



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## LUXMETR

LUXMETER

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michael Velím

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

BRNO 2016



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor Automatizační a měřicí technika  
Ústav automatizace a měřicí techniky

*Student:* Michael Velím

*ID:* 164433

*Ročník:* 3

*Akademický rok:* 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

**Luxmetr**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je :

- 1) Vypracování rešerše týkající se metodiky měření intenzity osvětlení vybraných ploch v pracovním prostředí s důrazem na hygienické limity.
- 2) Zpracování systémového návrhu luxmetru s bateriovým napájením a číslicovým displejem pro rozsah osvětlení 20 - 1000 luxů.
- 3) Návrh obvodového řešení luxmetru.
- 4) Experimentální ověření navrženého řešení.
- 5) Vyhodnocení dosažených výsledků.

Práce musí obsahovat celkové schéma zapojení, výkres plošného spoje a soupisku součástek.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] ROZMAN, J., SADOVSKÝ, P., ČERMÁK, D. Diagnostika životního prostředí. VUT FEI, Brno, 2000, ISBN 80-214-1771-4.
- [2] PLCH, J. Světelná technika. IN-EL, Praha, 1999, ISBN 80-86230-09-0.

*Termín zadání:* 8.2.2016

*Termín odevzdání:* 23.5.2016

*Vedoucí práce:* doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.

*Konzultant bakalářské práce:*

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc., předseda oborové rady

## UPOZORNĚNÍ:

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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

# PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Luxmetr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne.....

.....

podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc.  
za účinnou metodickou pomoc a poskytnutí laboratorního vybavení pro zpracování bakalářské práce.

V Brně dne.....

.....

podpis autora

## **Abstrakt**

Tato práce se věnuje problematice měření pracovního osvětlení, se zaměřením na návrh luxmetru s rozsahem měření 50 – 1000 lx. Účelem tohoto zařízení je stanovit míru osvětlení v místnosti. Z těchto dat zjistíme, zda je pro danou činnost vykonávanou na pracovišti zvolen vhodný zdroj světla. Práce má dvě hlavní části – teoretickou a praktickou. V první části autor popisuje a přibližuje problematiku osvětlování a upřesňuje, jaké světelné zdroje jsou pro dané pracoviště vhodné. Také zmiňuje, jaké součástky jsou vhodné pro sestavení luxmetru a parametry přístroje. Druhá část se věnuje samotnému sestavení a výsledkům z měření při kalibraci luxmetru. Součástky pro přístroj autor vybral po důkladné rešerši literatury a důraz kladl také na jejich bližší charakteristiku.

## **Abstract**

This thesis deals with the matter of measuring working light with the aim to design a luxmeter with the range of 50 – 1000 lx. The purpose of this device is to define the amount of light in the room. From these measurements we can get the information if the source of the light is good enough for the type of work which is being processed in the room. The thesis has two main parts – theoretical research and practical suggest of completing the device. In the first part the author describes the matter of illumination and tries to state which light source is good for different workplaces. The second part is mainly practical and it deals with the completion of the lumeter. Also it talks about the calibration measurements of the device. The components for this luxmeter were picked up after a literary research. The author also emphasises further characteristics of each component.

## **Klíčová slova**

Luxmetr, fotodioda, mikroprocesor

## **Keywords**

Luxmeter, photodiode, microprocessor

## **Bibliografická citace práce:**

VELÍM, M. *Luxmetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 48 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc..

# Obsah

Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
1. Úvod do problematiky .....	9
2. Měření osvětlení .....	10
2. 1. Osvětlení prostředí .....	10
2. 2. Základní světelně technické veličiny .....	14
2. 3. Metodika měření umělého osvětlení .....	21
3. Vlastní implementace řešení .....	25
4. Zhodnocení dosažených výsledků .....	45
Literatura.....	46

## Seznam obrázků

- Obr. 1: Závislost spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce [7]
- Obr. 2: Normál svítivosti [7]
- Obr. 3: Osvětlenost [7]
- Obr. 4: Definice jasů [7]
- Obr. 5: Vymezení prostorového úhlu [7]
- Obr. 6: Proud fotodiodou v závěrném směru v závislosti na osvětlení [2]
- Obr. 7: Voltampérová charakteristika fototranzistoru [1]
- Obr. 8: Voltampérová charakteristika fototyristoru [1]
- Obr. 9: Fotorezistor [1]
- Obr. 10: Fotometrická lavice [13]
- Obr. 11: Blokové uspořádání luxmetru
- Obr. 12: Spektrální citlivost fotodiody BPW 21 [9]
- Obr. 13: Závislost výstupního napětí a proudu na intenzitě osvětlení [11]
- Obr. 14: Zapojení fotodiody s operačním zesilovačem [3]
- Obr. 15: Praktické zapojení fotodiody pro omezení svodových proudů [3]
- Obr. 16: Programátor mikrokontrolérů ATMEGA
- Obr. 17: Přenos bitů po sběrnici [4]
- Obr. 18: Začátek a konec přenosu dat [4]
- Obr. 19: LCD displej
- Obr. 20: Vývojový diagram
- Obr. 21: Celkové schéma zapojení luxmetru
- Obr. 22: Návrh rozmístění součástek
- Obr. 23: Zrcadlený návrh cest pro osvětlení desky
- Obr. 24: 3D model svrchního dílu pouzdra
- Obr. 25: 3D model spodního dílu pouzdra
- Obr. 26: Vytisknuté pouzdro
- Obr. 27: Graf závislosti osvětlení na výstupní hodnotě AD převodníku
- Obr. 28: Graf závislosti výstupního napětí z operačního zesilovače na osvětlení
- Obr. 29: Srovnání směrových charakteristik luxmetrů

## Seznam tabulek

Tab. 1:	Vymezení barev na základě vlnové délky [7]
Tab. 2:	Doporučené rozsahy osvětlenosti podle CIE [7]
Tab. 3:	Optimální hodnoty odraznosti, osvětlení a jasů v kanceláři pro dílčí plochy [7]
Tab. 4:	Vzdělávací (školská a výchovná) zařízení [7]
Tab. 5:	Závislost počtu měřicích bodů $n$ na činiteli místnosti $k$
Tab. 6:	Seznam použitých součástí
Tab. 7:	Výňatek z tabulky změřených a vypočítaných hodnot
Tab. 8:	Tabulka změřených (hodnota AD) a vypočítaných hodnot ( $E_M$ , $\Delta$ , $\delta$ )
Tab. 9:	Výňatek z tabulky změřených a vypočítaných hodnot



# 1. Úvod do problematiky

Aby lidé mohli vykonávat zrakové úkoly účinně a přesně, musí jim být zajištěno vhodné osvětlení. Zrakový výkon je určen zejména fyziologickými vlastnostmi lidského zraku a pro danou zrakovou činnost je objektivním měřítkem osvětlení. Zrakový výkon je určen v jednotlivých prostorech pro jasně definovanou činnost [7].

Cílem osvětlení je vyvolávat psychofyziologický stav organismu, vyvolaný optickou situací vnějšího prostředí. Intenzita osvětlení je rozdílná pro práci a odpočinek, aby umožňovala zraku optimálně plnit jeho funkci [7].

Správné osvětlení by mělo být navrženo tak, aby splňovalo zásady současné světelné techniky. Cílem je zajistit správné psychologické, fyziologické a biologické požadavky, jež ovlivňují míru únavy, kvalitu vykonané práce a zdravotní stav organismu. Správnou míru osvětlení ověřujeme měřením pomocí luxmetru [7].

Luxmetr je přístroj skládající se z fotocitlivého detektoru, elektroniky a displeje. V praxi se používá nejen ke stanovení hodnoty osvětlení, ale i k měření odrazivosti povrchů, vlastní frekvence zářivek a vlastností optických pohlcovacích filtrů [7].

## 2. Měření osvětlení

### 2.1. Osvětlení prostředí

Světlo představuje viditelnou část spektra elektromagnetického záření. Vlnové délky viditelného spektra leží mezi ultrafialovým a infračerveným zářením, a to v rozmezí 400 – 800 nm. Protože pomocí zraku získáváme 80% informací z okolí, potřebujeme, aby zrak optimálně plnil svou funkci. Při dodržení vhodných podmínek osvětlení se člověk cítí psychicky dobře (zraková pohoda) [6].

Tab. 1: Vymezení barev na základě vlnové délky [7]

Vlnová délka $\lambda$ (nm)	Barevný tón
380 - 420	Fialová
420 - 440	Modrofialová
440 - 460	Modrá
460 - 510	Modrozelená
510 - 560	Zelená
560 - 590	Žlutá
590 - 650	Oranžová
650 - 780	Červená

Umělé osvětlení nahrazuje denní světlo tam, kde je ho nedostatek (vzdálená místa od oken, zastínění pracovní plochy překážkou). Moderní světelné zdroje dokážou ve vnitřních prostorech vytvořit osvětlení kvantitativně srovnatelné s denním světlem.

Intenzitu osvětlení navrhujeme na daný zrakový úkon. Požadované intenzity osvětlení přiřazené pracovním činnostem jsou uvedeny v tabulce č. 2 [7].

Tab. 2: Doporučené rozsahy osvětlenosti podle CIE [7]

Osvětlenost (lx)	Prostor, místo, druh činnosti
20 - 30 - 50	základní jednoduchá zraková orientace v prostředí
50 - 75 - 100	jednoduchá orientace, kratší doba jednoduché činnosti
100 - 150 - 200	prostory, které nejsou dlouhodobě užívány pro pracovní účely, prostory obytné a společenské
200 - 300 - 500	zraková místa pro jednodušší, běžně pracovní úkoly (kanceláře, školy)
500 - 750 – 1000	zraková místa pro vizuálně náročnější déle trvající pracovní úkony
1000 – 1500 – 2000	zvláště náročné pracovní úkoly
více než 2000	velmi náročné zrakové úkoly

## Osvětlování vnitřních pracovních míst

Práce a pracoviště prochází v současné době velkými proměnami. Se vzrůstajícím počtem pracovišť s výpočetní technikou obsahující obrazovku, vzrostly požadavky na jejich strukturované uspořádání, vyžadující také změnu konvenčního osvětlení. Proto již nestačí projektovat osvětlení na základě intenzity a mezních křivek osvětlení. Je nutné brát v úvahu a posoudit rozložení jasu, kontrastu, vertikální intenzity osvětlení v místnosti a uspořádání svítidel osvětlovací soustavy s přihlédnutím k pracovním činnostem a k samotnému pracovišti [7].

### Pracoviště s trvalou prací a výpočetní technikou

Pro každé dílčí pracoviště existuje přesný popis světelně technických vlastností použitých svítidel [7].

U řadové skladby pracovišť by měly být svítidla pravidelně rozmístěna na stropě, popřípadě ve světelných bílých pásích plošných svítidel s mřížkami orientovanými paralelně k oknu [7].

Podle úrovně odrazných ploch vymezujících plochu kanceláře by mohly vzniknout jasy, které by často převyšovaly poměr 1 : 10 stanovených pro zrakovou práci v kancelářích. Optimální hodnoty odrazností dílčích ploch v kancelářském prostoru viz tab. č. 3 [7].

Tab. 3: Optimální hodnoty odraznosti, osvětlení a jasu v kanceláři pro dílčí plochy [7]

<b>Plocha v místnosti</b>	<b>Odrážnost <math>\rho_0</math> (-)</b>	<b>Osvětlení E (%)</b>	<b>Jas L (%)</b>
Místo úkolu	0,8	100	100
Okolí úkolu	0,35	100	40
Stěny	0,5	50-80	30
Strop	0,7	30-90	30
Nábytek	0,3	---	20
Podlaha	0,2	50-100	25

### **Pracoviště s občasnou prací s výpočetní technikou**

Tato pracoviště můžeme rozdělit na čtení, psaní, studium, práce s výpočetní technikou, tvůrčí práce, plná koncentrace, komunikativní činnost se zákazníky a pracovníky [7].

Nejvýhodnější by bylo denní světlo z levé strany. Tento druh světla nesplňuje všechny parametry a není vždy k dispozici. Někdy je totiž potřeba denní světlo potlačit, či zcela eliminovat, většinou žaluziemi [7].

Pro splnění všech určených požadavků na osvětlení je důležité brát v úvahu více činností na pracovišti, proto návrh osvětlovací soustavy bude odlišný od předcházejícího pracoviště, kde je pouze trvalá činnost s výpočetní technikou [7].

Nejrozsáhlejší část normy ČSN EN 12464-1 Světlo a osvětlení – Osvětlení pracovních prostorů – Část 1 - Vnitřní pracovní prostory: Obsahuje vysvětlení skladby rozsáhlých tabulek, přehledný obsah tabulek podle oborů a následně samotný tabulkový přehled požadavků pro jednotlivé prostory a definované lidské činnosti [7].

Tyto oblasti jsou rozděleny následovně: [7]

- Komunikační zóny a společné prostory v budovách
- Průmyslové činnosti a prostory
- Administrativní prostory (kanceláře)
- Obchodní prostory
- Veřejné prostory
- Školská a výchovná zařízení
- Zdravotnická zařízení
- Dopravní prostory

U každé z položek je uvedena udržovaná osvětlenost ( $\bar{E}_m$ ), maximální přípustná hodnota indexu oslnění v systému (URG) a minimální hodnota indexu podání barev ( $R_a$ ). Pokud nejsou v seznamu některé místnosti (prostory), úkoly, nebo aktivity uvedeny, musí se převzít hodnoty pro podobné srovnatelné situace [7].

Ukázka požadavků na osvětlení vzdělávacích zařízení dle normy ČSN EN 12464-1.

Tab. 4: Vzdělávací (školská a výchovná) zařízení [7]

Druh prostoru, úkolu, nebo činnosti	$\bar{E}_m$ (lx)	URG (-)	$R_a$ (-)	Specifické požadavky
učebny, konzultační místnosti	300	19	80	osvětlení má regulovatelné
auditoria a poslouchárny	500	19	80	osvětlení má regulovatelné, aby splňovalo požadavky na prostory pro audiovizuální prezentace
demonstrační stůl	500	19	80	v přednáškových sálech 750 lx
místnosti pro výtvarnou výchovu v uměleckých školách	750	19	90	5 000 K < $T_{cp}$ 6 500 K
místnost pro praktickou výuku a laboratoře	500	19	80	
komunikační prostory a chodby	100	25	80	

## 2. 2. Základní světelně technické veličiny

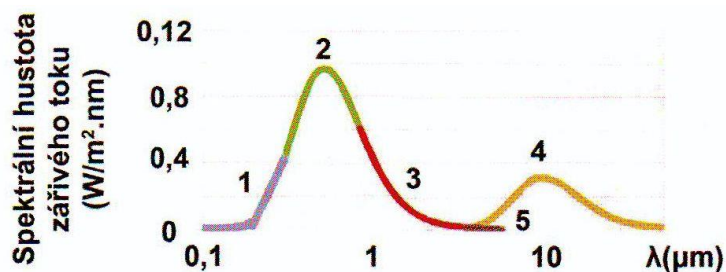
Pro popis světelného záření a jeho parametrů je, stejně jako v jiných vědních oborech, důležité používat fyzikální jednotky tak, aby platily po celém světě. Ve světelné technice se jednotky vztahují pod záštitu Mezinárodní komise pro osvětlování CIE. V mezinárodní soustavě jednotek SI se vyskytuje jednotka kandela (cd), jenž vystihuje základní vlastnosti světla. Veličiny jednotek zavedené komisí CIE se vztahují k takzvanému normálu fotometrického pozorovatele [7].

Fotometrického pozorovatele reprezentují standardní vlastnosti lidského oka, protože každý člověk může mít odlišnou citlivost k různým vlnovým délkám světla [7].

### Přehled veličin

#### Světelný tok

Světelný tok  $\Phi$  představuje zářivý tok  $\Phi_e$ , jenž je posuzován ze strany lidského oka. Světelný tok nám říká, jaké množství světelné energie vyzáří zdroj do svého okolí. Jednotkou světelné toku je lumen [lm]. Zářivý tok udává velikost výkonu, které záření přenáší, vysílá, nebo přijímá [7].



Obr. 1: Závislost spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce [7]

1. Sluneční ultrafialové záření
2. Sluneční viditelné záření
3. Sluneční infračervené krátkovlnné záření
4. Tepelné záření pozemských těles
5. Sluneční infračervené dlouhovlnné záření

## Svítivost

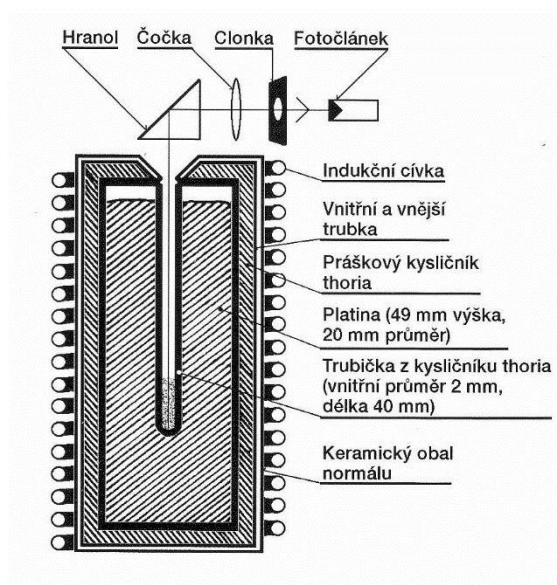
Veličina popisující distribuci světelného záření do prostoru. Vyjadřuje kolik světelného toku je vyzařeno zdrojem v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je kandela [cd]. Od roku 1979 se kandela definuje jako svítivost vyzařující pod určitým úhlem monochromatické záření s intenzitou  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  a frekvencí  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ . Střední hodnota svítivosti se pak určuje ze světelného toku  $\Phi$  vyzařujícím v prostorovém úhlu  $\Omega$  [7].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (2.1)$$

Kde:  $I$  – svítivost (cd);  $d\Phi$  - světelný tok;  $d\Omega$  - prostorový úhel, do kterého je světelný tok vyzařován (sr).

### Normál svítivosti (1 cd)

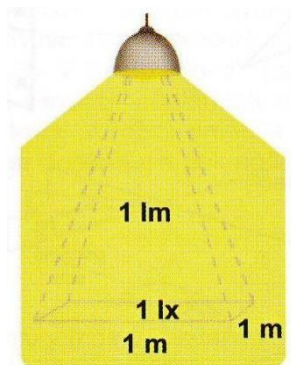
Zdrojem světla etalonu svítivosti je trubička z thoria umístěná v kelímku s rozžhavenou platinou. Zdrojem je proud o vysokém kmitočtu. Měření se provádí při přechodu kapalného skupenství platiny na pevné. V Evropě nejvíce používaný etalon se nazývá Hefnerova svíce skládající se z 40mm dlouhého plamene octanu amylnatého hořícího nad bavlněným kulatým knotem s průměrem 8mm za určitých podmínek [7].



Obr. 2: Normál svítivosti [7]

## Osvětlenost

Osvětlenost, neboli také intenzita osvětlení, udává hodnotu světelného toku na jednotkovou plochu ( $1 \text{ m}^2$ ) [7].



Obr. 3: Osvětlenost [7]

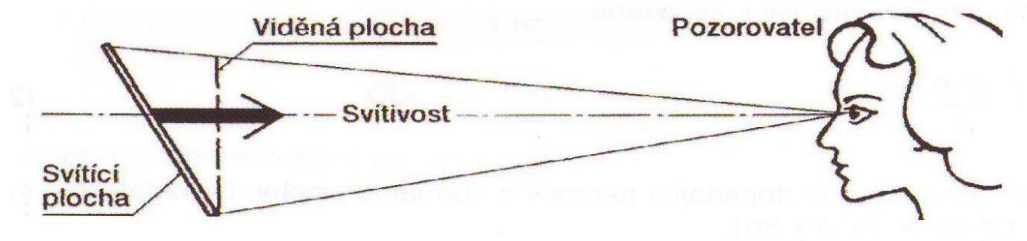
Jednotkou osvětlenosti je lux (lx) a platí:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.2)$$

Kde:  $E$  – osvětlenost;  $d\Phi$  – velikost světelného toku dopadajícího na plochu (lm);  $dA$  – plocha, na kterou dopadá světelné záření ( $\text{m}^2$ ).

## Jas

Veličina definovaná jako měrná svítivost. Značí se  $L$  a jednotkou je  $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Je to veličina, na kterou oko přímo reaguje (kontrast jasu). Jas je určen plošnou a prostorovou hustotou světelného toku, proto záleží na poloze pozorovatele a směru jeho pohledu.



Obr. 4: Definice jasu [7]



Pokud je plocha sledovaná pod úhlem, je průměr této plochy menší, než skutečná plocha [7].

$$L = \frac{I}{S_p} \quad (2.3)$$

Kde:  $L$  – jas ( $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $I$  – svítivost (cd);  $S_p$  – průmět svítící plochy.

### Světlení

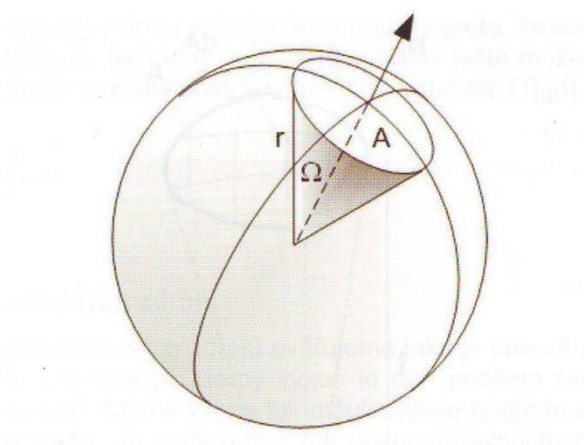
Veličina definující plošnou hustotu světelného toku  $d\Phi$ , jenž je vyzařován z plochy  $dA$ . Jednotkou je lumen na metr čtvereční ( $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ ) [7].

$$M = \frac{d\Phi}{dA} \quad (2.4)$$

Kde:  $M$  – světlení ( $\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $d\Phi$  – plošná hustota světelného toku (lm);  $dA$  – plocha ze které vychází světelný tok ( $\text{m}^2$ ).

### Prostorový úhel

Velmi důležitá veličina, představující část prostoru, jenž je vymezen kuželovou plochou, která na kouli poloměru  $r$ , vytvoří plochu  $A$  [7].



Obr. 5: Vymezení prostorového úhlu [7]

Velikost prostorového úhlu, pod kterým je vidět ze středu koule plocha A je dán vztahem: [7]

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

Kde:  $\Omega$  - prostorový úhel ve steradiánech (sr); A – plocha vytvořená kuželem představující daný prostorový úhel ( $m^2$ ); r – poloměr koule (m).

### **Fotoelektrický jev**

Fotoelektrický jev popisuje vzájemnou interakci látek a elektromagnetického záření, kdy dochází k uvolnění, nebo pohlcení fotonů [7].

#### Dělení:

- a) vnitřní fotoelektrický jev:

Založen na principu předání energie dopadajícího fotonu valenčnímu elektronu.

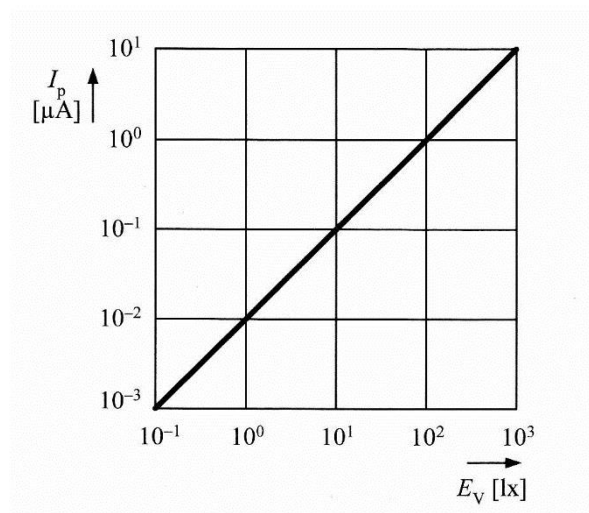
- b) vnější fotoelektrický jev:

Dochází k uvolnění elektronu z látky.

### **Polovodičové fotočlánky**

#### **Fotodioda**

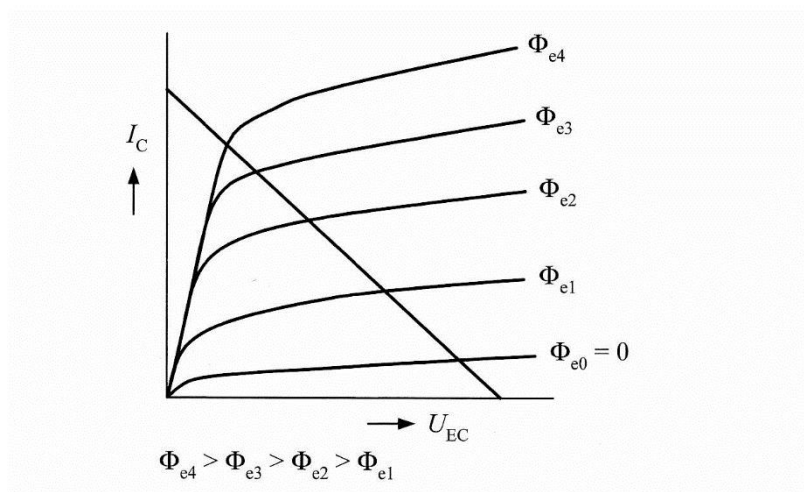
Přechod PN diody je značně citlivý na světlo, a to hlavně v záporné polarizaci, kdy při osvětlení přechodu vzroste závěrný proud. Proud fotonů vhodné energie při dopadu na přechod PN uvolní pár elektron-díra, který zvětšuje závěrný proud, nebo ve fotovoltaickém režimu (bez přiloženého napětí) zvýší napětí přechodu PN. V současné době se využívají PIN fotodiody. Citlivost křemíkové fotodiody se pohybuje od infračerveného přes viditelné až po ultrafialové záření. Fotodioda se využívá pro konstrukci optočlenů, světelných závor, dálkových ovladačů a pro svou linearitu v měřicích přístrojích (luxmetr, expozimetr) [1].



Obr. 6: Proud fotodiodou v závěrném směru v závislosti na osvitu [2]

### Fototranzistor

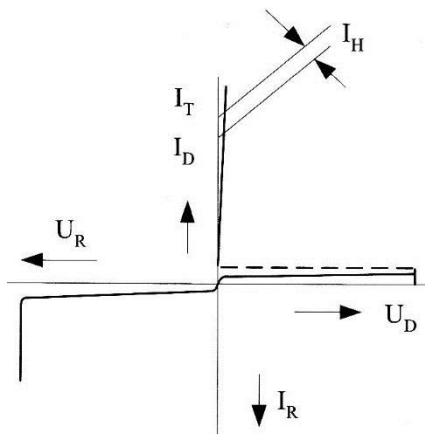
Pracuje na principu klasického tranzistoru s tím rozdílem, že je ovládán zářením dopadající na přechod báze. Fototranzistor může mít i vyvedenou bázi pro řízení citlivosti fototranzistoru. Světlem generované minoritní nosiče náboje jsou strhnuty polem kolektoru a vytvoří primární fotoproud  $I_c$ . Fototranzistor se využívá v zapojení se společným emitorem. Nejčastější využití má fototranzistor při konstrukci optočlenů [1].



Obr. 7: Voltampérová charakteristika fototranzistoru [1]

## Fototyristor

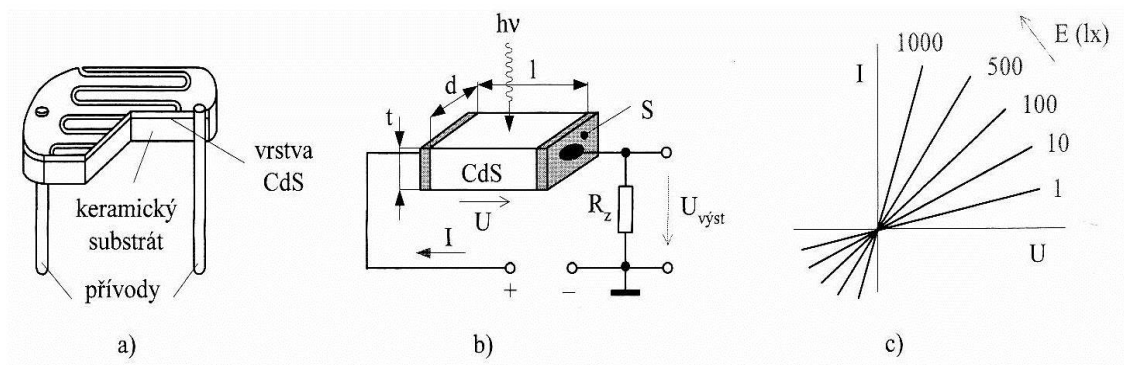
Součástka pracující na principu přepínání z propustného do blokovacího režimu. Spínání zajišťuje záření dopadající na polovodič. Fototyristor setrvává v sepnutém režimu i po zániku osvitů řídicí elektrody. Vypnutí se provádí poklesem napětí (proudu) na anodě pod přídržnou hodnotu  $I_H$  [1].



Obr. 8: Voltampérová charakteristika fototyristoru [1]

## Fotorezistor

Homogenně dotovaný polovodič CdS typu N je citlivý na osvit. Zvyšujícím se osvětlením klesá odpor součástky. Vhodným koncentračním poměrem polovodičů CdS/CdSe lze měnit spektrální citlivost fotorezistoru. Nevýhodou je světelný paměťový efekt, velká časová konstanta a velká teplotní závislost [1].



Obr. 9: Fotorezistor [1]: a) reálná struktura fotorezistoru, b) zjednodušená struktura fotorezistoru, c) voltampérová charakteristika

## CCD snímače světelného toku

Snímače se skládají uspořádaných fotobuněk. Každá jednotlivá fotobuňka přeměňuje dopadající světlo na elektrický náboj, jenž se převede A/D převodníkem na digitální signál [1].

### 2.3. Metodika měření umělého osvětlení

Postup měření umělého osvětlení:[7]

1. V úvodní části je potřeba měření odůvodnit, stanovit co bude měřeno a z jakých norem a předpisů se bude vycházet. Normy popisující měření osvětlení jsou: ČSN 36 0011-1 (Měření osvětlení) a ČSN 36 0011-3 (Měření umělého osvětlení).
2. Další část popisuje, za jakých podmínek měření probíhalo (tlak, teplota, vlhkost). Uvede se čas, datum měření a kdo měření prováděl.
3. Proveďte se soupis měřicích přístrojů se všemi potřebnými údaji, zejména údaje o korekcích a kalibracích.
4. Konkrétně se popíše prostor, ve kterém měření probíhalo a stanoví se pro něj předepsané hladiny osvětlení.
5. Do dokumentace se zaznamenávají údaje o napájecí soustavě osvětlovací soustavy.
6. Charakterizuje se prostor s konkrétními hodnotami odraznosti stěn, stropů, podlah včetně jejich barev, jejich aktuální stav a konstrukce.
7. V posledních částech se popíší světelné zdroje se všemi parametry a charakteristikami. Zdokumentují se parametry svítidel, jejich počet, rozmístění a stav.

Měří se ve srovnávací rovině (0,85 m od podlahy) a na pracovních místech při celkovém osvětlení [7].

Měření se provede ve čtvercové síti místnosti. Vzdálenost měřicích bodů se pohybuje od jednoho do šesti metrů, podle rozlehlosti. Minimální počet měřicích bodů n určíme z následující rovnice [7].

$$n = \frac{1}{k} = \frac{a * b}{kh * (a + b)} \quad (2.6)$$

Kde: a, b – rozměry místnosti (m); h- výška svítidel nad srovnávací rovinou; k – činitel místnosti (-).

Tab. 5: Závislost počtu měřicích bodů  $n$  na činiteli místnosti  $k$ .

k	n
$k < 1$	36
$1 < k < 2$	25
$2 < k < 3$	16
$3 < k < 4$	9
$4 < k$	4

Na pracovní ploše jsou body od sebe vzdáleny minimálně 0,2 m od sebe. Fotočlánek nesmí být ničím krytý a musí být umístěn ve správné výšce a musí se kontrolovat výška srovnávací hladiny. Měření probíhá tak, aby byla změřena místa s nejmenší a největší intenzitou [7].

Prvně si uvedeme průměrnou hodnotu horizontálního osvětlení vypočtenou jako aritmetický střed ze všech provedených měření [7].

$$E_{prHR} = \frac{\sum_n E_n}{n} \quad (2.7)$$

Kde:  $E_{prHR}$  – průměrná hodnota horizontální osvětlenosti (lx);  $E_n$  – osvětlenost v jednotlivých bodech (lx);  $n$  – počet měřicích bodů.

Dále se určí maximální intenzita  $E_{MAX}$ , kterou představuje maximální hodnota zjištěná při měření. Stejně tak se určí i minimální hodnota  $E_{MIN}$ . Z jednotlivých podílů osvětleností se určí rovnoměrnost osvětlení  $r$  [7].

$$r = \frac{E_{MIN}}{E_{MAX}} \quad (2.8)$$

Celková plocha, která je osvětlená, se udává podle rozměrů místnosti.

$$S = a * b \quad (2.9)$$

Kde:  $S$  – celková osvětlená plocha ( $m^2$ );  $a$ ,  $b$  – rozměry plochy ( $m$ ).

Z příkonu osvětlovací soustavy a celkové osvětlené plocha se zjistí měrný příkon.

$$p = \frac{P}{S} \quad (2.10)$$

Kde:  $p$  – měrný příkon osvětlovací soustavy ( $W \cdot m^{-2}$ );  $P$  – elektrický příkon soustavy ( $W$ );  
 $S$  – celková osvětlená plocha ( $m^2$ ) [7].

Na konec se určí napěťový korekční faktor  $k_u$  podílem jmenovitého napětí světelného zdroje  $U_n$  a napětí naměřené v soustavě  $U_m$  [7].

### **Požadavky na cejchování měřicích přístrojů světelných veličin**

Cejchování měřicích přístrojů probíhá v laboratorním prostředí tak, aby výsledky mohly sloužit pro hodnocení a posuzování, nebo pro katalogové listy výrobců [7].

Fotometrická laboratoř musí být vybavena černým povrchem stěn a předmětů, aby se zamezilo rušivým odrazům světla. Nejdůležitějším zařízením je fotometrická lavice v černém provedení o délce od 3 do 6 metrů. Tvoří ji ocelová tyč, na níž jsou umístěny clony, měřené i měřicí zařízení. Po celé délce lavice se nachází stupnice s možností odečítání vzdálenosti s přesností na 1 mm. Při kalibraci luxmetru se na jeden konec lavice umístí normál svítivosti a na posuvnou část kalibrovaný luxmetr. Měření musí splnit základní podmínku – dodržení fotometrické vzdálenosti. Ta se určí jako pětinasobek největšího rozměru fotometrovaného svítidla při méně přesných měřeních, nebo desetinásobek při přesných měřeních [7].

Další důležitou částí fotometrické laboratoře je kulový integrátor (Ulbrichtova koule). Ten slouží k měření světelného toku svítidel a zdrojů osvětlení. Používá se také k určení světelných výkonů světelných zdrojů, ke kalibraci normálů světelných toků atd. Kulový integrátor je dutá koule s normovanou skladbou nátěrů, jejíž konečný povrch je spektrálně nezávislý a má vysokou odrazivost. V kouli je uložen fotočlánek se clonkou, aby se zamezilo přímému dopadu světla na povrch. Integrátor má průměr od několika centimetrů až do tří metrů, ve kterém lze měřit zdroje s rozměrem až 2 metry [7].

Součástí fotolaboratoře je i goniofotometr sloužící s k rozložení křivek svítivosti v prostoru. Dle konstrukce bývá jeden z prvků (např. zdroj) pevný a druhý (fotočlánek) se otáčí kolem prvního [7].



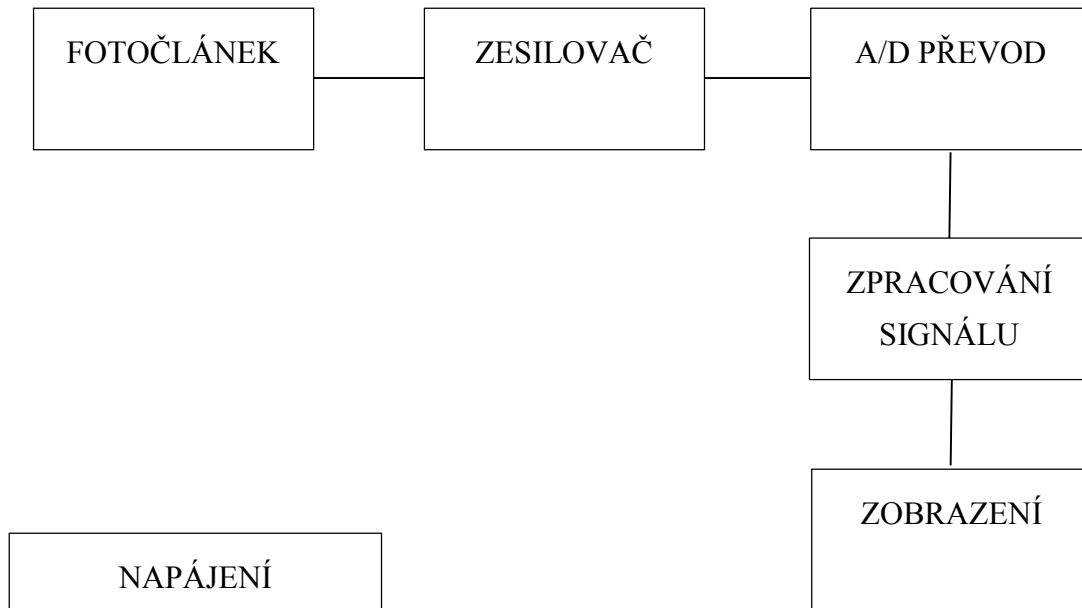
Obr. 10: Fotometrická lavice [13]



### 3. Vlastní implementace řešení

V této kapitole je blokově popsán systémový návrh luxmetru s technickým popisem každé součásti.

#### Systémový návrh luxmetru



Obr. 11: Blokové uspořádání luxmetru

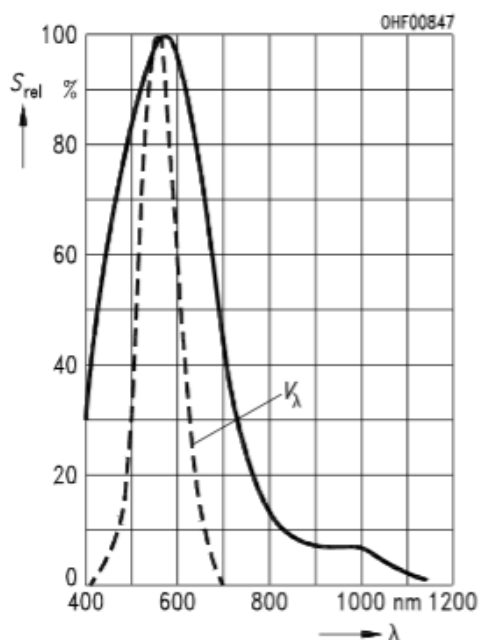
#### Fotočlánek

Jako nejvhodnější detektor pro měření osvětlení je fotodioda. Fotodioda rychle a citlivě reaguje na změnu osvětlení a nevyžaduje složité zapojení v obvodu.

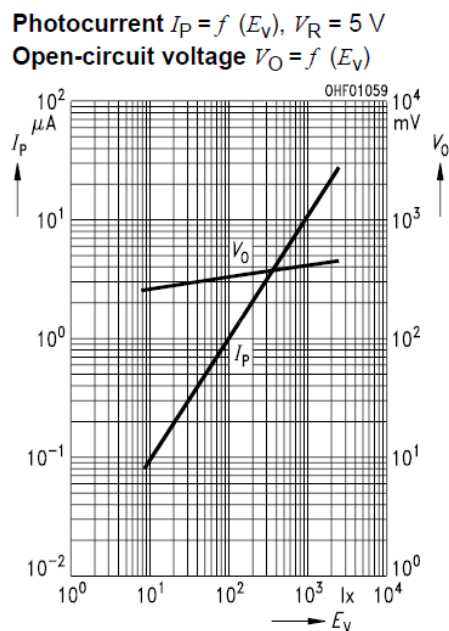
Při výběru fotodiody bylo důležité vybrat takovou fotodiodu, jenž bude mít největší citlivost ve viditelném spektru záření.

Nejvhodnější fotodiodou pro měření osvětlení je BPW21 (Siemens) s největší spektrální citlivostí na vlnové délce 550 nm. Tato dioda byla vyrobena pro účely měření denního a umělého osvětlení (vlnová délka od 350 nm do 820 nm). Výstupní napětí fotodiody v rozsahu 20 – 1000 lx je 300 mV – 400 mV. Nevýhodou této fotodiody je

velký teplotní koeficient  $T_{CP} = 2,6 \text{ mV/K}$ , což v měřeném rozsahu vytváří značnou chybu  $26 \text{ lx/K}$  [11].



Obr. 12 Spektrální citlivost  
fotodiody BPW 21 [9]



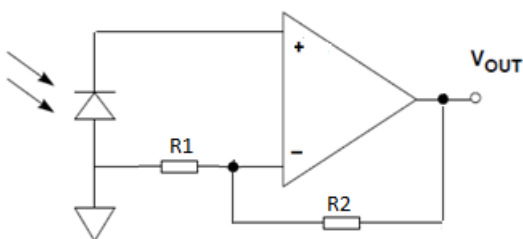
Obr. 13: Závislost výstupního napětí a  
proudu na intenzitě osvětlení  
[11]

## Zesilovač

Pro zesílení výstupního napětí fotodiody se hodí operační zesilovač, jež je charakterizován velkou vstupní impedancí. Pro naši aplikaci je zvolen operační zesilovač LMC6462 díky následujícím parametrům:[15]

- Vysoká vstupní impedance (vstupní proudy  $150 \text{ fA}$ )
- Nízký ztrátový výkon (z důvodu bateriového napájení)
- Nízké offsetové napětí (pouze  $2,5 \text{ mV}$ )
- Teplotní závislost offsetového napětí pouze  $2 \text{ } \mu\text{V/K}$
- Napájecí napětí  $3 \text{ V}$ , nebo  $5 \text{ V}$  (bez nutnosti požití symetrického napájení)

Fotodioda byla zapojena s operačním zesilovačem v neinvertujícím režimu z důvodu požadavku kladného výstupního napětí pro další zpracování A/D převodníkem.



Obr. 14: Zapojení fotodiody s operačním zesilovačem [3]

Pro výpočet zesílení bylo potřeba vzít v úvahu následující požadavky:

- Napěťový výstup z fotodiody pro požadovaný rozsah osvětlení: 280 – 410 mV ( $\Delta U_d$ ).
- Výstupní napětí zesilovače menší jak 5V (omezeno napájecím napětím).
- Výstupní napětí zesilovače pro požadovaný měřicí rozsah:

$$U_{MAX} - U_{MIN} = 900 \text{ mV} \quad (3.1)$$

Kde:  $U_{MAX}$  – výstupní napětí operačního zesilovače pro horní hranici měřeného rozsahu osvětlení 1000 lx (mV);  $U_{MIN}$  - výstupní napětí operačního zesilovače pro dolní hranici měřeného rozsahu osvětlení 20 lx (mV); hodnota 900 mV vyplývá z hodnoty referenčního napětí AD převodníku viz. odstavec A/D převod.

Z požadavků vyplývá rovnice:

$$(U_{MAX} - U_{MIN}) = K_U (\Delta U_d) \quad (3.2)$$

Vyjádřením zesílení ( $K_U$ ) získáme rovnici:

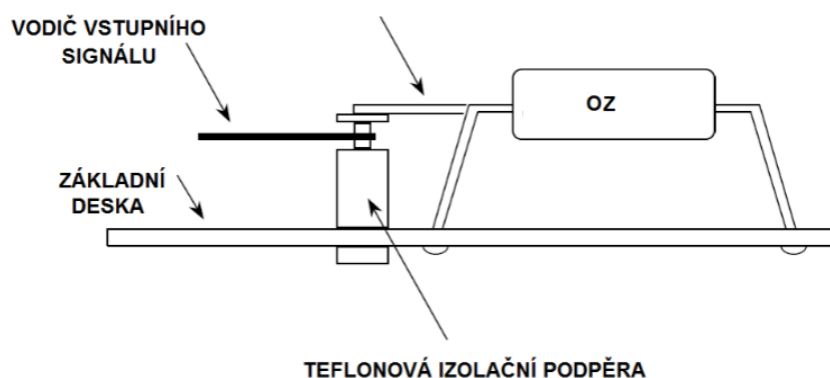
$$K_U = \frac{U_{MAX} - U_{MIN}}{\Delta U_d} = \frac{900 \text{ mV}}{130 \text{ mV}} = 6.92 [-] \quad (3.3)$$

Zesílení operačního zesilovače zapojeném v neinvertujícím režimu je dáno vztahem:

$$Ku = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

Aby zesílení operačního zesilovače bylo 7, musí být poměr rezistorů  $R_2$  a  $R_1$  roven 6. Pro splnění podmínky pro zesílení a hodnot rezistorů vyráběných u určitých řadách se jeví vhodné hodnoty rezistorů  $R_1 = 51\text{k}\Omega$  a  $R_2 = 300\text{k}\Omega$ .

Pro zvýšení přesnosti měření je vhodné přiletovat katodu fotodiody přímo na vývod operačního zesilovače. Tím se sníží hodnota svodového proudu [3].



Obr. 15: Praktické zapojení fotodiody pro omezení svodových proudů [3]

## A/D převodník

Úkolem A/D převodníku je konvertovat spojitou hodnotu signálu na digitální pro další zpracování mikrokontrolérem. Pro zpracování zadaného rozsahu hodnot (20 - 1 000 lx), tomu odpovídá převodník min.  $2^{10}$  bitů (1024 hodnot). Pro určitou rezervu rozsahu, možný přítomný šum v signálu a z důvodu nelineárního průběhu volíme 13 bitový převodník MCP3301.

Vlastnosti A/D převodníku MCP3301:[14]

- Rozlišovací schopnost 13 bitů (možnost změřit 8192 různých hodnot).
- Měření amplitudy od 0,1V do 4,9 V s vzorkovací frekvencí 100 kHz (v našem případě, kdy měříme stejnosměrnou složku, není důležitý parametr).
- Nízká spotřeba: režim stand-by 50  $\mu\text{A}$ , režim active 450  $\mu\text{A}$ .

- Napájecí napětí 4,5 V – 5,5 V
- Referenční napětí od 400 mV do 5 V
- Komunikace přes SPI sběrnici

Pro funkčnost AD převodníku je třeba přivést referenční napětí. Referenční napětí nám říká, jaký napěťový rozsah budeme měřit. Aby se signál z fotodiody nemusel moc zesilovat (zvýšené nároky na napájení) postačí nám referenční napětí  $U_{\text{ref}} = 450 \text{ mV}$ , což znamená, že AD převodník bude měřit v rozsahu  $\pm 450 \text{ mV}$  (900 mV).

Protože je použitý AD převodník diferenciální (měří rozdíl dvou vstupních napětí  $U_{\text{IN}+}$  a  $U_{\text{IN}-}$ ), potřebujeme přivést správnou hodnotu napětí na vstup  $\text{IN}(-)$ . Od této hodnoty bude AD převodník měřit v rozsahu  $U_{\text{ref}} = 450 \text{ mV}$ .

Výpočet správné hodnoty  $U_{\text{IN}(-)}$ :

$$U_{\text{IN}(-)} = \frac{U_{\text{MAX}} - U_{\text{MIN}}}{2} = \frac{2,8 - 2}{2} = 2,45 \text{ V} \quad (3.5)$$

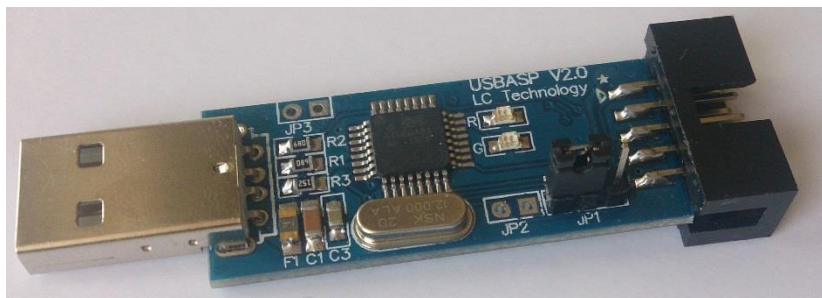
Kde:  $U_{\text{IN}(-)}$  – rozdílová hodnota vstupního napětí (V);  $U_{\text{MAX}}$  – výstupní napětí operačního zesilovače pro horní hranici měřeného rozsahu osvětlení (V);  $U_{\text{MIN}}$  – výstupní napětí operačního zesilovače pro dolní hranici měřeného rozsahu osvětlení (V).

Obě hodnoty napětí byly přivedeny na svorky  $V_{\text{ref}}$  a  $\text{IN}(-)$  pomocí lineárních trimrů (ve schématu R3 a R4) zapojených jako děliče napětí, kde se pomocí multimetru nastavily přesné hodnoty napětí.

Dle doporučení výrobce je vhodné obvod doplnit keramickými kondenzátory o hodnotě 100 nF co nejblíže k vývodům  $V_{\text{SS}}$  (napájecí napětí) a  $V_{\text{REF}}$  (referenční napětí), aby se odfiltroval šum. Ve schématu jsou kondenzátory označeny jako C3 a C4.

## Mikrokontroler

Pro vyhodnocení byl využit mikrokontroler ATmega8A-PU ATMEL s 8 KB vnitřní paměti flash. Program pro mikrokontroler byl napášen v jazyce C a softwarem Extreme Burner AVR přes USB programátor nahrán do vnitřní paměti mikrokontroléru.



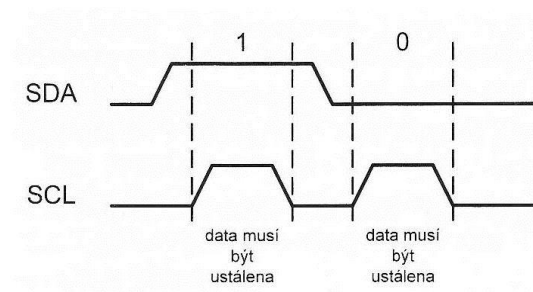
Obr. 16: Programátor mikrokontrolérů ATMEGA

## Sběrnice I<sup>2</sup>C

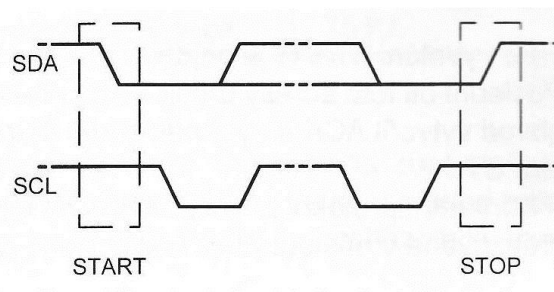
I<sup>2</sup>C je obousměrná dvou vodičová sběrnice určená pro komunikaci jednočipových procesorů s podřízenými obvody. Linka SDA sériově přenáší data. Linka SCL slouží k přivedení hodinového signálu přenosu.

V průběhu jednoho hodinového cyklu SCL dochází k přenosu jednoho bitu informace z linky SDA.

Informace na lince SDA musí být v průběhu kladného impulsu hodin SCL neměnná.



Obr. 17: Přenos bitů po sběrnici [4]



Obr. 18: Začátek a konec přenosu dat [4]

Oznámení začátku přenosu je oznámeno sestupnou hranou SDA při SCL = 1, konec přenosu definuje náběžná hrana SDA při SCL=1. Při přenosu dat je přenos každého bajtu potvrzen (ACK) přijímačem. ACK představuje logickou 0 vloženou na sběrnici přijímačem spojenou s potvrzovací hodinovým impulzem.

Ke sběrnici může být připojeno více zařízení, jelikož I<sup>2</sup>C není vybavena vlastní adresovou sběrnici, odesílá se informace o adrese pro komunikaci s podřízeným obvodem stejným způsobem jako data [4].

## Sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface)

SPI, představuje synchronní kanál, používaný při programování vnitřních pamětí, aby měl mikroprocesor všechny potřebné informace pro komunikaci při běhu programu. Rozhraní SPI, umožňuje zařízením nastavit jejich typ: Master/Slave.

Sběrnice SPI, se nejčastěji používá pro komunikaci mezi některými typy pamětí EEPROM, LCD displeje, A/D a D/A převodníky [8].

## Zobrazení

### LCD displej

Pro zobrazení byl vybrán LCD alfanumerický displej 16x2 se sériovou komunikací I2C. Displej je dvouřádkový a každý řádek je schopen zobrazit 16znaků. Proto je vhodný i pro případné hlášení chyb z mikrokontroléru (osvětlení mimo rozsah, slabá baterie,...).



Obr. 19: LCD displej

## Napájení

Důležitou částí přesného měřicího přístroje je stabilizované napětí. Operační zesilovač, AD převodník, mikrokontroler a display vyžadují stejnou hodnotu napětí, proto nám bude stačit jeden stabilizátor napětí na 5V. Vhodným kandidátem je třibodový stabilizátor napětí LM2936–5.0.

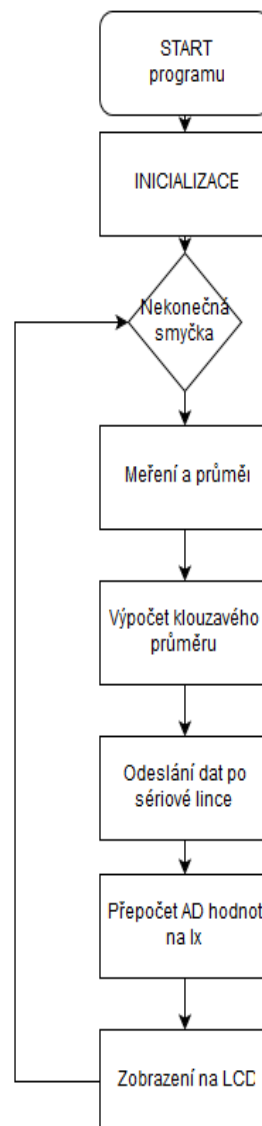
Tento stabilizátor se vyznačuje nízkou vlastní spotřebou (proud nulovým pinem 1 mA). Dle požadavku výrobce je vhodné umístit na vstup stabilizátoru (co nejbližší k vývodu) keramický kondenzátor 100 nF, aby se zabránilo rozkmitání stabilizátoru. Na výstup stabilizátoru se umístí elektrolytický kondenzátor (minimálně 2,2  $\mu$ F) pro vyhlazení výstupního napětí [12].

Jako zdroj napětí je možné požit zdroj o napětí 5,5 – 16 V. Pro splnění zadání bakalářské práce je použita alkalická baterie o napětí 9 V.



## Program

Program byl napsán dle normy ANSI C99 v programu Atmel studio 6 podle následujícího vývojového diagramu:



Obr. 20: Vývojový diagram

## **Popis programu:**

1. Inicializace: Nastavení komunikace pro přenos dat po sériové lince, nastavení portů mikrokontroléru, inicializace displeje, definice a inicializace proměnných.
2. Nekonečná smyčka: Tato měřicí smyčka se vykonává do odpojení zdroje napájení a vykoná jedno průměrované měření každých 500 ms. Sbírá data pomocí sběrnice SPI z AD převodníku.
3. Měření a průměr: Změří se za sebou deset hodnot a vypočítá se průměr z deseti vzorků.
4. Výpočet klouzavého průměru: Vypočítá se průměr z posledních pěti měření (průměr průměrů).
5. Odeslání dat po sériové lince: Je možné s mikrokontrolérem komunikovat pomocí sériové linky připojené k PC pro zobrazení výsledků, odesílají se 2 bajty za sebou (sloužilo pro ladění programu a ve finálním vyhotovení nemá již význam).
6. Přepočet AD hodnot na lx: Dle změřené převodní charakteristiky je podle rovnice přepočítána hodnota AD převodníku na jednotku osvětlení (lx).
7. Zobrazení dat na LCD: Odešlou se data po I2C sběrnici pro zobrazení na LCD displeji. Zobrazuje se pro kontrolu na prvním řádku výstup z AD převodníku a na druhém řádku přepočtenou hodnotu v luxech. Pokud je osvětlení menší než 20 lx zobrazí se 4 nuly. V případě osvětlení více než 1300 lx je oznámen překonaný rozsah zobrazením 4 pomlček. Ukázka zobrazení viz obr. 19.

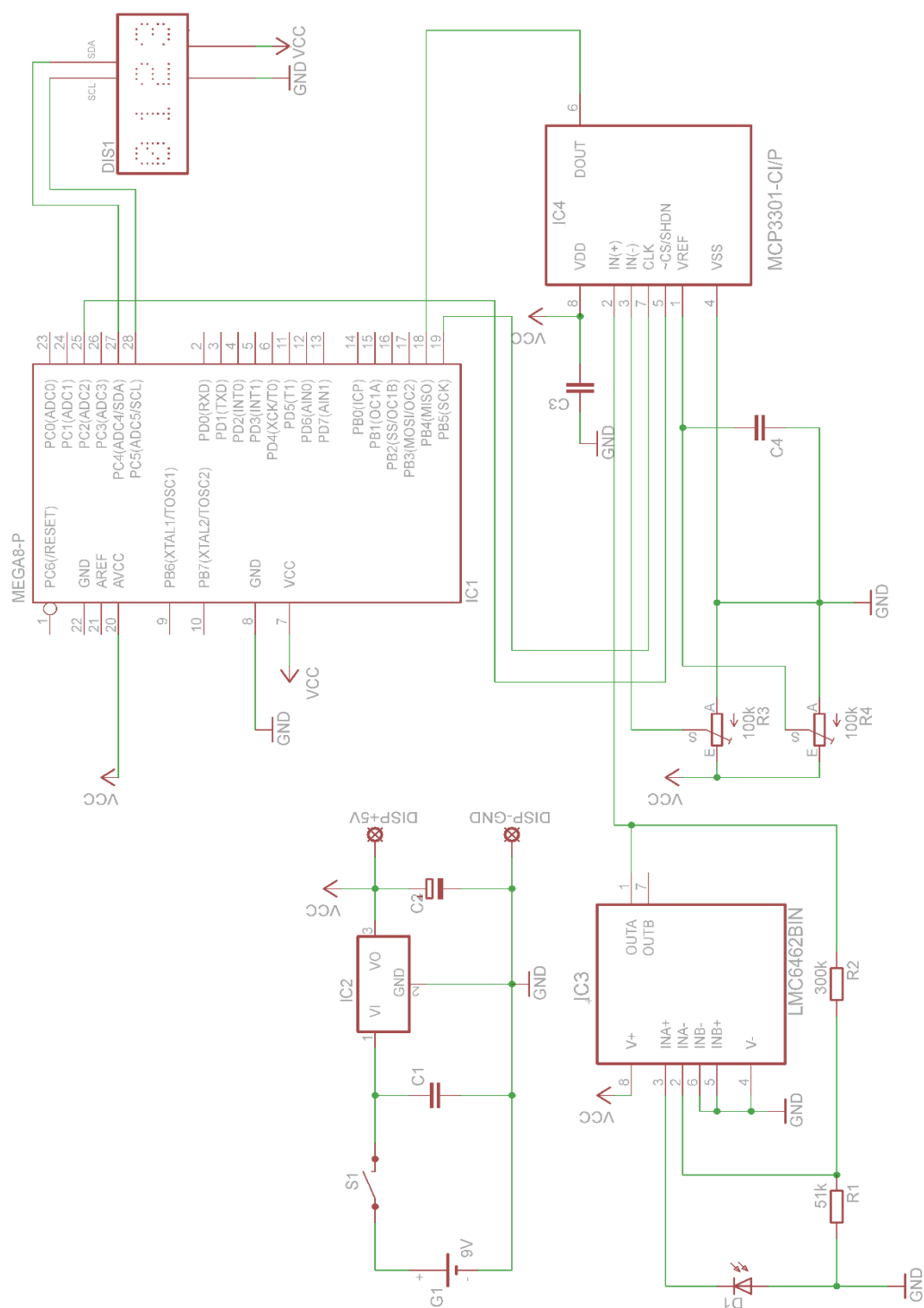
## **Schéma zapojení a návrh plošného spoje**

Celkové schéma zapojení a návrh plošného spoje byly vytvořeny v programu Eagle 6.4.0 dle následujícího postupu:

### **Schéma**

1. Vybrat součástky ze standartních knihoven Eaglu a přidělit správné pouzdro součástky.
2. Pokud použitá součástka není součástí knihoven Eaglu, je potřeba danou knihovnu stáhnout (obvykle ze stránek prodejce) a importovat do programu.
3. Rozmístit součástky na pracovní ploše tak, aby celkové schéma bylo přehledné.

V posledním kroku se součástky propojí mezi sebou.



Obr. 21: Celkové schéma zapojení luxmetru

Tab. 6: Seznam použitých součástek

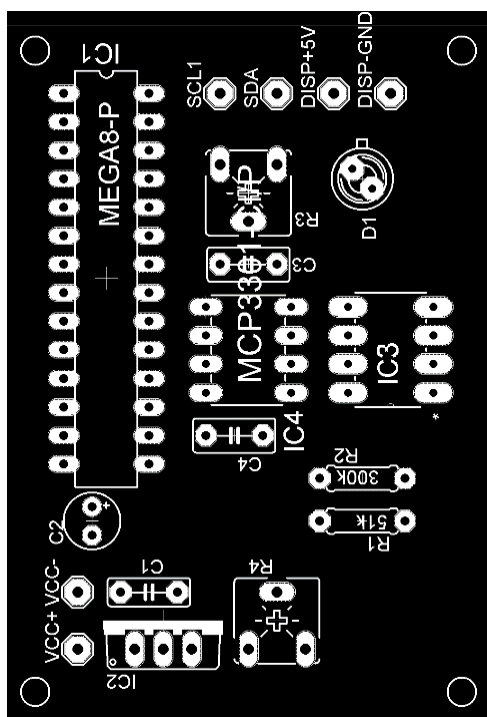
Název	Hodnota, označení	Popis	Pouzdro
C1	100nF	keramický 100N/63V	C050-025X075
C2	48uF	elektrolytický E4700M/10V	E2,5-5
C3	100nF	keramický 100N/63V	C050-025X075
C4	100nF	keramický 100N/63V	C050-025X075
D1	BPW21	Fotodioda	TO-5
DIS1	16x2	LCD 1602 HD44780 I2C	
IC1	ATmega8A-PU	mikrokontroler	DIL28
IC2	LM2936	stabilizátor napětí	TO-252
IC3	LMC6462	operační zesilovač	PDIP
IC4	MCP3301	A/D Převodník 13 - bit	PDIP
R1	51k	rezistor metaliz. 0,4W 1%	204
R2	300k	rezistor metaliz. 0,4W 1%	204
R3	100k	trimr lineární 0,1 W 20 %	CA6 V5
R4	100k	trimr lineární 0,1 W 20 %	CA6 V5
G1	9V	alkalická baterie	
S1	ON/OFF 250V/3A	kolébkový spínač	
SOKL 28U	24 x 2,54	patice k ATMEGA8	
Krabička	90x90x32	90x90x32	
Konektor		Konektor pro připojení 9V baterie	

## Deska plošného spoje

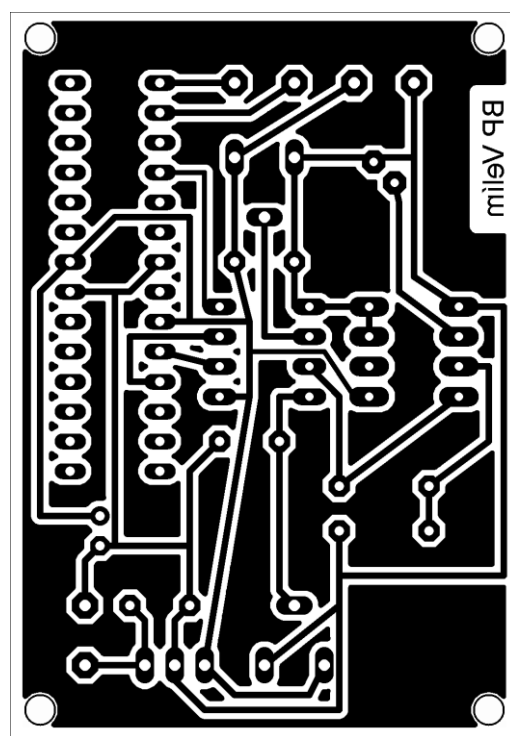
Vhodně rozvrhnout součástky tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému ovlivnění (vlivem teploty, elektromagnetické pole,...).

Součástky umístit tak, aby nedocházelo ke zbytečnému křížení cest a plocha desky by měla být efektivně využita pro úsporu materiálu.

Propojit součástky, aby nedocházelo ke křížení cest. Pomocí kontroly DRC se ověří správnost návrhu a případné chyby je nutné odstranit.



Obr. 22: Návrh rozmístění součástek

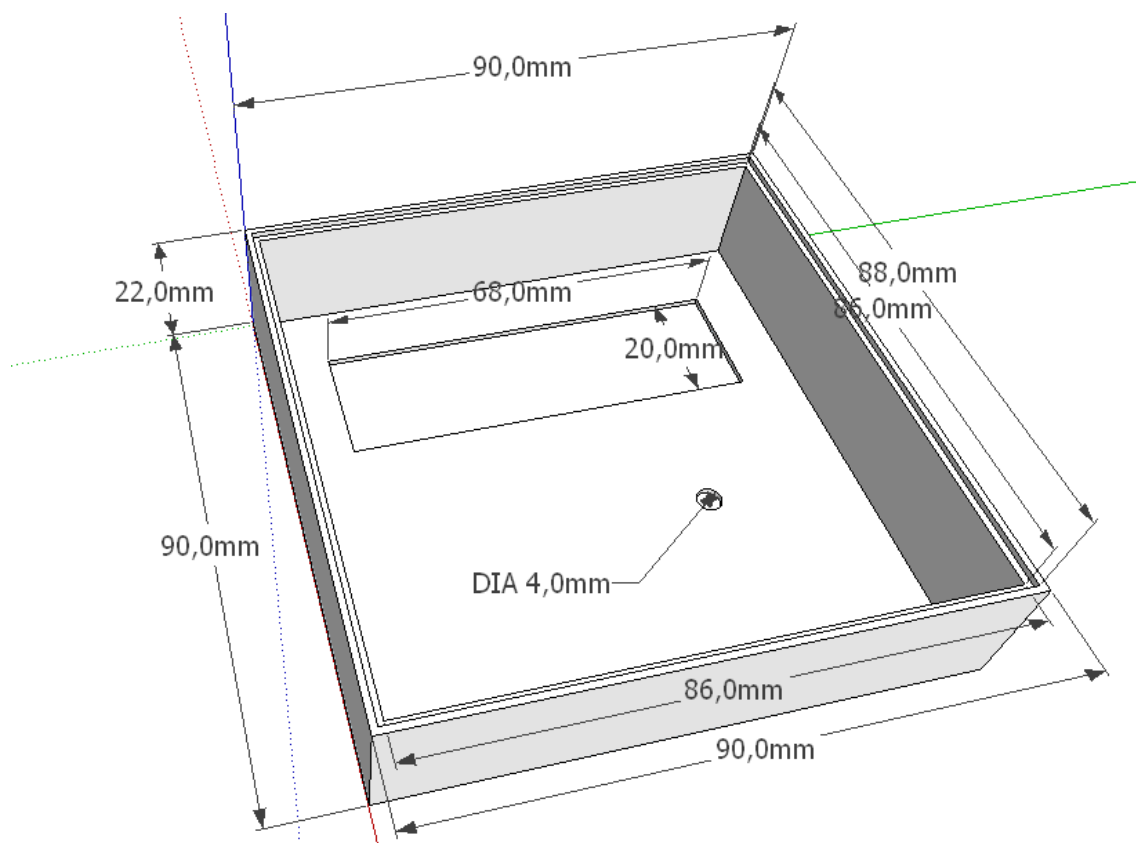


Obr. 22: Zrcadlený návrh cest pro osvit desky

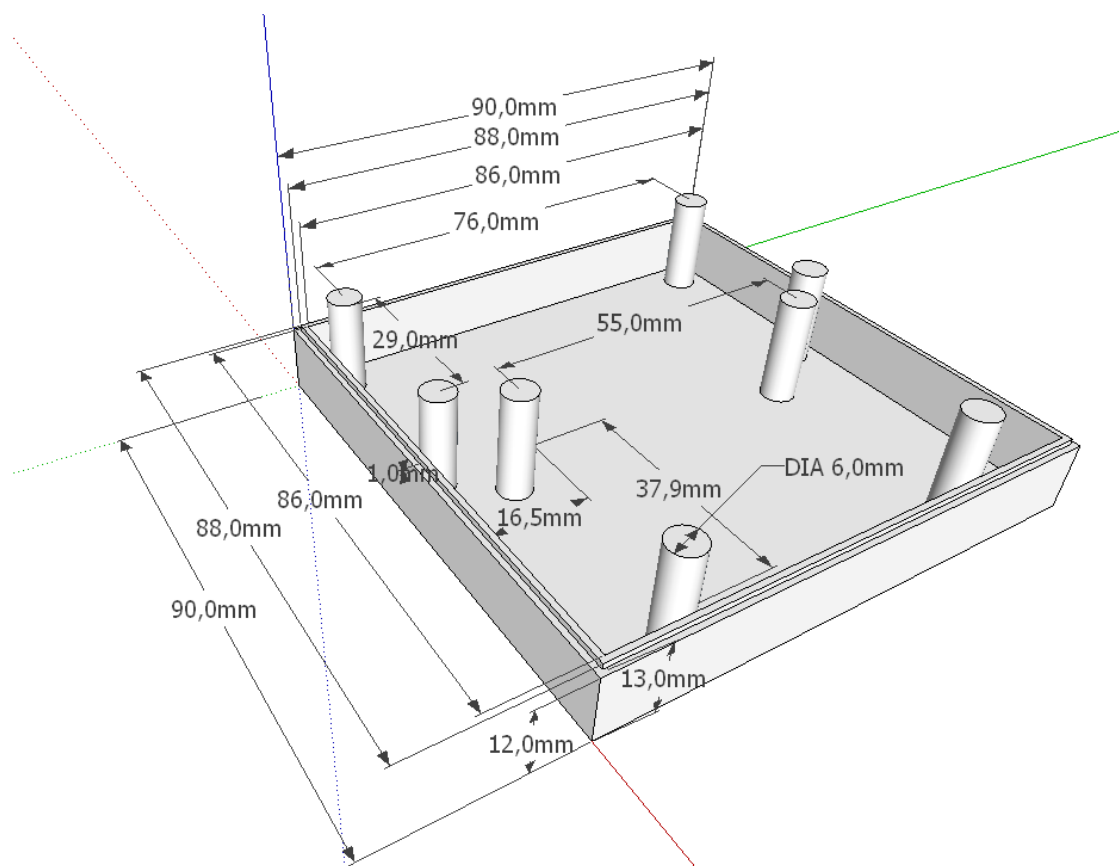
## Konstrukce pouzdra

Pouzdro bylo navrženo v programu SketchUp 2016, tak aby se do něj mohl umístit LCD displej a plošný spoj luxmetru s baterií na distanční sloupky přišroubováním. Baterii je vhodné přichytit ke stěně tavnou pistolí nebo oboustrannou lepicí páskou, aby se zamezilo volnému pohybu uvnitř pouzdra. Okénka na displej a fotodiodu byla v návrhu záměrně zmenšena (o 2 mm), aby se při konstrukci mohl sbrousit okraj na požadovaný rozměr. Návrh byl vytvořen pro tisk krabičky na 3D tiskárně. Obě části krabičky drží při sobě díky vrstvám (zdrsněné stěny) vytvořených při 3D tisku (lze zacvaknout).

Po vytištění pouzdra se sbrousily ostré hrany, vyvrtaly se díry do připravených distančních sloupků a do boční stěny se vyfrézovalo okénko pro kolébkový vypínač. Povrch pouzdra byl sbroušen, nastříkán plničem a nalakován.



Obr. 24: 3D model svrchního dílu pouzdra



Obr. 25: 3D model spodního dílu pouzdra



Obr. 26: Vytisknuté pouzdro

## 4. Provedená měření

### Stanovení převodní charakteristiky

Aby zobrazovaná hodnota na displeji odpovídala veličině osvětlení [lx], musí se stanovit převodní charakteristika. Převodní charakteristika nám říká, jaké osvětlení odpovídá námi změřené hodnotě na AD převodníku.

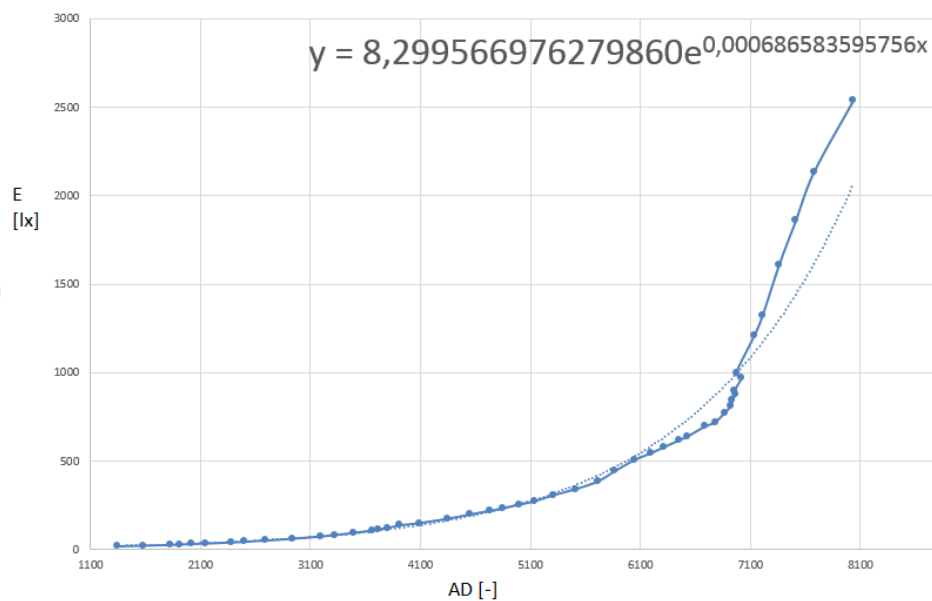
Při měření byl použit jako referenční luxmetr VOLFCRAFT LX – 1108 (v.č. Q255082). Jako zdroj osvětlení sloužila zářivka ze stolního svítidla.

Měření probíhalo podobně, jako u fotometrické lavice, kde na jedné straně byl umístěn měřicí (referenční) a měřený luxmetr a na druhé straně zdroj osvětlení. Osvětlení se nastavovalo změnou vzdálenosti zářivky od luxmetrů. Při měření se odečítala hodnota na referenčním luxmetru a hodnota na AD převodníku. Následně byly hodnoty vyneseny do grafu v programu MS EXCEL, kde se vygenerovala exponenciální spojnice trendu, jejíž rovnice představuje rovnici přechodové charakteristiky.

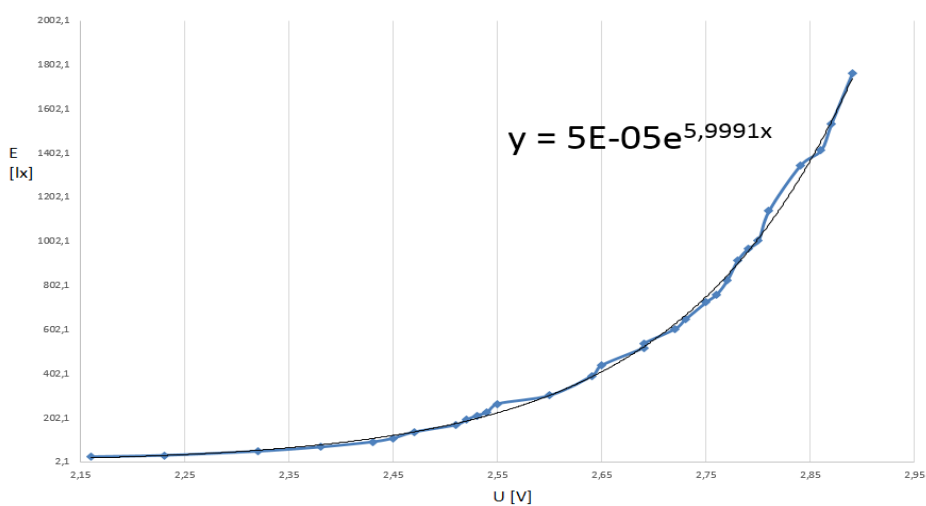
Tab. 7: Výňatek z tabulky změřených a vypočítaných hodnot

Číslo měření	Referenční osvětlení [lx]	Hodnota AD převodníku	Vypočítaná hodnota [lx]
1	20	1345	20,9
10	63	2933	62,2
14	110	3660	102,4
18	151	4085	137,1
20	200	4545	188,0
23	256	4997	256,4
27	388	5714	419,5
28	445	5865	465,3
30	545	6190	581,6
33	640	6521	730,0
34	697	6685	817,0
38	844	6933	968,7
40	901	6955	983,4
42	1000	6969	992,9
43	1212	7135	1112,8
45	1610	7360	1298,7





Obr. 27: Graf závislosti osvětlení na výstupní hodnotě AD převodníku



Obr. 28: Graf závislost výstupního napětí z operačního zesilovače na osvětlení

## Stanovení chyby měření u určení třídy přesnosti luxmetru

Měřením a výpočtem byla stanovena absolutní a relativní chyba měření osvětlení.

$$\Delta_x = X_M - X_S \quad (4.1)$$

Kde:  $\Delta_x$  – absolutní chyba měření (lx);  $X_M$  – naměřená hodnota (lx);  $X_S$  – referenční hodnota osvětlení (lx).

Výpočet relativní chyby  $\delta_x$

$$\delta_x = \frac{|X_M - X_S|}{X_S} \times 100 [\%] \quad (4.2)$$

Tab. 8: Tabulka změřených (hodnota AD) a vypočítaných hodnot ( $E_M$ ,  $\Delta$ ,  $\delta$ )

Číslo měření	Referenční osvětlení $E_S$ [lx]	Hodnota AD převodníku [-]	$U_{oz}$ [V]	Vypočítaná hodnota $E_M$ [lx]	Absolutní chyba $\Delta$ [lx]	Relativní chyba $\delta$ [%]
1	1650	7620	2,82	1552,5	97,52	5,91
2	1196	7280	2,79	1229,3	-33,28	2,78
3	705	6596	2,72	768,6	-63,62	9,02
4	493	6108	2,67	549,8	-56,81	11,52
5	276	5331	2,59	322,5	-46,51	16,85
6	226	5037	2,51	263,6	-37,56	16,62
7	164	4565	2,51	190,6	-26,61	16,23
8	92,5	3727	2,42	107,2	-14,72	15,92

## Stanovení nejistoty měření

Nejistota typu A představuje nejistotu, jenž získáme opakovaným měřením za stejných podmínek. Představuje výběrovou směrodatnou odchylku výběrového průměru. Udává se v jednotkách měřené veličiny.

$$u_a(x) = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.3)$$

Kde:  $u_a(x)$  - nejistota typu A (x);  $s_{\bar{x}}$  – směrodatná odchylka; n – počet měření;  $x_i$  – změřená hodnota (x);  $\bar{x}$  – průměr změřených hodnot (x)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (4.4)$$

Standartní rozšířená nejistota představuje k – násobek standartní nejistoty.

$$U = k \times u \quad (4.5)$$

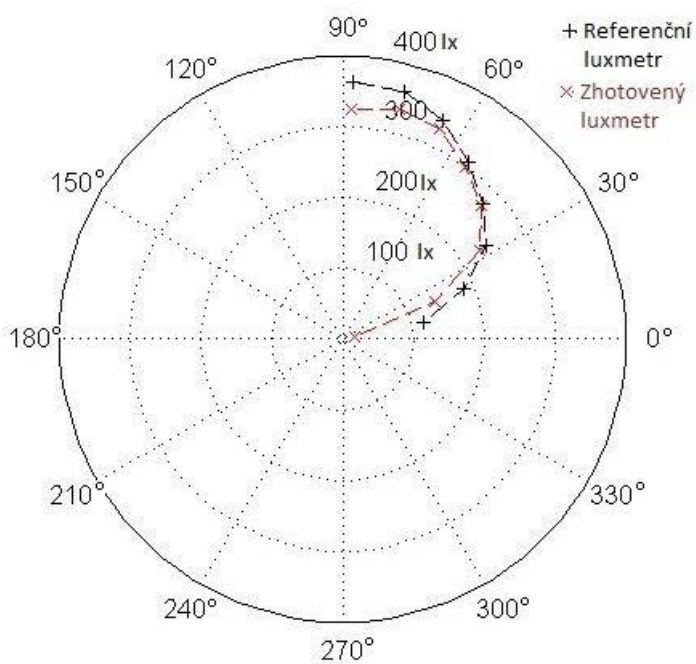
Kde: U – rozšířená nejistota (x), k – koeficient počtu měření (n = 10 ~ k = 1,2;  
n = 10 ~ k = 1,3) (-)

Tab. 9: Výňatek z tabulky změřených a vypočítaných hodnot

E [lx]	92,6	200	700	1000	1673
Výstup z AD	3638	4640	6671	7297	7816
	3631	4635	6690	7301	7793
	3628	4626	6726	7322	7776
	3625	4620	6735	7322	7741
	3621	4622	6736	7322	7707
	3594	4613	6740	7316	7700
	3578	4597	6742	7261	7652
	3573	4592	6746	7215	
	3572	4595	6760	7210	
U <sub>a</sub> (AD)	9,04	5,86	9,50	15,17	21,99
U <sub>ad</sub> [-]	10,85	7,03	11,40	18,20	28,59
U <sub>ak</sub> [lx]	8,36	8,34	8,36	8,40	8,46

## Směrová charakteristika luxmetru

U luxmetrů se používá kosinový nástavec za účelem směrování šikmých paprsků do středu fotočlánku. Absence kosinového nástavce představuje chybu měření při osvitu snímače pod určitým úhlem. Proto bylo provedeno měření směrové charakteristiky za účelem srovnání měření luxmetrem vybavený tímto nástavcem.



Obr. 29: Srovnání směrových charakteristik luxmetrů

## 4. Zhodnocení dosažených výsledků

V bakalářské práci byla zpracována literární rešerše zabývající se měřením intenzity osvětlení pracovních ploch a důrazem na hygienické limity. Byl zpracován systémový návrh luxmetru s číslicovým displejem pro měření osvětlení v rozsahu od 20 do 1000 luxů, následně byl luxmetr sestrojen. Funkčnost byla měřením ověřena.

Luxmetr byl sestrojen dle systémového návrhu obsahující fotočlánek, zesilovač, AD převodník, mikroprocesor a číslicový displej. Jako fotočlánek byla použita fotodiody s optickým filtrem pro citlivost ve viditelném spektru záření. V měřeném rozsahu osvětlení odpovídá napětí na fotodiodě 280 mV až 400 mV. Signál z fotodiody byl zesílen vhodným operačním zesilovačem na napětíovou úroveň pro přesné zpracování AD převodníkem. Použitím 13 bitového AD převodníku lze v zadaném rozsahu přesně zpracovat měřená data nelineárního charakteru. S AD převodníkem se převede analogová hodnota na digitální úroveň. Data jsou v digitální podobě odeslána pro zpracování mikrokontrolérem. Program mikrokontroléru zajišťuje vhodné průměrování a zobrazení hodnoty osvětlení na LCD displeji. Celé zařízení bylo konstruováno na co nejmenší energetickou náročnost s vlastní spotřebou 315 mW, při použití 9 voltové baterie, což umožňuje více než 22 hodin nepřetržitého měření.

Dle systémového návrhu bylo navrženo kompletní schéma zapojení a následně plošný spoj. Plošný spoj byl vytvořen fotocestou a po odleptání osazen součástkami. Pro oživení přístroje se nastavilo vhodné napětí na trimerech pomocí přesného voltmetru. Pro funkčnost luxmetru bylo potřeba změřit převodní charakteristiku pro přepočítání hodnot z AD převodníků na jednotku osvětlení. Ze změřených dat byla zjištěna relativní chyba luxmetru jejíž maximální hodnota činila 16,8 %. Z této chyby byla stanovena třída přesnosti luxmetru na 20%. Tato hodnota ukazuje, že přístroj je vhodný pro orientační měření. S použitím kosinového nástavce, kalibrací pro různé druhy zdrojů světla a kalibrací na fotometrické lavici by byla přesnost měření daleko vyšší. S ohledem na funkčnost a technické parametry byl nad rámec zadání bakalářské práce navržen obal pro měřicí součásti. Obal byl vytvořen za pomoci 3D tiskárny. Zadání bakalářské práce bylo splněno v plném rozsahu.

# Literatura

[1] FUKÁTKO, Tomáš. *Detekce a měření různých druhů záření*. 1. vyd. Praha: BEN, 2007, 189 s. ISBN 978-80-7300-193-3.

[2] HUMLHANS, Jan. *Zajímavá zapojení 3. díl*. 1. vyd. Praha 2005, 175 s.  
ISBN 80-7300-152-7

[3] Kester, W. *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning*. United States of America, 1999, 366 s. ISBN-0-916550-20-6

[4] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730-0094-6.

[5] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0059-8.

[6] ROZMAN, Jiří. *Diagnostika životního prostředí*. 1. vyd. Brno: VUT, 2000, 136 s. ISBN 80-214-1771-4.

[7] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. 1. vyd. Praha 2011, 255 s.  
ISBN 978-80-01-04941-9

[8] VÁŇA, Vladimír. *Mikrokontroléry ATMEL AVR – popis procesoru a instrukční soubor*. 1. vyd. Praha: BEN, 2003, 336 s. ISBN 80-7300-083-0.

[9] 152977-da-01-ml-PHOTO\_DIODE\_BPW21\_TO39\_\_OSR\_de\_en: BPW21. *Conrad* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z:  
[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/152977-da-01-ml-PHOTO\\_DIODE\\_BPW21\\_TO39\\_\\_OSR\\_de\\_en.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/150000-174999/152977-da-01-ml-PHOTO_DIODE_BPW21_TO39__OSR_de_en.pdf)

- [10] Atmega88-20pu-datasheet-1. *GM Elektronik* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/432/191/atmega88-20pu-datasheet-1.pdf>
- [11] Bpw21-datasheet-1. *GM Elektronik* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/520/028/bpw21-datasheet-1.pdf>
- [12] Lf50cv-datasheet-2. *GM Elektronik* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/142/lf50cv-datasheet-2.pdf>
- [13] Svetlo1. *KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE* [online]. Plzeň: Katedra elektroenergetiky a ekologie, ZČU v Plzni, 2010 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://kee.zcu.cz/images/laboratore/svetlo1.jpg>
- [14] 166939: MCP3301. *Farnell* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1669397.pdf>
- [15] 1902821: LMC6462. *Farnell* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1902821.pdf>