

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDÍCÍ TECHNIKY**



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

System pro optické měření polohy

Katedra řídicí techniky

Školní rok: 2006/2007

Z a d á n í b a k a l á ř s k é p r á c e

Student: Jan D o s k o č i l
Obor: Kybernetika a měření
Název tématu: Systém pro optické měření polohy

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

1. Analyzujte možnosti pro návrh levného senzoru absolutní polohy s fotodiodou pro rozlišení a přesnost senzoru lepší než 1 μm .
2. Senzor vyrobte a umístěte jej na dodané polohovací zařízení.
3. Senzor doplňte o vyhodnocovací obvody a otestujte vlastnosti celého měřicího systému na dodaném polohovacím zařízení.

Seznam odborné literatury: Dodá vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ondřej Holub

Datum zadání bakalářské práce: zimní semestr 2006/07

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. 8. 2007

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry



Prof. Ing. Zbyněk Škvor, CSc.
děkan

V Praze, dne 28. 2. 2007

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Holubovi za odborné vedení při zpracování práce a za jeho pomoc a podporu.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je analyzovat možnosti návrhu optického senzoru polohy a jeho realizace. Analýza představuje vhodný výběr páru vysílače a detektoru záření, které jsou základním prvkem optického snímače. Realizace představuje návrh snímače a jeho konstrukce. Ta nám umožňuje otestování měřícího obvodu, dále doplněného o vyhodnocovací část. Měření a vyhodnocení signálu je realizováno pomocí uživatelského prostředí Simulink v Matlabu

Abstract

Objective of this bachelor thesis is to analyze possibilities of the optic position sensor proposal and its realization. Analysis consists in a proper chose of pair of the transmitter and the detector of radiation which the basic elements of optic sensor are. Realization is the proposal of a sensor and its construction. It enables us to test measuring circuit with evaluation part added later.. Measurement and signal evaluation is realized with the help of user environmnet Simulink in Matlab.

Obsah

KAPITOLA 1

ÚVOD	1
------------	---

KAPITOLA 2

VÝBĚR VHODNÉHO PÁRU VYSÍLAČE A DETEKTORU ZÁŘENÍ.....	2
2.1 Parametry fotodiody	4

KAPITOLA 3

ZESÍLENÍ VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU Z FOTODIODY	6
---	---

KAPITOLA 4

POPIS MĚŘICÍHO SYSTÉMU	9
4.1 ELEKTRONICKÁ ČÁST	9
4.1.1 Vysílač záření.....	10
4.1.2 Detektor záření	11
4.1.3 Převodník proud – napětí	11
4.1.4 Multifunkční I/O karta MFH 624.....	13
4.2 MECHANICKÁ ČÁST.....	14
Konstrukční provedení.....	14
4.2.1 Polohovací zařízení.....	15
4.2.2 Konstrukce optického snímače.....	15
4.2.3 Rastr.....	17

KAPITOLA 5

MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VÝSTUPNÍHO SIGNÁLU.....	18
5.1 Převodní charakteristika.....	18
5.2 Použité funkce pro vyhodnocení signálu	19
5.3 Postup měření a vyhodnocení signálu	20

KAPITOLA 6

ZÁVĚR	23
LITERATURA	24

KAPITOLA 7

PŘÍLOHY	26
---------------	----

Kapitola 1

Úvod

V současné době je široce využíváno bezkontaktní měření polohy nejen v průmyslových odvětvích, ale také v laboratorních podmínkách, kde se používají bezkontaktní senzory polohy. Je vhodné uvést, že termín senzory polohy má dvojitý význam. V prvním případě je výstižnější mluvit o senzorech *přiblížení, blízkosti nebo dotyku* a v druhém případě o senzorech, které *vyhodnocují pohyb a polohu*. Senzory pro měření polohy je možno realizovat různými způsoby. Například pomocí indukčních, kapacitních, ultrazvukových nebo optoelektronických snímačů.

Optoelektronické snímače jsou tvořeny pomocí prvků, které jsou citlivé na světlo. Mezi nejpoužívanější patří fotodiody, fototranzistory a fotorezistory. Světlo v těchto prvcích vyvolává zvýšení vodivosti polovodičového materiálu. Tohoto úkazu se potom využívá různými způsoby.

Bakalářská práce se zabývá návrhem optického senzoru absolutní polohy s fotodiadou a je rozdělena do sedmi kapitol. První kapitola obsahuje stručný úvod do snímačů polohy a rovržení práce. Druhá část je zaměřena na výběr správného páru detektoru a přijímače optického záření. Zde jsou také uvedeny konkrétní možnosti pro realizaci optického snímače. Třetí kapitola se zabývá možnostmi zesílení výstupního signálu z fotodiody. Ve čtvrté, a také nejrozsáhlejší části, je popsán celý měřicí systém. Tato kapitola je rozdělena na dvě hlavní části – elektronickou a mechanickou. V elektronické části jsou uvedeny a popsány jednotlivé elektronické prvky použité pro realizaci optického snímače. V mechanické části se zabývám konstrukčním provedením snímače. V páté kapitole je popsán postup měření signálu, včetně použitých funkcí potřebných pro vyhodnocení. Dále jsou zde uvedeny některé naměřené výsledky. V závěrečné, šesté kapitole se zabývám zhodnocením celé práce.

Kapitola 2

Výběr vhodného páru vysílače a detektoru záření

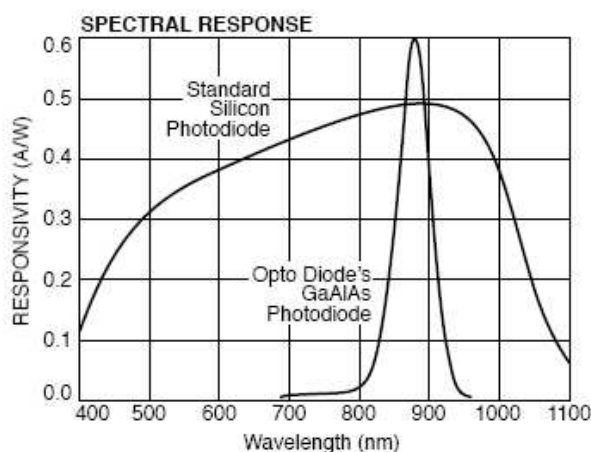
Z důvodu výborné linearity, nízkého šumu, výhodných spektrálních a frekvenčních charakteristik jsou fotodiody jedním z nejvíce rozšířených fotodetektorů pro měřicí a komunikační účely. Při výběru fotodiody si musíme nejdříve určit v jaké oblasti optického záření bude náš detektor pracovat. Optické záření je část elektromagnetického spektra a lze ho charakterizovat vlnovou délkou λ nebo frekvencí f . Vztah mezi nimi vyjadřuje rovnice (2.1), kde c je rychlost světla.

$$\lambda = \frac{c}{f} [m; m.s^{-1} : Hz] \quad (2.1)$$

Aby záření přijímané detektorem bylo co nejméně rušené, je nutné vyloučit oblast světelného spektra, které se přibližně nachází mezi 380 nm až 770 nm vlnové délky. Proto jsem vybíral fotodiody, které pracují v oblasti ultrafialového záření (UV – Ultraviolet) a blízkého infračerveného záření (NIR – near infrared), které se nachází mezi 770 nm až 1,5 μ m vlnové délky. S vlnovou délkou souvisejí následující parametry důležité pro výběr fotodiody. Prvním z nich je *citlivost* fotodiody (responsivity) na optické záření, kterou můžeme vidět na obr 2.1. Citlivost je udávána jako poměr výstupního proudu fotodiody I_f a přijímané světelné energie P . Světelná energie je obvykle měřena ve W/cm^2 a proud fotodiody v A/cm^2 . Citlivost můžeme tedy vyjádřit vztahem (2.2)

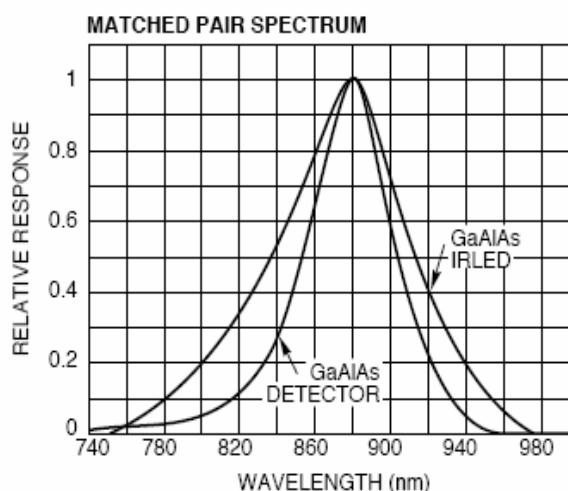
$$S = \frac{I_f}{P} [A.W^{-1}; A; W] \quad (2.2)$$

Citlivost je také často udávána jako relativní veličina (relativní citlivost – relative response) vztažená k maximální velikosti. Dále může být vyjádřena v procentech nebo jako bezrozměrné desetinné číslo od nuly do jedné. Citlivost fotodiody je pro malou intenzitu optického záření omezena velikostí šumových napětí a při velkých intenzitách optického záření saturační úrovní. Změny intenzity záření nad saturační úroveň mají malý vliv na výstupní proud z fotodiody. Citlivost fotodiody klesá se spektrem vlnových délek, ve kterém fotodioda pracuje. Například UV fotodiody dosahují mnohem menších citlivostí (řádově setiny A/W) než IR fotodiody (řádově desetiny A/W).



Obrázek 2.1. Spektrální charakteristiky fotodiody

Na obr.2.1. jsou znázorněny spektrální charakteristiky *Si* fotodiody a *GaAlAs* fotodiody. Z charakteristiky je zřejmé, že obě fotodiody mají největší citlivost v oblasti infračerveného záření, ale křemíková fotodiody dosahuje vysoké citlivosti v širší oblasti spektra, a proto není vhodná pro použití do optického senzoru polohy. S citlivostí úzce souvisí parametr *vlnová délka maximální citlivosti* λ_p [nm] (peak sensitivity), a dále také parametr *spektrální šířka pásma* $\Delta\lambda$ [nm]. Spektrální šířka pásma se udává pro poměrnou citlivost 0.5 (50%) maximální citlivosti diody (obvykle 50 nm až 80 nm) a liší se podle polovodičových materiálů a dotačních příměsí. Parametry diod λ_p a $\Delta\lambda$ nám slouží ke správnému výběru páru luminiscenční diody a fotodiody.



Obrázek 2.2. Spektrální charakteristiky ideální dvojice vysílač-přijímač

Při výběru dvojice vysílače a detektoru záření je jednak důležité, aby si spektra přijímaného a vysílaného záření byla co nejvíce podobná, a také aby vlnové délky maximální citlivosti ležely na stejné vlnové délce, nebo alespoň co nejbližší. Výše uvedené tři parametry jsem považoval za základní při výběru vhodného páru vysílače a přijímače záření. Na obr. 2.2. jsou zobrazeny spektrální charakteristiky vhodného páru vysílače infračerveného záření a jeho detektoru, které vyrábí Opto Diode Corporation.

2.1 Parametry fotodiody

Ke zúžení výběru fotodiód, jsem použil níže uvedené parametry.

Aktivní oblast čipu A [mm^2] (Active chip area) – udává nám velikost plochy, kterou je fotodioda schopna přijímat záření. Při volbě větší aktivní oblasti dosáhneme vyšší citlivosti přijímače, ale na úkor větší kapacity. V praxi se před aktivní oblast dávají různé druhy filtrů. Takto dosáhneme selekce přijímaného pásma před vstupem na přijímací diodu (zúžení spektrální charakteristiky), čímž se omezí vliv ostatních zdrojů záření mimo přijímané pásmo.

Doba odezvy t_r [s] (response time) – definována jako maximální doba potřebná pro zpracování změn vstupního signálu.

Proud za temna I_D [A] (Dark current) – malý proud (řádově nA), který vytéká z fotodiody, při zapojení v závěrném směru (nepřijímá záření). Tento proud je pro nás zdrojem šumu.

Typ diody	λ_p [nm]	S_{λ_p} [A/W]	$\Delta\lambda$ [nm]	α [°]	A [mm ²]	t_{rise} [μs]	t_{resp} [μs]	Cena [EUR]
GaAlAs OD-870-L	870		50	35		0,015		6,3
GaAlAs OD-870-F	870		50	8		0,015		6,3
GaAlAs OD-50L	880		80	7		0,7		8,4
GaAlAs ODD-45WIS	880	0,6	60		1		1	13,7
LED OD-620-L	620		25	7				7,8
ODD-1	632	0,4			1		0,015	5,0
Ø5.4mm UVLED365-10	365		10	10				9,6
EPD 365-0/0.9	365	0,07	85		0,7	0,007	0,013	35,0
Ø5.4mm LED435-30M3	430-435-440		15	10				7,9
EPD 440-0/0.9	440	0,12	180		0,9	0,007	0,013	30,7
HUBL-3101L	468		20	20				2,4
EPD-470-5/0.5.	430-470-510	0,12	80		0,13			6,8
L-53SF4BT	880		50	30		-		0,2
SFH 203FA	900	0,59	210		1	0,005		0,5
UVLED365-10	365		10	10				9,6
RLT365-TO-18	360-366-370		12	15				11,5
EPD-365-0/1.4	365	0,07	85		1,2	0,001	0,14	44,3
LED-450-06U	440-450-460		30	9				-
S6428-01	460	0,22	90		6,7	0,5		10,0

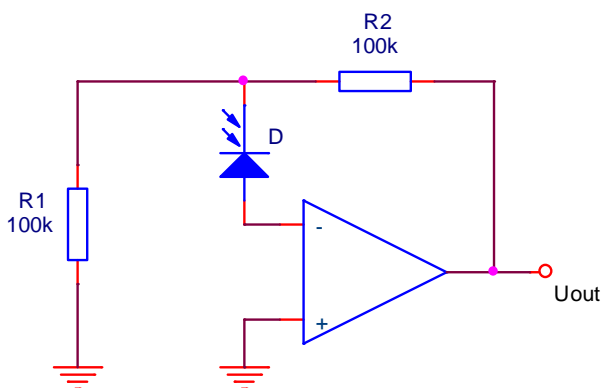
Tabulka 2.1. Přehled vhodných párů diod

V tabulce 2.1. jsou uvedeny jednotlivé fotodiody a LED, jež jsou vhodné vzhledem ke svým vlastnostem pro vytvoření páru vysílače a přijímače. Tučně jsou zde označeny detektory záření a červeně použité diody v optickém snímači. Kompletní tabulku můžete vidět v elektronické příloze, která se bohužel z tiskových důvodů na stránku nevejde.

Kapitola 3

Zesílení výstupního signálu z fotodiody

Další komponentou optického snímače polohy je snímání výstupního signálu z fotodiody. Ke sledování výstupního signálu se používají operační zesilovače, které mají na vstupu tranzistory typu FET. Díky nim je možno dosáhnout malých vstupních klidových proudů, a proto jsou vhodné pro vyhodnocení signálu. Základní parametry zesilovačů jsou *linearita*, *offset*, *šum* a *šířka pásma*. Tyto faktory mají vliv na výběr zesilovače dle způsobu jejich použití. V současné době jsou na trhu zesilovače, které mohou nabídnout velmi malé vstupní proudy, nízký šum a vysokou rychlost. Záměrem je, pokud možno, co nejvíce přesná přeměna výstupního signálu z fotodiody na požadovaný signál (proud, napětí).

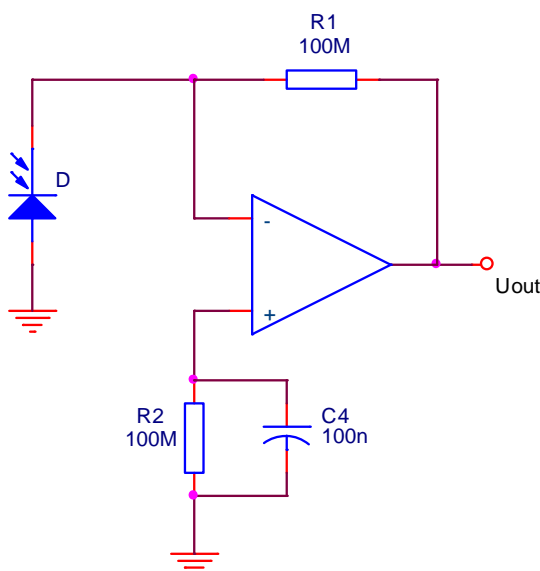


Obrázek 3.1. Schéma zapojení pro měření napěťového výstupu fotodiody

Energie přenášená světlem na fotodiodu může být měřena buď jako napěťový nebo proudový výstup. Měření napětí na diodě nám poskytuje zapojení na obr. 3.1. Zde je fotodioda zapojena v sérii s invertujícím vstupem zesilovače a OZ má vysokou vstupní impedanci. Když na diodě není žádné napětí, pak je nulové napětí i na výstupu. Jestliže na fotodiodu dopadá záření, vytváří se na ní malý úbytek napětí. Ten způsobí napěťový offset mezi vstupy zesilovače, které přestanou být v rovnováze a na výstupu se objeví maximální (saturační) napětí. Tím začne přes odpory R_1 a R_2 protékat proud, čímž na nich vzniká úbytek napětí, který ovlivní invertující vstup zesilovače a na výstupu dojde ke zmenšení na hodnotu výstupního napětí U_{out} . Napětí U_{out} je vyjádřeno vztahem 3.1

$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(1 + \frac{I_p}{I_s}\right) \quad (3.1)$$

Podíl členů kT/q nám vyjadřuje tepelné napětí U_T , kde k je Boltzmanova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-19} \text{ J.K}^{-1}$), T je absolutní teplota a q je náboj elektronu ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Pro normální pokojovou teplotu vychází $U_T = 25,9 \text{ mV}$. Ze vztahu můžeme vidět, že i když dopadající záření na fotodiodu je konstantní, výstupní napětí se mění. Tuto nevýhodu napravuje zapojení na obr. 3.2., kde na výstupu při stálé intenzitě záření dostaneme konstantní výstupní napětí. Při sledování proudu z fotodiody bychom měli mít v ideálním případě na vstupu OZ nulovou vstupní impedanci, které by odpovídal nulový úbytek napětí na diodě. To nám částečně zajistí zpětnovazební smyčka a symetrické napájení OZ s virtuální zemí.



Obrázek 3.2 Schéma zapojení pro měření proudového výstupu z fotodiody (převodník I/U)

Vstupní odpor OZ představuje na obr. 3.2 podíl zpětnovazebního odporu R_1 a přenosu (zesílení) otevřené smyčky A_{OL} . A_{OL} můžeme definovat jako podíl výstupního napětí OZ ku rozdílovému napětí na vstupních svorkách OZ. Díky vysoké hodnotě zpětnovazebního odporu je impedance fotodiody zanedbatelná. Ze zapojení je patrné, že výstupní proud fotodiody protéká rezistorem R_1 , na kterém se vytváří úbytek napětí. Výstupní napětí U_{out} je tedy úměrné proudu vytékajícímu z fotodiody a hodnotě odporu R_1 a je dáno vztahem 3.2.

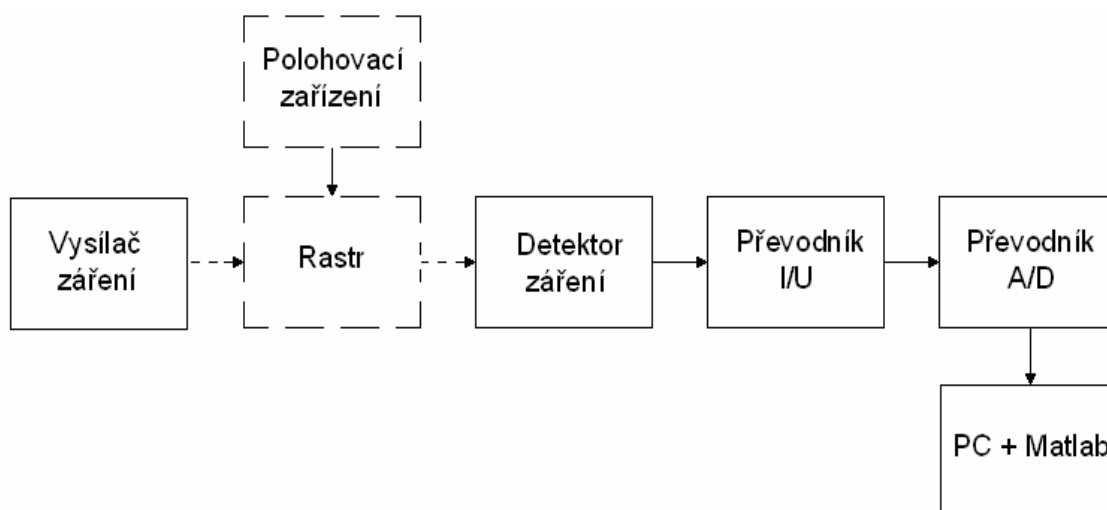
$$U_{out} = I_p R_1 \quad (3.2)$$

Vysoká hodnota zpětnovazebního odporu vytváří teplotní drift ss napětí. Tuto chybu můžeme kompenzovat zapojením odporu R_2 paralelně s kondenzátorem na neinvertující vstup OZ. Tato chyba se však dostatečně nepotlačí a zbývající odchylka napětí je způsobena neshodou mezi vstupními proudy zesilovače a mezi dvěma odpory. Nevýhodou kompenzace této chyby je úbytek napětí na diodě, jenž má za následek unikající proud (leakage current) z diody. Proud z fotodiody může být mnohem větší než vstupní proudy OZ.

Kapitola 4

Popis měřicího systému

Celý systém můžeme rozdělit na elektronickou a mechanickou část. Blokové schéma systému je uvedeno na obr. 4.1. V následující kapitole se budu nejdříve věnovat elektronické části snímače, a poté konstrukčnímu provedení, kde budou popsány jednotlivé bloky schématu.



Obrázek 4.1. Blokové schéma měřicího systému

Stručný popis

Vysílač záření, v našem případě IR LED, vysílá infračervené záření, které prochází dvěma rastry. Jeden z těchto rastrů je pohyblivý. V závislosti na jejich vzájemné poloze dopadají na fotodiodu různé intenzity záření. Výstupní signál z fotodiody je dále zpracován převodníky a vyhodnocován pomocí PC a potřebného softwaru.

4.1 Elektronická část

4.1.1 Vysílač záření

Vysílačem záření je infračervená svítivá dioda. Původně byla vybrána cenově dostupná vysokorychlostní IR dioda *OD-870-F* (viz tabulka 2.1) od firmy Optodiode Corporation, ale kvůli špatné komunikaci s výrobcem jsem použil LED typu *L-53SF4BT* od firmy Kingbright, jež byla k dostání na českém trhu a splňovala také mé požadavky. V konstrukci optického snímače jsou umístěny celkem čtyři svítivé diody, které spolu s předřadnými odpory o velikosti 56Ω jsou napájeny z regulovatelného stabilizovaného zdroje. V prvním návrhu desky plošného spoje jsem realizoval spouštění LED pomocí přepínačů. Toto řešení se později ukázalo jako nevhodné z důvodu rozdílných proudů tekoucích do jednotlivých svítivých diod. Různé proudy odpovídají odlišným intenzitám vyzařování, což způsobovalo velmi rozdílné signály na výstupu snímače.

Základní princip luminiscenční diody

Ve svítivých diodách emitujících záření dochází k přeměně elektrické energie na energii světelnou. Tento pochod se uskutečňuje v tenké závěrné vrstvě *pn*. Když diodou začne protékat proud v propustném směru, potom při stejném dotování obou vrstev, z vrstvy *n* do vrstvy *p* protéká přibližně stejné množství elektronů jako děr z vrstvy *p* do vrstvy *n*. U svítivých diod je vrstva *n* velmi silně dotována, zatímco *p* je dotována méně. Tímto je dosaženo toho, že proud v propustném směru zprostředkovávají téměř výhradně elektrony. Elektrony, pronikající do vrstvy *p*, zde rekombinují s přítomnými děrami. Při rekombinaci se uvolňuje energie, která je dle použitého materiálu vyzářena buď jako viditelné světlo, nebo v našem případě infračervené záření. U svítivých diod pro IR záření je oblast vzniku světla umístěna na spodní straně krystalu. To má tu výhodu, že je tím umožněn podstatně lepší odvod tepla. Z toho plynou vyšší proudy v propustném směru a tím také vyšší vyzařované výkony.

Mezní parametry

$$P = 100\text{mW}$$

$$I_F = 50\text{ mA}$$

$$U_R = 5\text{ V}, T = 85\text{ }^\circ\text{C}$$



Obrázek 4.1.1 LED L-53SF4BT

Charakteristické vlastnosti

$$\lambda_p = 880\text{ nm} \quad (I_F = 20\text{ mA})$$

$$\Delta\lambda = 50\text{ nm} \quad (I_F = 20\text{ mA})$$

$$P_O = 20\text{ mW/sr} \quad (I_F = 20\text{ mA})$$

4.1.2 Detektor záření

Detektory infračerveného záření v optickém snímači jsou křemíkové PIN fotodiody typu *SFH 203 FA* od firmy Siemens, které jsem vybral z téhož důvodu, jako infračervené luminiscenční diody. Při výběru jsem kladl důraz na to, aby spektrální charakteristika ležela mimo dosah viditelného světla, a tím se eliminovalo rušení signálu z okolního prostředí. Fotodioda v navrženém obvodu (obr. 4.1.3) je zapojena ve fotovoltaickém režimu, tzn. chová se jako zdroj proudu, který je řízen intenzitou dopadajícího záření.

Základní princip PIN fotodiody

PIN fotodioda řeší nedostatky PN fotodiody, které spočívají v tom, že šířka ochuzené vrstvy (aktivní oblast detekce optického záření) je malá. Mnoho párů elektron-díra před tím, než mohou v připojeném obvodu vytvořit elektrický proud rekombinují. Širší ochuzená oblast snižuje pravděpodobnost rekombinace nosičů náboje. Rozšířením oblasti se zvyšuje účinnost fotodiody.

V PIN fotodiodě se vytváří šířka ochuzené vrstvy dle potřeby. Princip spočívá v tom, že mezi silně dotované vrstvy typu *p* a *n* je vložena slabě dotovaná vrstva, která má téměř vlastní intrinsickou vodivost. Odtud pochází název diody – PIN. V této oblasti je silné, rovnoměrně rozložené elektrické pole, které zvyšuje rychlost nosičů náboje, a tím i mezní kmitočet diody.

Mezní parametry

$$P = 100 \text{ mW}$$

$$U_R = 50 \text{ V}$$

$$T = 230 \text{ }^\circ\text{C}$$



Obrázek 4.1.2 SFH 203 FA

Charakteristické vlastnosti

$$\lambda_p = 900 \text{ nm}$$

$$S_{\lambda_p} = 0,59 \text{ A.W}^{-1}$$

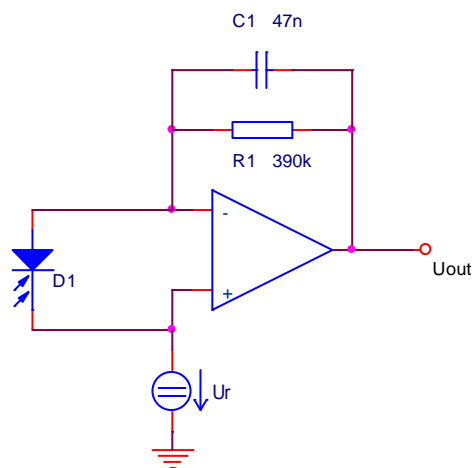
$$A = 1 \text{ mm}^2$$

$$I_D = 1 (\leq 5) \text{ nA}$$

4.1.3 Převodník proud-napětí

Pro vyhodnocení výstupního signálu z fotodiody jsem zvolil převodník I/U , který jsem realizoval pomocí operačního zesilovače *OPA 129*. Tento OZ je díky svým parametrům vhodný pro vyhodnocování signálů z fotodetektorů. Jeho parametry jsou extrémně nízký vstupní klidový proud a malé hodnoty šumu, offsetu a driftu. *OPA 129* má na vstupech dielektricky izolované FET (Difet), díky nimž se dosahuje malých hodnot vstupních klidových proudů.

Schéma zapojení převodníku I/U je na obr. 4.1.3. Výstupní proud z fotodiody je přiveden na invertující vstup OZ. Protože vstupní odpor operačního zesilovače je velký, prochází tento proud zpětnovazebním rezistorem R_1 . Výstupní napětí převodníku představuje úbytek napětí vyvolaný proudem na odporu R_1 . Aby výstupní signál z fotodiody byl dostatečně zesílen, zvolil jsem velikost zpětnovazebního odporu 390 k Ω . Z důvodu velkého zesílení, a tím co největšího rozkmitu výstupního napětí potřebného pro vyhodnocení signálu je na neinvertující vstup OZ připojen zdroj referenčního napětí. Tento zdroj je ovládán z prostředí Simulink v Matlabu a je realizován pomocí multifunkční karty *MFH 624* (viz kapitola 4.1.4). Pomocí zdroje referenčního napětí je celý výstupní signál posunut do lineární oblasti převodníku.

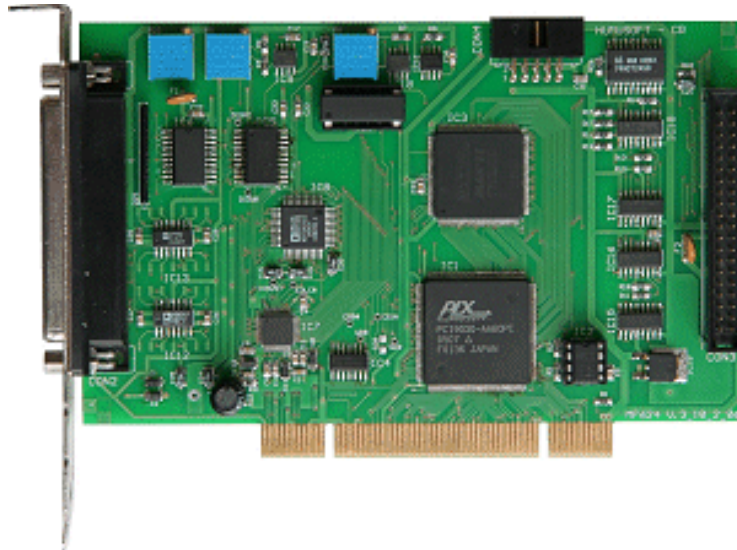


Obrázek 4.1.3 Schéma zapojení převodníku I/U

Zpětnovazební rezistor je doplněn o filtrační kondenzátor velikosti 47 nF. Operační zesilovač je napájen symetrickým napětím $\pm 12V$, které je realizováno pomocí laboratorního stabilizovaného zdroje *P230R51D*. Výstup převodníku proud-napětí je připojen na A/D převodník, který je také realizován pomocí multifunkční karty *MFH 624*.

4.1.4 Multifunkční I/O karta MFH 624

MFH 624 je multifunkční karta (obr. 4.1.4), která je propojena s PC pomocí PCI sběrnice. Komunikaci s měřicí kartou zajišťuje Real Time Toolbox 4.0.0 pro Matlab. Připojení vstupů, případně výstupů ke kartě nám umožňuje svorkovnice *TB620*. Měřicí karta, svorkovnice a potřebný software jsou od firmy Humusoft s. r. o.



Obrázek 4.1.4 Multifunkční I/O karta MFH 624

Vlastnosti:

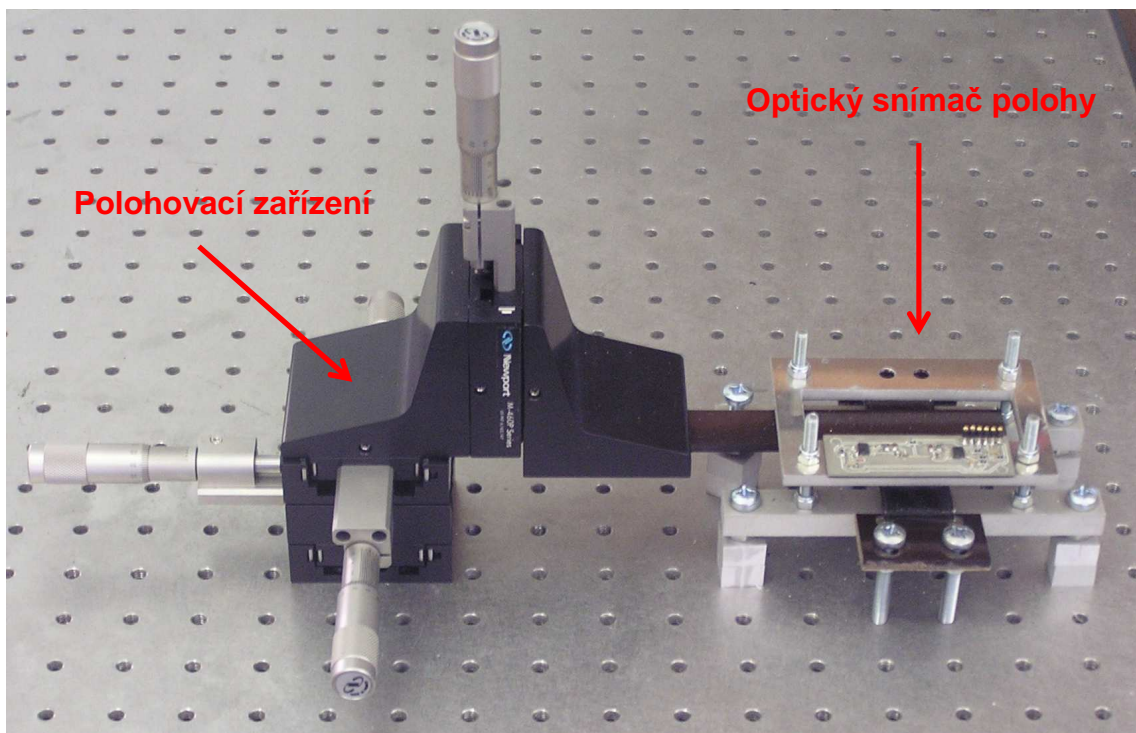
- Osm 14-bitových analogových vstupů
- Osm 14-bitových analogových výstupů
- Krátká doba převodu (jednotky μs)
- 8 digitálních vstupů, 8 digitálních výstupů
- 4 vstupy inkrementálních snímačů (diferenciální)
- 4 čítače/časovače
- Nízká spotřeba

S kartou jsem komunikoval pomocí Real Time Toolboxu 4.0.0 pro Matlab ve verzi 2006b v uživatelském prostředí Simulink, kde jsem také vytvořil funkční schéma (obr. 5.3.1 a obr 5.3.2). Pomocí uživatelského prostředí jsem měřil výstupní signály z jednotlivých převodníků proud-napětí. Na kartě jsem využil čtyři 14-bitové analogové vstupy se vstupními rozsahy $\pm 10V$ pro snímání výstupních signálů a jeden analogový výstup jako zdroj referenčního napětí.

4.2 Mechanická část

Konstrukční provedení

Na obr. 4.2.1 je optický snímač polohy, který je spolu s polohovacím zařízením, umístěn na antivibračním stole.

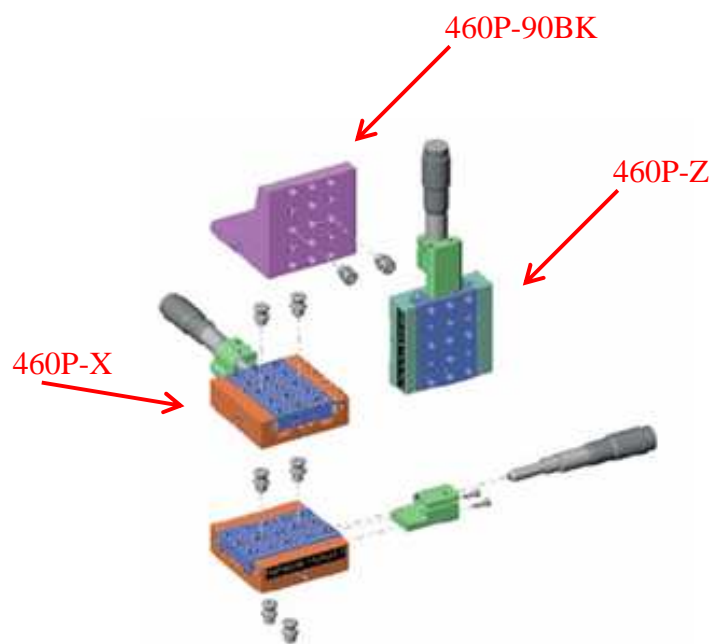


Obrázek 4.2.1 Optický snímač s polohovacím zařízením

4.2.1 Polohovací zařízení

Celé polohovací zařízení je postave z několika samostatných bloků. Jsou zde použity dva bloky *460P-90BK*, které nám umožňují vertikální uchycení posuvného bloku *460P-Z* a uchycení držáku, na němž je připevněno laboratorní sklo. Jednotlivé bloky jsou propojeny spojovacími šrouby tzv. pegy (obr. 4.2.1).

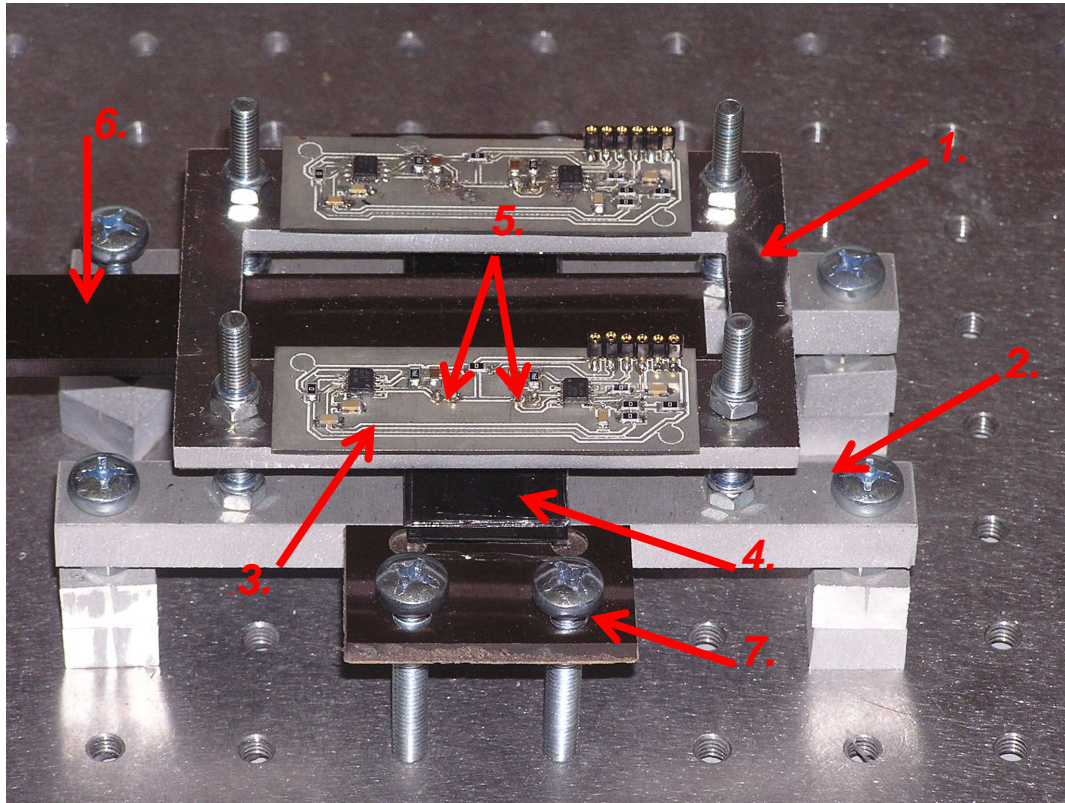
Spojením těchto bloků nám vzniká funkční polohovací systém, se kterým je možno pohybovat ve směru tří os, což nám umožňuje optimální nastavení vzájemné polohy rastrů. Posuvné bloky (*460P-X*, *460P-Z*) jsou opatřeny mikrometry se stupnicemi. Nejjemnější stupnice je po 2 μm , z čehož plyne rozlišení $\pm 1 \mu\text{m}$, které nám představuje chybu posuvu rukou. Celé polohovací zařízení nám slouží k uchycení a pohybu držáku. Na konci držáku je oboustrannou lepící páskou připevněno laboratorní sklo s rastrem. Držák je vyroben z materiálu pertinax pomocí CNC frézky. Výkresy držáků pro laboratorní skla jsou součástí příloh (obr. 7.4 a 7.5).



Obrázek 4.2.1 Polohovací zařízení

4.2.2 Konstrukce optického snímače

Celá konstrukce optického snímače je z hliníku a dle našich požadavků byla vyrobena firmou AQUAdem metodou řezání vodním paprskem.



Obrázek 4.2.2 Konstrukce optického snímače

1. – vrchní část konstrukce
2. – spodní část konstrukce
3. – plošný spoj s fotodiodou a převodníkem I/U
4. – dva rastry na laboratorních sklech umístěné těsně nad sebou
5. – poloha fotodiód
6. – držák pro uchycení pohyblivého rastru
7. – držák pro uchycení nepohyblivého rastru

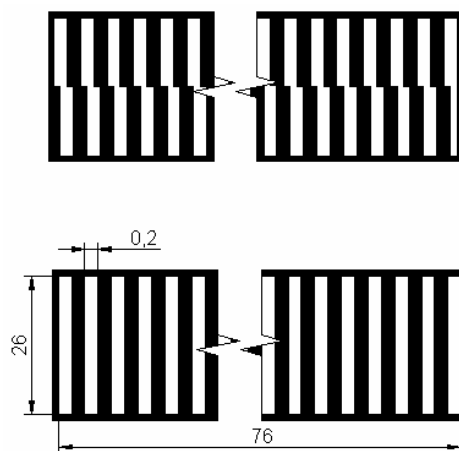
Na obr. 4.2.2 je vidět, že celá konstrukce má dvě základní části, jež jsou spolu spojeny pomocí šroubů M5. To umožňuje výškově variabilní nastavení obou částí. Konstrukce byla navržena z důvodu, aby vysílače a detektory záření byly umístěny přesně naproti sobě a mezi nimi mohly být položeny laboratorní skla s rastry. Velikost

a tvar konstrukce je navržena především s ohledem na rozměry laboratorního skla s rastrem a také, aby bylo možné měřit vzájemný posun mezi rastry.

Vrchní část hliníkové konstrukce slouží pro uchycení plošného spoje a k pevné fixaci čtyř fotodiod, pro které jsou zde vyvrtány jednotlivé otvory. Naproti nim jsou ve spodní části umístěné LED. Spodní část je 10 mm vysoká z důvodu úplného “skrytí“ svítivých diod. To je provedeno proto, aby se vysílané infračervené záření co nejméně rozptylovalo do prostředí, a tím neovlivňovalo okolní fotodiody a nesnižovalo kvalitu měření. Návrh držáků pro nepohyblivý rastr byl uzpůsoben pro výrobu na školní CNC frézce a je opět vyroben z materiálu pertinax, který byl snadno dostupný. Technické výkresy všech vyrobených mechanických částí jsou umístěny v příloze.

4.2.3 Rastr

K měření polohy je využíváno dvojice rastrů, které jsou přilepeny k laboratornímu sklu a uchyceny příslušným držákem (obr. 7.3. a 7.4). Oba rastry jsou vyrobeny metodou osvitů na průhlednou fólii od typografického studia Amos. Na obr. 4.2.3 jsou rastry, z nichž horní je umístěn na pohyblivém držáku a pohybuje se těsně nad druhým, pevně uchyceným rastrem. (spodní rastr na obr. 4.2.3). Pohyblivý rastr má svislé pruhy proti sobě o čtvrt periody vzájemně posunuty, a to z důvodu. rozeznání směru pohybu. Oba rastry mají stejně široké pruhy a mezery o rozměru 200 μm . Z toho nám vyplývá perioda posunu 400 μm .



Obrázek 4.2.3 Použité rastry pro měření polohy

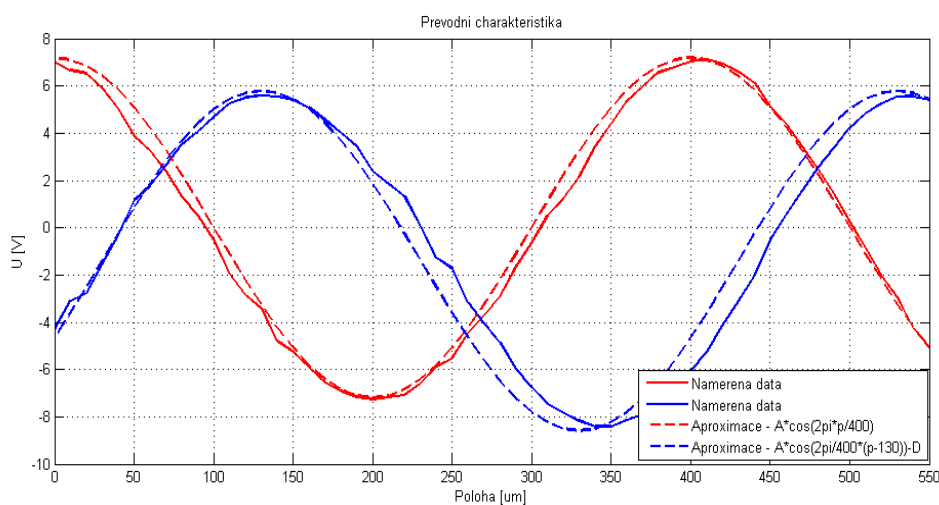
Kapitola 5

Měření a vyhodnocení výstupního signálu

V této kapitole jsou uvedeny naměřené výsledky. Jsou zde také popsány použité funkce potřebné pro vyhodnocení signálu a princip vyhodnocení signálu, včetně jeho převodu na polohu.

5.1 Převodní charakteristika

Po ověření funkčnosti celého systému jsem nejdříve změřil převodní charakteristiku. Na polohovacím zařízení jsem nastavoval vzájemný posun rastrů po $10\ \mu\text{m}$ a odečítal výstupní hodnoty snímače pomocí multimetru *Agilent 34410A*. Naměřená a aproximovaná převodní charakteristika v rozsahu $0 - 550\ \mu\text{m}$ je na obr 5.1.



Obrázek 5.1 Naměřená a aproximovaná převodní charakteristika

Na obr. 5.1 můžeme vidět dvě křivky. První z nich tzv. „nosná“ je zde znázorněna červeně a druhá „vedlejší“ modře. Maxima jednotlivých křivek v převodní charakteristice odpovídají místům, kde se rastry navzájem zcela překrývají. V tomto případě je výstupní záření z LED nejvíce zastíněno a fotodioda přijímá nejslabší signál. Minima odpovídají naopak místům, kde se rastry nepřekrývají.

5.2 Použité funkce pro vyhodnocení signálu

Pro vyhodnocení signálu jsem využil funkce *atan2* a *unwrap*. Funkce *unwrap* nám umožňuje tzv. „rozbalení fáze“ signálu (obr. 5.3). Funkce *atan2* vypočítá a vrátí arcus tangens y/x . Znaménka argumentů x a y jsou použita pro určení kvadrantu, v němž se nachází výsledná hodnota. Funkce vrací výsledek v radiánech v intervalu $\langle -\pi; \pi \rangle$.

Z převodní charakteristiky (obr. 5.1) je vidět, že signály nejsou posunuté o $\pi/2$, a proto je pro funkci *atan2* nutná korekce. Křivka „nosná“ je popsána rovnicí 5.1 a křivka „vedlejší“ rovnicí 5.2. Polohu značíme p , amplitudu - A , posunutí - D a $u_1(u_2)$ jsou hodnoty napětí.

$$u_1 = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot p}{400}\right) \quad (5.1)$$

$$u_2 = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{400} \cdot (p - 130)\right) - D \quad (5.2)$$

Z rovnic 5.1 a 5.2 vyjádříme konstanty a a b

$$a = \frac{u_1}{A} = \cos\left(\frac{2\pi \cdot p}{400}\right) \quad (5.3)$$

$$b = \frac{u_2 + D}{A} = \cos\left(\frac{2\pi}{400} \cdot (p - 130)\right) \quad (5.4)$$

Pravou stranu rovnice 5.4 si podle součtového vzorce pro kosinus rozepíšeme

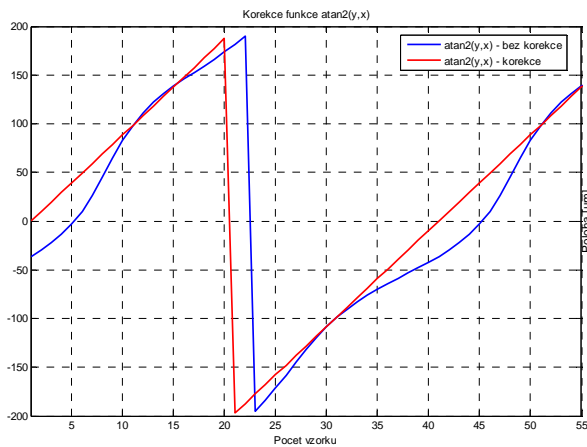
$$\cos\left(\frac{2\pi}{400} \cdot (p - 130)\right) = \cos\left(\frac{2\pi \cdot p}{400}\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 130}{400}\right) + \sin\left(\frac{2\pi \cdot p}{400}\right) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot 130}{400}\right)$$

a vyjádříme neznámou, které odpovídá y ve funkci *atan2*(y,x)

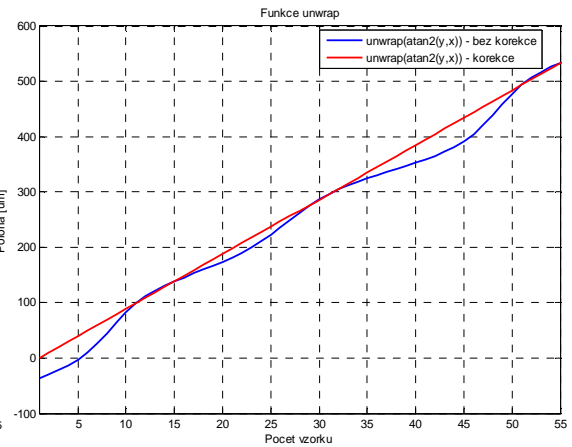
$$\sin\left(\frac{2\pi \cdot p}{400}\right) = \frac{b - a \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot 130}{400}\right)}{\sin\left(\frac{2\pi \cdot 130}{400}\right)} \quad (5.5)$$

Výraz na pravé straně rovnice 5.5 dosadíme za argument y , za x dosadíme a . Výsledná rovnice pro převod napětí na polohu v rozsahu jedné periody (400 μm) je v rovnici 5.6.

$$\mathbf{p = (atan2(y,x)) \cdot (400/2\pi)} \quad (5.6)$$



Obrázek 5.2 Použití funkce atan2(y,x)

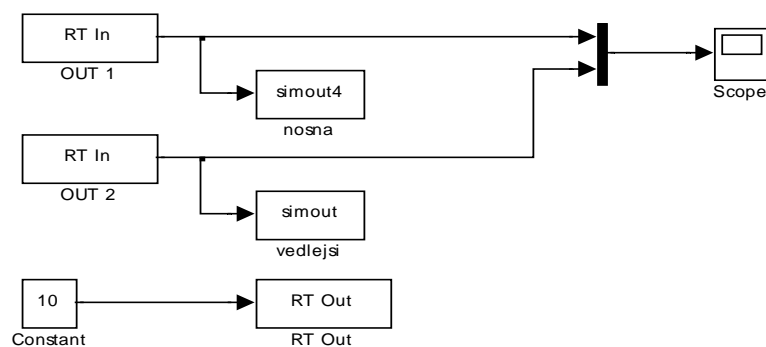


Obrázek 5.3 Funkce unwrap(atan2(x,y)) na naměřená data

Na obr. 5.2 je použití funkce atan2 na naměřené hodnoty z převodní charakteristiky. Na obr. 5.3 je výsledná poloha po zavedení funkce unwrap. Zde je patrné, jakou výhodu nám poskytuje korekce funkce atan2.

5.3 Postup měření a vyhodnocení signálu

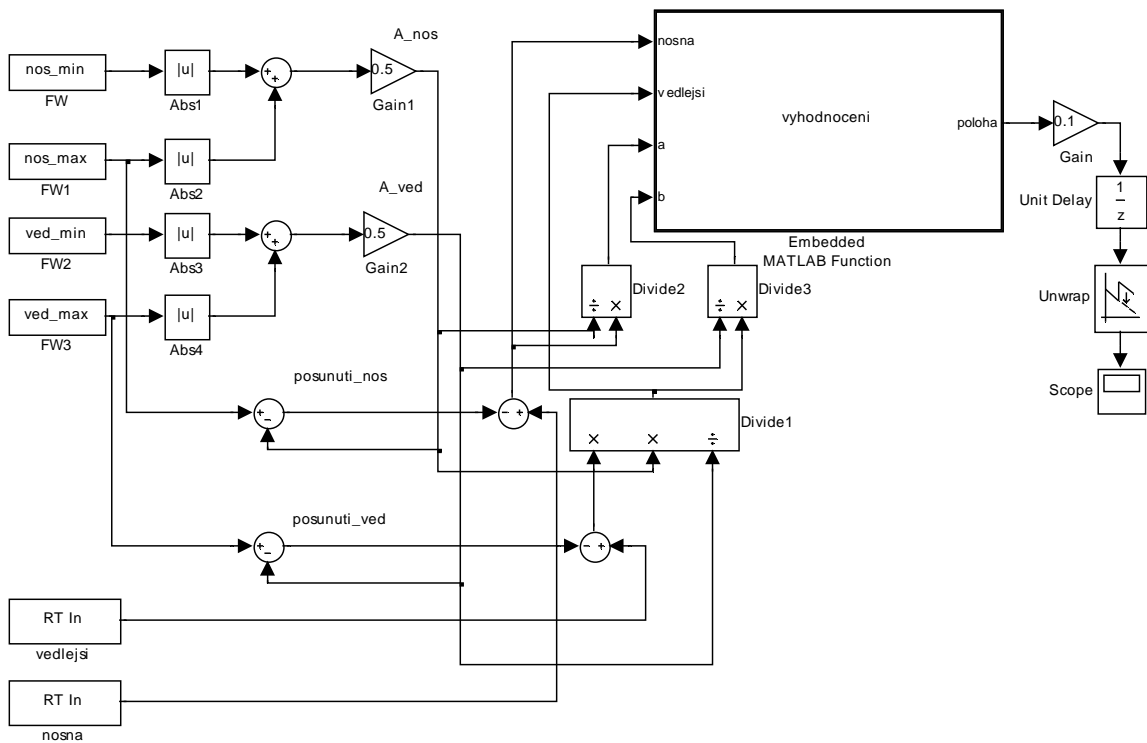
Před vlastním měřením polohy je nutné provést kalibraci optického snímače. Kalibrace se provádí pomocí simulinkového schématu (obr. 5.3.1) a kalibračního skriptu.



Obrázek 5.3.1 Simulinkové kalibrační schéma

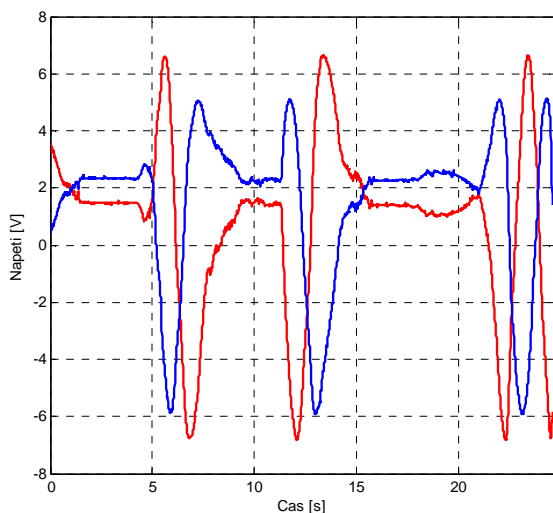
Při kalibraci optického snímače měníme vzájemnou polohu rastrů v rozsahu několika period a pomocí kalibračního skriptu vypočteme potřebné parametry výstupního signálu (maximální a minimální hodnoty amplitud signálů), které jsou dále použity pro měření a vyhodnocení polohy.

Měření a vyhodnocení polohy je prováděno opět pomocí simulinkového schématu (obr. 5.2.2), ze kterého je patrný princip vyhodnocení signálu. Výstupní signál optického snímače je pomocí multifunkční karty přiveden na bloky *RT In*. Dále je signál upraven pomocí matematických bloků a parametrů získaných při kalibraci. Upravené signály mají stejné amplitudy a nulové stejnosměrné složky. Bez těchto vlastností signálů, by nebylo vhodné funkci atan2 (viz. kapitola 5.2) pro vyhodnocení použít.

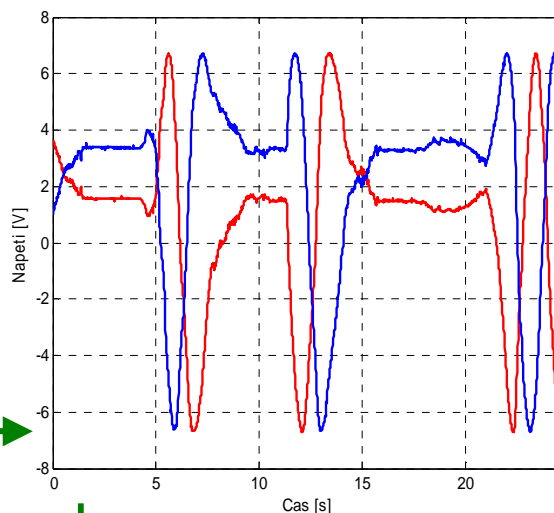


Obrázek 5.3.2 Simulinkové schéma pro měření a vyhodnocení signálu

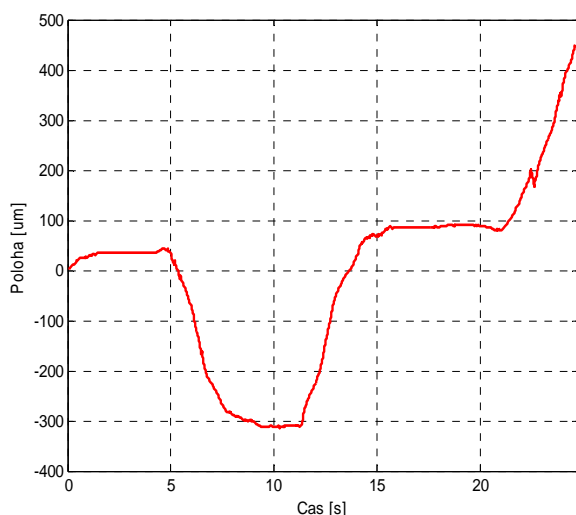
Po aplikaci funkce atan2 a její korekce (blok vyhodnocení) je signál přiveden na vstup bloku s funkcí unwrap, kde na jeho výstupu dostaneme výslednou polohu.



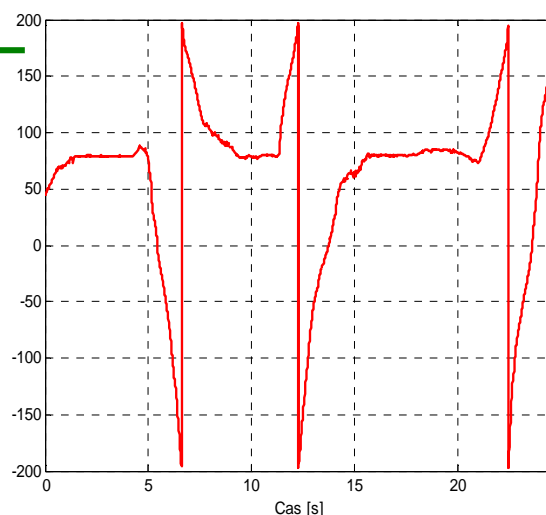
Obrázek 5.3.3 Výstupní signály z optického snímače



Obrázek 5.3.4 Upravené signály z optického snímače



Obrázek 5.3.6 Výsledná poloha



Obrázek 5.3.5 Funkce atan2 aplikovaná na upravené signály

Na obrázcích 5.3.3 až 5.3.6 je znázorněn postup vyhodnocení signálu. Na obr. 5.3.3 jsou výstupní data z optického snímače. Obr. 5.3.4 ukazuje upravená data, která jsou vhodná pro použití funkcí pro převod napětí na polohu (viz. obr. 5.3.5 a 5.3.6). Postup vyhodnocení signálu je patrný z obrázků a směr je označen šipkou. Další naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze (obr. 7.1 a 7.2). Kvalita měření je ovlivněna zejména proměnným fázovým posunem signálů. Tento fakt nám způsobuje největší nepřesnost měření, která může dosahovat až 30 μm . Na měření mají vliv další negativní faktory jako je šum výstupního signálu z měřicího obvodu a šum převodníkové karty, které však kvalitu měření výrazně neovlivňují.

Kapitola 6

Závěr

Prvním úkolem mé bakalářské práce bylo analyzovat možnosti návrhu pro optický snímač polohy s fotodiodou. Za tímto účelem jsem vybral vhodné součástky (vysílač a detektor záření) a použil je pro návrh optického snímače.

V dalším kroku jsem vybral vhodný vyhodnocovací obvod pro výstupní signál z fotodiody a celý měřicí obvod realizoval na nepájivém kontaktním poli za účelem zjištění jeho funkčnosti. Poté jsem celý měřicí obvod umístil na desku plošného spoje, čímž se výrazně snížil šum výstupního signálu, který se projevoval na nepájivém kontaktním poli. Jelikož šlo o první návrh desky plošného spoje nevyhnul jsem se některým chybám, tj. přidání blokovacích kondenzátorů u napájení integrovaných obvodů a přidání filtračních kondenzátorů.

Dalším úkolem bylo navrhnout vhodnou konstrukci pro uchycení desek plošných spojů s měřicími obvody a pro umístění LED a fotodiod tak, aby bylo možno měřit vzájemný posun obou rastrů. Proto jsem navrhl konstrukci vyroubenou z hliníku, která řeší jednotlivé konstrukční problémy (kapitola 4.2.2).

Dále zbývalo doplnit měřicí obvod o vyhodnocovací část. Vyhodnocení a měření výstupního signálu ze snímače je realizováno pomocí uživatelského prostředí Simulink v Matlabu a multifunkční karty MFH 624. V prostřední Simulink jsem vytvořil funkční schéma, pomocí kterého je prováděno měření a vyhodnocení signálu.

Při měření polohy se objevil problém, se kterým v teoretickém návrhu nebylo počítáno. Vzájemný fázový posun výstupních signálů ze snímače byl větší než čtvrt periody, a proto vyhodnocení výstupního signálu bylo obtížnější. Tento problém se mi podařilo částečně vyřešit korekcí matematické funkce atan2 pro vyhodnocení signálu (viz. kapitola 5.2). Úplné odstranění problému se mi nezdařilo z důvodu proměnného fázového posunu signálu, který se projevuje při měření v reálném čase.

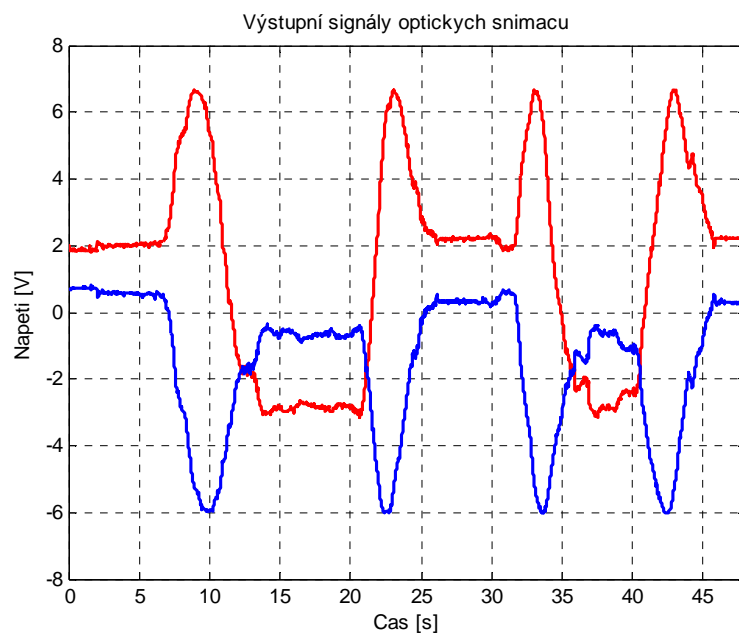
Celý měřicí systém je funkční a v případě jeho dalšího vývoje bych viděl možnost odstranění vlivu proměnného fázového posunu v přídatné korekci matematické funkce pro výstupní signál. Dále je zde možnost použít kvalitnější součástky pro vysílač a detektor záření.

Literatura

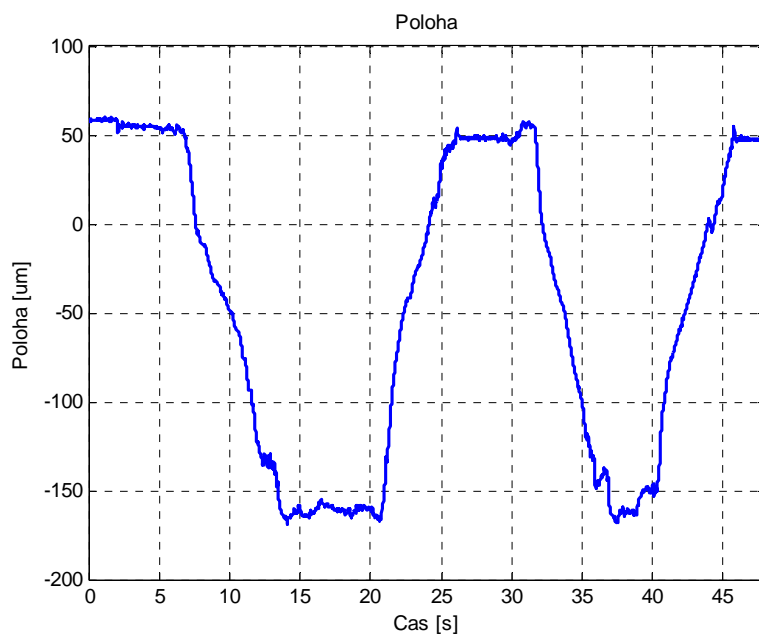
- [1] VOBECKÝ J., ZÁHLAVA V. *ELEKTRONIKA součástky a obvody, principy a příklady*.
Vydavatelství Grada Publishing: Praha 2001
- [2] PUNČOCHÁŘ J. *OPERAČNÍ ZESILOVAČE v elektronice*.
Vydavatelství BEN: Praha 2002
- [3] HUMLHANS J. *ZAJÍMAVÁ ZAPOJENÍ – 4.DÍL*.
Vydavatelství BEN: Praha 2004
- [4] DOŇAR B., ZAPLATÍLEK K. *MATLAB tvorba uživatelských aplikací*.
Vydavatelství BEN: Praha 2005
- [5] DOLEČEK J., *OPTOLEKTRONIKA a optoelektronické prvky*.
Vydavatelství BEN: Praha 2005
- [6] FROHN M., OBERTHUR W., SIEDLER H.-J., WIEMER M., ZASTROW P.
ELEKTRONIKA polovodičové součástky a základní zapojení.
Vydavatelství BEN: Praha 2006
- [7] BELZA J., *Operační zesilovače*.
Vydavatelství BEN: Praha 2004
- [8] RIPKA P., ĎAĎO S., KREIDL M., NOVÁK J. *Senzory a převodníky*.
Vydavatelství ČVUT: Praha 2005
- [9] FISCHER J. *Optoelektronické senzory a videometrie*.
Vydavatelství ČVUT: Praha 2002
- [10] VYSOKÝ O., *Elektronické systémy 2*.
Vydavatelství ČVUT: Praha 2003
- [11] *MFH 624 Multifunction I/O Card*. HUMUSOFT®. User's manual
- [12] *Photodiode monitoring with op amps*. BURR – BROWN®.
Application bulletin. <http://focus.ti.com/lit/an/sboa035/sboa035.pdf>
- [13] *Designing photodiode amplifier circuits with OPA 128*. BURR–BROWN®.
Application bulletin. <http://focus.ti.com/lit/an/sboa061/sboa061.pdf>
- [14] *Silicon PIN Photodiode - SFH 203FA*. OSRAM. Datasheet.
<http://rocky.digikey.com/WebLib/Osram/Web%20Data/sfh203.pdf>
- [15] *Infra – red emitting diode - L-53SF4BT*. Datasheet.
http://sklep.avt.com.pl/photo/_pdf/L53F3.pdf

- [16] *Photodiode Technical information*. HAMAMATSU.
http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf
- [17] *Silicon PIN Photodiode - SFH 203FA*. OSRAM. Datasheet.
<http://rocky.digikey.com/WebLib/Osram/Web%20Data/sfh203.pdf>
- [18] *Operational amplifier - OPA 129*. BURR – BROWN®. Datasheet.
<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa129.pdf>
- [19] KLOS O., *Optoelektronické a laserové sensory – přehled trhu*
<http://www.automatizace.cz/article.php?a=642>
- [20] SOVA J., *Optoelektronika*
<http://linux.fjfi.cvut.cz/~sunie/akce/tcn/2003/sbornik/pdf/optoelektronika/optoelektronika.pdf>
- [21] Wikipedie – *Wikipedie, otevřená encyklopedie*
<http://cs.wikipedia.org>

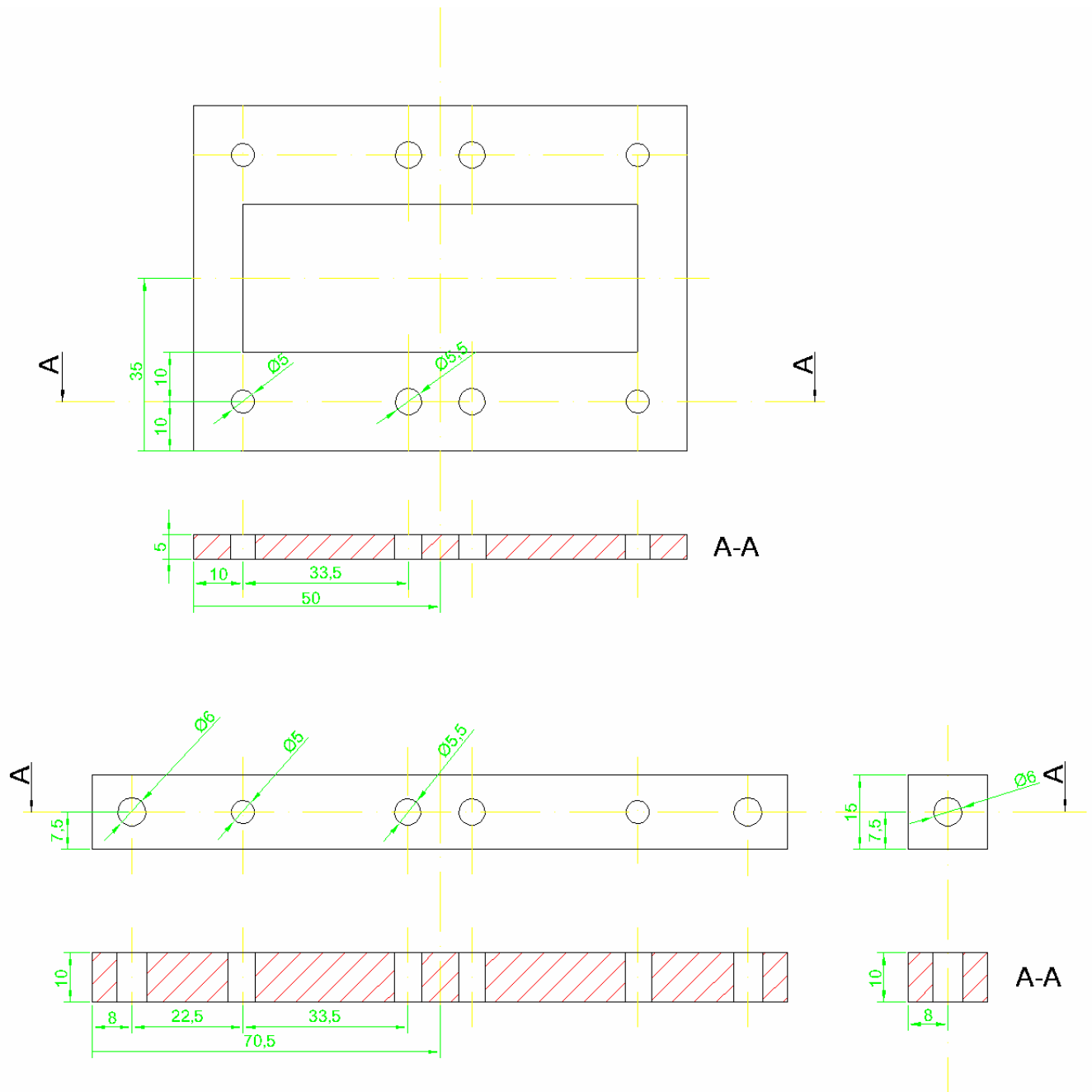
Přílohy



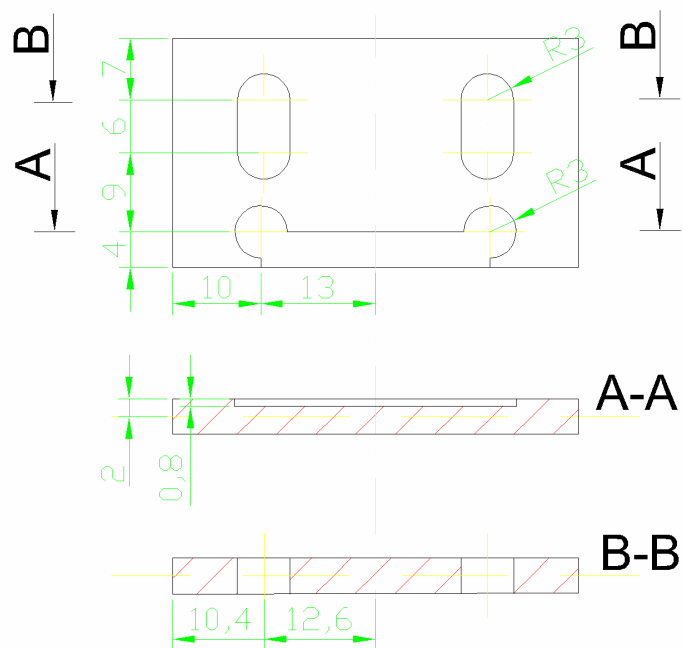
Obrázek 7.1 Naměřené výstupní signály z optických snímačů při změnách polohy po 200 μm



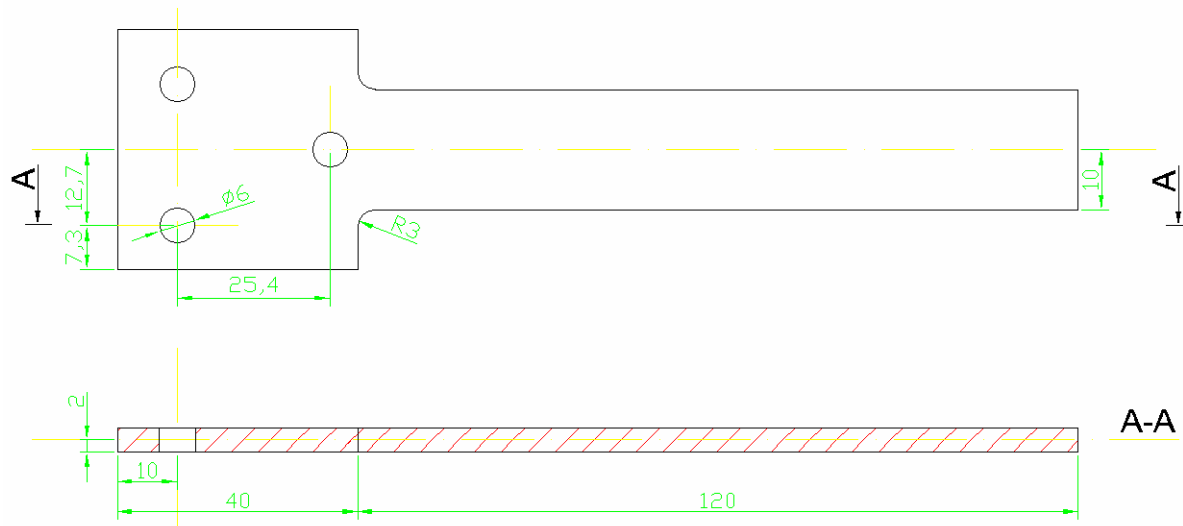
Obrázek 7.2 Výsledná poloha z naměřených průběhů na obr. 7.1



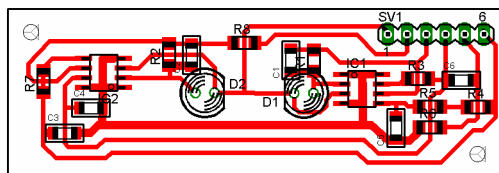
Obrázek 7.3 Výkres konstrukce vrchní a spodní části optického snímače



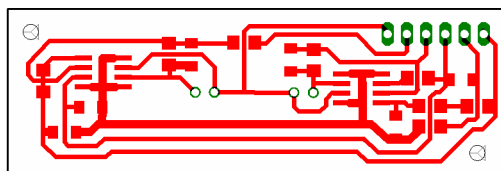
Obrázek 7.4 Držák pro uchycení nepohyblivého laboratorního skla



Obrázek 7.5 Držák pro uchycení pohyblivého laboratorního skla



Obrázek 7.6 Osazená deska plošného spoje měřicího obvodu



Obrázek 7.7 Deska plošného spoje měřicího obvodu