05            | 1,00       | 438,05     |
| 756,6         | 769,2         | 762,90            | 0,75       | 429,13     |
| 1697,0        | 1694,0        | 1695,50           | 0,50       | 423,88     |

### 4.2.2 Tabulka naměřených hodnot analogovým senzorem AMS 302

Následující hodnoty napětí  $U_n$  z jednotlivých analogových senzorů (5-ti senzorů) v tabulce 4.3, 4.4, 4.5, představují průměrnou hodnotu ze 30 hodnot napětí v dané vzdálenosti od normalu na fotometrické lavici vzhledem k velkému rozptylu. Výsledná osvětlenost  $E_n$  byla získána následujícím vztahem:

$$E_n = \frac{95}{247} \cdot i = \frac{95}{247} \cdot \frac{U_n}{R}, \quad (4.3)$$

kde:

- $U_n$  je výstupní napětí senzoru AMS302,
- $R$  je odpor použitý při zapojení, v našem případě  $R = 220\Omega$ ,
- $\frac{95}{247}$  je směrnice přímky vypočtená z obrázku udávající závislost osvětlenosti na proudu obsaženém v datasheetu AMS302.

Tabulka 4.3: Naměřené hodnoty napětí  $U$  a vypočtené hodnoty osvětlenosti  $E$  senzory AMS302 (1, 2, 3) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| $r$ [m] | $U_{1a}$ [V] | $E_{1a}$ [lx] | $U_{2a}$ [V] | $E_{2a}$ [lx] | $U_{3a}$ [V] | $E_{3a}$ [lx] |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,50    | 1,53         | 2828          | 1,58         | 2734          | 1,57         | 2879          |
| 0,75    | 0,72         | 1307          | 0,72         | 1290          | 0,72         | 1230          |
| 1,00    | 0,42         | 683           | 0,42         | 718           | 0,42         | 734           |
| 1,25    | 0,27         | 455           | 0,26         | 462           | 0,27         | 472           |
| 1,50    | 0,18         | 314           | 0,18         | 321           | 0,19         | 331           |
| 1,75    | 0,13         | 232           | 0,13         | 236           | 0,14         | 244           |
| 2,00    | 0,11         | 177           | 0,10         | 176           | 0,10         | 183           |
| 2,25    | 0,08         | 139           | 0,08         | 140           | 0,08         | 146           |
| 2,50    | 0,06         | 108           | 0,06         | 110           | 0,07         | 115           |
| 2,75    | 0,05         | 89            | 0,05         | 92            | 0,05         | 94            |
| 3,00    | 0,04         | 76            | 0,04         | 73            | 0,04         | 77            |

Tabulka 4.4: Naměřené hodnoty napětí  $U$  a vypoč. hodnoty osvětlenosti  $E$  senzoru AMS302 (4,5) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| $r$ [m] | $U_{4a}$ [V] | $E_{4a}$ [lx] | $U_{5a}$ [V] | $E_{5a}$ [lx] |
|---------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,50    | 1,79         | 3076          | 1,72         | 3170          |
| 0,75    | 0,82         | 1332          | 0,91         | 1503          |
| 1,00    | 0,45         | 786           | 0,46         | 771           |
| 1,25    | 0,29         | 491           | 0,30         | 531           |
| 1,50    | 0,21         | 339           | 0,19         | 332           |
| 1,75    | 0,14         | 246           | 0,14         | 242           |
| 2,00    | 0,11         | 185           | 0,11         | 189           |
| 2,25    | 0,08         | 146           | 0,09         | 151           |
| 2,50    | 0,07         | 116           | 0,07         | 116           |
| 2,75    | 0,06         | 95            | 0,05         | 94            |
| 3,00    | 0,05         | 77            | 0,05         | 77            |

Tabulka 4.5: Naměřené hodnoty napětí  $U$  a vypoč. hodnoty osvětlenosti  $E$  senzoru AMS302 v závislosti na úhlu natočení senzoru.

| $\phi$ [°] | $U_{1ac}$ [V] | $E_{1ac}$ [lx] | $U_{2ac}$ [V] | $E_{2ac}$ [lx] |
|------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| 0          | 0,43          | 758            | 0,11          | 188            |
| 15         | 0,46          | 810            | 0,12          | 197            |
| 30         | 0,50          | 869            | 0,12          | 216            |
| 45         | 0,41          | 724            | 0,10          | 184            |
| 60         | 0,38          | 660            | 0,05          | 81             |
| 75         | 0,28          | 492            | 0,07          | 127            |
| 90         | 0,11          | 193            | 0,03          | 44             |

Hodnoty v tabulce 4.5  $U_{1ac}$  představují napětí senzoru ve vzdálenosti 1,00 m od normalu, hodnoty  $U_{2ac}$  ve vzdálenosti 2,00 m. Obdobně hodnoty  $E_{1ac}$  jsou vypočtené hodnoty osvětlenosti ve vzdálenosti 1,00 m a  $E_{2ac}$  pro vzdálenost 2,00 m. Velikostí úhlu  $\phi$  určujeme míru natočení vzhledem k normalu. Úhel  $0^\circ$  nastává, když je senzor natočený přímo proti normalu a světelné paprsky dopadají kolmo na plochu senzoru.

### 4.2.3 Tabulka naměřených hodnot digitálního senzoru BH1750

Tabulka 4.6: Naměřené hodnoty osvětlenosti senzorem BH1750.

| $r$ [m] | $E_{1b}$ [lx] | $E_{2b}$ [lx] | $E_{3b}$ [lx] | $E_{4b}$ [lx] | $E_{5b}$ [lx] | $E_{avgb}$ [lx] |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| 0,50    | 1881          | 1896          | 1874          | 1879          | 1889          | 1883            |
| 0,75    | 855           | 848           | 840           | 853           | 984           | 876             |
| 1,00    | 477           | 485           | 484           | 789           | 491           | 545             |
| 1,25    | 312           | 314           | 315           | 315           | 340           | 319             |
| 1,50    | 223           | 223           | 224           | 223           | 219           | 222             |
| 1,75    | 164           | 165           | 165           | 165           | 166           | 165             |
| 2,00    | 128           | 127           | 128           | 128           | 130           | 128             |
| 2,25    | 103           | 103           | 104           | 103           | 107           | 104             |
| 2,50    | 81            | 84            | 85            | 84            | 84            | 83              |
| 2,75    | 69            | 70            | 70            | 70            | 71            | 70              |
| 3,00    | 61            | 62            | 60            | 61            | 61            | 61              |

Tabulka 4.7: Naměřené hodnoty napětí  $U$  a vypočtené hodnoty osvětlenosti  $E$  senzorem BH1750 v závislosti na úhlu natočení senzoru.

| $\phi$ [°] | $E_{1bc}$ [lx] | $E_{2bc}$ [lx] |
|------------|----------------|----------------|
| 0          | 482            | 130            |
| 15         | 445            | 119            |
| 30         | 360            | 99             |
| 45         | 266            | 65             |
| 60         | 134            | 39             |
| 75         | 40             | 12             |
| 90         | 7              | 1              |

## 4.3 Tabulky vypočtených hodnot senzorů

### 4.3.1 Tabulky vypočtených hodnot svítivosti analog. senzoru AMS302.

Tabulka 4.8: Vypočtené hodnoty svítivosti  $I$  a vypočtené procentuální odchylky od luxmetru Krochmann  $\rightarrow \Delta$  pro senzory AMS302 (1, 2, 3) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| $r$ [m] | $I_{1a}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{2a}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{3a}$ [m] | $\Delta$ [%] |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,50    | 707,24       | 66,79        | 683,15       | 61,25        | 719,75       | 69,80        |
| 0,75    | 735,18       | 71,31        | 725,62       | 69,09        | 691,87       | 61,22        |
| 1,00    | 683,00       | 55,91        | 718,00       | 63,90        | 734,00       | 67,56        |
| 1,25    | 710,93       | 59,53        | 721,87       | 61,99        | 737,50       | 65,49        |
| 1,50    | 706,50       | 57,47        | 722,25       | 60,98        | 744,75       | 65,99        |
| 1,75    | 710,50       | 55,80        | 722,75       | 58,49        | 747,25       | 63,86        |
| 2,00    | 708,00       | 52,78        | 704,00       | 51,92        | 732,00       | 57,96        |
| 2,25    | 703,68       | 50,10        | 708,75       | 51,18        | 739,12       | 57,66        |
| 2,50    | 675,00       | 42,66        | 687,50       | 45,31        | 718,75       | 51,91        |
| 2,75    | 673,06       | 41,94        | 695,75       | 46,73        | 710,87       | 49,92        |
| 3,00    | 684,00       | 43,53        | 665,10       | 39,56        | 693,00       | 45,42        |

Tabulka 4.9: Vypočtené hodnoty svítivosti  $I$  a vypočtené procentuální odchylky od luxmetru Krochmann  $\rightarrow \Delta$  pro senzory AMS302 (4, 5) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| r [m] | $I_{4a}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{5a}$ [m] | $\Delta$ [%] |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,50  | 769,00       | 81,42        | 792,50       | 86,96        |
| 0,75  | 749,25       | 74,59        | 845,43       | 97,01        |
| 1,00  | 786,00       | 79,43        | 771,00       | 76,00        |
| 1,25  | 767,18       | 72,15        | 829,68       | 86,18        |
| 1,50  | 762,75       | 70,01        | 747,00       | 66,49        |
| 1,75  | 753,37       | 65,21        | 741,12       | 62,52        |
| 2,00  | 740,00       | 59,67        | 756,00       | 63,14        |
| 2,25  | 739,12       | 57,66        | 764,45       | 63,06        |
| 2,50  | 725,00       | 53,23        | 725,00       | 53,23        |
| 2,75  | 718,43       | 51,51        | 710,87       | 49,92        |
| 3,00  | 693,00       | 45,42        | 693,00       | 45,42        |

Tabulka 4.10: Hodnoty svítivosti  $I_\gamma$  z napětí měřeného na senzoru AMS302 a hodnoty svítivosti  $I_{\gamma n}$ .

| $\phi$ [°] | $I_{\gamma 1}$ [cd] | $I_{\gamma 1n}$ [cd] | $I_{\gamma 2}$ [cd] | $I_{\gamma 2n}$ [cd] |
|------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 0          | 758                 | 758                  | 376                 | 376                  |
| 15         | 810                 | 751                  | 394                 | 372                  |
| 30         | 869                 | 732                  | 432                 | 363                  |
| 45         | 724                 | 700                  | 368                 | 347                  |
| 60         | 660                 | 656                  | 162                 | 325                  |
| 75         | 492                 | 601                  | 254                 | 298                  |
| 90         | 193                 | 535                  | 88                  | 265                  |

V tabulce 4.10 je svítivost  $I_{\gamma 1}$  vypočtená z výstupních hodnot napětí ze senzoru AMS302 pomocí vztahu 4.3, svítivost  $I_{\gamma 1n}$  je vypočtená pomocí vztahu 4.2 (oboje při vzdálenosti 1,00 m od normalu). Hodnoty svítivostí  $I_{\gamma 2}$  a  $I_{\gamma 2n}$  jsou počítány obdobně jako předchozí, jen při vzdálenosti 2,00 m od normalu.



### 4.3.2 Tabulky vypočtených hodnot svítivosti dig. senzoru BH1750.

Tabulka 4.11: Vypočtené hodnoty svítivosti  $I$  a vypočtené procentuální odchylky od luxmetru Krochmann  $\rightarrow \Delta$  pro senzor BH1750 (měření 1,2,3) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| $r$ [m] | $I_{1b}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{2b}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{3b}$ [m] | $\Delta$ [%] |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,50    | 470,25       | 10,94        | 474,00       | 11,82        | 468,50       | 10,52        |
| 0,75    | 480,93       | 12,07        | 477,00       | 11,12        | 472,50       | 10,10        |
| 1,00    | 477,00       | 8,89         | 485,00       | 10,75        | 484,00       | 10,48        |
| 1,25    | 487,50       | 9,39         | 490,65       | 10,97        | 492,18       | 10,44        |
| 1,50    | 501,75       | 11,83        | 501,75       | 11,83        | 504,00       | 12,33        |
| 1,75    | 502,25       | 10,14        | 505,35       | 10,81        | 505,31       | 10,81        |
| 2,00    | 512,00       | 10,48        | 508,00       | 9,62         | 512,00       | 10,48        |
| 2,25    | 521,43       | 11,23        | 521,43       | 11,23        | 526,50       | 12,35        |
| 2,50    | 506,25       | 7,00         | 525,00       | 10,96        | 531,25       | 12,28        |
| 2,75    | 521,85       | 10,41        | 529,35       | 11,64        | 529,35       | 11,64        |
| 3,00    | 549,00       | 15,20        | 549,00       | 15,20        | 540,00       | 13,31        |

Tabulka 4.12: Vypočtené hodnoty svítivosti  $I$  a vypočtené procentuální odchylky od luxmetru Krochmann  $\rightarrow \Delta$  pro senzor BH1750 (měření 4,5) v závislosti na vzdálenosti od normalu.

| r [m] | $I_{4b}$ [m] | $\Delta$ [%] | $I_{5b}$ [m] | $\Delta$ [%] |
|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,50  | 469,75       | 10,82        | 472,25       | 11,41        |
| 0,75  | 479,81       | 11,81        | 553,50       | 28,98        |
| 1,00  | 485,00       | 10,71        | 491,00       | 12,08        |
| 1,25  | 492,18       | 10,44        | 531,25       | 19,21        |
| 1,50  | 501,75       | 11,83        | 492,75       | 9,82         |
| 1,75  | 505,31       | 10,81        | 508,37       | 11,48        |
| 2,00  | 512,00       | 10,48        | 520,00       | 12,21        |
| 2,25  | 521,43       | 11,23        | 541,68       | 15,55        |
| 2,50  | 525,00       | 10,96        | 525,00       | 10,96        |
| 2,75  | 529,37       | 11,64        | 536,93       | 13,23        |
| 3,00  | 549,00       | 15,20        | 549,00       | 15,20        |

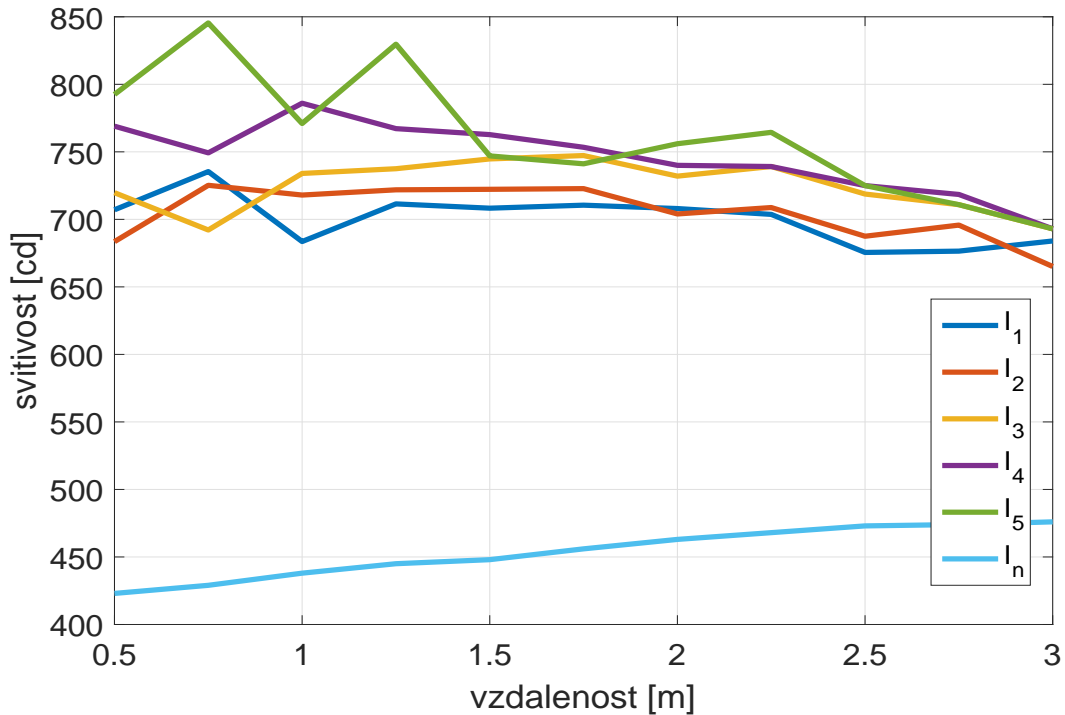
Tabulka 4.13: Hodnoty svítivosti  $I_\gamma$  z napětí měřeného na senzoru BF1750 a hodnoty svítivosti  $I_{\gamma n}$ .

| $\phi$ [°] | $I_{\gamma 1}$ [cd] | $I_{\gamma 1n}$ [cd] | $I_{\gamma 2}$ [cd] | $I_{\gamma 2n}$ [cd] |
|------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 0          | 482                 | 482                  | 260                 | 260                  |
| 15         | 445                 | 477                  | 238                 | 257                  |
| 30         | 360                 | 465                  | 198                 | 251                  |
| 45         | 266                 | 445                  | 130                 | 240                  |
| 60         | 134                 | 417                  | 78                  | 225                  |
| 75         | 40                  | 382                  | 24                  | 206                  |
| 90         | 7                   | 340                  | 2                   | 183                  |

V tabulce 4.13 je svítivost  $I_{\gamma 1}$  vypočtená z výstupních hodnot osvětlenosti ze senzoru BH1750 pomocí vztahu 4.1, svítivost  $I_{\gamma 1n}$  je vypočtená pomocí vztahu 4.2 (oboje při vzdálenosti 1,00 m od normalu). Hodnoty svítivostí  $I_{\gamma 2}$  a  $I_{\gamma 2n}$  jsou počítány obdobně jako předchozí, jen při vzdálenosti 2,00 m od normalu.

## 4.4 Grafy výsledků

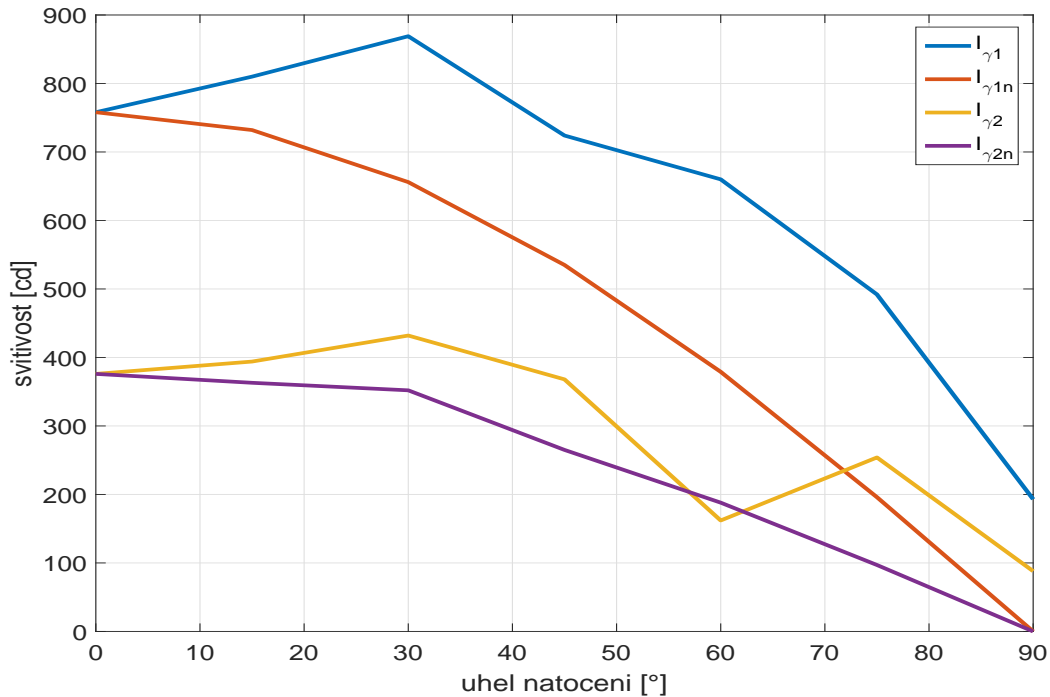
### 4.4.1 Graf svítivosti změřené analogovým senzorem AMS302 v závislosti na vzdálenosti



Obrázek 4.3: Závislost svítivosti na vzdálenosti od normalu u měření analogovým senzorem.

Na tomto grafu můžeme vidět závislost vypočtených svítivostí  $I_1 - I_5$  z hodnot analogových senzorů AMS302 (1 - 5) v porovnání s průběhem svítivosti  $I_n$  získaného pomocí luxmetru Krochmann. Je zřejmé, že analogové senzory se výrazně liší od skutečných hodnot svítivosti normalu, a to o 40 – 60 %, viz hodnoty  $\Delta$  z tabulek 4.8 a 4.9. Senzory s analogovým výstupem byly testovány za stejných podmínek jako senzory s digitálním výstupem, tudíž odchylky způsobené rozdílnými podmínkami při měření můžeme vyloučit. Senzory s analogovým výstupem jsou velmi citlivé na přenos a okolní prostředí. Jednou z příčin nepřesností mohlo být propojení senzorů s řídicím modulem přes nepájivé pole.

#### 4.4.2 Graf svítivosti změřené analogovým senzorem AMS302 v závislosti na úhlu natočení

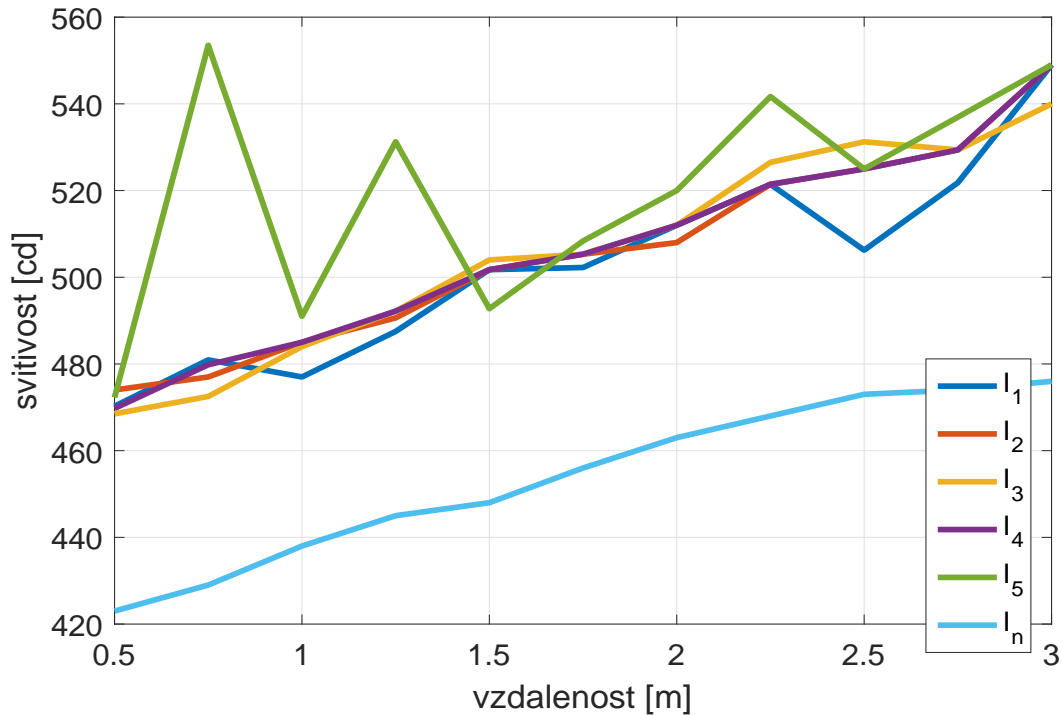


Obrázek 4.4: Závislost svítivosti na úhlu natočení k normalu u měření analogovým senzorem.

Na obrázku 4.4 můžeme vidět závislosti svítivostí na úhlu natočení senzoru. Průběh  $I_{\gamma 1}$  vyjadřuje průběh svítivosti vypočteného z napětí na senzoru AMS302 ve vzdálenosti 1,00 m. Průběh  $I_{\gamma 1n}$  vyjadřuje ideální průběh svítivosti vypočteného pomocí vztahu 4.2 při uvažování vzdálenosti 1,00 m. Průběh  $I_{\gamma 2}$  vyjadřuje průběh svítivosti vypočteného z napětí na senzoru AMS302 ve vzdálenosti 2,00 m. Průběh  $I_{\gamma 2n}$  vyjadřuje ideální průběh svítivosti vypočteného pomocí vztahu 4.2 při uvažování vzdálenosti 2,00 m.

Výsledné průběhy skutečné a ideální ve vzdálenosti 1,00 m i 2,00 m se výrazně liší, což je způsobeno konstrukcí senzoru a nepřesnostmi v měření, např. neoptimálním uchycením na fotometrickou lavici, vlastním stíněním a v poslední řadě částečnými odrazy v temné komoře.

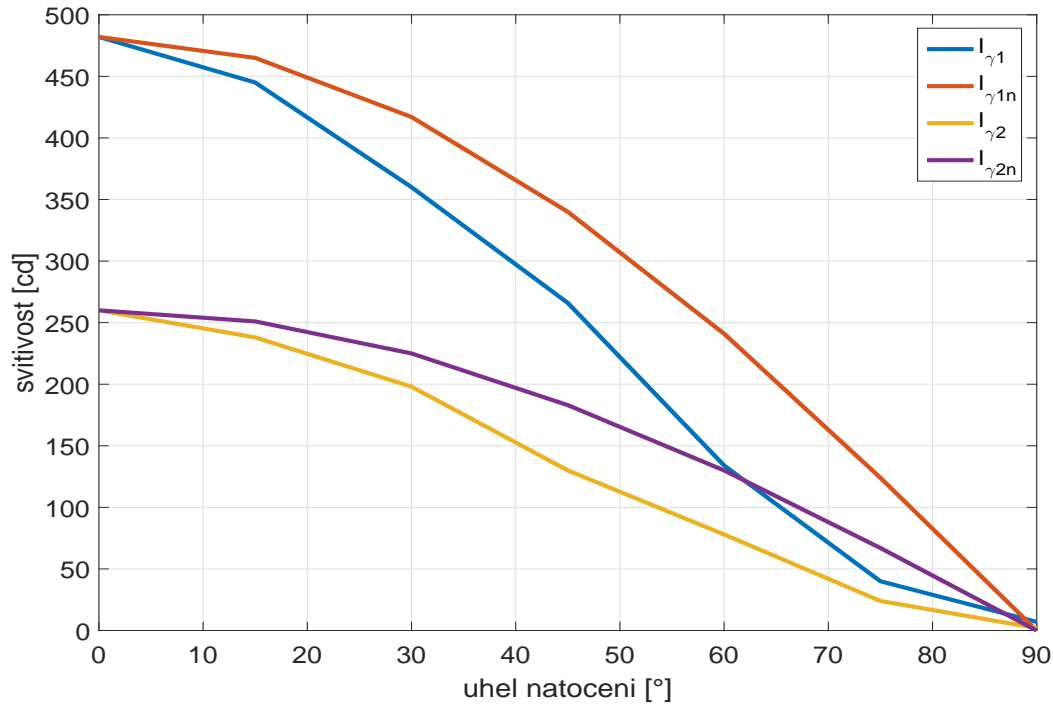
### 4.4.3 Graf svítivosti změřené digitálním senzorem BH1750 v závislosti na vzdálenosti



Obrázek 4.5: Závislost svítivosti na vzdálenosti od normalu u měření digitálním senzorem.

Na tomto grafu můžeme vidět závislosti vypočtených svítivostí  $I_1 - I_5$  z hodnot digitálního senzoru v porovnání s průběhem svítivosti  $I_n$  získaného pomocí luxmetru Krochmann. Výsledné hodnoty svítivosti jsou mnohem příznivější než u analogového senzoru. Liší se o 9–15%, viz hodnoty  $\Delta$  z tabulek 4.11 a 4.12 a můžeme říci, že přibližně lineárně kopírují skutečné průběhy s malým offsetem.

#### 4.4.4 Graf svítivosti změřené digitálním senzorem BH1750 v závislosti na úhlu natočení



Obrázek 4.6: Závislost svítivosti na úhlu natočení k normalu u měření digitálním senzorem.

Na obrázku 4.4 můžeme vidět závislosti svítivosti na úhlu natočení digitálního senzoru. Průběh  $I_{\gamma 1}$  vyjadřuje průběh svítivosti vypočteného z napětí na senzoru BH1750 ve vzdálenosti 1,00 m. Průběh  $I_{\gamma 1n}$  vyjadřuje ideální průběh svítivosti vypočteného pomocí vztahu 4.2 při uvažování vzdálenosti 1,00 m. Průběh  $I_{\gamma 2}$  vyjadřuje průběh svítivosti vypočteného z napětí na senzoru BH1750 ve vzdálenosti 2,00 m. Průběh  $I_{\gamma 2n}$  vyjadřuje ideální průběh svítivosti vypočteného pomocí vztahu 4.2 při uvažování vzdálenosti 2,00 m.

Výsledné průběhy skutečné a ideální ve vzdálenosti 1,00 m i 2,00 m se trochu liší, což je způsobeno konstrukcí senzoru, který je umístěn na ploché destičce, viz 3.2, a při natočení se samotný senzor dostává do vlastního stínu.

## 4.5 Zhodnocení výsledků testování

Dosažené výsledky pomocí senzorů AMS302 s analogovým výstupem obsahovaly výrazné odchylky a výsledné hodnoty svítivosti se neshodovaly s výsledky získané pomocí certifikovaného luxmetru Krochmann. Průběhy senzorů AMS302 ukazují nepřesnosti jednotlivých senzorů mezi sebou, avšak celá skupina analogových senzorů je zatížena výraznou nepřesností od ideálních průběhů. Z tohoto hlediska se s nimi při realizaci jasového směrového analyzátoru nepočítá.[17]

Senzory BH1750 dopadly v testování mnohem lépe. Výsledné průběhy senzorů BH1750 s digitálním výstupem jsou zatíženy mnohem menší chybou, nebo-li více se přibližují ideálním hodnotám. Odchylky mezi jednotlivými senzory BH1750 nedosahují větších rozptylů. Další výhodou je snadná práce při zapojení, přenosu dat a následné vyhodnocení výstupních údajů, např. pomocí vyhodnocovacího modulu Arduino. Z výše zmíněných důvodů a výsledků testování jsou použity senzory BH1750 pro realizaci jasového směrového analyzátoru.[17]





# Kapitola 5

## Komunikační rozhraní

Senzory osvětlenosti testované v kapitole 4 mají v sobě implementovanou komunikaci skrze sběrnici I<sup>2</sup>C a převádí naměřenou intenzitu světla na digitální výstup.[12] Proto jsem se rozhodl, že celá komunikace řídicí jednotky se senzory bude řešená sériově, tj. právě přes sběrnici I<sup>2</sup>C.[18]

Nejdůležitějším nástrojem pro sériovou komunikaci, tj. kdy přenos dat postupuje po jednotlivých bitech, je sběrnice nebo komunikační kanál. Komunikace přes sběrnici se nejvíce využívá v počítačových sítích a v komunikaci na větší vzdálenost. V současné době je větší rozmach sériové komunikace i na kratší vzdálenost. Přenos po sběrnici může provádět vždy pouze jeden komunikační modul. Tento typ komunikace používá pro přenos dat pouze jeden kabel. Vyskytuje se zde vždy jedno přijímací a jedno vysílací zařízení. Přijímač má za úkol číst data ze sběrnice ve stejných intervalech, který nastavuje vysílač. Velice důležitým prvkem je rozeznání zahájení a ukončení vysílání hodnoty jednoho bitu a začátek vysílání dalšího bitu. Pro příjemce je nezbytné, aby vyhodnocoval význam přenášených dat stejně jako to vysílač zamýšlel. Příjemce spolu s vysílačem jsou tzv. synchronizováni.[21] [18]

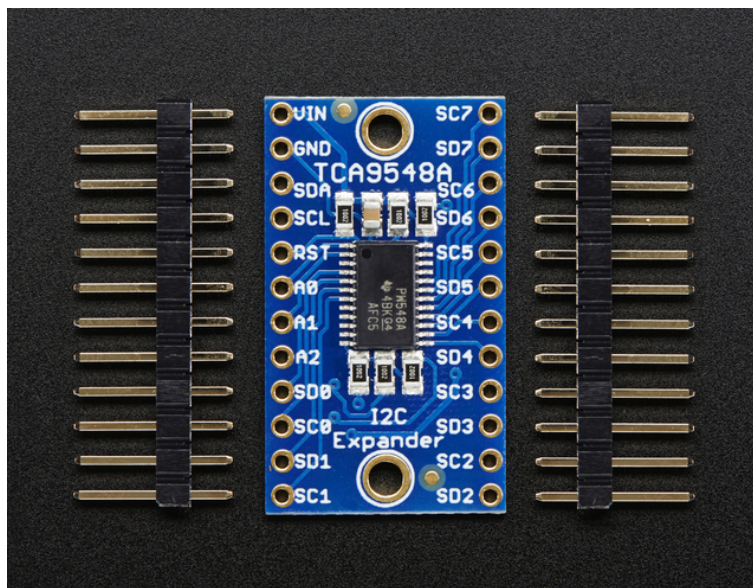
Jedna z prvních sběrnic byla sběrnice PC BUS. Firma IBM navrhla jako první svoji sběrnici pro počítače IBM PC a IBM PC/XT. Tento počítač používal 16-bitový procesor a měl 8-bitovou datovou sběrnici. Tento typ sběrnice poskytuje 62 linek, z nichž 8 je určeno pro přenos dat. Šířka přenosu dat je 8 bitů. Obecná šířka datové sběrnice velikostí odpovídá velikosti slova procesoru. Jednotlivé konektory jsou zvané sloty, které slouží k připojení jednotlivých karet. Maximální teoretická přenosová rychlost sběrnice je dána násobkem šířky datové sběrnice a rychlosti hodinových impulsů.[3] [18]

## 5.1 Digitální senzory komunikující po I<sup>2</sup>C sběrnici

Během testování zmíněného digitálního snímače BH1750 jsem zjistil, že na trhu pravděpodobně neexistuje, nebo jen ve velmi omezeném počtu, jakýkoliv senzor komunikující po I<sup>2</sup>C sběrnici a měl možnost adresace v plném rozsahu této sběrnice, tj.  $2^7 = 128$  možných senzorů na 1 sběrnici. Důvodem je cena pouzdra, která s počtem pinů roste, neboť se pouzdro zvětšuje a větší pouzdro znamená větší cenu. Adresace v senzorech je totiž realizována hardwarově.[18]

### 5.1.1 Řešení v podobě multiplexoru

Problém s adresovatelností senzorů jsem vyřešil pomocí I<sup>2</sup>C multiplexoru TCA9548A od firmy Adafruit zobrazeného na obrázku 5.1.



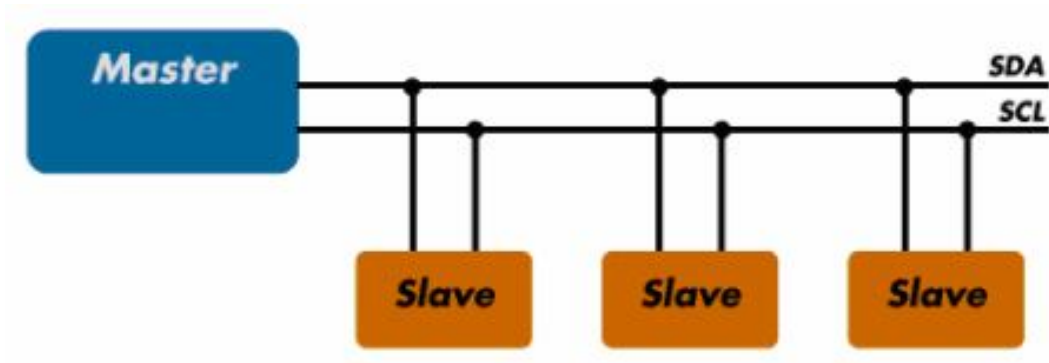
Obrázek 5.1: Multiplexor Adafruit TCA9548A.

Zdroj obrázku: [5].

V multiplexoru TCA9548A je obsaženo 8 obousměrných přepínačů, které ovládáme pomocí jedné I<sup>2</sup>C sběrnice. Multiplexor slouží jako rozšiřující modul pro případy, kdy máme pouze jednu I<sup>2</sup>C sběrnici a použitím tohoto multiplexoru získáme možnost připojit až 8 zařízení k jednomu mikrokontroléru. Funguje jako rozřazovač pomocí přepínání na vybranou sadu pinů I<sup>2</sup>C příkazem od řídicího registru. Nadřazený pár SCL/SDA obslouží dalších 8 párových kanálů. Jednotlivé kanály SC<sub>n</sub>/SD<sub>n</sub> či jejich kombinace lze obsloužit podle programovatelného řídicího registru.[14][18]

## 5.2 Master - Slave komunikace

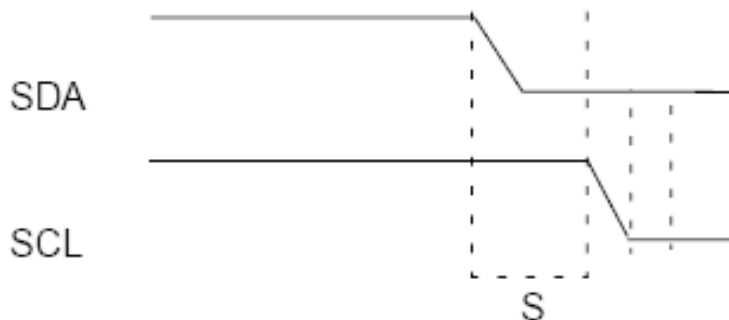
Model komunikace typu master - slave je založen na dvou typech uzlu. První typ se jmenuje master, řídí veškeré dění na sběrnici a má nejvyšší práva. V danou chvíli může pouze jedno jediné zařízení být nakonfigurováno jako uzel typu master. Díky tomuto požadavku zajistíme, že při komunikaci nebude docházet ke kolizím, a navíc bude komunikace deterministická. Master vysílá zprávu (zahajuje komunikaci) ve chvíli, kdy sám chce vysílat (samozřejmě s přihlédnutím dodržování podmínek, např. klid na sběrnici, atd.). Mezitím uzel typu slave se svou unikátní adresou čeká, až na něj přijde řada, resp. čeká na adresní oslovení, které je obsaženo na začátku vysílané zprávy. Zařízení (uzlů) typu slave nemohou řídit sběrnici jakýmkoli způsobem, nemají ani právo spustit, či požádat o spuštění komunikace. Na sběrnici může být různé množství slave zařízení. Pokud máme pouze jedno zařízení slave, mluvíme o spojení bod-bod. Pravděpodobnější variantou je připojení několika zařízení, klidně i desítek zařízení. Limit připojených slave uzlů je dán konkrétním typem komunikační sběrnice a způsobu adresování. [21][18]



Obrázek 5.2: Princip komunikace master - slave.

Zdroj obrázku: [1].

Princip propojení několika uzlů můžeme vidět na obrázku 5.2. K přenosu dat využívá jen 2 datové vodiče - SDA (serial data, tj. přenos dat) a SCL (serial clock, hodinový signál). Ve stavu, kdy nejsou přenášena žádná data, je na obou vodičích napěťová úroveň logické jedničky. Komunikační přenos je vždy zahájen zařízením master pomocí poklesnutí úrovně na datovém vodiči SDA na logickou nulu. Mezitím je datový vodič SCL po určitou dobu v úrovni logické jedničky. Když dojde k zmíněnému stavu, hovoříme o tzv. start bitu (viz obrázek 5.3). Start bit je rozpoznám mezi všemi uzly na sběrnici. Následně master vysílá adresu uzlu, se kterým chce komunikovat, a také rozhodující bit o směru toku informací (vysílat, nebo přijímat).[25][18]



Obrázek 5.3: Zahájení komunikace - vyslání start bitu.

Zdroj obrázku: [1].

## 5.3 I<sup>2</sup>C sběrnice

I<sup>2</sup>C (internal-intergrated circuit) je sběrnice sériová, která byla vyvinuta firmou Philips v 80. letech 20. století. Podle názvu odvodíme, že se jedná o interní datovou sběrnici, která slouží pro komunikaci a přenos dat mezi dílčími obvody. V dnešní době se jedná o velice rozšířený způsob komunikace především u mikrokontrolérů, sériových pamětí, nízko rychlostních periférií k základní desce, mobilních telefonů nebo jiných systémů. Největší výhodou je, že přenos je obousměrný a probíhá pouze po 2 vodičích - SDA (serial data) a SCL (serial clock).[25][1][18]

Každému zařízení (nakonfigurovanému do módu slave) připojenému na sběrnici I<sup>2</sup>C může být přidělena unikátní celočíselná adresa, aby bylo možné jednoznačně určit uzel, se kterým má zařízení typu master komunikovat. U sběrnic I<sup>2</sup>C, pomocí kterých je propojeno menší množství komunikujících zařízení (uzlů), se používá sedmibitová adresa přenášená v jednom bajtu, přičemž poslední přenesený bit, tj. ten s nejnižší vahou, má význam přepínače mezi módem čtení a zápisu dat – R/W. Pomocí sedmibitové adresy lze teoreticky rozlišit až  $2^7 = 128$  různých zařízení. Prakticky je však toto číslo zmenšeno o několik rezervovaných adres (general call addresses). Na obrázku 5.4 můžeme vidět schématicky znázorněný jeden přenos dat mezi uzlem Master a uzlem typu slave. V levé části máme 7 bitů (Slave Address) znázorněných modře, určujících, ke kterému koncovému zařízení typu Slave, je určena tato komunikace. [25][1][18]



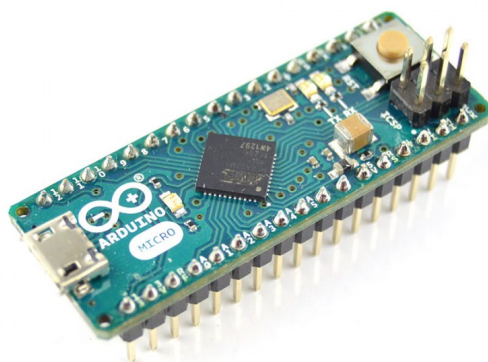
Obrázek 5.4: Schématické znázornění přenosu dat po I<sup>2</sup>C sběrnici.

Zdroj obrázku: [1].

## 5.4 Řídící jednotka

V této diplomové práci jsem použil jako řídicí jednotku Arduino Micro zobrazenou na obrázku 5.5. Moduly Arduino jsou velice rozšířené mezi začátečníky, kteří hledají vhodnou vývojovou platformu pro své projekty. Na trhu je mnoho variant desek a čipů, k jejichž programování stačí pouze sériový kabel či mnohem výkonnější platformy umožňující běh operačního systému. Ve světě je asi nejrozšířenější platformou právě Arduino, které má mnoho modifikací od velmi malých a méně výkonných až po kompletní soustavy obsahující Ethernet, Wifi, HDMI, USB, apod.[18]

Arduino Micro je mikrokontrolérová vývojová deska založená na procesoru ATmega 32U4 s flash pamětí 35kB, která má vestavěnou USB komunikaci. Díky vestavěné komunikaci se eliminuje potřeba sekundárního procesoru. To umožňuje připojení k PC stejně jako myš, klávesnice. Na desce najdeme 20 digitálních vstupních/výstupních pinů, z toho 7 pinů může být použito jako výstupy pulsně šířkové modulace (PWM), 12 analogových vstupů, 16 MHz krystal, mikro USB konektor pro připojení k PC, ICSP rozhraní a resetovací tlačítko.[15]

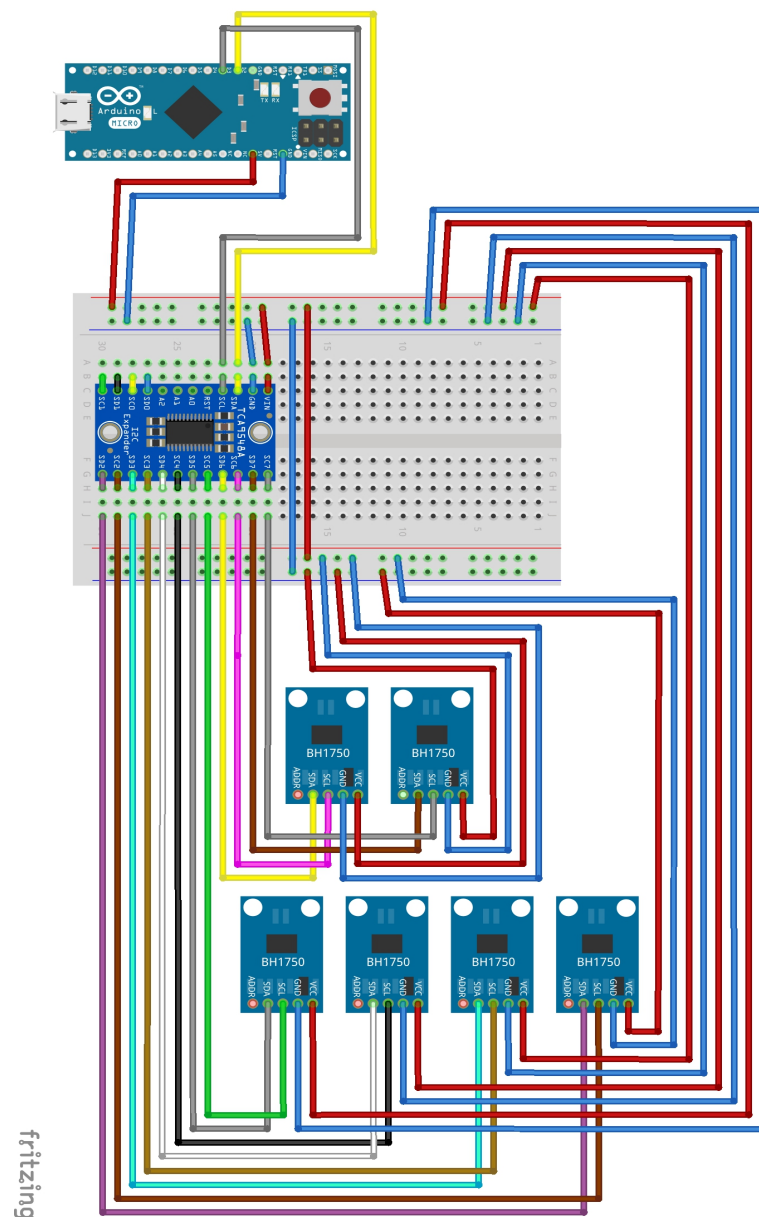


Obrázek 5.5: Řídící jednotka Arduino Micro.

Zdroj obrázku: [15].

### 5.4.1 Výsledné zapojení

Výsledné zapojení řídicí jednotky Arduino Micro spolu se senzory BH1750 a multiplexorem TCA9548A jsem realizoval přes nepájivé pole a propojovací kabely. Na obrázku 5.6 vidíme schématické zapojení vytvořené v prostředí Fritzing. Na multiplexor TCA9548A je připojena soustava složená z 6-ti (na každé stěně analyzátoru jeden senzor) digitálních senzorů BH1750 na měření intenzity světla a samozřejmě řídicí jednotka Arduino. Celá elektronika je ukryta ve vnitřním prostoru směrového jasového analyzátoru. [18]



Obrázek 5.6: Schématické zapojení řídicí jednotky, multiplexoru a senzorů.

## 5.5 Program a ukládání do souboru

Vytvořený software je rozdělen do dvou programů. V prvním programu (v paměti Arduina) jsem implementoval komunikaci řídicí jednotky se senzory na analyzátoru. Celý program na měření osvětlenosti se skládá z několika částí. Nejdříve proběhne požadavek řídicí jednotky na multiplexor připojený na dané adrese a poté naváže spojení. V další části je proveden sken všech portů na multiplexoru a zjištění potřebných adres na portech. Ve finální části jsou koncové zařízení, v našem případě senzory, dotazovány a probíhá přenos informací do řídicí jednotky.

V druhé části softwaru jsem implementoval program na odposlech sériového portu, jelikož řídicí jednotka Arduino Micro umí vyslat data skrze sériový port. Vytvořil jsem jednoduchou aplikaci pro automatické měření směrovým jasovým analyzátozem. Po ukončení měření se výsledné hodnoty uloží do souboru s příponou TXT. Manuál pro spuštění aplikace je obsažen v příloze této diplomové práce.

### 5.5.1 Ukázka souboru po průběhu měření

```
TCAScanner ready!  
TCA Port #0 Found I2C 0x23  
TCA Port #1 Found I2C 0x23  
TCA Port #2 Found I2C 0x23  
TCA Port #3 Found I2C 0x23  
TCA Port #4 Found I2C 0x23  
TCA Port #5 Found I2C 0x23  
TCA Port #6 Found I2C 0x23  
TCA Port #7 Found I2C 0x23  
BH1750 Test  
TCA Port #1 484 lx  
TCA Port #2 106 lx  
TCA Port #3 103 lx  
TCA Port #4 128 lx  
TCA Port #5 124 lx  
TCA Port #6 71 lx  
484 106 103 128 124 71 vektor: -22 21 -413
```



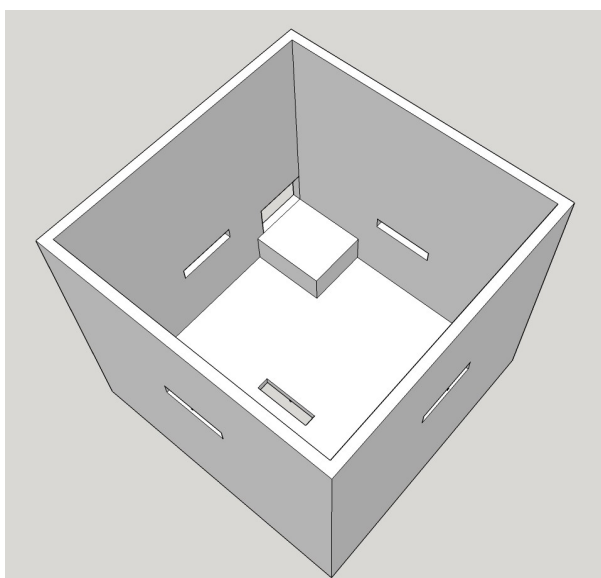
# Kapitola 6

## Realizace analyzátoru

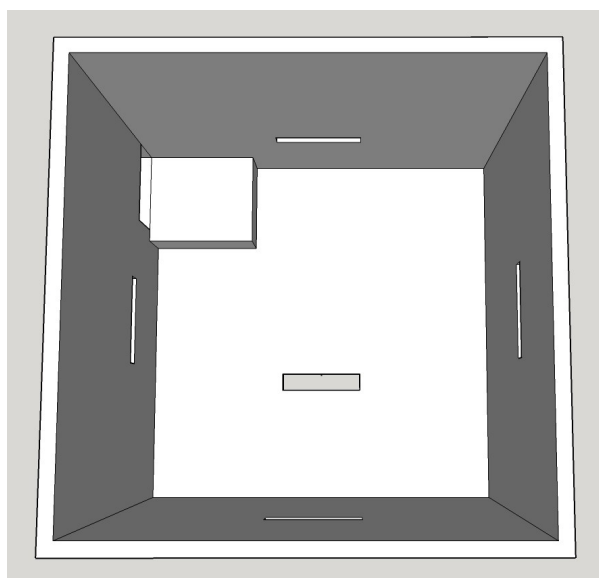
Při návrhu konstrukční části výsledného směrového jasového analyzátoru připadalo v úvahu několik variant řešení. Nejprve bylo uvažováno s pásem ve tvaru vertikálního čtvrt oblouku osázeným senzory, který se bude otáčet kolem osy po definovaném kroku v celém rozsahu, tj.  $360^\circ$ , abychom mohli naměřit dostatečný počet dat k aplikaci na redukovaný Klemsův systém [10]. Klemsův systém si představíme jako 2 polokoule rozdělené na tzv. Klemsovy segmenty, které slouží k rozdělení vnějšího i vnitřního poloprostoru, v našem případě pro zápis hodnot osvětlení prostoru. Každý z poloprostorů je ideálně rozdělen na 145 dílčích částí (segmentů). Tato varianta nebyla uskutečněna z důvodu nutnosti realizace krokovacího mechanismu. Dále byla možnost vytvořit jasový analyzátor kulového tvaru, avšak k praktické realizaci nedošlo, zvláště kvůli případnému uchycení jednotlivých senzorů (jak zvenku, tak zevnitř) na kouli, jelikož moduly digitálního senzoru BH1750 jsou obdélníky s rozměry 14 x 19 mm. Konečná podoba směrového jasového analyzátoru má tvar krychle, který se ukázal jako ideální tvar hned z několika důvodů. Hlavní důvod je snadné připevnění jednotlivých senzorů do požadovaných směrů ve středu každé stěny krychle, tj. celkem 6 senzorů. Dále vnitřní prostor je dostatečně velký a slouží pro uložení veškeré elektroniky a řídicího modulu dovnitř krychle. Jedním z dalších důvodů je možnost realizace snadného uchycení na stativ pomocí zapuštěné matice do rohu ve spodní stěně krychle, dále snadný a rychlý přístup do vnitřního prostoru po odklopení víka a v neposlední řadě možnost vývodu USB kabelu komunikujícího s vyhodnocovacím modulem ve spodní hraně bez stínění senzorů.

## 6.1 3D model

V první fázi návrhu finálního řešení bylo vytvoření 3D modelu, jelikož jsem se rozhodl využít možnost tisku na 3D tiskárně, který se stává stále populárnějším, díky možnosti rychlé realizaci jakéhokoliv tvaru. Model jsem vytvořil v programu Sketch Up, který je velmi intuitivní a tudíž vhodný pro začátečníky až středně pokročilé v oblasti 3D modelování. Model je rozdělen na dvě části – box a víko. Horní díl, tj. víko, je přiděláno k boxu pomocí malých magnetů z důvodu rychlého přístupu k elektronice.



Obrázek 6.1: Perspektivní pohled na box.

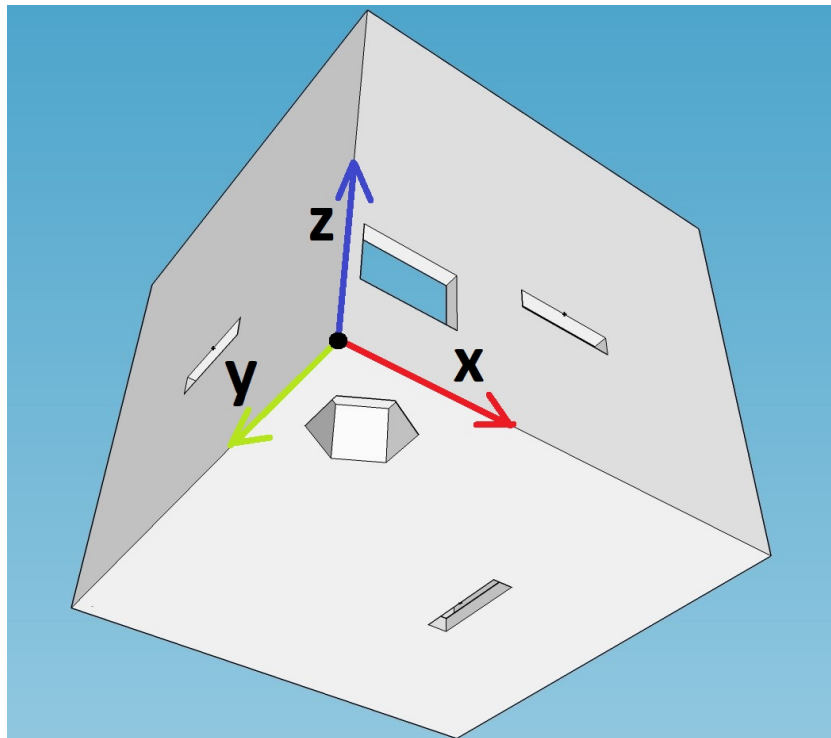


Obrázek 6.2: Svrchní pohled na box.

## 6.2 Box

Box obsahuje 5 stěn, z toho jsou 4 stěny kolem dokola a 1 stěna tvoří podlahu. Stěny mezi sebou tvoří vnitřní prostor na uschování veškeré elektroniky. Vnitřní prostor má tvar krychle o straně  $a = 60$  mm, v jednom z rohů je umístěný kvádr o rozměrech  $18 \times 15 \times 8$  mm pro zavedení matice na stativ z vnější strany podlahy. Stěny mají tloušťku  $d = 2$  mm. V každé ze stěn je umístěný otvor pro vyvedení kabelů z řídicího modulu do daného modulu senzoru. Otvor má rozměry  $14 \times 3$  mm, je ve výšce  $h = 5$  mm od středu stěny. Na protilehlých stěnách jsou otvory řešeny tak, aby nebyly umístěny ve stejné výšce, tzn. že na jedné straně je otvor ve výšce  $h = +5$  mm nad středem stěny a na protilehlé stěně ve výšce  $h = -5$  mm od středu stěny. Otvory umístěné pod či nad středem stěny

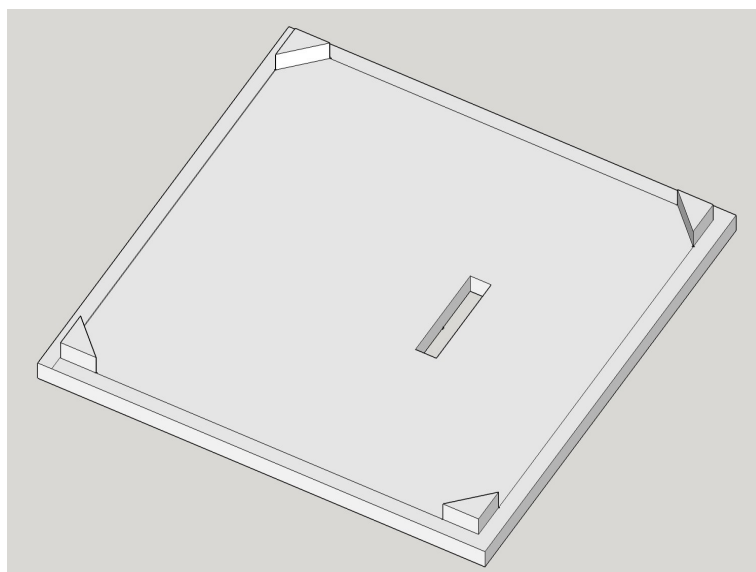
jsou udělány tak, aby po připojení senzorů byla fotodioda umístěná přesně ve středu stěny analyzátoru. V podlaze je již zmíněný prostor ve tvaru šestiúhelníku se stranou  $b = 6,2\text{ mm}$  pro zavedení matice. Dále je ve spodní části jedné stěny, těsně nad kvádrem pro matici, udělaný otvor o rozměrech  $13 \times 9\text{ mm}$  pro vyvedení USB kabelu z řídicího modulu do počítače. Na obrázku 6.3 vidíme také orientaci jednotlivých souřadnicových os vzhledem k analyzátoru.



Obrázek 6.3: Spodní část boxu včetně otvoru na zapuštění matice.

## 6.3 Víko

Víko zobrazené na obrázku 6.4 tvoří základní deska o tloušťce  $2\text{ mm}$  s rozměry  $62 \times 62\text{ mm}$ . V rozích desky jsou umístěny hranoly, které zapadnou do vnitřního prostoru boxu. Ve víku se nachází opět otvor pro vyvedení kabelů k vrchnímu senzoru o standardním rozměru  $14 \times 9\text{ mm}$ .



Obrázek 6.4: Pohled na vnitřní stranu modelu horního dílu, tj. víka.

## 6.4 3D tisk

Model vytvořený v programu Sketch Up byl exportován do souboru typu .obj, který je hojně podporován 3D tiskárnami a jejich softwary. Celý model byl vytištěn na 3D tiskárně MakerBot na katedře řídicí techniky na Fakultě elektrotechnické na Karlově náměstí v Praze. Při finální realizaci víka na 3D tiskárně došlo k malé úpravě na spodní desce víka, kde se zachovaly pouze rohy desky pro správné zasazení do boxu a zbytek byl redukován. Tato úprava urychlila celý tisk víka, ušetřila použitý materiál a zároveň nebyla poškozena funkčnost a byly dodrženy veškeré požadavky. Na tisk byla použita vlákna PLA, polyaktid, což je chemický textilní výrobek z kyseliny mléčné, jinak řečeno biologicky rozložitelná polyesterová varianta z rostlinných materiálů.

## 6.5 Upevnění na stativ

Uchycení na stativovou hlavu je řešeno pomocí zapuštěné matice do podlahy boxu. Matice je 6 mm vysoká se standardním fotozávitěm 1/4" UNC. Dále je součástí spojovací matice a závitová tyč o délce 20 mm se stejným typem závitu, která slouží k prodloužení vzdálenosti mezi stativovou hlavou a analyzátozem.

## 6.6 Propojení s PC

Z řídicího modulu Arduino Micro umístěného uvnitř boxu je vyvedený USB kabel, pomocí kterého se připojíme do PC či notebooku. Zároveň slouží jako napájení pro řídicí modul.

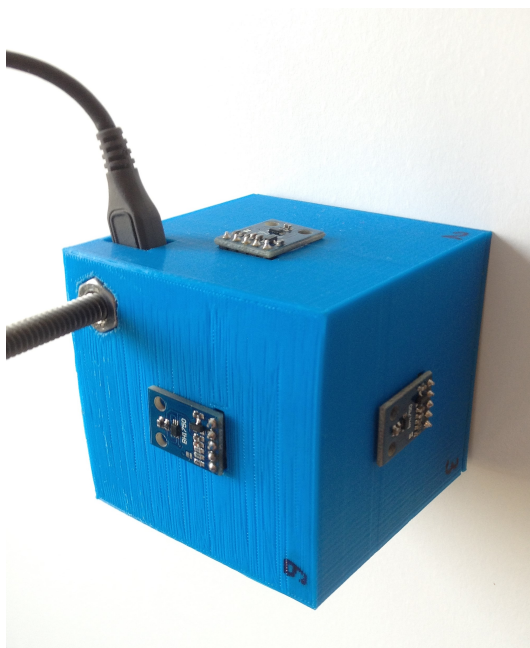
## 6.7 Reálný model

Směrový jasový analyzátor, který má v mém případě podobu krychle, je osazen celkem šesti senzory s digitálním výstupem BH1750. Pro lepší orientaci a porozumění výpočtům má každý senzor unikátní číslo. Senzor umístěný na víku analyzátoru má číslo 1. Na boční straně u vývodu USB kabelu z analyzátoru je senzor číslo 2. Senzor číslo 3 je umístěn na boční stěně vpravo od senzoru číslo 2. Proti senzoru číslo 2 je umístěn senzor číslo 4 na místě odpovídající čelní stěně. Senzor číslo 5 je analogicky umístěn na boční stěnu proti senzoru číslo 3. Na závěr nám zbývá senzor číslo 6, který je na spodní straně analyzátoru, tj. podlaze.

Na následných obrázcích vidíme pohled na reálný model směrového jasového analyzátoru. Na prvním obrázku 6.5 je vidět víko analyzátoru spolu s bočními stěnami včetně vývodu USB kabelu. Ve spodní části obrázku vidíme spojovací matici na propojovací tyči. Na druhém obrázku 6.6 vidíme pohled na spodní stranu analyzátoru, kde v detailu můžeme spatřit zapuštěnou matici pro uchycení propojovací tyče.



Obrázek 6.5: Perspektivní pohled na reálný model analyzátoru.



Obrázek 6.6: Pohled na spodní stranu reálného modelu, tj. podlahy.

# Kapitola 7

## Měření analyzátozem

Výsledné měření a ověrování přesnosti směrového jasového analyzátozu probíhalo ve stejné laboratoři světelné techniky na Fakultě elektrotechnické ČVUT a na stejné fotometrické lavici s podobnými podmínkami jako při testování senzorů (viz kapitola 4). Referenční hodnoty jsem získal pomocí měření certifikovaným a kalibrovaným luxmetrem Krochmann 2A. Pro následné testování byl použit normál, tj. konvenční světelný zdroj 13-2 s následujícími charakteristickými veličinami:

Tabulka 7.1: Hodnoty normálu 13-2, tj. zdroje světla.

|            |               |
|------------|---------------|
| $U_n$ [V]  | 230           |
| $I_0$ [cd] | $407 \pm 4\%$ |
| $T_c$ [K]  | 3000          |
| $P$ [W]    | 205           |

kde:

- $U_n$  je napětí [V],
- $I_0$  je svítivost [cd],
- $T_c$  je teplota chromatičnosti [K],
- $P$  je příkon normálu [W].

## 7.1 Naměřené hodnoty

Tabulka 7.2: Naměřené hodnoty osvětlenosti senzory analyzátoru a luxmetrem Krochmann ve vzdálenosti 1,00 m od normálu na fotometrické lavici.

| $n$ [-] | $E_2$ [lx] | $E_3$ [lx] | $E_4$ [lx] | $E_5$ [lx] | $E_{2n}$ [lx] | $E_{3n}$ [lx] | $E_{4n}$ [lx] | $E_{5n}$ [lx] |
|---------|------------|------------|------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1       | 430        | 479        | 479        | 444        | 417,9         | 447,7         | 446,1         | 407,6         |
| 2       | 429        | 474        | 479        | 442        |               |               |               |               |
| 3       | 430        | 477        | 480        | 444        |               |               |               |               |
| 4       | 426        | 478        | 479        | 446        |               |               |               |               |
| 5       | 429        | 477        | 480        | 446        |               |               |               |               |
| 6       | 429        | 476        | 474        | 446        |               |               |               |               |
| 7       | 429        | 477        | 479        | 445        |               |               |               |               |
| 8       | 432        | 477        | 479        | 444        |               |               |               |               |
| 9       | 430        | 480        | 479        | 445        |               |               |               |               |
| 10      | 429        | 478        | 474        | 445        |               |               |               |               |
| 11      | 429        | 481        | 479        | 445        |               |               |               |               |
| 12      | 426        | 481        | 480        | 445        |               |               |               |               |

kde:

- $n$  - je číslo měření [-],
- $E_{2,3,4,5}$  - hodnota osvětlenosti naměřená analyzátozem, konkrétně senzory č. 2, 3, 4, 5, [lx],
- $E_{2n,3n,4n,5n}$  - hodnota osvětlenosti naměřená luxmetrem Krochmann pro polohu senzoru analyzátoru č. 2, 3, 4, 5 [lx].



Tabulka 7.3: Naměřené hodnoty osvětlenosti analyzátozem a luxmetrem Krochmann v prostoru (uprostřed laboratoře světelné techniky v Dejvicích).

| <b>n</b> | <b>E<sub>1</sub></b> | <b>E<sub>2</sub></b> | <b>E<sub>3</sub></b> | <b>E<sub>4</sub></b> | <b>E<sub>5</sub></b> | <b>E<sub>6</sub></b> | <b>E<sub>1n</sub></b> | <b>E<sub>2n</sub></b> | <b>E<sub>3n</sub></b> | <b>E<sub>4n</sub></b> | <b>E<sub>5n</sub></b> | <b>E<sub>6n</sub></b> |
|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| [-]      | [lx]                 | [lx]                 | [lx]                 | [lx]                 | [lx]                 | [lx]                 | [lx]                  | [lx]                  | [lx]                  | [lx]                  | [lx]                  | [lx]                  |
| 1        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   | 570,7                 | 173,5                 | 167,1                 | 186,4                 | 165,1                 | 87,9                  |
| 2        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 3        | 484                  | 106                  | 103                  | 127                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 4        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 5        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 6        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 7        | 484                  | 106                  | 103                  | 127                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 8        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 9        | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 10       | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 11       | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |
| 12       | 484                  | 106                  | 103                  | 128                  | 124                  | 71                   |                       |                       |                       |                       |                       |                       |

## 7.2 Vypočtené hodnoty

### 7.2.1 Korekce luxmetru na rozsah

Z výsledků měření ČMI vyplývá, že naměřené hodnoty luxmetrem Krochmann 2A v laboratoři je potřeba vynásobit příslušným korekčním koeficientem  $k_{2856i}$  pro daný měřicí rozsah osvětlenosti  $E$ , abychom dostali správnou hodnotu. Korekční činitel z protokolu ČMI byl dodán panem Ing. M. Bálským, Ph. D. z katedry elektroenergetiky.

Tabulka 7.4: Korekční činitel pro luxmetr Krochmann 2A.

| rozsah [lx] | $k_{2856i}$ [-] |
|-------------|-----------------|
| 2000        | 0,992           |

Finální hodnoty luxmetru po započtení korekčního koeficientu na rozsah vypočteme podle vztahu:

$$E_0 = E_n \cdot k_{2856i}, \quad (7.1)$$

kde:

- $E_0$  je výsledná osvětlenost [lx],
- $E_n$  je naměřená osvětlenost luxmetrem [lx],
- $k_{2856i}$  je korekční koeficient na rozsah luxmetru [-].

Tabulka 7.5: Vypočtené průměrné hodnoty osvětlenosti ze senzorů analyzátoru (ve vzdálenosti 1,00 m) v porovnání s hodnotami získanými luxmetrem Krochmann.

|           |      | <b>S<sub>2</sub></b> | <b>S<sub>3</sub></b> | <b>S<sub>4</sub></b> | <b>S<sub>5</sub></b> |
|-----------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\bar{E}$ | [lx] | 429,0                | 477,9                | 478,4                | 444,8                |
| $E_0$     | [lx] | 414,5                | 444,1                | 442,5                | 404,3                |
| $\Delta$  | [%]  | 3,48                 | 7,61                 | 8,10                 | 9,99                 |

kde:

- $\bar{E}$  je průměrná hodnota osvětlenosti senzorů analyzátoru,
- $E_0$  je vypočtená hodnota osvětlenosti luxmetru Krochmann se započtením korekčního činitele  $k_{2856i}$ ,
- $\Delta$  je odchylka průměrné hodnoty osvětlenosti senzorů analyzátoru od referenční hodnoty získané luxmetrem,
- $S_{2,3,4,5}$  jsou jednotlivé polohy, kde byly senzory analyzátoru č. 2, 3, 4, 5 (následně i luxmetr) umístěny při měření.

Tabulka 7.6: Vypočtené průměrné hodnoty osvětlenosti jednotlivých senzorů analyzátoru (ve volném prostoru) v porovnání s hodnotami získanými luxmetrem Krochmann se započtením korekčního činitele.

|           |      | <b>S<sub>1</sub></b> | <b>S<sub>2</sub></b> | <b>S<sub>3</sub></b> | <b>S<sub>4</sub></b> | <b>S<sub>5</sub></b> | <b>S<sub>6</sub></b> |
|-----------|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| $\bar{E}$ | [lx] | 484,0                | 106,0                | 103,0                | 127,8                | 124,0                | 71,0                 |
| $E_0$     | [lx] | 566,1                | 172,1                | 165,7                | 184,9                | 163,7                | 87,2                 |

Tabulka 7.7: Vypočtené vektory osvětlenosti  $\vec{\epsilon}$  analyzátoru a luxmetru.

|            | $\epsilon_x$ | $\epsilon_y$ | $\epsilon_z$ |
|------------|--------------|--------------|--------------|
|            | [lx]         | [lx]         | [lx]         |
| analyzátor | -21,8        | 21,0         | -413         |
| luxmetr    | -12,7        | -1,9         | -478,9       |

Výpočet světelného vektoru vychází z teorie popsané v podkapitole (viz 2.3). Jednotlivé hodnoty světelného vektoru byly získány následujícím způsobem. Hodnota  $x$ -ové souřadnice světelného vektoru odpovídá rozdílu průměrných hodnot senzoru č. 2 - č. 4 analyzátoru, hodnota  $y$ -ové souřadnice světelného vektoru odpovídá rozdílu průměrných hodnot senzoru č. 5 - č. 3 analyzátoru a hodnota  $z$ -ové souřadnice světelného vektoru odpovídá rozdílu průměrných hodnot senzoru č. 6 - č. 1 analyzátoru. Matematicky vyjádřeno:

$$\begin{aligned}
 \vec{\epsilon} = (x, y, z) &= (S_2 - S_4, S_5 - S_3, S_6 - S_1) \\
 &= ((106, 0 - 127, 8), (124, 0 - 103, 0), (71, 0 - 484, 0)) \\
 &= (-21, 8, 21, 0, -413) \quad .
 \end{aligned}$$

Světelný vektor luxmetru byl spočten obdobně.

Odchylka měření v prostoru, nebo-li chyba světelného vektoru se vypočte pomocí poměru velikostí světelných vektorů analyzátoru  $\epsilon_A$  a luxmetru  $\epsilon_L$ , kde údaj z luxmetru bereme jako referenční hodnotu. Velikost vektoru  $\vec{\epsilon}$  vypočteme ze vztahu [20]:

$$\epsilon = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2} \quad , \quad (7.2)$$

kde:

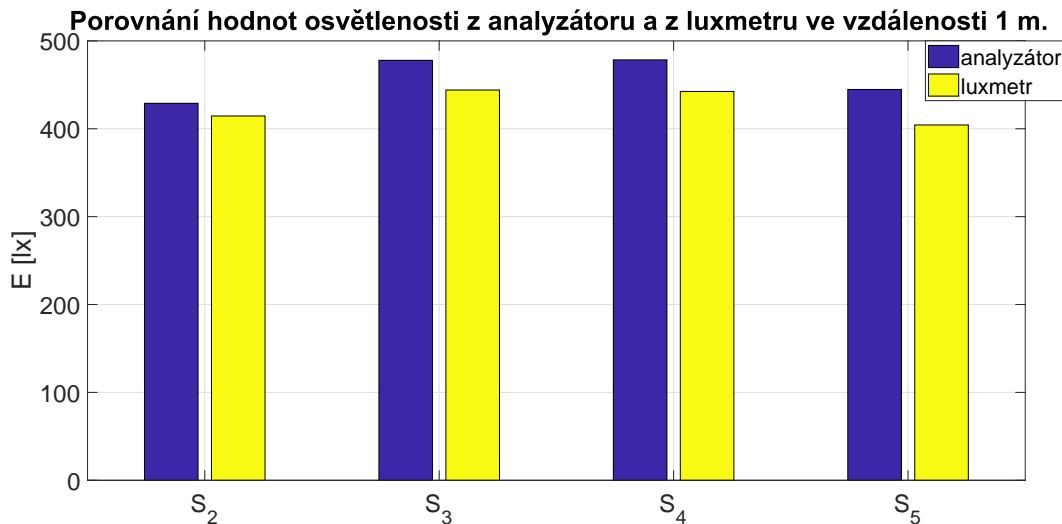
- $\epsilon_{x,y,z}$  jsou jednotlivé složky světelného vektoru [lx].

Tabulka 7.8: Vypočtené vektory osvětlenosti  $\vec{\epsilon}$  analyzátoru a luxmetru.

|                   |                         |
|-------------------|-------------------------|
| $\epsilon_A$ [lx] | (-21,8 , 21,0 , -413)   |
| $\epsilon_L$ [lx] | (-12,7 , -1,9 , -478,9) |
| $\Delta$ [%]      | 13,56                   |

## 7.3 Grafy

### 7.3.1 Graf hodnot osvětlenosti ve vzdálenosti 1,00 m od normálu



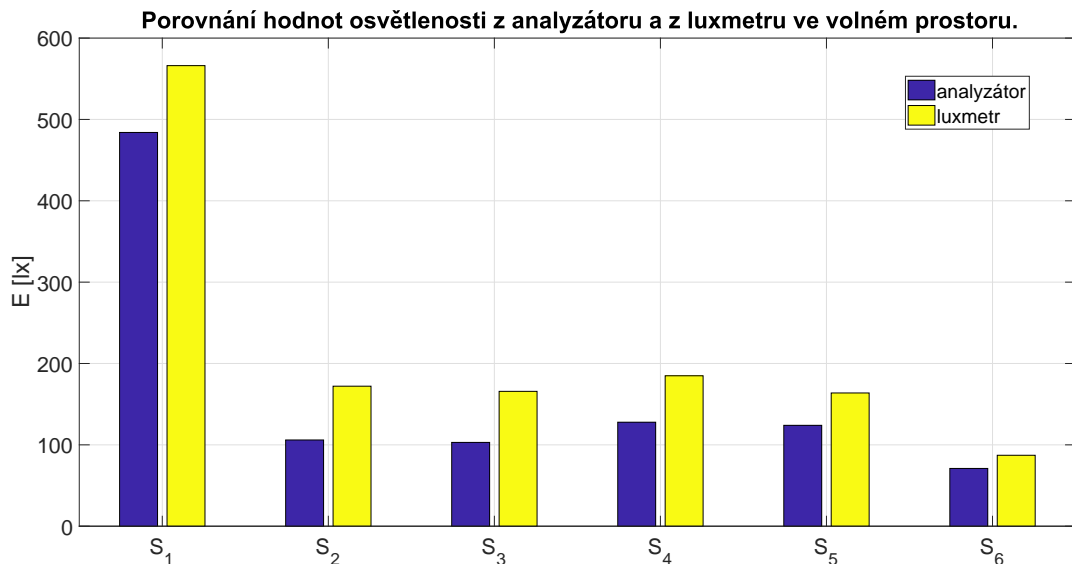
Obrázek 7.1: Hodnoty osvětlenosti ve vzdálenosti 1,00 m.

Na tomto grafu vidíme průběhy hodnot osvětlenosti z různých míst. I když je krychle osově i středově souměrná, osu otáčení máme posunutou od středu na kraj do rohu (viz podkapitola 6.1) v podobě závitové tyče. Vlivem otáčení okolo posunuté osy se poloha jednotlivých senzorů analyzátoru trochu liší. Z tohoto důvodu se provedla měření osvětlenosti senzory spolu s luxmetrem zvláště pro jednotlivá místa. Dalším jevem, který se projevuje kvůli posunuté ose, je to, že paprsky z normálu nedopadají v kolmém směru na sensor, ale dopadají pod určitým sklonem. Důležitým faktorem jsou různé výšky senzorů ve stěnách analyzátoru (viz podkapitola 6.2). Měření probíhalo na fotometrické lavici, kdy byla závitová tyč přidělána k posuvníku do vzdálenosti 1,00 m od normálu a senzor č. 4 (stanoviště  $S_4$ ) byl přímo proti normálu, který jako jediný vyhodnocoval paprsky dopadající v kolmém směru. Měření v tomto případě probíhalo pouze u 4 senzorů analyzátoru, resp. neproběhlo u senzoru umístěného na víku a na podlaze analyzátoru z důvodu komplikovaného uchycení na posuvník.

Na obrázku 7.1 můžeme vidět projevující se jev posunuté osy otáčení v podobě rozdílných hodnot osvětlenosti pro různá místa ( $S_2, S_3, S_4, S_5$ ). Vidíme, že hodnoty osvětle-

nosti získané analyzátořem jsou větší oproti hodnotám získané luxmetřem Krochmann. Odchyłky hodnot z analyzátořu nepřevyšují 10%, což považuji za velmi dobrý výsledek vzhledem k poměru nákupní ceny senzorů BH1750 a v porovnání s nákupní cenou luxmetřu. Vyobrazené hodnoty osvětlenosti můžeme srovnat s teoretickou hodnotou osvětlenosti normálu. Teoretickou hodnotu osvětlenosti normálu ( $I_0 = 407 \text{ cd}$ ) jsem získal z hodnoty svítivosti ze štítku, kde při vzdálenosti 1,00 m se osvětlenost rovná přímo hodnotě svítivosti (viz rovnice 4.1). Tato hodnota má pro nás pouze informativní charakter.

### 7.3.2 Graf hodnot osvětlenosti ve volném prostoru



Obrázek 7.2: Hodnoty osvětlenosti ve volném prostoru.

Měření ve volném prostoru probíhalo v laboratoři světelné techniky na Fakultě elektrotechnické ČVUT. Doprostřed místnosti, nad vyznačený bod, byl umístěn stativ, kde pomocí spojovací matice a závitové tyče byl ke stativové hlavě uchycen směřový jasový analyzátoř do výšky  $h = 0,75 \text{ cm}$ . Následně proběhlo několik měření analyzátořem. Dále se do jednotlivých pozic senzorů analyzátořu (celkem 6 pozic) umístil luxmetř a proběhlo měření.

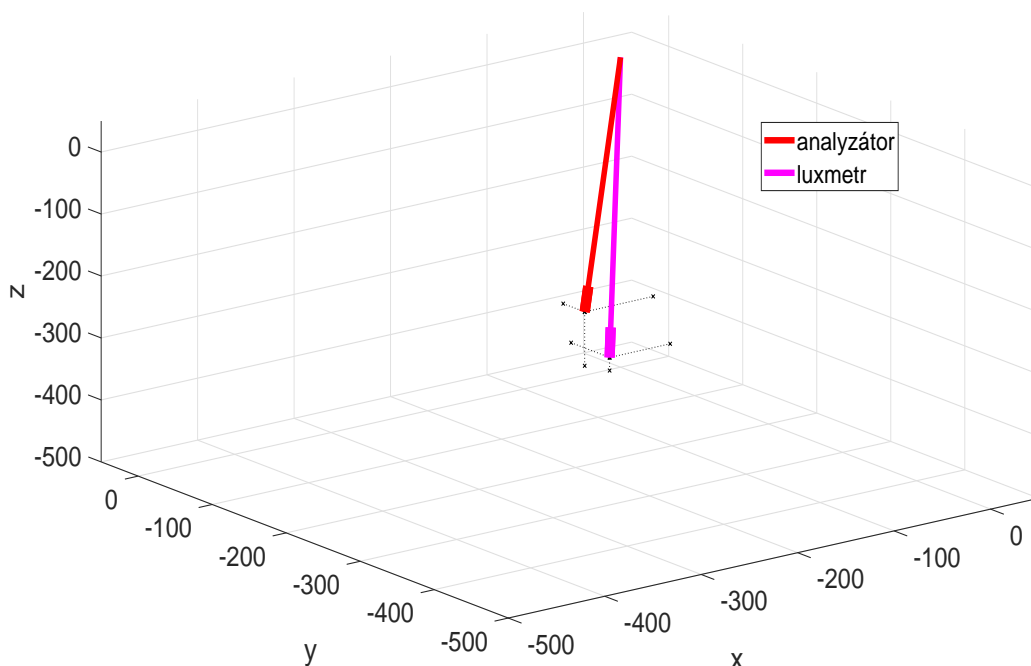
Na grafu zobrazeném na obrázku 7.2 můžeme vidět celkem 6 skupin grafů představujících jednotlivé stanoviště pro polohu senzorů na analyzátořu. Stanoviště S<sub>1</sub> představuje

místo na víku analyzátoru a směřuje do stropu místnosti, stanoviště  $S_2$  představuje místo ve stěně u vývodu kabelu z analyzátoru a směřuje k fotometrické lavici, stanoviště  $S_3$  představuje místo ve stěně vlevo od vývodu kabelu a směřuje ke dveřím do místnosti, stanoviště  $S_4$  představuje místo naproti stěně  $S_2$  a směřuje ke goniofotometru, stanoviště  $S_5$  je proti  $S_3$  a směřuje k oknu a poslední stanoviště  $S_6$  je proti stanovišti  $S_1$ , tudíž se jedná o místo na podlaze analyzátoru a směřuje na podlahu. Z grafu na obrázku 7.2 vyčteme větší odchylky mezi hodnotami osvětlenosti analyzátoru a hodnotami luxmetru než to bylo u předešlého měření na fotometrické lavici. Odchylky měření jsou způsobené více faktory. Jedním z nejdůležitějších faktorů je způsob zachycení paprsků na senzoru analyzátoru a v luxmetru. Luxmetr vyhodnocuje dopadající paprsky pouze v kolmém směru, kdežto senzory analyzátoru vyhodnocují i paprsky dopadající pod určitým úhlem. Dalším faktorem je vlastní částečné stínění analyzátoru, které je dáno jeho rozměry. Důležitou roli hraje i umístění luxmetru do příslušných stanovišť senzorů analyzátoru, které probíhalo orientačně bez podrobnějšího vyměřování.

### 7.3.3 Graf směrů vektorů osvětlenosti

Při měření světelného vektoru jsem vycházel z faktu, že průmět světelného vektoru do směru normály k určité rovině je roven rozdílu osvětleností obou stran této roviny. Aplikoval jsem to na analyzátor ve tvaru krychle, kde využívám šest stejných senzorů a při výsledném počítání světelného vektoru odečítám od sebe protilehlé hodnoty ze senzorů podle orientace souřadnicové osy, viz kapitoly 2, 6.

Zobrazení výsledných vektorů osvětlenosti v prostoru.



Obrázek 7.3: Výsledné světelné vektory.

Na posledním grafu vyobrazeném na obrázku 7.3 vidíme výsledné vektory osvětlenosti v prostoru, které jsou vypočítány z hodnot analyzátoru a luxmetru, a jsou výsledkem měření směrovým jasovým analyzátozem. Odchylka světelného vektoru osvětlenosti analyzátoru,  $\Delta = 13,76\%$ , se od světelného vektoru luxmetru liší z výše popsaných důvodů nepřesnosti měření. Grafické zobrazení světelného vektoru jsem udělal pomocí průmětů do zvolených tří os pravouhlé souřadnicové soustavy.





# Kapitola 8

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a následně vytvořit model směrového jasového analyzátoru. Během realizace bylo zapotřebí zaměřit se na výběr vhodného senzoru pro měření jasových poměrů při osvětlení prostoru, dále na volbu řídicí jednotky a na závěr formu ukládání výstupu z měření. Posledním krokem bylo ověření funkce realizovaného směrového analyzátoru dosavadními metodami měření směrových charakteristik osvětlení prostoru.

Podářilo se mi navrhnout model směrového jasového analyzátoru, který jsem následně realizoval pomocí 3D tisku. Během tvorby návrhu modelu jsem analyzoval stávající nabídku dostupných senzorů pro měření osvětlenosti jak s analogovým výstupem, tak s výstupem digitálním. Jak se později ukázalo, senzory s digitálním výstupem nabízejí mnohem lepší přesnost měření a zvláště mnohem jednodušší práci s nimi. Následně jsem vybral vhodnou řídicí jednotku Arduino Micro kvůli svým rozměrům, rozšířenosti a technické podpoře. Tato řídicí jednotka mi umožnila implementaci programu pro komunikaci se senzory přes I<sup>2</sup>C sběrnici. Následně jsem implementoval program pro ukládání naměřených dat spolu s vypočteným světelným vektorem. Pro realizaci směrového jasového analyzátoru jsem využil 3D tisk z polyaktidových vláken. V rámci možnosti upevnění na stativovou hlavu jsem do spodní stěny analyzátoru zapustil matici, do které je zašroubována propojovací závitová tyč a přes spojovací matici je možno analyzátor upevnit na stativovou hlavu. Funkci realizovaného směrového jasového analyzátoru jsem na závěr ověřil metodami měření směrových charakteristik osvětlení prostoru. Přesnost mého analyzátoru se ukázala jako velmi dobrá, dokonce výrazně lepší než se předpokládalo. Odchytky měření, které nepřesáhly hranici 10 % na fotometrické lavici, byly způsobeny konstrukcí jednotlivých senzorů, upevněním senzorů na analyzátor a hlavně uchycením samotného analyzátoru na posuvník fotometrické lavice. Během měření docházelo k ur-

čítým zjednodušením, což se podepsalo na výsledné přesnosti analyzátoru. Na druhou stranu, v porovnání s pořizovacími náklady profesionálních přístrojů na měření směrových charakteristik osvětlení prostoru, realizovaný směrový jasový analyzátor přináší mnohem dostupnější variantu přijatelné přesnosti měření.

Směrový jasový analyzátor, vytvořený v rámci této diplomové práce, může být využíván právě při měření směrových charakteristik osvětlení prostoru a posloužit k návrhu skutečných osvětlovacích soustav, které se nasadí v praxi. V budoucí době by bylo možné analyzátor zpřesnit například přidáním více senzorů, výměnou stávajících senzorů za senzory přesnější nebo úpravou tvaru analyzátoru.

# Literatura

- [1] Komunikace po sériové sběrnici I2C, 2018. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/komunikace-po-seriove-sbornici-isup2supc/>.
- [2] ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory.
- [3] Obsolete Technology Website, 2018. Dostupné z: <http://oldcomputers.net/ibm5100.html>.
- [4] Oxford Dictionary, 2015. Dostupné z: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/sensor>.
- [5] ADAFRUIT. <https://learn.adafruit.com>, May 2018.
- [6] ALIEXPRESS. [www.aliexpress.com](http://www.aliexpress.com), May 2018.
- [7] ĎAĎO, S. – KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1996.
- [8] BEDNARÍK, M. *Fyzika 1*. Praha : skriptum ČVUT, 2011.
- [9] BENEŠ, J. – STRÁNSKÝ, P. – VÍTEK, F. *Základy lékařské biofyziky*. Praha : Nakladatelství Karolunim, 2007.
- [10] BÁLSKÝ, M. *Analýza procesu mnohonásobných odrazů*. PhD thesis, ČVUT Praha, 2014.
- [11] BUMBÁLEK, J. *Základy technické optiky*. Praha : Skriptum ČVUT, 1987.
- [12] DATASHEET. *Ambient light sensor BH1750*, 2015. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/338083/ROHM/BH1750FVI.html>.

- [13] DATASHEET. *Panasonic light sensor AMS302*, 2015. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/315/ADD8000CE2-933962.pdf>.
- [14] DATASHEET. *Adafruit TCA9548A*, 2015. Dostupné z: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/tca9548a.pdf>.
- [15] DATASHEET. *Arduino Micro*, 2018. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-micro>.
- [16] FRANKLIN, G. F. – POWELL, J. D. – NAEINI, A. E. *Feedback Control of Dynamic Systems*. Addison-Wesley Pub : Prentice Hall, 2014.
- [17] GOLA, D. Projekt 1 - Výběr a analýza vlastností jasových čidel pro analýzu denního osvětlení. Technical report, ČVUT, Praha, 2017.
- [18] GOLA, D. Projekt 2 - Návrh komunikačního rozraní pro načítání dat ze soustavy digitálních jasových čidel. Technical report, ČVUT, Praha, 2017.
- [19] GRIMES, C. A. – DICKEY, E. C. – PISHKO, M. V. *Encyclopedia of Sensors (10-Volume Set)*. University Park, USA : American Scientific Publishers, 2006. ISBN 1-58883-056-X.
- [20] HABEL, J. a. k. *Světlo a osvětlování*. Praha : FCC Public, 2013.
- [21] HALSALL, F. *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*. Boston : Adison Wesley, 1996. ISBN 978-0201422931.
- [22] KONG, J. A. *Electromagnetic Wave Theory*. Massachusetts : MIT, 2003.
- [23] LABGUIDE. [www.labguide.cz](http://www.labguide.cz), May 2018.
- [24] MATOUŠEK, J. Vliv světla a osvětlení na člověka. *Elektroinstalatér*. 5/2003.
- [25] NXPSEMICONDUCTORS. *User manual and I<sup>2</sup>C-bus specication*, 2014. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>.
- [26] OPPENHEIM, V. – VERGHESE, G. C. *Signals, Systems and Inference*. Massachusetts : Prentice Hall, 2015. ISBN 978-0133943283.
- [27] PEATROSS, J. – WARE, M. *Physics of Light and Optics*. New York : available at [optics.byu.edu](http://optics.byu.edu), 2015.

- [28] PIXABAY. [www.pixabay.com](http://www.pixabay.com), May 2018.
- [29] POWERWIKI. [www.powerwiki.cz](http://www.powerwiki.cz), May 2018.
- [30] RIPKA, P. et al. *Senzory a převodníky*. Praha : Skripta ČVUT, 2005.
- [31] RS-ONLINE. <https://hken.rs-online.com>, May 2018.
- [32] VYLEGALA, P. *Snímače a senzory*. Praha : ROBOTI, 2013.
- [33] ZUMDAHL, S. S. – ZUMDAHL, S. A. Atomic Structure and Periodicity. *In Chemistry*. 2003.



# Příloha A

## Manuál k programu ANALYZATOR

1. V adresáři /analyzator/application.windows32/ si spustíte soubor **analyzator.exe**.
2. Otevře se prázdné okno aplikace, během které probíhá zápis hodnot do souboru.
3. Pro ukončení klikněte do okna spuštěné aplikace a stiskněte mezerník.
4. Po úspěšném zavření aplikace se ve stejném adresáři jako analyzator.exe objeví nový textový soubor **analyzator\_1.txt**, kde najdete výsledky svého měření.





# Příloha B

## Obsah přiložených souborů

K této práci je přiložen zazipovaný soubor s programem na ukládání naměřených hodnot analyzátořem. Dále je přiložen program pro komunikaci řídící jednotky se senzory přes multiplexor. Struktura příloh:

- /ARD\_komunikace.ino - program zajišťující komunikaci řídící jednotky, multiplexoru a senzorů, kde výsledné hodnoty měření jsou pak posílány na sériový port (spustitelný v programu Arduino IDE a v současné době nahrán do paměti řídící jednotky analyzátořem)
- /analyzator.zip - obsahuje všechny programy a zdrojové soubory pro spuštění aplikace na měření analyzátořem
- /analyzator/analyzator.pde - zdrojový soubor aplikace (spustitelný v programu Processing 3)
- /analyzator/application.windows32/analyzator.exe - aplikace na měření analyzátořem pro 32-bitové operační systémy (funguje i pro 64-bitové OS)