



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

LUXMETR

LUXMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JIŘÍ BAJGAR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ROZMAN, CSc.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Biomedicínská technika a bioinformatika

Student: Jiří Bajgar

ID: 136461

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Luxmetr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Seznamte se se základy světelné techniky a prostudujte metody měření intenzity osvětlení vybraných ploch v pracovním prostředí. 2) Seznamte se také s metodikou měření a hygienickými limity v oblasti osvětlení. 3) Proveďte literární rešerši v dané oblasti. 4) Zpracujte systémový návrh luxmetru s bateriovým napájením a číslicovým displejem pro rozsah osvětlení 20 - 1000 luxů. 5) Na základě systémového návrhu vypracujte obvodové řešení luxmetru. Experimentálně ověřte navržené řešení. Práce musí obsahovat celkové schéma zapojení, výkres plošného spoje a soupisku součástek. 6) Proveďte diskusi návrhu a zhodnoťte jeho výhody a nevýhody.

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: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

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

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

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.

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

V Brně dne.....

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Rozmanovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce

V Brně dne

.....

podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá základy světelné techniky, seznámení se základními jednotkami a hygienickými limity pro pracovní prostředí. Práce také obsahuje metody měření osvětlení a seznámení se základními detektory. Dále návrh jednoduchého luxmetru z rozsahem měření 20 – 1000 lx..

Abstract

This bachelor thesis deals with the basics of lighting technology. Furthermore, this work introduces the basic units (of measurements) and hygienic limits for the working environment. It also includes methods of measuring lighting and introduces the basic detectors. The design of a simple light meter with measuring range from 20 to 1000 lx is also included in this work.

Klíčová slova

Luxmetr, osvětlení, detektor, fotodioda.

Keywords

Luxmeter, lighting, detector, photodiode.

Bibliografická citace

BAJGAR, J. *Luxmetr*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 49 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Rozman, CSc..

Obsah

Seznam tabulek.....	4
Seznam obrázků	4
1 Úvod do problematiky	6
1.1 Základní světelně technické veličiny	6
1.2 Hygienické limity	12
2 Metody měření osvětlení.....	14
2.1 Luxmetry.....	14
2.2 Jasoměry.....	16
2.3 Typy snímačů.....	18
3 Konstrukce luxmetru.....	23
3.1 Blokové schéma.....	23
3.2 Obvodové řešení	30
4 Zhodnocení a závěr	55
Použitá literatura	58
Seznam zkratk	42
Seznam příloh	42

Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené hodnoty intenzit osvětlení, [1]	13
Tabulka 2: Doporučené hodnoty intenzit osvětlení pracovních obytných místností, [7]	13
Tabulka 3: Přípustné chyby luxmetrů a jasoměrů pro jednotlivé typy měření [2]	17
Tabulka 4: Maximální rozsah fotodiody [13]	24
Tabulka 5: Charakteristika fotodiody [13]	24
Tabulka 6: Vlastnosti měřidla HD 3438 [14]	28
Tabulka 7: Popis měřidla HD 3438 [14].....	29
Tabulka 8: Nastavení rozsahů [14].....	29
Tabulka 9: Seznam součástí, hodnoty a popis	53
Tabulka 10: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a výpočet relativní chyby	55

Seznam obrázků

Obr. 1: Normál svítivosti [3]	7
Obr. 2: Barva světla podle vlnové délky [9]	8
Obr. 3: definice jasu [2].....	10
Obr. 4: Vnější fotoelektrický jev [9]	11
Obr. 5: Luxmetr [11].....	14
Obr. 6: Jasoměr [12].....	16
Obr. 7: Princip optického systému jasoměru [1]	17
Obr. 8: a) Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení, b) voltampérová charakteristika [4].....	18
Obr. 9: Voltampérová charakteristika fototyristoru [4]	19
Obr. 10: Voltampérová charakteristika fototranzistoru [4].....	19
Obr. 11: Srovnání citlivosti fotočlánků.....	20
Obr. 12: Základní typy kosinových nástavců [1]	21
Obr. 13: Chyby měření s použitím a bez použití kosinového nástavce [1]	21
Obr. 14: Blokové schéma luxmetru	23
Obr. 15: Fotodioda BPW21 [13].....	24
Obr. 16: Spektrální závislost fotodiody [13]	25
Obr. 17: Závislost výstupního proudu a napětí na intenzitě osvětlení [13].....	26
Obr. 18: Základní zapojení OZ jako I/U převodníku [18]	26
Obr. 19: Pracovní režimy fotodiody: vlevo napěťový režim, vpravo hradlový režim [18].....	27

Obr. 20: Panelové měřidlo HD3438 [14].....	29
Obr. 21: Zapojení OZ jako komparátor	32
Obr. 22: Napěťový sledovač.....	33
Obr. 23: Základní zapojení stabilizátoru	34
Obr. 24: Funkce komparátoru.....	35
Obr. 25: Simulace obvodu v PSPICE	35
Obr. 26: Předloha pro tvorbu DPS, zobrazení 1:1.....	36
Obr. 27: Reálná DPS po vyleptání	36
Obr. 28: Plán rozvržení součástek na DPS	37

1 Úvod do problematiky

Vidění je označení pro příjem a zpracování vizuální informace o vnějším světě, zprostředkované fotony viditelného světla, tj. elektromagnetické záření o vlnové délce 380–780 nm. Je to složitý fyzikální, fyziologický a psychologický proces, který je uskutečňován zrakovým analyzátozem známým jako oko, [17].

Zrakový analyzátor lze v základních rysech srovnat s uzavřeným barevným televizním okruhem. Oko je analogické televizní kameře, optický nerv kabelu vedoucímu videosignál a zrakové centrum v mozku televiznímu monitoru, v němž vzniká obraz snímaného předmětu. Zrakový systém je však mnohem dokonalejší a citlivější. Proto musíme dbát na dobré osvětlení, [17].

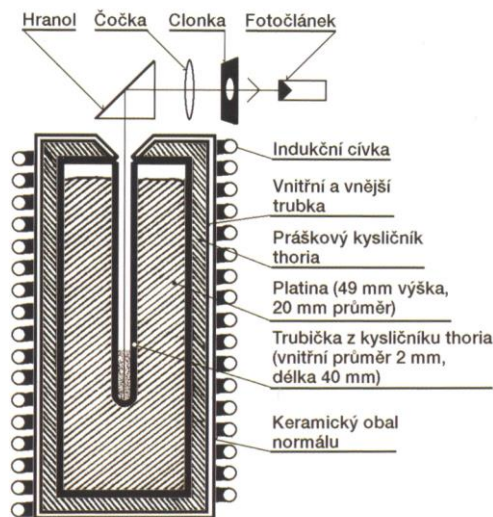
Dobré osvětlení pracovních míst ve výrobních podnicích patří nejen k důležitým činitelům racionalizace výroby a zvyšování produktivity práce, ale i ke zvyšování bezpečnosti při práci. Má tedy podstatný vliv na zlepšování pracovního prostředí člověka. Námaha zraku při špatném osvětlení urychluje a zvyšuje únavu organismu, způsobuje vyšší vypětí a vzrušivost nervového systému, může se promítat i do psychických reakcí. Platí to nejen pro pracovní, ale i obytnou a rekreační složku včetně osvětlení venkovních prostorů - chodníků, vozovek a prostranství. Dokonalejším pouličním osvětlením po setmění lze snížit počet dopravních nehod až o 1/3. V tomto smyslu je proto osvětlení i mezním činitelem, a proto se významně podílí na tvorbě životního prostředí, [2].

Základním cílem této bakalářské práce je seznámení s metodou a způsoby měření intenzity osvětlení v pracovním prostředí a nastínění návrhu luxmetru.

1.1 Základní světelně technické veličiny

Pro popis světelného záření a jeho parametrů je stejně jako v jiných vědních oborech, důležité používat fyzikální veličiny a jednotky, které jsou sjednocené tak, že platí všude na světě. U světla jsou tyto veličiny sjednoceny pod záštitou Mezinárodní komise pro osvětlování CIE (Commission internationale de l'éclairage). Také v mezinárodní soustavě jednotek SI se vyskytuje základní jednotka popisující vlastnosti světla. Jedná se o jednotku svítivosti - kandela (cd). Všechny veličiny a jednotky zavedené komisí CIE se vztahují na tzv. normálního fotometrického pozorovatele. Tento pozorovatel reprezentuje standardní vlastnosti lidského oka, protože každý člověk může mít odlišnou citlivost k různým vlnovým délkám světla, [3].

Základní normálem fotometrické laboratoře by měl být normál svítivosti. Ten se odvozuje od normálu svítivosti na národní úrovni, který je odvozen od etalonu svítivosti v Měrovém středisku mezinárodní laboratoře ve Francii. Praktická aplikace tohoto normálu je zobrazena na obr. 1. V tomto případě je 1 cd kolmá svítivost $1/60 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ povrchu absolutně černého tělesa při teplotě tuhnutí platiny (2 046,5 K) za tlaku 101 324,72 Pa, [2], [3].



Obr. 1: Normál svítivosti [3]

Světlo

Světlo jakožto viditelná část spektra elektromagnetického záření je zhodnocováno zrakovým orgánem. Působí na fyziologické, biochemické i psychické funkce organismu. Zrak patří mezi nejdůležitější a nejcitlivější smyslové orgány člověka - práh citlivosti pro zelenou barvu světla je $5 \cdot 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Prostřednictvím zraku získáváme z okolního prostředí téměř 80 % všech informací. Příjemný psychofyziologický stav, při kterém plní zrak optimálně svou funkci a člověk má pocit, že nejen dobře vidí, ale cítí se i psychicky dobře, se označuje jako zraková pohoda, [1]

Stejně jako jiné druhy vlnění, charakterizuje i světlo vlnová délka

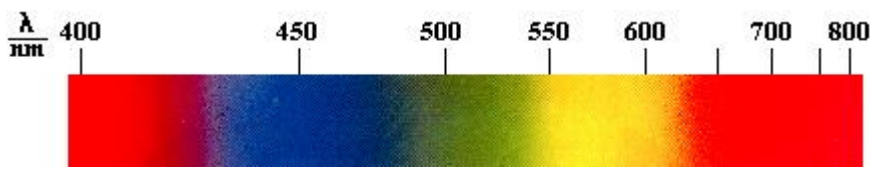
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

kde f je frekvence světla, [3].

Jako světlo se označuje elektromagnetického vlnění, na které je citlivý lidský zrakový orgán - oko. Fyziologický vjem zvaný vidění vyvolává elektromagnetické vlnění o vlnových délkách 390 nm až 790 nm

Světlo různých frekvencí vyvolává u člověka různé vjemy, které charakterizujeme jako **barvy světla**. Světelný interval je vymezen fialovou barvou ($\lambda_f = 390 \text{ nm}$) a červenou barvou ($\lambda_r = 790 \text{ nm}$) viz obr. 2. Toto vymezení je ale orientační, protože je ovlivňováno individuálními vlastnostmi lidského zraku. Navíc nejcitlivější je oko na barvu žlutozelenou ($\lambda_f = 550 \text{ nm}$) V praxi většinou nevnímáme jednoduché světlo charakterizované určitou frekvencí, ale světlo složené z vlnění různých frekvencí. Účinky jednotlivých složek světla na zrak pak určují výsledný barevný vjem, kterému odpovídá charakteristický odstín barvy. Při určitém poměru barevných složek světla dostáváme světlo bílé, [9].

Skládáním světél různých barev se zabývá **kolorimetrie**, jejíž poznatky jsou důležité např. pro přenos, záznam a reprodukci signálu barevné televize, [9].



Obr. 2: Barva světla podle vlnové délky [9]

Světelný tok Φ

Světelný tok Φ představuje zářivý tok Φ_2 , který je posuzován ze strany citlivosti lidského oka. Říká nám, kolik světelné energie vyzáří zdroj do svého okolí. Jednotkou světelného toku je **lumen (lm)**. Zářivý tok představuje velikost výkonu, který záření přenáší, vysílá nebo přijímá. Pokud je záření spojitě (není monochromatické), pak se zářivý tok určí ze vztahu (2), [3].

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda \cong \sum_{i=1}^n (\Phi_{e\lambda})_i \Delta\lambda_i \quad (2)$$

kde $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ = spektrální hustota zářivého toku Φ_e , [3].

Svítivost

Svítivost je světelně technická veličina, která popisuje distribuci světelného záření do prostoru. Udává, kolik světelného toku vyzáří zdroj v prostorovém úhlu do určitého směru. Jednotkou svítivosti je **kandela (cd)**. Kandela patří mezi základní fyzikální jednotky soustavy SI. Od roku 1979 je kandela definována jako svítivost bodového zdroje, jenž vyzařuje 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 určí ze světelného toku vyzařujícího v jednotkovém prostorovém úhlu Ω , [3].

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3)$$

kde I = svítivost (cd); $d\Phi$ = světelný tok (lm); $d\Omega$ = prostorový úhel, do kterého je světelný tok vyzařován (sr), [3].

Za bodový zdroj můžeme považovat prakticky každé svítidlo, jehož největší rozměr a je zanedbatelný vůči vzdálenosti l zdroje od kontrolního bodu:

$$l \geq 10a \quad (4)$$

Intenzita osvětlení

Osvětlenost neboli intenzita osvětlení (E) je podíl té části světelného toku, která dopadá na plošku povrchu tělesa, a této plošky. Jednotkou je **lux (lx)**. Osvětlení jednoho luxu je vyvoláno světelným tokem jednoho lumenu rovnoměrně rozptýleného na ploše 1 m^2 . (Osvětlení za úplňku je 0,24 luxů, zatažená zimní obloha dává osvětlení 3 000 luxů, za slunečného letního dne je osvětlení až 100 000 luxů, ale 100 W žárovka ve vzdálenosti 2 m má intenzitu osvětlení jen 35 luxů).

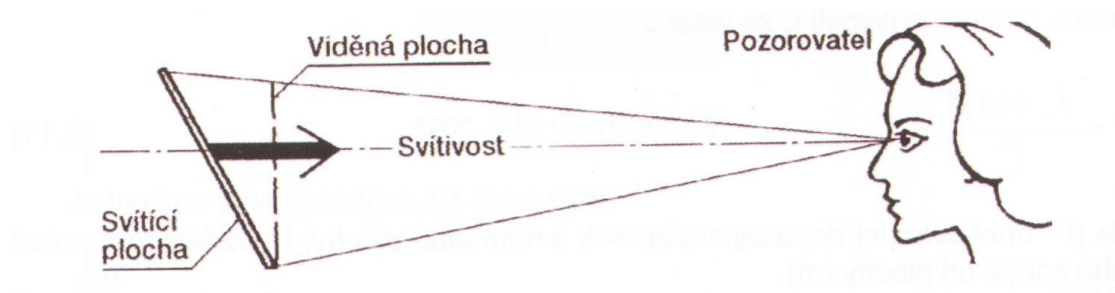
Platí:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} \quad (5)$$

kde E = osvětlenost (lx); $d\Phi$ = velikost světelného toku dopadajícího na plochu (lm); dA = plocha, na kterou dopadá světelné záření (m^2), [6].

Jas

Jas je fotometrická veličina definovaná jako měrná svítivost. Je to veličina, na kterou oko přímo reaguje (přesněji řečeno: lidské oko reaguje na kontrast jasu). Označuje se L a jednotkou jasu v soustavě SI je kandela $\times 1 \text{ m}^2$, dříve označovaná jako nit (nt). V literatuře se lze setkat se staršími jednotkami: 1 stilb (sb) = $1 \text{ cd} \cdot \text{cm}^{-2}$, příp. lambert (La), [3], [6].



Obr. 3: definice jasu [2]

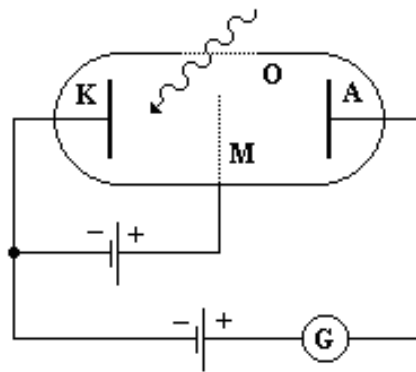
Fotoelektrický jev

Ozařujeme-li svazkem světla s dostatečně krátkou vlnovou délkou čistý kovový povrch, vyráží světlo z tohoto povrchu elektrony. Tento **fotoelektrický jev**, stručně také **fotoefekt**, se využívá v mnoha zařízeních včetně televizních kamer, snímacích elektronek a převaděčů obrazu pro noční vidění – noktovizorů. Einstein použil svou hypotézu fotonu při vysvětlení tohoto jevu, který nemůže být jednoduše pochopen pomocí klasické fyziky, [10]

Z hlediska způsobu vzniku elektronů vlivem dopadajícího elektromagnetického záření se rozlišuje:

1. vnější fotoefekt - elektrony jsou uvolňovány z povrchu materiálu (např. z povrchu katody);
2. vnitřní fotoefekt - elektrony jsou uvolňovány uvnitř materiálu.

Vnější fotoelektrický jev je možné zkoumat pomocí speciální fotonky (viz obr. 4). Záření dopadá okénkem O (které je propustné i pro UV část spektra) na fotokatodu K a uvolňuje z ní elektrony. Ty putují k anodě A a vzniklý proud v obvodu lze měřit galvanometrem G . Na mřížku M je možné přivést záporné napětí, které brzdí vylétávající elektrony a propouští jen elektrony o určité energii, kterou lze tímto způsobem měřit, [9].



Obr. 4: Vnější fotoelektrický jev [9]

1.2 Hygienické limity

Aby lidé mohli vykonávat zrakové úkoly účinně a přesně, musí jim být poskytnuto vhodné osvětlení. Osvětlení může být zprostředkováno denním světlem, umělým světlem nebo jejich kombinací. Úroveň viditelnosti a pohody požadovaná pro velké množství pracovních prostorů závisí na druhu a době trvání činnosti, [7].

Osvětlení se rozděluje podle užitých zdrojů na denní, umělé a sdružené. Podle účelu na osvětlení vnitřních a venkovních prostorů, podle funkce na hlavní, pomocné, bezpečnostní nebo nouzové, [1].

Denní osvětlení

Slunce je primárním zdrojem denního záření, které je jednou z přirozených forem energie, jež můžeme bezprostředně využívat. Světlo vzniká jako viditelná část spektra denního záření a je produktem slunečního elektromagnetického záření. Denní světlo je nejen vhodným energetickým zdrojem pro osvětlování prostorů, ale také nutným předpokladem k vytvoření zdravého prostředí pro život živých organismů v interiérech. Vytvoření podmínek pro dosažení vhodných parametrů denního osvětlení je složitým úkolem, a to zejména proto, že se zde setkávají mnohdy protichůdné požadavky pracovníků různých profesí. Složitost je daná i tím, že denní světlo nejen umožňuje vidění osob v interiéru, ale současně spoluvytváří zdravé životní prostředí stimulací biorytmů organismů. Hlavní složky denního světla na zemském povrchu jsou přímé sluneční světlo a oblohové světlo, [3].

Při denním osvětlení je zřakový výkon v průměru o 4,3 % vyšší než při osvětlení umělém. Průměrný jas oblohy je asi 4 000 cd/m². Závisí na znečištění atmosféry, druzích mraků apod. Nároky na tento druh osvětlení jsou uvedeny v ČSN 36 0035, [1].

Umělé osvětlení vnitřních prostor

Vychází z rozboru zřakové náročnosti vykonávané práce nebo z hledisek estetických a psychologických. Kromě vytvoření optimálních pracovních podmínek má zajistit bezpečnost práce a přispět ke zřakové pohodě člověka. Volba potřebné hladiny intenzity osvětlení je podle druhu vykonávané práce normou ČSN 36 0046 doporučována v šesti třídách – tabulka č. 1, [1].

Tabulka 1: Doporučené hodnoty intenzit osvětlení [1]

Třída	Požadavky na Osvětlení	Velikost kritického detailu d [mm] pozorovaného ze vzdálenosti D		$\frac{D}{d}$	E ($\rho = 0,35$)
		D = 0,35 m	D = 1 m	-	lx
1	mimořádné	0,1	0,3	3500	5000
2	velmi vysoké	0,1 – 0,2	0,3 – 0,6	3500 – 1750	2000 – 5000
3	vysoké	0,2 – 0,4	0,6 – 1,2	1750 – 875	600 – 2000
4	průměrné	0,4 – 0,8	1,2 – 2,3	875 – 440	250 – 600
5	malé	0,8 – 1,5	2,3 – 4,4	440 – 230	100 – 250
6	velmi malé	1,5 – 3,0	4,4 – 8,8	230 – 110	25 – 100

Pro prostory s průměrnou a vysokou zrakovou náročností, ve kterých pracovníci setrvávají více jak polovinu pracovní doby, je předepsána minimální hladina intenzity osvětlení 160 lx – *hygienické minimum*. Doporučené hodnoty intenzity osvětlení vybraných pracovních a obytných prostor jsou uvedeny v tabulce č. 2, [1], [8].

Tabulka 2: Doporučené hodnoty intenzit osvětlení pracovních obytných místností [7]

Prostor	E	Prostor	E
	lx		lx
RTG ambulance,	1	sklep, půda, schodiště,	30
promítání dia, filmů,	10	předsíň, prádelna, toaleta	60
komunikační místnost,	60	ložnice, koupelna,	120
toalety, kina		dětský obývací pokoj	150
hlediště divadel, auly, šatny,	120	kuchyň, jídelna	250
umývárny, nemoc. pokoje		místo pro zrakově náročné	500
tělocvičny,	200	práce	
dětské lůžkové pokoje,		pitevní stoly	3 000
konferenční místnosti,	250	operační stoly	5 000
hovorny, knihovny		operační pole	25 000
posluchárny, studovny,	500		
účtárny, písárny			
rýsovny, výuk. laboratoře	1 000		

2 Metody měření osvětlení

Fotometrie je obor zabývající se měřením světelné energie viditelného záření, a to v oblastech viditelného záření, který bere ohledy na vlastnosti normálního zraku. Vlastní měření se dělí na vizuální (subjektivní) metody, při kterých se využívá vlastnosti lidského zraku a fyzikální (objektivní) metody, při nichž měření probíhá s využitím fyzikálních čidel (fotočlánků). Objektivní eventuálně fyzikální metody využívají fotometrické přístroje, [3], [1].

V praxi je možno používat různé fotoelektronické snímače využívající vnitřní anebo vnější fotoelektrický efekt. Jsou to tyto: emisní fotonky, fotodiody, fototranzistory. Fotoelektrické snímače jsou schopny pracovat ve spojitém nebo impulsním režimu. Výstupní hodnoty jsou závislé lineárně nebo logaritmicky na hodnotách vstupních. V dnešní době je většina měření prováděná detektory, [3], [1], [2].

2.1 Luxmetry

Luxmetry jsou přístroje (obr. 5) na měření osvětlenosti (rovinné, kulové, válcové, polokulové, poloválcové aj.). Pokud není uvedeno jinak, myslí se pod pojmem luxmetr přístroj na měření rovinné osvětlenosti. Snímací úhel luxmetru pro měření rovinné osvětlenosti má být ve všech rovinách kolmý k rovině, ve které se určuje osvětlenost. Fotometrická hlava je obvykle vybavena filtrem pro přizpůsobení spektrální citlivosti $V(\lambda)$ a difuzním nástavcem pro korekci směrové chyby fotodetektoru, [3].



Obr. 5: Luxmetr [11]

Snímačem či detektorem je zpravidla selenový nebo křemíkový fotočlánek. Spektrální vlastnost lidského zraku je respektována zavedením odpovídající korekce. Možná chyba při měření osvětlovacích soustav se žárovkami dosahuje 5 %, soustav s výbojkami až 50 %. Provozní luxmetry bývají konstrukčně řešeny s oddělením detektoru a vyhodnocovacích obvodů. Pro měření malých hodnot intenzit osvětlení jsou součástí luxmetrů i odpovídající zesilovače, [1].

Šikmý dopad světla na plochu fotočláneku je korigován tzv. *kosinovým nástavcem*. Chyba měření bez kosinového nástavce se zvětšuje s úhlem dopadu: pro 30° je to 6 %, pro 45° větší než 15 %, [1].

Měření umělého osvětlení se provádí v různých místech kontrolní (srovnávací) roviny, volba měřicích míst je závislá na rozmístění a počtu svítidel. Pro měření platí normy ČSN EN 13032 Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel (2005), ČSN 360011 Měření osvětlení vnitřních prostor (2006), [1], [3].

Metodika měření

Při měření umělého osvětlení je nutno vyloučit vliv denního osvětlení. Proto se měří v noci nebo při zatemnění. Osvětlenost se vzhledem ke stálosti osvětlení vyhodnocuje pouze hodnotami osvětlenosti v luxech. Celkové osvětlení v prostoru nebo jeho funkčně vymezené části se mění v síti pravidelně rozložených bodů. Tedy volba měřicích míst je závislá na rozmístění a počtu svítidel, [1], [2].

Nejmenší počet bodů je možno vypočítat ze vztahu:

$$n = \frac{1}{k} = \frac{a \cdot b}{5 \cdot k \cdot (a + b)} \quad (6)$$

Kde: a, b = rozměry místnosti [m]

h = výška svítidla nad srovnávací rovinou [m]

k = činitel místnosti [-]

2.2 Jasoměry

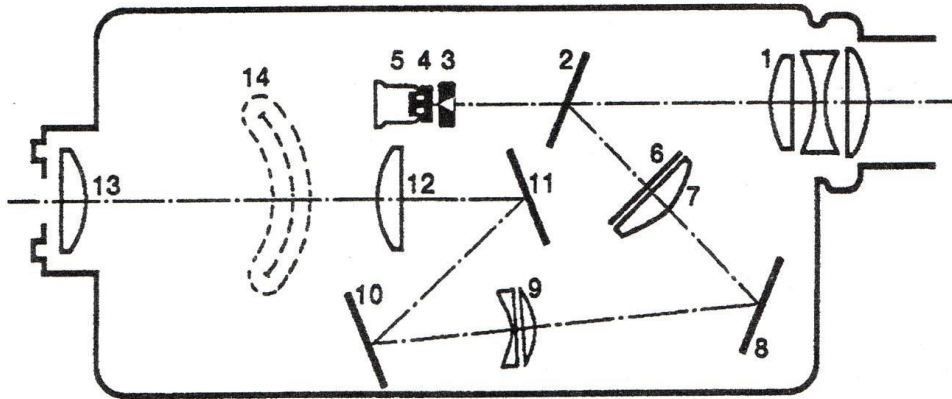
Jasoměr (obr. 6) pracuje na stejném principu jako luxmetr, ale je doplněn o optiku, která vymezuje kolmý dopad světla na čidlo luxmetru v definovaném prostorovém úhlu, ve kterém je snímáný jas integrován. Měří jas reálných nebo fiktivních povrchů vyzařujících nebo odrážejících světlo. Bývá doplněn optickým systémem, který umožňuje, aby obsluha nasměrovala vlastní měřicí systém přesně na zvolené místo.



Obr. 6: Jasoměr [12]

Princip měření spočívá ve stanovení velikosti světelného toku procházejícího clonou. V rovině clony se zobrazí vyhrazená plocha zorného pole, ve které se určí střední hodnota jasu měřené plochy. Nezbytná je znalost vzdálenost jasoměru od měřené plochy. Velikost úhlu měření podmiňuje rozdělení jasoměrů na bodové (úhel $< 0,6^\circ$) a integrační (úhel $> 2^\circ$), [1].

Systémy umožňující měření jak jasů, tak intenzity osvětlení jsou označovány jako **fotometry**. Univerzálnost takového měřiče je potom chápána s ohledem na praktické využití na měření venkovního osvětlení, interiérů, ale i v laboratorních podmínkách. Principální řešení optického systému jasoměru u fotometru je uvedeno na obr. 7, [1].



Obr. 7: Princip optického systému jasoměru [1]

Užité dva křemíkové fotodetektory jsou korigovány na poměrnou světelnou účinnost viditelného záření V_λ . Optický systém jasoměru je tvořen třemi čočkami označenými 7, 12, 13. Polopropustné zrcadlo 2, mezi objektivem 1 a fotodetektorem 5 dodává světlo i pro zobrazovací jednotku. Clona 3 vymezuje úhlový rozsah svazku 1° . Filtr 4 koriguje spektrální citlivost fotodetektoru. Zobrazení úhlové stupnice umožní terčík 6 a stupnice pro odečítání hodnot 14. Svazek je veden odraznými zrcadly 8, 10, 11 přes rektifikační optiku 9. Vše můžeme vidět na obr. 7. Čísla v textu odpovídají číslům na obrázku, [1], [2].

Přípustné chyby luxmetrů a jasoměru

Celé této problematice byla věnována řada prací. Existuje rovněž mezinárodní předpis, jaké parametry mají mít jednotlivé typy luxmetrů a jasoměru. Tak lze luxmetry a jasoměry definovat pro tři základní skupiny měření. V první skupině jsou luxmetry a jasoměry, které slouží pro laboratorní a přesná měření, ve druhé skupině jsou luxmetry a jasoměry pro běžná provozní měření (měření při revizních činnostech), třetí skupina se vyznačuje tím, že výsledky jsou určeny jen pro hrubou orientaci. Přípustné chyby pro jednotlivé třídy jsou uvedeny v tabulce 3, [2].

Tabulka 3: Přípustné chyby luxmetrů a jasoměru pro jednotlivé typy měření [2]

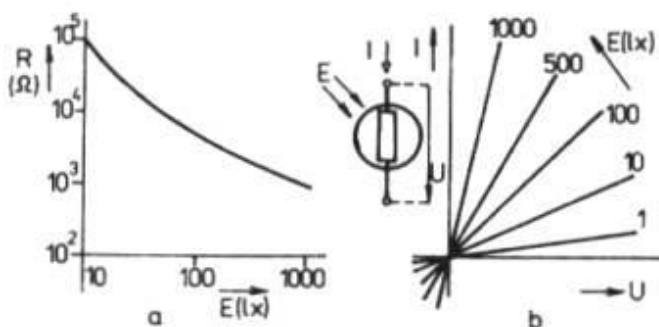
Přesnost	Typ měření	Celková přípustná chyba v %		Třída
		Luxmetry	Jasoměry	
L	Laboratorní	± 3	± 5	1
A	Přesné	± 5	$\pm 7,5$	2
B	Provozní	± 10	± 10	3
C	Orientační	± 20	± 20	4

2.3 Typy snímačů

Fotorezistor

Fotorezistory se vyrábějí zpravidla napařením vrstvy vhodného polovodičového materiálu (např. CdS, CdSe pro viditelné světlo nebo CdTe pro infračervené záření) na keramickou podložku. Aby se dosáhlo většího odporu součástky, má polovodičová vrstva tvar meandru. Pouzdro je upraveno tak, aby na citlivou vrstvu mohlo dopadat světlo (záření). Za temna je odpor součástky velmi vysoký. Osvětlíme-li citlivou vrstvu, dochází ke zmenšení odporu fotorezistoru. Závislost odporu na osvětlení je přibližně logaritmická (v logaritmických souřadnicích vychází téměř přímkový průběh — obr. 8a). Při osvětlení několik set luxů je odpor fotorezistoru pouze několik set ohmů. Zmenšil se tedy 104 až 107krát. Tento údaj je dokladem velké citlivosti fotorezistoru, [4], [5].

Kdybychom měřili voltampérovou charakteristiku, získali bychom soustavu přímek, která dokazuje, že fotorezistor je při konstantním osvětlení lineárním symetrickým jednobranem, [4].



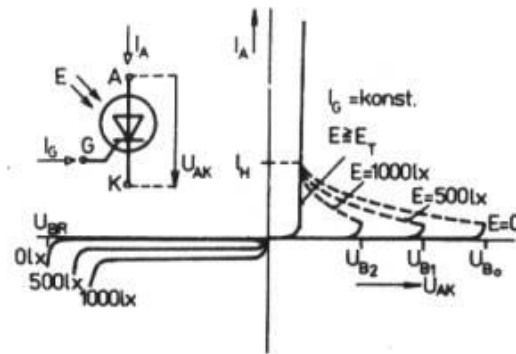
Obr. 8: a) Závislost odporu fotorezistoru na osvětlení, b) voltampérová charakteristika [4]

Pohled na přechodovou charakteristiku (obr. 8a) ukazuje značnou setrvačnost fotorezistoru. Všimněte si, že při zvětšení osvětlení je změna odporu pomalejší než při zatemnění. Důležité také je, že rychlost změn odporu je závislá na velikosti osvětlení. Literatura [12] udává časové konstanty fotorezistorů z CdS: při osvětlení 10^{-2} lx je π řádově desítky sekund, při osvětlení 1000 lx asi 10^{-3} až 10^{-4} s, při osvětlování impulsy laseru poklesne π řádově na 10^{-8} až 10^{-9} s.[3]

Fototyristor

Čtyřvrstvá struktura PNPN fototyristoru je umístěna v pouzdru s průhledným okénkem, které umožňuje, aby do oblasti přechodu mohlo pronikat světlo. Součástka má

vyvedenou řídicí elektrodu G a za temna má stejné vlastnosti jako běžný tyristor řízený proudem.



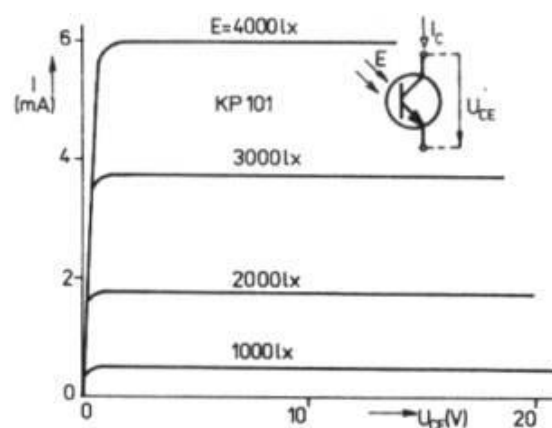
Obr. 9: Voltampérová charakteristika fototyristoru [4]

Kdybychom nastavili určitý řídicí proud I_G a měnili osvětlení, zjistili bychom, že blokové napětí U_B se při zvětšování osvětlení zmenšuje. Situaci zachycují voltampérové charakteristiky na obr. 9. Důležitou veličinou je tzv. spínací osvětlení E_T , při kterém mizí bloková schopnost fototyristoru při napětí $U_{AK} > 0$. Je zřejmé, že velikostí proudu I_G je možné řídit citlivost fototyristoru na velikost osvětlení, při kterém fototyristor spíná, [4], [5].

Fototranzistor

Namísto vstupního proudu přiváděného do báze bipolárních tranzistorů se k řízení kolektorového proudu fototranzistorů využívá světelné energie. Světlo proniká do oblasti přechodu báze-emitor okénkem v pouzdrů uzavřeným skleněnou čočkou.

Vstupní charakteristiky tranzistoru TESLA KP 101 jsou na obr. 10. Důležitou charakteristickou veličinou je světelná citlivost $S = \Delta I_C / I_E$ ($\mu A/lx$), která je analogická strmosti y_{21} běžných tranzistorů. Při vzrůstu osvětlení se citlivost S zvětšuje, [4]



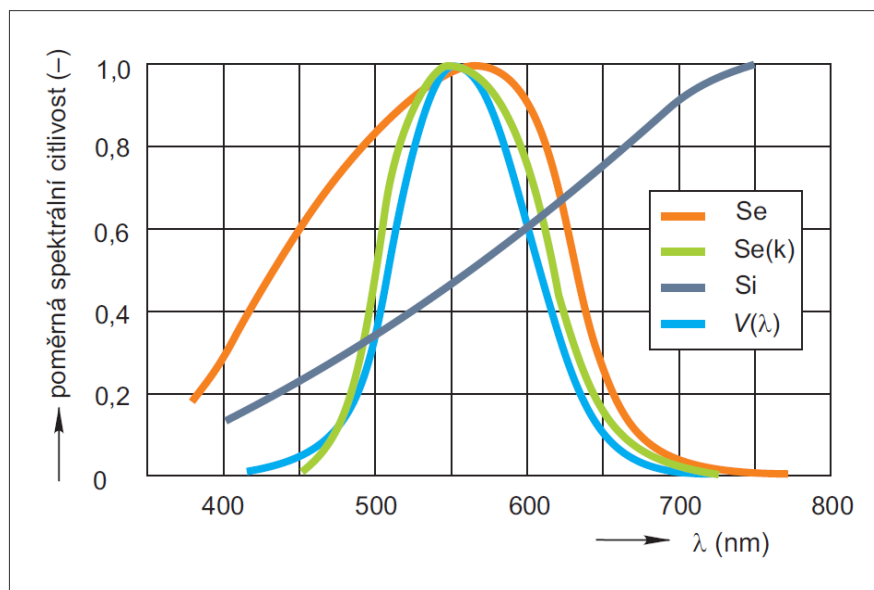
Obr. 10: Voltampérová charakteristika fototranzistoru [4]

Fotočlánky

Fotočlánek je nejčastěji používané fyzikální čidlo pro objektivní světelná (popř. radiometrická) měření. Někdy je také označován jako **fyotodetektor**, neboť vždy obsahuje detektor citlivý na světlo. Ten převádí světlo či jinou část elektromagnetického záření na elektrický signál.

Fotočlánek bývá součástí fotometrické hlavičky, která obsahuje další doplňkové příslušenství - např. filtry pro korekci spektrální citlivosti, nástavce pro směrové přizpůsobení, konstrukční součásti atd. Je základem mnohých fotometrických přístrojů: luxmetru, jasoměru, goniofotometru, kulového integrátoru nebo kolorimetru.

Na obr. 11 jsou srovnány spektrální citlivosti základních fotočlánků a lidského zraku. Spektrální rozložení citlivosti fotoelektrických snímačů bývá zpravidla odlišné od spektrální citlivosti oka normálního pozorovatele, a proto se přizpůsobuje korekčními filtry.

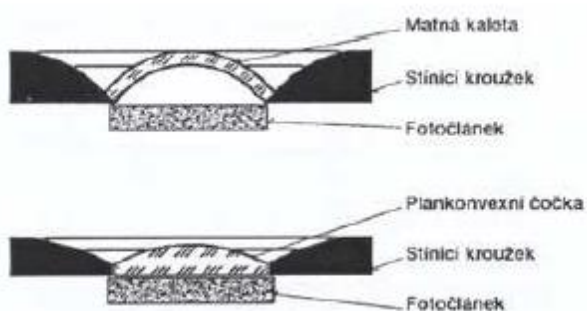


Obr. 11: Srovnání citlivosti fotočlánků

Příklady průběhů poměrné spektrální citlivosti hradlových fotočlánků v porovnání s poměrnou spektrální citlivostí $V(\lambda)$ normálního fotometrického pozorovatele při denním vidění: Se = nekorigovaný selenový fotočlánek, Si = nekorigovaný křemíkový fotočlánek, Se(k) = běžně korigovaný selenový fotočlánek, [4].

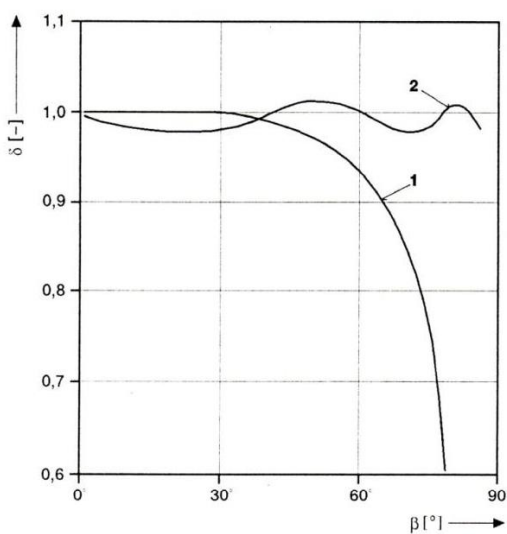
Kosinový nástavec

Na obr. 12 je schematicky znázorněn kosinový nástavec provedený podle Harting–Helweiga a nástavec podle Reeb–Tosberga. Oba nástavce korigují šikmé dopady světla na povrch fotočlánku. Použije-li se fotočlánek bez tohoto kosinového nástavce, dochází k chybě měření, která se zvětšuje s úhlem dopadu. Při úhlu dopadu 30° je chyba 6 %, při úhlu 45° je větší než 15 % a při ještě větším úhlu dopadu se chyba měření dále výrazným způsobem zvětšuje, [1].



Obr. 12: Základní typy kosinových nástavců [1]

Na obr. 13 jsou uvedeny chyby měření s použitím a bez použití kosinového nástavce. Křivka jedna ukazuje chyby měření bez kosinového nástavce a křivka číslo dvě ukazuje chyby měření s použitím kosinového nástavce.



Obr. 13: Chyby měření s použitím a bez použití kosinového nástavce [1]

Fotodioda

Fotodioda je plošná polovodičová dioda konstrukčně upravená tak, aby do oblasti přechodu PN pronikalo světlo. Není-li přechod osvětlen, má voltampérová charakteristika fotodiody stejný průběh, jako má charakteristika běžné plošné diody. Největší rozdíl mezi osvětleným a neosvětleným stavem pozorujeme při polarizaci diody ve zpětném směru ($U_{AK} < 0$; III kvadrant), kdy dochází k téměř lineárnímu růstu proudu I_A při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Dioda se v těchto podmínkách chová jako pasivní součástka, jejíž odpor je závislý na osvětlení (odporový režim činnosti diody).

Fotodioda reaguje na změny osvětlení velmi rychle. Náběh t_r je řádově 10^{-6} až 10^{-9} s. Zvláštní je konstrukce těchto diod, např. fotodioda PIN, která má mezi vrstvou P a N vloženou vrstvu s intrinziční vodivostí s velkou elektrickou pevností (U_{AK} je až -500 V), a pracuje proto s velmi vysokými intenzitami elektrického pole v oblasti přechodu, nebo Schottkyho fotodioda (napařená vrstva zlata na křemíku) dosahující náběhu řádově 10^{-12} až 10^{-13} s.

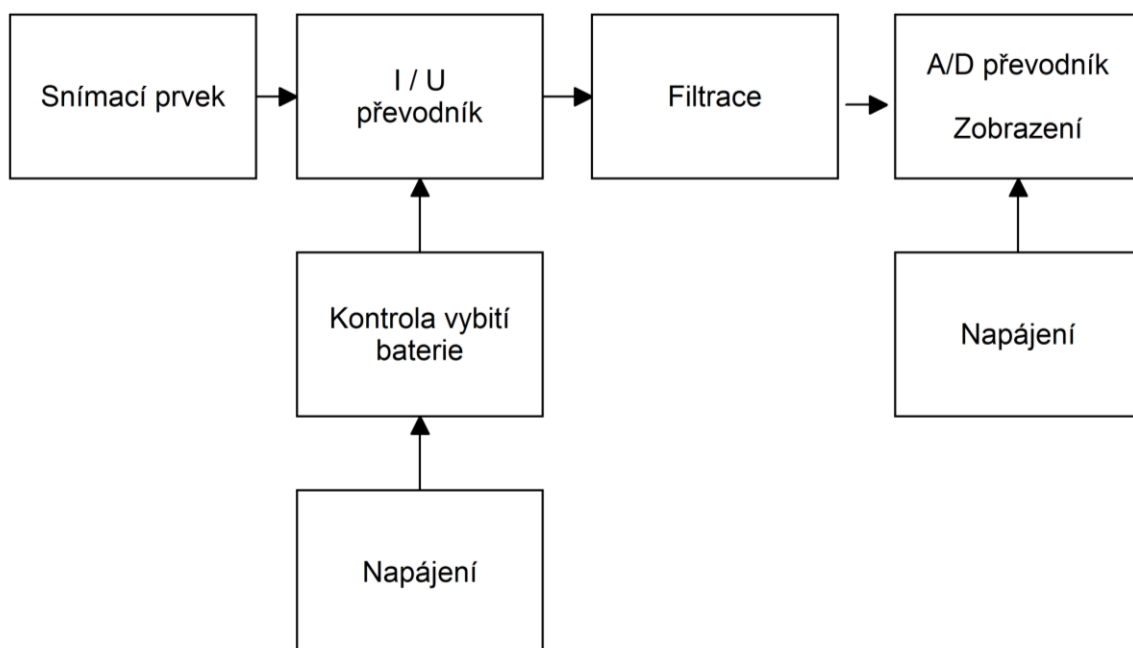
Fotodiody se používají k měření osvětlení (selenové a některé křemíkové v hradlovém režimu), dále ke snímání z děrné pásky v automatizaci, ve filmových projektorech při snímání optického záznamu zvuku atd. Rychlé fotodiody pracují jako přijímače v optických spojích, oprtonech apod, [4], [5].

3 Konstrukce luxmetru

Kapitola se věnuje návrhu konstrukce luxmetru. Obsahuje blokové schéma, ze kterého vychází celkové schéma zapojení. Dále jsou zde uvedeny výpočty obvodových prvků, návrh plošného spoje, ověření schématu a nakonec soupiska použitých součástek.

3.1 Blokové schéma

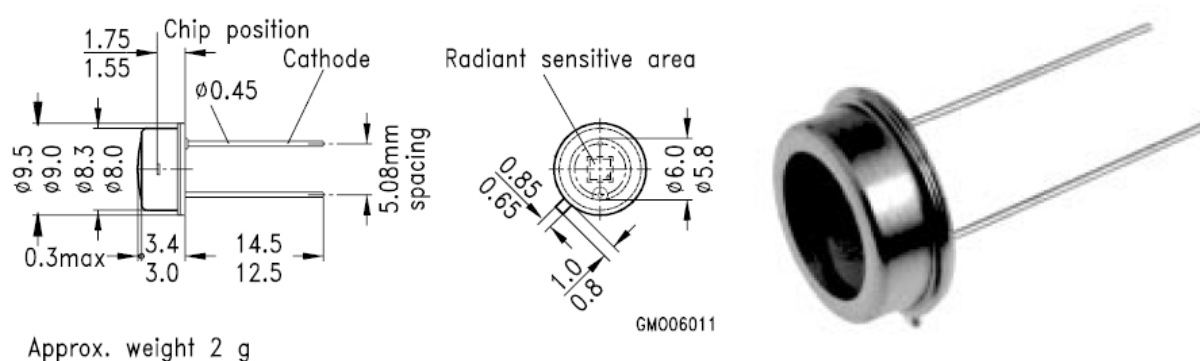
Blokové schéma ukazuje, jak funguje zapojení přístroje luxmetr. Skládá se ze sedmi základních bloků. První nejdůležitější blok je snímací prvek, který snímá hodnoty pro další zpracování. Další blok zajišťuje převod proudu na napětí. Blok filtrace je uzpůsoben signálu pro zobrazení a také proti velkým zákmitům signálu. A/D převodník a zobrazení je zakresleno ve stejném bloku, protože obě funkce zajišťuje zvolené panelové měřidlo. Bloky napájení jsou dvě nezávislé 9V baterie. U první baterie je zařazen blok kontroly vybití, protože když dojde k poklesu napětí na baterii cca na 7–6 V, měření už nemusí probíhat korektně. U druhé baterie tento blok není, protože má displej integrovanou i kontrolu vybití baterie



Obr. 14: Blokové schéma luxmetru

Snímací prvek

Základní součástí navrhovaného luxmetru je snímací prvek. Byla vybrána spektrálně kompenzovaná křemíková fotodioda od firmy Siemens. Tato fotodioda je přizpůsobena citlivosti lidského oka. Používaná je pro měření intenzity osvětlení v rozsahu vlnových délek 350 nm–820 nm. Je to dioda BPW21, jež se vyznačuje velmi dobrou linearitou závislosti výstupního proudu na osvětlení.



Obr. 15: Fotodioda BPW21 [13]

Fotodioda má předřazený korekční filtr, a proto je určena přímo pro měření osvětlení. Tento filtr upravuje tvar charakteristiky tak, aby se podobala charakteristice citlivosti lidského oka. Hlavní výhodou fotodiody je (v ideálním případě) lineární závislost výstupního proudu na osvětlení.

Tabulka 4: Maximální rozsah fotodiody [13]

Popis	Symbol	Hodnota	Jednotka
Provozní a skladovací teplota	$T_{op} T_{stg}$	-40...+80	°C
Pájecí teplota ve vzdálenosti 2 mm od spoje	T_s	235	°C
Závěrné napětí	V_r	10	V
Celkový ztrátový výkon	P_{tot}	250	mV

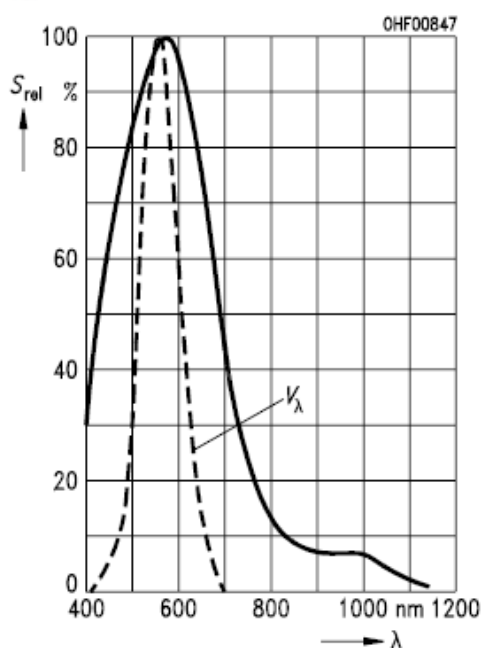
Tabulka 5: Charakteristika fotodiody [13]

Popis	Symbol	Hodnota	Jednotka
Spektrální citlivost, $V_R = 5 V$	S	10 ($\geq 5,5$)	nA/lux
Vlnová délka maximální citlivosti	λ_{Smax}	550	nm
Spektrální rozsah citlivosti $S = 10 \% z S_{max}$	λ	350 ... 820	nm
Citlivostní plocha zářiče	A	7,34	mm ²

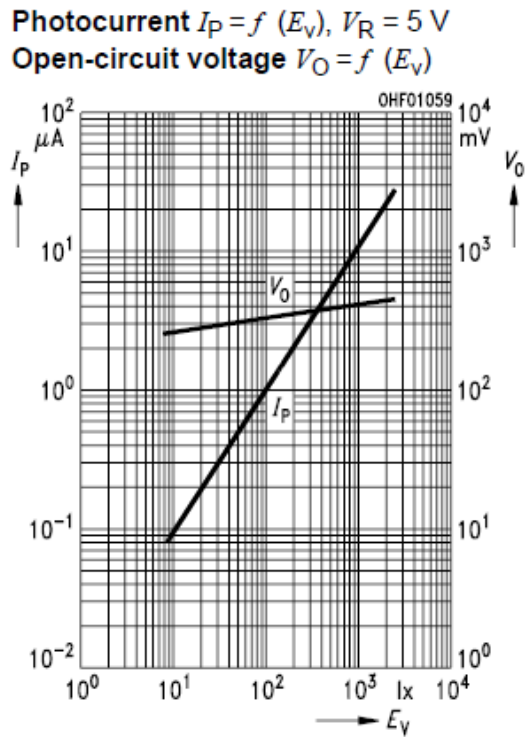
Rozměr ohniska citlivostní plochy	$D \times \check{S}$	2,73 × 2,73	mm × mm
Vzdálenost od přední stěny pouzdra	H	1,9 ... 2,3	mm
Poloviční úhel	ϕ	±55	Grad
Proud za tmy $V_R = 5 \text{ V}$ $V_R = 10 \text{ mV}$	I_R I_R	2 (≤ 30) 8 (≤ 200)	nA pA
Spektrální citlivost	S_λ	0,34	A/W
Výtěžnost, $\lambda = 550 \text{ nm}$	η	0,80	Foton
Pevný napěťový obvod, $E_V = 1 \text{ 000 luxů}$	V_0	400 (≥ 320)	mV
Zkratový proud	I_{sc}	10	μA
Doby náběžných sestupných hran $R_L = 1 \text{ k}\Omega$, $V_R = 5 \text{ V}$, $\lambda = 550 \text{ nm}$, $I_p = 10 \text{ }\mu\text{A}$	t_r, t_f	1,5	μs
Napětí v propustném směru $I_F = 100 \text{ mA}$, $E = 0$	V_F	1,2	V
Kapacita	C_0	580	pF
Teplotní koeficient z V_0	TC_V	- 2,6	mV/K
Teplotní koeficient z I_{sc}	TC_I	- 0,05	%/K
Ekvivalentní výkon šumu $V_R = 5 \text{ V}$, $\lambda = 550 \text{ nm}$	NEP	$7,2 \cdot 10^{-14}$	$\text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$
Detekční limit	D	$1 \cdot 10^{12}$	$\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$

Relative spectral sensitivity

$$S_{rel} = f(\lambda)$$



Obr. 16: Spektrální závislost fotodiody [13]



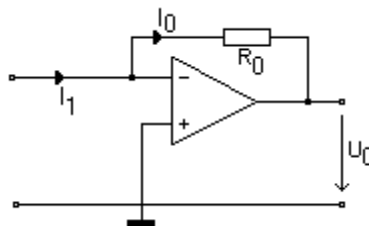
Obr. 17: Závislost výstupního proudu a napětí na intenzitě osvětlení [13]

I/U převodník

Do převodníku přivádíme proud a na jeho výstupu je napětí úměrné přiváděnému proudu:

$$U_0 = k \cdot I_1 \quad (7)$$

Převodník přijímá tento vstupní proud, aniž svými vlastnostmi ovlivňuje velikost. Konstanta k má zde význam zesílení, ovšem toto zesílení není bezrozměrné. Má rozměr [V/A].



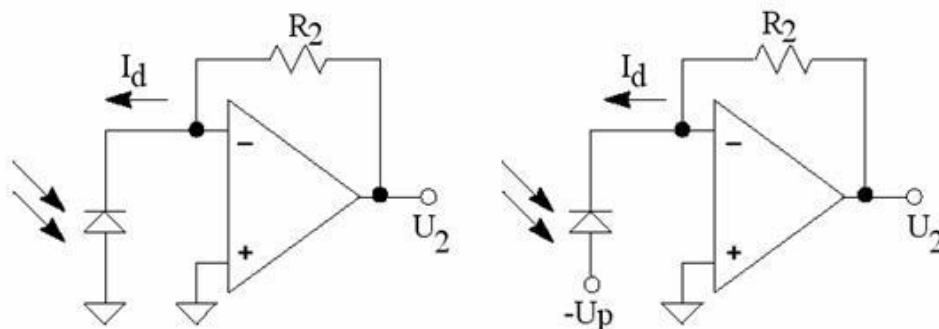
Obr. 18: Základní zapojení OZ jako I/U převodníku [18]

Zapojení se podobá invertujícímu zesilovači, u kterého není druhý odpor. Vstupní proud, přicházející na vstupní svorku (-) je odebírán napětím U_0 přes odpor R_0 . Napětí U_0 musí být tak velké, aby platilo: $I_0 = I_1$ a současně $U_- = U_+ = 0$

$$I_1 = I_0 = \frac{U_0}{R_0} \Rightarrow U_0 = R_0 \cdot I_1 \quad (8)$$

Předpokládaná konstanta k je totožná s odporem R_0 .

Fotodioda pracuje v jednom ze dvou režimů: buď s nulovým předpětím (*napěťový režim*), nebo se záporným předpětím (*hradlový režim*), jak je ukázáno na obr. 19. Napěťový režim je vhodný pro přesné měřicí účely, zatímco pro větší spínací rychlosti se hodí hradlový režim. V napěťovém režimu je proud fotodiódou za nulové intenzity osvětlení nulový, zatímco v hradlovém režimu teče fotodiódou malé množství proudu tzv. *proud za tmy*, [18].



Obr. 19: Pracovní režimy fotodiody: vlevo napěťový režim, vpravo hradlový režim [18]

A/D převodník

zajišťuje převod analogového signálu na číslicový. Spojitý analogový signál nejprve **vzorkujeme** (v určitém okamžiku změříme amplitudu). Potom tuto hodnotu převedeme kvantováním na digitální tvar, vytvoříme výstupní datové slovo.

K dosažení přesnosti musíme zajistit:

1/ **Vzorkovací kmitočet musí být minimálně dvojnásobný než maximální kmitočet (jeho nejvyšší harmonická složka) obsažený v analogovém signálu.** K zajištění této podmínky zařazujeme obvykle **před A/D převodník dolní propust.**

2/ Dostatečnou **rychlost vzorkování**. Ta vyplývá z nejkratší možné doby převodu. Jedná se o velmi důležitý parametr A/D převodníků.

3/ Výstupní slovo musí mít dostatečný **počet řádů**, abychom měli malý **kvantizační krok** a malou **kvantizační chybu** (obdobně jako u D/A převodníků).

Např. na výstupu 8bitového A/D převodníku může být $2^8 = 256$ různých hodnot, na výstupu 12bitového převodníku $2^{12} = 4\ 096$ různých hodnot. **Paralelní A/D převodník je nejrychlejší** ze všech typů, [4].

Panelové měřidlo, které jsem vybral z katalogu, má integrovaný 12bitový analogově/digitální převodník. Proto ho mohu použít pro zapojení luxmetru, [4].

Zobrazení

Displej z tekutých krystalů (anglicky **liquid crystal display**, zkratkou **LCD**) je tenké a ploché zobrazovací zařízení skládající se z omezeného počtu barevných nebo monochromatických pixelů seřazených před zdrojem světla nebo reflektorem. Vyžaduje poměrně malé množství elektrické energie, je proto vhodné pro použití v přístrojích běžících na baterie. LCD monitory nemají žádný negativní vliv na zrak člověka. Každý pixel LCD se skládá z molekul tekutých krystalů uložených mezi dvěma průhlednými elektrodami a mezi dvěma polarizačními filtry, přičemž osy polarizace jsou na sebe kolmé. Bez krystalů mezi filtry by bylo světlo procházející jedním filtrem blokováno filtrem druhým. Molekuly tekutých krystalů jsou bez vnějšího elektrického pole ovlivněny mikroskopickými drážkami na elektrodách. Drážky na elektrodách jsou vzájemně kolmé, takže molekuly jsou srovnány do spirálové struktury a stáčí polarizaci procházejícího světla o 90 stupňů, což mu umožňuje projít i druhým filtrem. Polovina světla je absorbována prvním polarizačním filtrem, kromě toho je ale celá sestava průhledná.[16]

Parametry panelového měřidla

3 a ½ místné LCD panelové měřidlo HD-3438

Tabulka 6: Vlastnosti měřidla HD 3438 [14]

Vlastnosti:	
Vstupní citlivost	200 mV
Napájení	9 V DC
Vstupní odpor	> 100 MΩ
Velikost LCD	13 mm
Desetinná tečka	Volba propojkou



Obr. 20: Panelové měřidlo HD3438 [14]

Tabulka 7: Popis měřidla HD 3438 [14]

Popis:	
Základní rozsah:	199,9 mV
Maximální zobrazitelná hodnota:	číslo 1999 s automatickou indikací polarity
Způsob zobrazení:	LCD displej
Měřicí metoda:	Dual-Slope integrační A/D převodník
Indikace přeplněného rozsahu:	zobrazení symbolu 1
Počet měření:	2–3 × za sekundu
Vstupní otvor:	> 100M _Ω
Přesnost:	± 0,5 % (23 °C ± 5 °C, 80 % PH)
Desetinná tečka:	nastavitelná propojkou na desce plošného spoje
Napájecí napětí:	stejnsměrné 9 V
Proudový odběr:	1 mA
Rozměry:	68 × 44 mm
Počet bitů A/D převodníku	12

Rozteč otvoru pro uchycení: 54,5 × 38 mm obdélníkový

Uvedení do provozu:

Pomocí děliče napětí lze změnit vstupní citlivost přístroje. Hodnoty rezistorů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 8: Nastavení rozsahů [14]

Rozsah	Dělič RA/RB	Desetinná tečka
199,9 mV	ponechat	P1 - spojena P2,P3 -
1,999 V	RA = 1 MΩ RB = 9 MΩ	P3 - spojena P1,P2 -
19,99 V	RA = 100 kΩ RB = 9,9 MΩ	P2 - propojena P1,P3 -
199,9 V	RA = 10 kΩ RB = 9,99 MΩ	P1 - propojena P2,P3 -
500 V	RA = 1 kΩ RB = 9,999 MΩ	P1,P2,P3 - rozpojené

Jako RA a RB použijte metalizované rezistory 0,5 W s tolerancí alespoň 0,5 %. Rezistory nejsou součástí přístroje – je nutno je dokoupit.

- Při použití jiného rozsahu než 200 mV doporučujeme přístroj kalibrovat známým napětím, které je nejlépe přesně polovinou kalibrovaného rozsahu. Hodnota známého napětí se po připojení nastaví trimrem R2.

- Měřené napětí připojte mezi svorky Vin a GND. Pouze stejnosměrné, [14]

Napájení

Pro měřicí přístroje je důležitý stabilní a spolehlivé napájení, pak bude měřicí přístroj pracovat podle našich představ a nastavených parametrů. Máme různé druhy napájení ze sítě nebo baterie. Jediným možným napájením pro mé řešení přístroje je napájení přenosné, protože by bylo nepraktické mít přenosný měřicí přístroj napájený ze sítě. Budu používat akumulátor, který má dlouhou životnost a výdrž. Protože při návrhu nebylo myšleno na galvanické oddělení obvodu pro napájení a obvodu pro měření, musely být použity dva akumulátory. A to pro samotný měřicí obvod a panelové měřidlo.

3.2 Obvodové řešení

Kapitola se věnuje návrhu obvodu. Od výpočtu obvodových součástí, vytvoření schématu zapojení a jeho kontrolu v simulačním programu až po vytvoření DPS a její realizaci.

Výpočty

Výpočty odporového děliče pro nastavení napětí na komparátoru.

$$U_2 = U \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (9)$$

Pro napájecí napětí 9V

$$U_{9v} = 9 \frac{4,7}{56 + 4,7} = 0,696V \quad (10)$$

Pro napájecí napětí 6,4V

$$U_{6v} = 6,4 \frac{4,7}{56 + 4,7} = 0,495V \quad (11)$$

Nastavení pracovního bodu na diodě.

Z volt-ampérové charakteristiky diody odečtené hodnoty:

$$U_D = 0,510V$$

$$I_D = 0,150mA$$

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{0,510}{0,150} = 3400 \Omega \quad (12)$$

a dopočítání odporu pro druhý dělič upravením vzorce 9

$$R_2 = \frac{UR_D}{U_D} - R_D = \frac{9 \cdot 3400}{0,510} - 3400 = 56\,000\Omega \quad (13)$$

Výpočet předřadného odporu pro LED diodu

$$R_4 = \frac{U}{I} = \frac{2}{0,002} = 1000 \Omega \quad (14)$$

Výpočet převodu proud na napětí:

Vycházíme ze vzorce číslo 8. Výsledek vypočtu, je uveden níže.

Při intenzitě osvětlení 1000lux protéká diodou proud $I_1 = 10\mu A$.

Převod 1:1, $R_0 = 1M\Omega$

$$U_0 = I_1 \cdot R_0 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 = 10V \quad (15)$$

Převod 1:10, $R_0 = 100k\Omega$

$$U_0 = I_1 \cdot R_0 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 = 1V \quad (16)$$

Převod 1:100, $R_0 = 10\text{k}\Omega$

$$U_0 = I_1 \cdot R_0 = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4 = 0,1\text{V} \quad (17)$$

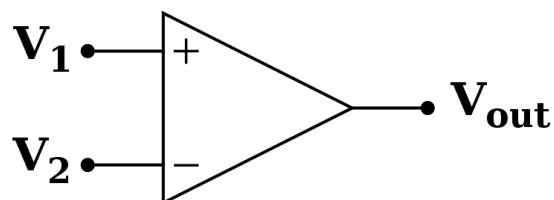
Výpočet mezní frekvence filtru typu dolní propust

$$f = \frac{1}{2\pi R_8 C_4} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}} = 15,91 \text{ Hz} \quad (18)$$

Schéma zapojení

Pro tvorbu schématu a následnou tvorbu DPS byl použit program EAGLE 6.2.0 light. Schéma zapojení je zobrazeno v příloze A.

První část obvodu s označením IC2A je zapojení OZ jako komparátoru. Ten zajišťuje signalizaci vybití baterie. Tento zesilovač porovnává napětí na záporném a kladném vstupu. Zesilovač porovnává napětí na diodě, které je při napájecím napětí 9 V cca na 515 mV, s napětím na děliči napětí zapojeném na druhý vstup zesilovače. Toto napětí je při 9 V cca 696 mV. Pokud napájecí napětí klesne pod 6,5 V, klesne napětí na diodě na 497 mV a také na odporovém děliči poklesne na 495 mV. Protože napětí na záporné větvi OZ je nižší než na kladné, objeví se na výstupu OZ kladné napětí, a proto se rozsvítí červená LED dioda. Od této chvíle sice bude měřicí přístroj fungovat nadále, ale měření už nemusí být tak přesné.



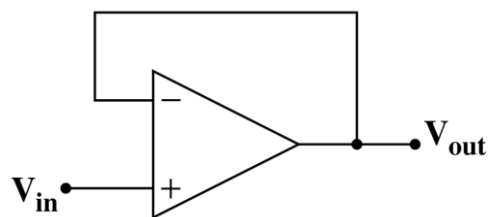
Obr. 21: Zapojení OZ jako komparátor

Další částí obvodu IC2B je znovu OZ, který pracuje jako převodník proudu na napětí. Zajišťuje malý vstupní odpor, který je vyžadován fotodiodou proto, aby byla závislost proudu

na osvětlení téměř lineární. Převod proudu na napětí je závislé na velikosti připojeného odporu ve zpětné vazbě. Tyto odpory mění rozsah pro zobrazení na panelovém měřidle. A to 1×, 10×, 100× hodnota na displeji. Při maximálním osvětlení je výstupní napětí větší, než vstupní rozsah napětí panelového měřidla. Proto při změně hodnoty odporu se poměr převodu mění. Dále je ve zpětné vazbě zapojen keramický kondenzátor, jenž filtruje vysoké záskoky, které by se mohly objevit na fotodiodě, a také stabilizuje OZ.

Následuje jednoduchý filtr typu dolní propust, který má mezní frekvenci 15,91 Hz. Tento filtr omezuje rychlé změny v obvodu, a tak ustaluje zobrazení na displeji.

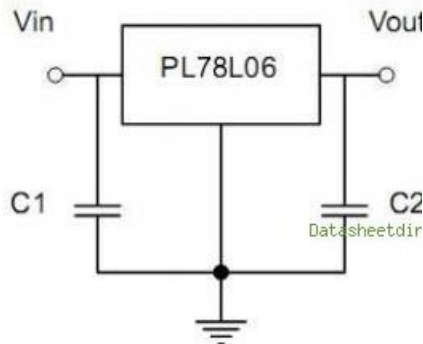
Poslední z OZ označený jako IC2C funguje jen jako napěťový sledovač. Je to jednoduché zapojení OZ. Jeho záporná zpětná vazba je připojena přímo na výstup. To znamená, že je jeho napěťový přenos roven 1. Zesilovač nic nezesiluje ani netlumí, ale má funkci oddělení výstupu I/U převodníku a vstupu displeje. Má velký vstupní odpor, a tak nezatěžuje obvod předchozí. Základní zapojení na obr. 22



Obr. 22: Napěťový sledovač

Potenciometr na konci obvodu má funkci doladění hodnoty na displeji. Konektory X6 slouží k připojení na měřicí svorky panelového měřidla.

Poslední prvek v obvodu je stabilizátor 78L06. Jeho základní zapojení je zobrazeno na obr. 23. Kondenzátory C1 a C2 brání tomu, aby se stabilizátor nerozkmital. V mém obvodu je jeden kondenzátor elektrolytický a druhý keramický. Pro správnou činnost stabilizátoru by mělo být dodrženo takové pravidlo, že kondenzátory by měly být připojeny co nejkratšími přívody. Tento stabilizátor zajišťuje stabilní napětí 6 V. Tímto napětím jsou napájeny OZ, které jsou v obvodu použity.



Obr. 23: Základní zapojení stabilizátoru

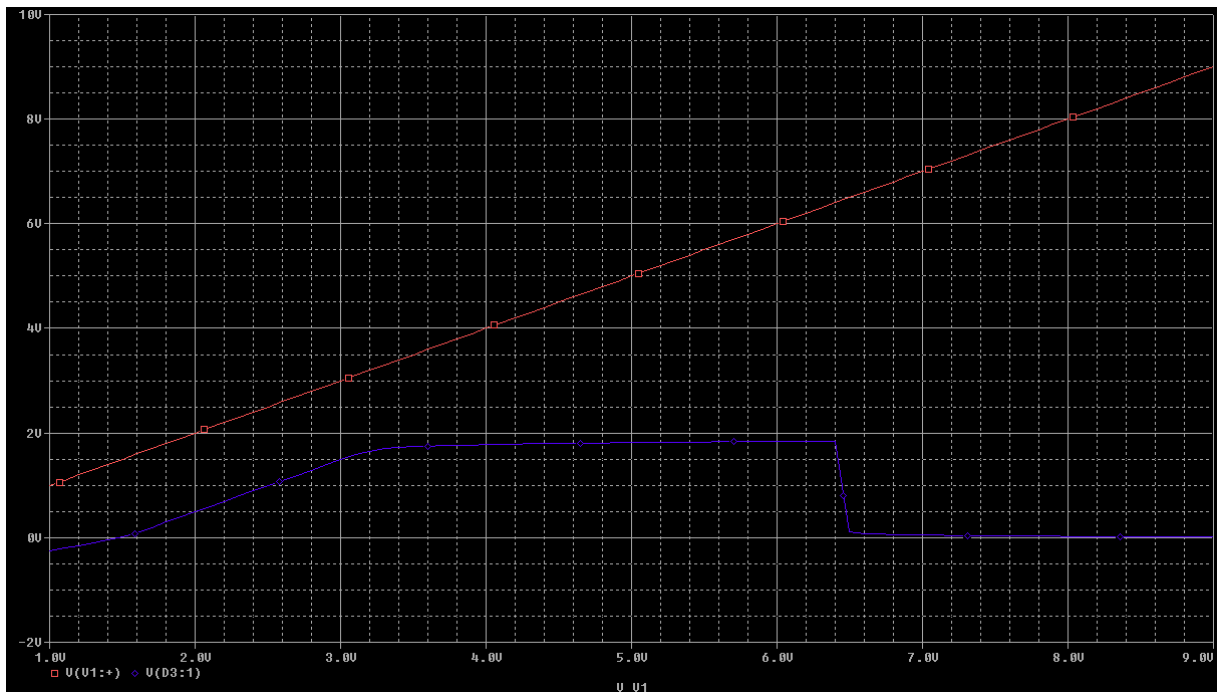
Na konektor X1 je připojena 9V baterie přes vypínač, a zajišťuje tak napájení celého obvodu. Baterie je připojená konektorem s označením 9VI. Tento konektor zajišťuje to, že nemůže dojít k přepólování baterie. Byla použita alkalická baterie GP Ultra plus - kapacita neznámá, protože výrobce ji ani na svých oficiálních stránkách nemá uvedenu. Ale podle výrobce by tato baterie měla být určena pro měřicí přístroje.

Ověření v programu PSPICE

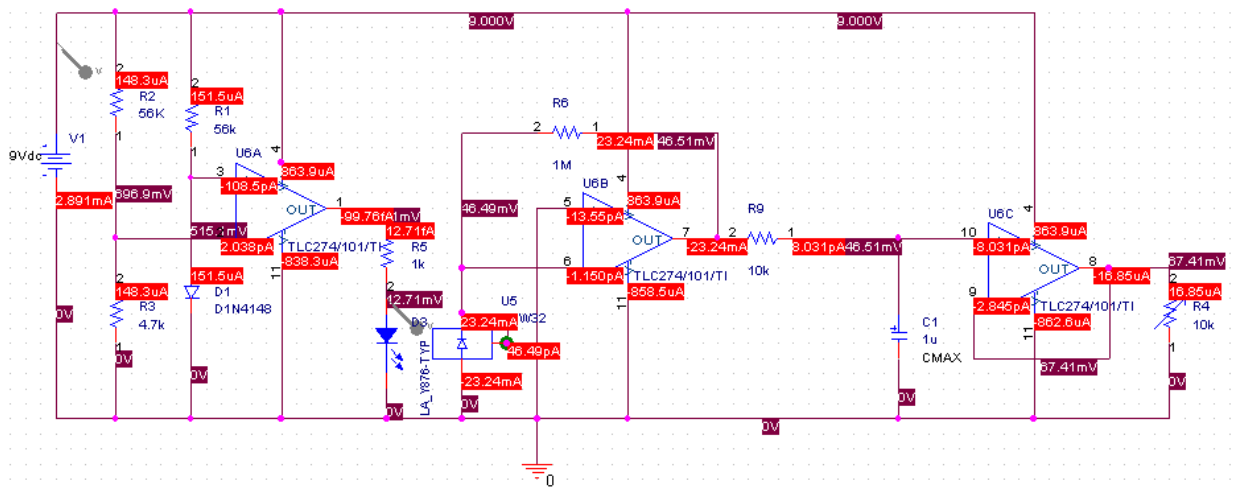
Po návrhu zapojení byla zapotřebí kontrola funkčnosti obvodu. Proto byl použit simulační program PSPICE, ve kterém můžeme namodelovat a poté nasimulovat námi navržený obvod. V programu je mnoho testů a různých simulací. Mým hlavním záměrem bylo vyzkoušení funkčnosti zapojení a kontrola možné chyby zapojení nebo zapojení obvodu do zkratů. Simulace neukázala žádné problémy. V programu chyběly některé obvodové součástky, proto jsem schéma zjednodušil pro tuto simulaci. Princip zůstává stejný, až na to, že v tomto obvodu nelze přepínat rozsahy a není zde uveden stabilizátor napětí.

Obr. 25 ukazuje hodnoty, které by se měly objevit v obvodu při jeho činnosti. Dále jsem ověřoval funkčnost komparátoru a rozsvícení LED diody. Na obr. 24 lze vidět:

- při poklesu napětí (červená linka) pod hodnotu 6,5 V se komparátor překlápí a na LED diodu je přiváděno napětí cca 2 V (modrá linka).



Obr. 24: Funkce komparátoru



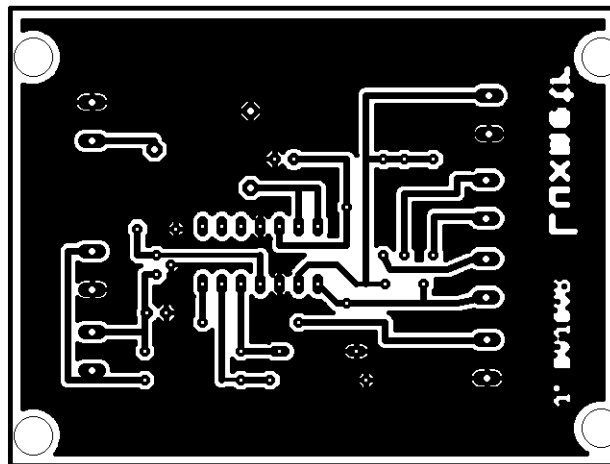
Obr. 25: Simulace obvodu v PSPICE

Výkres plošného spoje

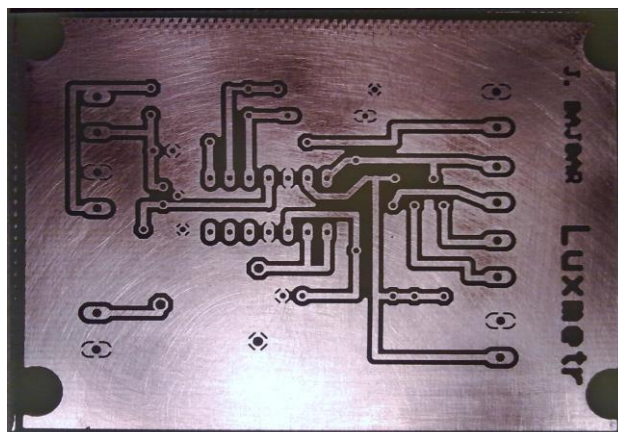
Výkres plošného spoje (DPS) a schéma zapojení jsem vytvořil v programu EAGLE 6.2.0. Na tvorbu DPS a schéma zapojení existuje mnoho dalších programů, jako jsou např. OrCad, DesignSpark, KiCad. Já zvolil EAGLE, protože jsem s ním pracoval na střední škole. Také jeho light verze je volně ke stažení na internetu.

Pro zajímavost a představu, jak by měl vypadat osazený DPS, jsem použil EAGLE 3D. Tento program umí vytvořit 3D model DPS pro lepší představu vzhledu konečného produktu. Ukázka v příloze E

Jelikož celkové schéma zapojení není moc složité, navrhl jsem plošný spoj jako jednostranný. Jeho rozměr je 82 × 72 mm.

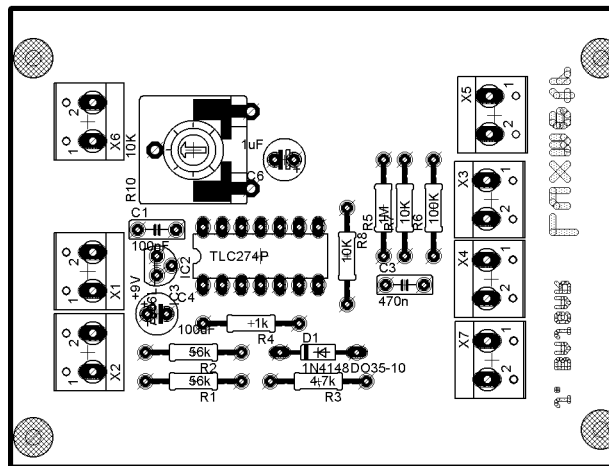


Obr. 26: Předloha pro tvorbu DPS, zobrazení 1:1



Obr. 27: Reálná DPS po vyleptání

Na obr. 26 je předloha pro vypracování plošného spoje. Na obr. 27 je ukázka, jak vypadá deska po mém vyleptání. Pro výrobu desky jsem zvolil fotocestu. Tato metoda funguje na principu osvitů DPS citlivého na UV záření přes předlohu. Předlohu jsem vytiskl na inkoustové tiskárně s rozlišením 1 200 × 1 200 DPI, protože inkoust má lepší krytí černé plochy než černý toner. Po osvětlení se DPS vloží do roztoku NaOH pro odstranění osvětlené vrstvy. Poté už se vyleptá leptacím roztokem. Zbytky fotovrstvy po vyleptání se odstraní etanolem nebo louhem.



Obr. 28: Plán rozvržení součástek na DPS

Obr. 28 ukazuje plán rozvržení součástek na DPS. Podle tohoto plánu se můžeme orientovat a postupovat při osazování. Jako první jsem osazoval pasivní součástky a nakonec operační zesilovač, protože IO obvody jsou citlivé na teplo a statickou elektřinu.

Konektor X1 je pro připojení napájení přes vypínač. Konektor X2 nebyl použit a je propojen vodičem. Konektory X3 a X4 slouží pro připojení přepínače na volbu rozsahu. Konektor X5 slouží pro připojení snímacího prvku. Konektor X6 slouží pro připojení výstupu na displej.

Seznam součástek

Součástky byly vybrány a zakoupeny s ohledem na funkčnost a požadované vlastnosti. V tabulce jsou uvedeny všechny součástky, které byly použity pro realizaci luxmetru. Jsou uvedeny názvy, hodnoty a typ pouzdra. Typ pouzdra je důležitý pro návrh DPS. Všechny součástky byly zakoupeny u firem GM electronic a Ges-Electronics.

Tabulka 9: Seznam součástek, hodnoty a popis

Název	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	56k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R2	56k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R3	4,7k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R4	1k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R5	1M	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R6	100k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R7	10k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R8	10k	RM 0204	kov. vr. 1% TK50; 0,4W
R10	10k	CA14V	Potenciometr; 0,25W;lin
C1	100nF	C050-025X075	Keramický
C2	470nF	C050-025X075	Keramický
C3	100 μ F/10V	E2,5-6	Elektrolytický radiální
C4	1 μ F/63V	E2,5-6	Elektrolytický radiální
D1	1N4148	DO35	Dioda 75V/0,2A
D2	BPW21	TO5	Fotodioda 350..820nm
LED1	Led4mm		Červená
IC2	TLC274	DIL14	4xOZ CMOS
IC3	78L06	TO92	Lineární regulátor napětí
Panelové měřidlo	HD-3128		3-1/2digit.; Ucc= 6-9V
Baterie	9V		Alkaline
Baterie	9V		Alkaline
Přepínač	ss-13H12-G5		Posuvný, on –on - on
Vypínač	2pólový, 250V/15A		Kolebkový on-off
Krabička	KP40A		Přístroj
Krabička			Sonda
Jack zásuvka 3,5mm	EY-502-C-M-3.5		JACK 3,5 MONO, panel
Jack vidlice 3,5mm	DCI SCP-2003T		3,5 mm; mono
X1	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
X2	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
X3	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
X4	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
X5	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
X6	ARK306 2P	W237-132	5mm + zamek
Kabel	RG-174		Koaxiál 50 Ω

4 Zhodnocení a závěr

Pro zhodnocení luxmetru jsem musel porovnat hodnoty, které jsem naměřil navrženým luxmetrem a luxmetrem referenčním. Pro tyto účely byly vypůjčeny dva referenční luxmetry s označením LX-1108 a LX-107. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 10. Dále byl podle vzorce 19 vypočítán rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Pomocí této hodnoty byla určena relativní chyba podle vzorce 20.

$$\Delta X = X_m - X_s \quad (19)$$

kde ΔX = rozdíl hodnoty naměřené a skutečné (lux); X_m = naměřená hodnota (lux); X_s = skutečná hodnota (lux).

$$\delta_x = \frac{\Delta X}{X_s} \cdot 100 \quad (20)$$

kde δ_x = relativní chyba (%); ΔX = rozdíl hodnoty naměřené a skutečné (lux); X_s = skutečná hodnota (lux).

Tabulka 10: Naměřené hodnoty intenzity osvětlení a vypočet relativní chyby

LX-1108 [lux]	LX-107 [lux]	X_s [lux]	Navržený luxmetr [lux]	ΔX [-]	δ_x [%]
60,0	64	62,00	49,3	12,70	20,48
92,0	95	93,50	75,9	17,60	18,82
95,1	107	101,05	83,9	17,15	16,97
123,3	119	121,15	90,6	30,55	25,22
162,9	175	168,95	149,8	19,15	11,33
181,5	184	182,75	158,8	23,95	13,11
228,6	234	231,30	210,0	21,30	9,21
284,7	300	292,35	250,0	42,35	14,49
335,8	358	346,90	295,0	51,90	14,96
428,0	413	420,50	390,0	30,50	7,25
Průměr					15,18

Podle průměrné relativní chyby, která je $\pm 15,18\%$ bych navržený přístroj zařadil do 4. třídy, přesnosti C. Měření na takovém přístroji proto slouží jen pro orientační účely.

Bakalářská práce je rozšířením semestrálního projektu. Hlavním cílem bylo navrhnout luxmetr s bateriovým napájením a číslicovým displejem pro rozsah osvětlení 20 – 1000 luxů.

V první části jsou popsány základní pojmy a veličiny, které jsou potřebné pro popis a měření světla. Práce dále obsahuje hygienické limity v oblasti osvětlení pracovních ploch. Následuje popis měření intenzity osvětlení a jasů, rovněž stručný popis přístrojů používaných pro tato měření. Pro srovnání jsou popsány další optoelektrické součástky.

Druhá část práce obsahuje postup konstrukce luxmetru. Návrh začíná blokovým schématem a popisem jednotlivých bloků. Pokračuje výpočtem obvodových prvků, které jsou potřebné pro kontrakci. Také je uvedeno celkové schéma obvodu. Pro kontrolu bylo schéma zapojení ověřeno v simulačním programu PSPICE. Jelikož simulace nepoukázala na žádnou chybu, byl vytvořen návrh DPS. Pro tento návrh byl použit program EAGLE 6.2.0 light, ve kterém bylo vytvořeno i schéma zapojení a celá dokumentace pro tvorbu DPS. Pro zajímavost byl pomocí EAGLE 3D vytvořen 3D model navržené DPS. Díky návrhu byl přístroj realizován a bylo provedeno měření a jeho zhodnocení.

Jedná se o jednoduchý návrh přístroje, proto u něj nemůže být očekávána taková přesnost měření jako u profesionálně vyrobených přístrojů. Můj přístroj byl uveden do chodu a bylo provedeno měření. Po porovnání naměřených hodnot s referenčními luxmetry a vypočítání relativní chyby přístroje. Na základě chyb byl přístroj zařazen do 4. třídy, proto je určen pouze pro orientační měření.

Přístroj má výhodu v tom, že může být vyroben relativně rychle, a to i v nesespecializované laboratoři. Dále je přenosný s bateriovým napájením. Měřicí obvod a obvod panelového měřidla jsou napájeny samostatně (galvanické oddělení). Proto nemůže být ovlivněna naměřená hodnota. V takovém napájení vidím i nevýhodu a tou je vyšší váha přístroje zapříčiněná přítomností dvou baterií. Řešením by bylo navrhnout obvod přímo na DPS který by galvanicky oddělil měřicí obvod od napájecího obvodu. Také by se dala zlepšit přesnost přístroje kompenzací světelných zdrojů, jako je u dražších přístrojů anebo použitím mikro kontroléru pro zpracování signálu z fotodiody.

Zadání bakalářské práce bylo tímto splněno.

Použitá literatura

- [1] ROZMAN Jiří. *Diagnostika životního prostředí*. 1. vyd. Brno: VUT, 2000, 136 s. ISBN 80 214-1771-4.
- [2] PLCH Jiří. *Světelná technika v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 210 s. ISBN 80-862-3009-0.
- [3] SOKANSKÝ Karel, NOVÁK Tomáš, BÁLSKÝ Marek, BLÁHA Zdeněk, CARBOL Zbyněk, DIVIŠ Daniel, SOCHA Blahoslav, ŠNOBL Jaroslav, ŠUMPICH Jan a ZÁVADA Petr. *Světelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] MAŤÁTKO Jan. *Elektronika*. 2. vyd. Praha: IDEA servis, 1987, 271 s. ISBN 80-859-7020-1.
- [5] SVEČNIKOV, Sergej Vasiljevič. *Základy optoelektroniky*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975, 306s.
- [6] PŘIBÁŇOVÁ Henrietta a LAJČÍKOVÁ Ariana. *Umělé osvětlení vnitřního prostředí* [online]. 2003, 3.1.2003 [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1303-umele-osvetleni-vnitriho-prostredi>
- [7] ČSN EN 12464-1. *Světlo a osvětlení - Osvětlení pracovních prostorů - Část 1: Vnitřní pracovní prostory*. ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 2004.
- [8] HABEL Jiří. *Světelná technika a osvětlování*. Praha: FCC Public, 1995, 437 s. ISBN 80-901-9850-3.
- [9] *Encyklopedie fyziky*; [online], Poslední revize – neuvedeno [cit. 2012-12-11], Dostupné z URL: <http://fyzika.jreichl.com/index.php>
- [10] HALLIDAY D., RESNICK R., WALKER J. *Fyzika*. VUTIUM, Brno, 2001.
- [11] *Měřicí přístroje, luxmetry: CONRAD HD-450 Luxmetr*. ITEK.CZ [online]. 2012 [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <http://hobby.itek.cz/merici-pristroje-luxmetry/X9180246-CONRAD-HD-450-Luxmetr>
- [12] LS-100 Luminance Meter. *Konica Minolta* [online]. 2012 [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <http://sensing.konicaminolta.asia/products/ls-100-luminance-meter/>
- [13] GM electronic. [online]. [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/520/520-028/dsh.520-028.1.pdf>
- [14] GM electronic. [online]. [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/dokumentace/722/722-197/czn.722-197.1.pdf>
- [15] LÁNÍČEK Robert. *Elektronika obvody, součástky, děje*. Praha: BEN, 1998, 478 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [16] Wikipedie – otevřená encyklopedie.; [online], 2012 [cit. 2012-12-11], Dostupné z URL: http://cs.wikipedia.org/wiki/Displej_z_tekut%C3%BDch_krystal%C5%AF

[17] HRAZDIRA Ivo a MORNSTEIN Vojtěch. *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. 1. vyd. Brno: Neptun, 2001, 381 s. ISBN 80-902-8961-4.

[18] OZ jako převodník proud napětí a součtový. [online]. 2010 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z:

http://dlabos.wz.cz/en/30-OZ_jako_prevodnik_proud_napeti_a_souctovy.html

Seznam zkratek

LCDLiquid Crystal Display

CIECommission internationale de l'éclairage

OZOperační zesilovač

IOIntegrovaná obvod

CMOSComplementary Metal–Oxide–Semiconductor

EAGLE.....Easily Applicable Graphical Layout Editor

DPSDeska plošných spojů

Seznam příloh

A Celkové schéma zapojení42

B Simulace celého obvodu43

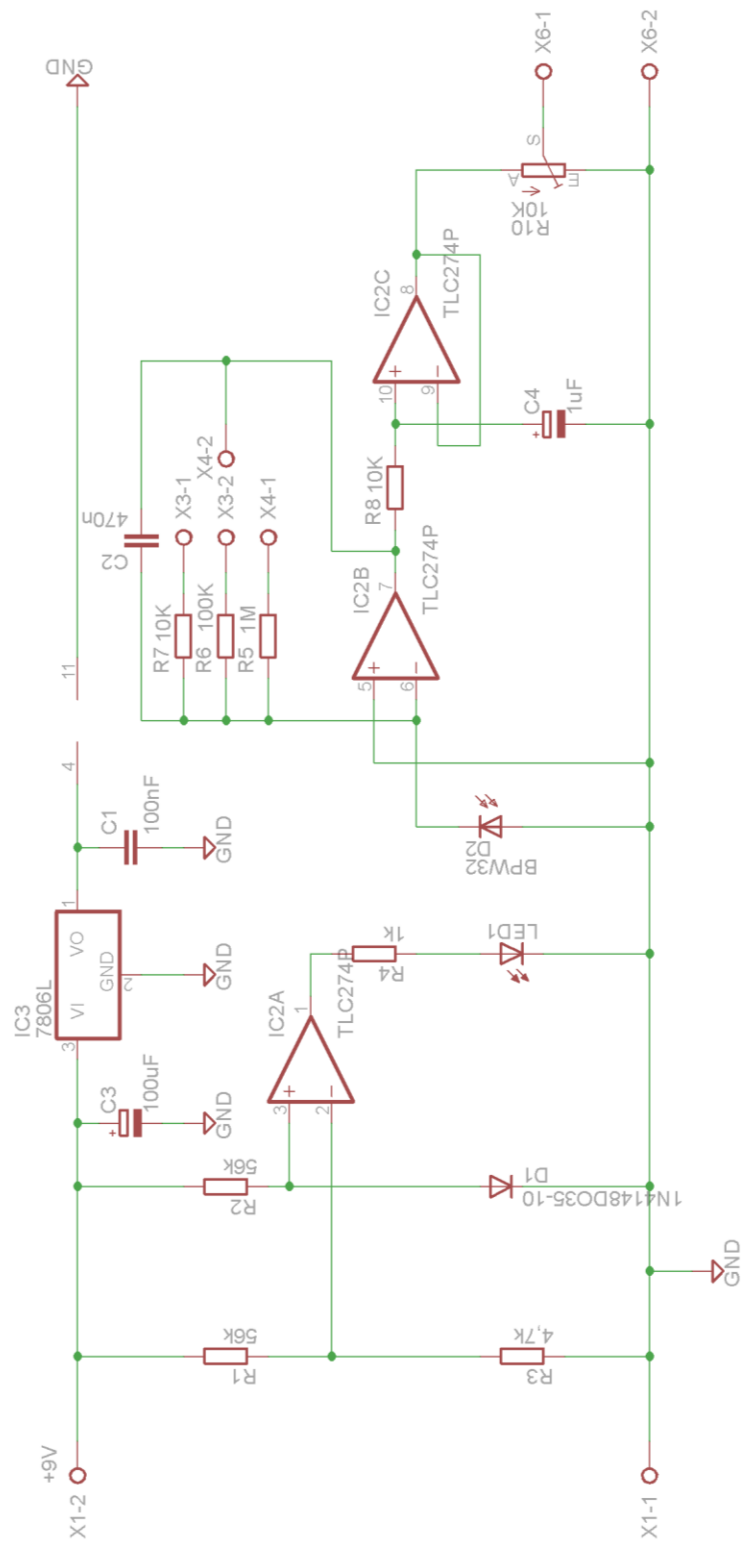
C Schéma zapojení z programu EAGLE44

D Deska plošného spoje, osazovací plán45

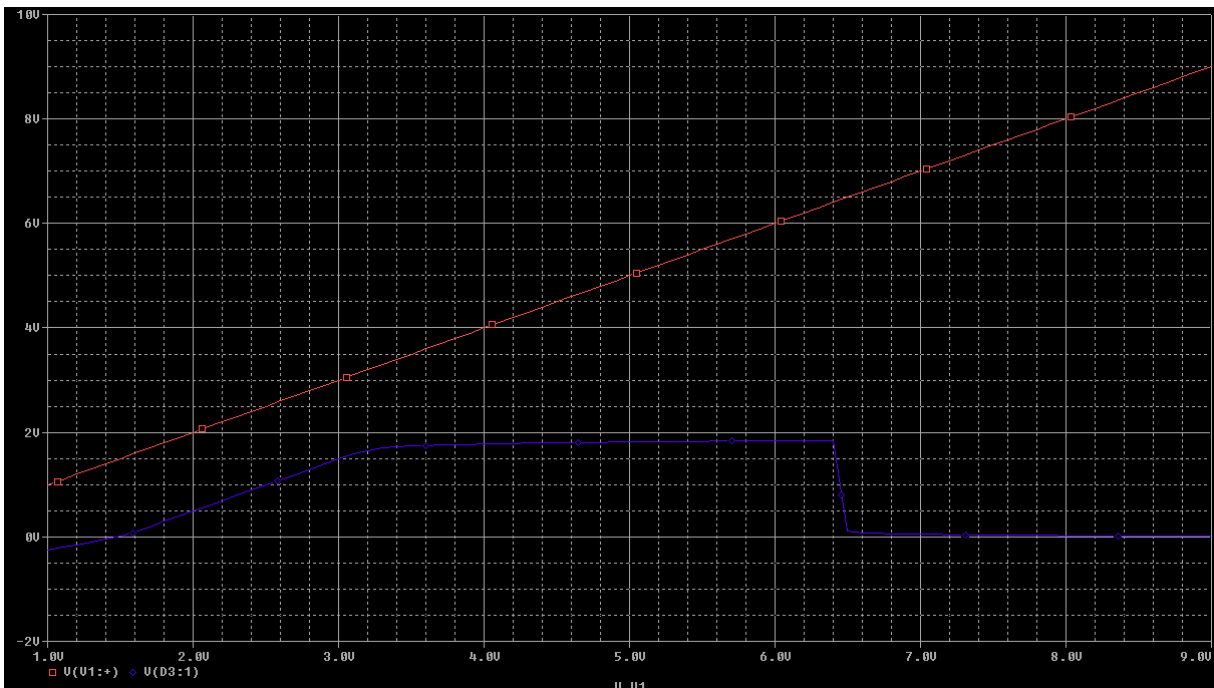
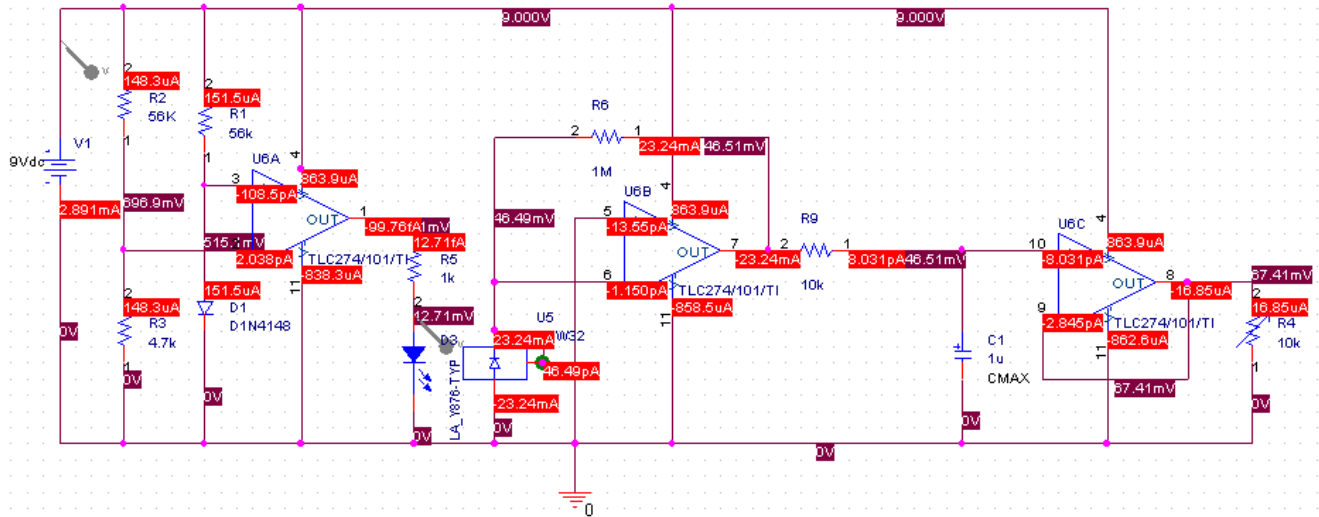
E 3D zobrazení DPS46

F Vlastní realizace47

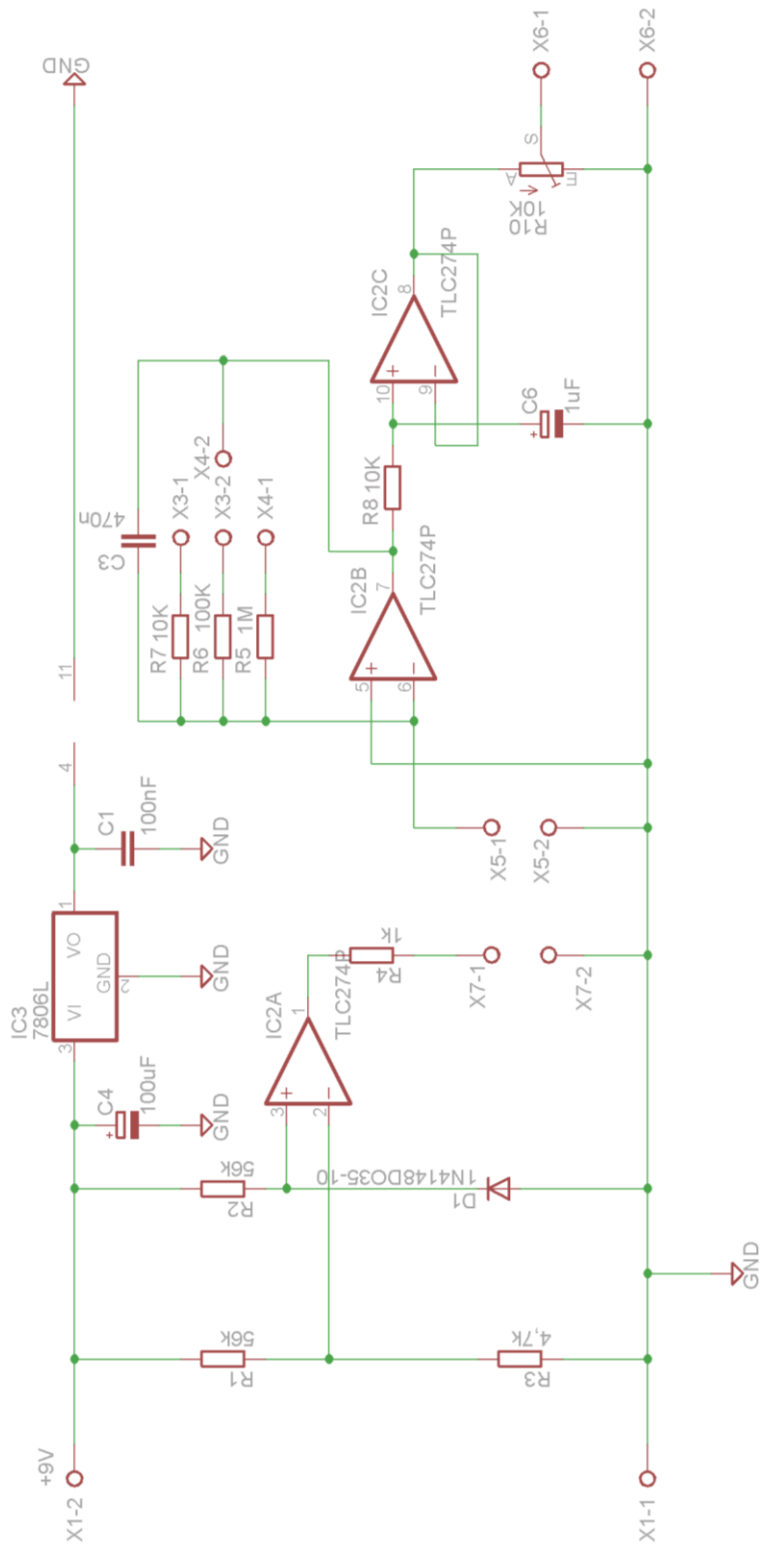
A Celkové schéma zapojení



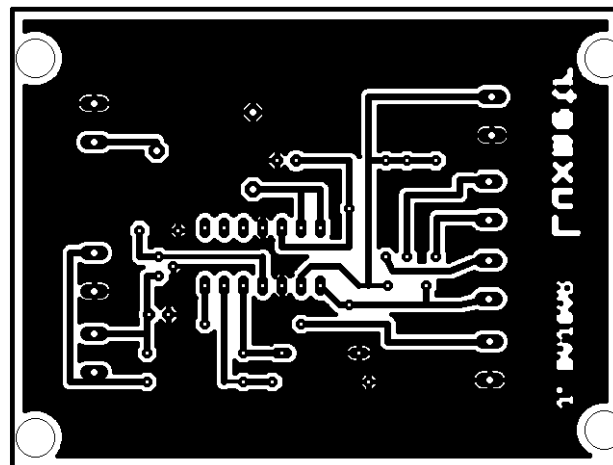
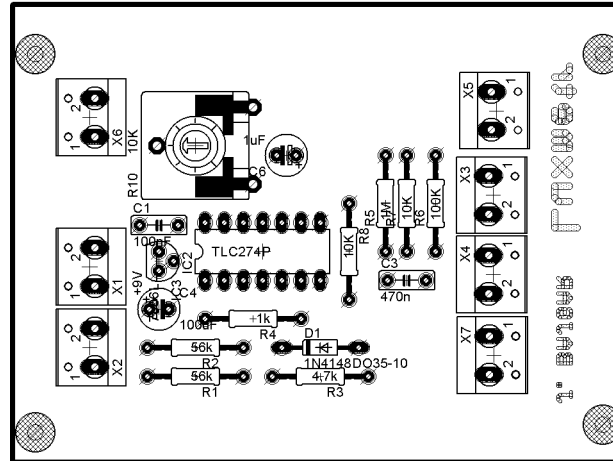
B Simulace celého obvodu v PSPICE



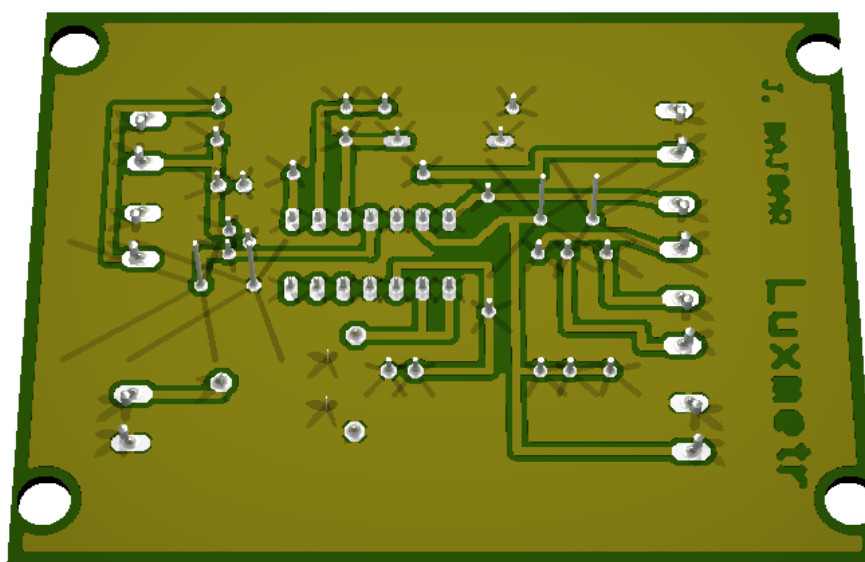
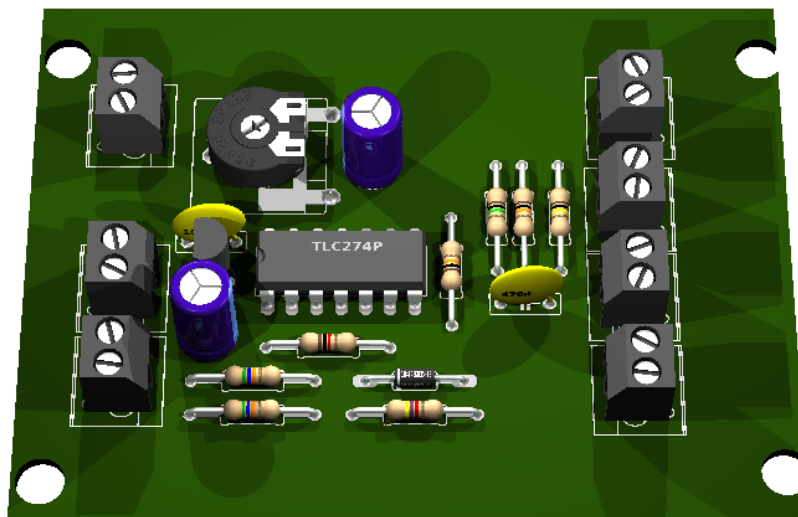
C Schéma zapojení z programu EAGLE



D Deska plošného spoje, osazovací plán



E 3D zobrazení DPS



E Vlastní realizace

