



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DIGITÁLNÍ ZAPISOVAČ DAT

DIGITAL DATA RECORDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ MÜLLER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAN DIBLÍK

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Tomáš Müller

ID: 77947

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Digitální zapisovač dat

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi konstrukce digitálního zapisovače dat, schopného zpracovat výstupní napětí napětí fotodiody.

Navrhněte obvodovou strukturu zapisovače. Vyhledejte potřebné obvodové prvky a proveďte měření jejich charakteristik. Realizujte desky plošných spojů.

Realizujte a oživte laboratorní přípravek. Realizujte software pro zachycení a zpracování dat v PC. Proveďte experimentální ověření činnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] WILFERT, O. Optoelektronika. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2003.

[2] Firemní dokumentace výrobce integrovaných obvodů [online]. Dostupné na: <http://www.freescale.cz>

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 20.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jan Diblík

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

ABSTRAKT

Diplomová práce Digitální zapisovač dat pojednává o způsobu měření intenzity záření laserového paprsku, jeho vyhledání pomocí krokových motorů a zpracování změřeného signálu pro následné zobrazení na PC. Je zde nastíněna základní teorie optoelektroniky, která se týká zadaného problému. Zejména je tu vysvětlen základní princip fotodetektoru a krokových motorů, které jsou hlavními částmi zařízení. Druhou částí práce je teoretický návrh řešení. Jednotlivě jsou popsány všechny části měřicího systému – jejich vlastnosti a podmínky pro správnou činnost. V poslední části je vysvětlen chod zařízení s odkazy na části vytvořených programů. Kde jsou uvedeny stěžejní funkce, posloupnost řízení hardwaru a princip komunikace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální zapisovač, krokový motor, laser, fotodetektor, čtyřkvadrantová fotodioda, mikrokontroler, FTDI RS232R.

ABSTRACT

This thesis deals with method of measuring optical beam intensity, searching for communication system beam using stepper motor movement of the optical head and processing measured signal for displaying on PC. The basic theory of optoelectronics is shown here concerning the problem. There is elaborated main principles of photodetector and stepper motor mainly, which are main part of device. The second part of work is theoretical design of data recorder. All parts are described individually-their characteristics and conditions for correct usage. In the last part setup of device is explained, with the references to blocks of written programs. In the last part, main functions of system, its hardware managing and communication are described. At the very end of thesis, examples of measured data are presented.

KEYWORDS

Digital data recorder, stepper motor, laser, photodetector, four-quadrant photodiode, microcontroller, FTDI RS232R.

MÜLLER, T. Digitální zapisovač dat. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 53 s., 18 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Jan Diblík.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Digitální zapisovač dat jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Janu Diblíkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

| | |
|--|-------------|
| Seznam obrázků | viii |
| Seznam tabulek | x |
| Úvod | 1 |
| 1 základní teorie - Optická část | 2 |
| 1.1 Detektory optického svazku..... | 2 |
| 1.1.1 Vnější fotoelektrický jev..... | 2 |
| 1.1.2 Vnitřní fotoelektrický jev..... | 2 |
| 1.1.3 Fotodiody..... | 2 |
| 1.1.4 Fotodioda PIN..... | 3 |
| 1.1.5 Lavinová fotodioda..... | 4 |
| 1.1.6 Náhradní model fotodiody..... | 4 |
| 1.1.7 Optické parametry fotodiody..... | 6 |
| 2 Základní teorie - elektrický pohon | 8 |
| 2.1 Krokový motor..... | 8 |
| 2.2 Základní parametry krokového motoru..... | 8 |
| 2.2.1 Statické parametry..... | 8 |
| 2.2.2 Dynamické parametry..... | 9 |
| 2.3 Členění krokových motorů podle způsobu konstrukce..... | 10 |
| 2.3.1 Motory s proměnnou reluktancí..... | 10 |
| 2.3.2 Motory s aktivním rotorem..... | 11 |
| 2.3.3 Hybridní krokový motor..... | 11 |
| 2.4 Způsoby řízení krokových motorů..... | 12 |
| 2.4.1 Jednofázové a dvoufázové řízení..... | 12 |
| 2.4.2 Řízení s polovičním krokem..... | 13 |
| 2.4.3 Mikrokrokování..... | 13 |
| 2.4.4 Bipolární a unipolární řízení..... | 14 |
| 3 Návrh digitálního zapisovače dat | 15 |
| 3.1 Čtyřkvadrantový detektor..... | 15 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | Zesílení detekovaného signálu..... | 18 |
| 3.2.1 | Optoelektrický převodník | 18 |
| 3.2.2 | Zapojení s analogovou úpravou signálů | 20 |
| 3.2.3 | Digitálně řízené zesílení..... | 22 |
| 3.3 | A/D převod | 25 |
| 3.4 | Mikrokontrolér..... | 26 |
| 3.4.1 | A/D převodník mikrokontroléru ATmega16 | 27 |
| 3.5 | Komunikace mezi mikrokontrolérem a PC | 28 |
| 3.6 | Krokový motor a jeho řízení..... | 30 |
| 4 | Celkové schéma a vývojový diagram pro obslužný program | 31 |
| 4.1 | Popis programu procesoru | 31 |
| 4.2 | Popis obslužného programu pro PC..... | 36 |
| 4.2.1 | Popis funkce programu | 37 |
| 5 | měření a ověření funkce aktivního vyhledávání opt. svazku | 40 |
| | Závěr | 50 |
| | Literatura | 51 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 52 |
| | Seznam příloh | 53 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Voltampérová charakteristika fotodiody [2]. | 3 |
| Obrázek 2: Řez fotodiodou PIN. | 4 |
| Obrázek 3: Řez lavinovou fotodiodou . | 4 |
| Obrázek 4: Náhradní schéma fotodiody. | 5 |
| Obrázek 5: Rozběhová charakteristika[4]. | 10 |
| Obrázek 6: Řez motorem s proměnnou reluktancí [4]. | 10 |
| Obrázek 7: Řez krokovým motorem s permanentním magnetem [4]. | 11 |
| Obrázek 8: Řez hybridního krokového motoru [4]. | 12 |
| Obrázek 9: Jednofázové řízení [4]. | 13 |
| Obrázek 10: Dvoufázové řízení [4]. | 13 |
| Obrázek 11: Bipolární uspořádání motoru [7]. | 14 |
| Obrázek 12: Unipolární uspořádání motoru [7]. | 14 |
| Obrázek 13: Blokové schéma. | 15 |
| Obrázek 14: Čtyřkvadrantový detektor. | 16 |
| Obrázek 15: Převodní charakteristika mezi dopadajícím výkonem a napětím vygenerovaným fotodiodou. | 16 |
| Obrázek 16: Měření přeslechů čtyřkvadrantové diody. | 17 |
| Obrázek 17: Optický převodník s transimpedančním zesilovačem. | 18 |
| Obrázek 18: Upravené zapojení. | 19 |
| Obrázek 19: Závislost zesílení a fáze na frekvenci [16]. | 19 |
| Obrázek 20: Dioda v odporovém režimu. | 20 |
| Obrázek 21: Typické zapojení obvodu pro detekci polohy optického svazku [13]. | 21 |
| Obrázek 22: Zapojení obvodu pro digitální výpočet detekce polohy optického svazku. | 22 |
| Obrázek 23: Vnitřní struktura obvodu PGA116 (PGA117). | 22 |
| Obrázek 24: Serial Peripheral Interface [18]. | 23 |
| Obrázek 25: Komunikační protokol PGA116/117 . | 24 |
| Obrázek 26: Uspořádání vývodů u mikrokontroleru ATmega16 [11]. | 26 |
| Obrázek 27: Rozložení pinů u FTDI FT232RL. | 29 |
| Obrázek 28: Schéma H – můstku. | 31 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 29: Komunikační paket. | 34 |
| Obrázek 30: Vývojový diagram obslužného programu. | 36 |
| Obrázek 31: Formulář obslužného programu. | 37 |
| Obrázek 32: Zapojení pracoviště při zkušebním měření. | 40 |
| Obrázek 33: Posun senzoru v x-ové ose při vyhledávání optického svazku. | 41 |
| Obrázek 34: Posun senzoru v y-ové ose při vyhledávání optického svazku. | 41 |
| Obrázek 35: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 1. kvadrant. | 42 |
| Obrázek 36: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 2.kvadrant. | 42 |
| Obrázek 37: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 3.kvadrant. | 43 |
| Obrázek 38: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 4.kvadrant. | 43 |
| Obrázek 39: Průběh x-ové souřadnice při posunu optického svazku. | 44 |
| Obrázek 40: Průběh y-ové souřadnice při posunu optického svazku. | 44 |
| Obrázek 41: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 1.kvadrant při posunu. | 45 |
| Obrázek 42: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 2.kvadrant při posunu. | 45 |
| Obrázek 43: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 3.kvadrant při posunu. | 46 |
| Obrázek 44: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 4.kvadrant při posunu. | 46 |
| Obrázek 45: Změna x-ové souřadnice při zahřívání atmosférické cesty | 47 |
| Obrázek 46: Změna y-ové souřadnice při zahřívání atmosférické cesty | 47 |
| Obrázek 47: Průběh napětí 1. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty. | 48 |
| Obrázek 48: Průběh napětí 2. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty. | 48 |
| Obrázek 49: Průběh napětí 3. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty. | 49 |
| Obrázek 50: Průběh napětí 4. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty. | 49 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí na diodách, když opt. svazek směřuje na střed 4kv. detektoru. | 18 |
| Tabulka 2: SPI módy. | 23 |
| Tabulka 3: význam bitů SPI komunikace. | 24 |
| Tabulka 4: Nastavení zesílení u PGA116/117. | 24 |
| Tabulka 5: Přepínání kanálů. | 24 |
| Tabulka 6: Názvy a významy vývodů u ATmega16 [10]. | 27 |
| Tabulka 7: Názvy a významy vývodů u FTDI FT232RL [15]. | 29 |
| Tabulka 8: Technické parametry krokového motoru. | 30 |
| Tabulka 9: Posloupnost spínání krokového motoru. | 30 |

ÚVOD

Cílem semestrálního projektu a následující diplomové práce je sestavení elektronického zařízení, které bude sloužit jako měřicí a sledovací jednotka pro laboratoř optoelektroniky a fotoniky na Ústavu Radioelektroniky Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií při VUT v Brně. Úkolem Digitálního zapisovače dat je aktivně vyhledat laserový paprsek, zaměřit ho na střed fotodetektoru, sledovat jeho pohyb a získané data poslat do PC k zpracování.

Digitální zapisovač (dále jen DZ) se bude skládat z optického přijímače, jehož hlavní části budou čtyřkvadrantová fotodioda s optoelektrickým převodníkem, pomocí které se vyhodnotí pozice laserového paprsku. K přesnému polohování bude použita dvojice krokových motorů řízená mikroprocesorem. Detekovaný signál z optoelektrického převodníku je vždy nutné zesílit do patřičných úrovní pomocí zesilovače s řízeným zesílením ovládaným mikroprocesorem. Poté bude signál převeden na digitální signál, který bude zpracován mikroprocesorem, jenž rozhodne o dalším posunu detekční jednotky, či změně zesílení signálu. Nakonec zapisovač předá data PC, který jej přijme, zpracuje a vyhodnotí. Vyhotovený obslužný program v PC jednak ovládá činnost samostatného zařízení posíláním příkazů a po přijetí datového paketu zobrazí aktuální velikosti napětí naměřených na kvadrantech a pozici optického svazku.

Cílem této práce je sestavit zařízení, které se bude moci využívat pro automatické směřování hlavic optického spoje na protistanici. Díky kterému se bude moci docílit například kompenzace pohybu vlivem teplotní roztažnosti. Další variantou užitečné činností je zastavení hlavice a záznam dat o změně dopadající intenzity na jeho kvadrantech, což vypoví o parametru turbulentní atmosféry.

1 ZÁKLADNÍ TEORIE - OPTICKÁ ČÁST

1.1 Detektory optického svazku

Funkcí detektorů optického záření je přeměna zářivé energie na měřitelnou elektrickou veličinu (často elektrický proud nebo napětí) nebo ovlivnění fyzikálních vlastností detekujícího prvku (elektrický odpor). Tyto detektory, jak je uvedeno v [1], lze rozdělit na detektory tepelné, jež detekují zvýšení teploty způsobené přeměnou zářivé energie a pro tuto práci důležitější detektory kvantové. Jejich funkce je založena na přímém působení fotonů záření na elektrony krystalové mřížky materiálu, z kterého je detektor vytvořen. Prvním vědcem, kdo si tohoto jevu všiml, byl Hendrich Herz, který v roce 1887 ověřil Maxwellovu ideu o elektromagnetických vlnách. Dalším významným časovým mezníkem byl rok 1905, kdy Albert Einstein zveřejnil teorii, v které se opíral o Plackovou kvantovou teorii, že elektrony neabsorbují energii v důsledku urychlování elektrickou složkou dopadající elektromagnetické vlny ale po kvantech, jejichž velikost je úměrná frekvenci zařízení. Nositelem tohoto kvanta je zmíněný foton. Tyto absorpce lze rozdělit do dvou skupin, a sice vnější fotoelektrický jev a vnitřní fotoelektrický jev.

1.1.1 Vnější fotoelektrické jev

Tento jev nastane převážně u kovových látek, některých polovodičů či u kyslíčků a je způsoben dopadem fotonu na materiál. Dopadem a následující absorpcí fotonu s energií, která je alespoň rovna ionizační energii, se uvolňuje elektron ze své vazby a opouští povrch materiálu. Látka pak dostává kladný potenciál. Zmíněná ionizační energie je dána podle [1] rozdílem energické úrovně vakua (W_V) a Fermiho energické hladiny (W_F) $W_p = W_V - W_F$.

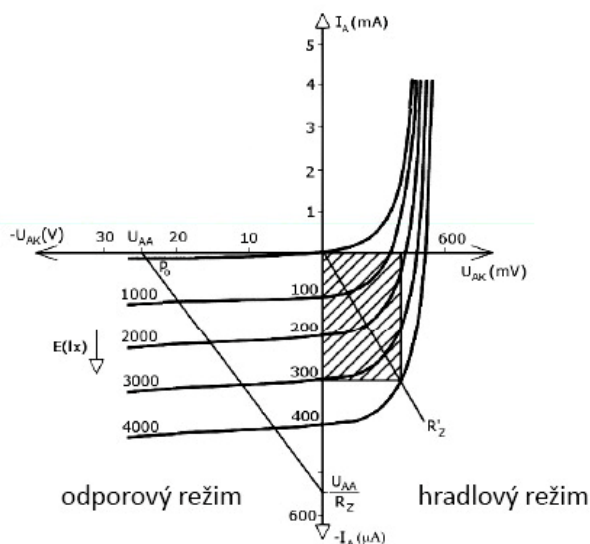
1.1.2 Vnitřní fotoelektrický jev

Vnitřní fotoelektrický jev nastává hlavně u polovodičů, protože mají úzký zakázaný pás mezi valenčním a vodivostním pásem. Elektron ve valenčním pásmu pohltí foton s energií větší než je šířka zakázaného pásma. Takový elektron přejde do pásma vodivostního a stává se volným nosičem náboje. Tím zvýší vodivost látky, která se označuje jako „vlastní fotovodivost“.

1.1.3 Fotodiody

Fotodiody lze charakterizovat jako zařízení používající k funkci PN přechod. Jsou to plošné diody konstrukčně upravené tak, aby mohlo pronikat optické záření na jejich PN přechod. Vzniká tedy fotocitlivá součástka. Pokud PN přechod neosvětlujeme, tak se dioda chová jako běžná dioda. Pokud by teplota okolí byla rovna absolutní nule, tak je valenční pás úplně zaplněný a vodivostní pás je prázdný. Když se teplota začne zvyšovat, elektrony dostávají tepelnou energii a začínají naplňovat vodivostní pás. Vliv osvětlení lze pozorovat nejvíce při polarizaci diody v závěrném směru, kdy dopadajícího záření dodá elektronu energii. Pokud tato energie je větší než šířka

zakázaného pásma 1,2eV, tato energie dopomůže elektronu dostat se do vodivostního pásu (pozn. fotony s menší energií než je zakázané pásmo nejsou pohlceni vůbec. [13]), pak vzniká pár elektron díra. Jinak řečeno, vlivem osvětlení dochází k téměř lineárnímu nárůstu proudu (III. kvadrant, viz obrázek 1). Část její VA charakteristiky se nachází i ve IV. kvadrantu, kdy se dioda chová jako zdroj energie. Tento režim se nazývá „hradlový“.[12]



Obrázek 1: Voltampérová charakteristika fotodiody [2].

Voltampérová charakteristika vychází z obecného popisu polovodičové diody, z tzv. Schockeyho rovnice:

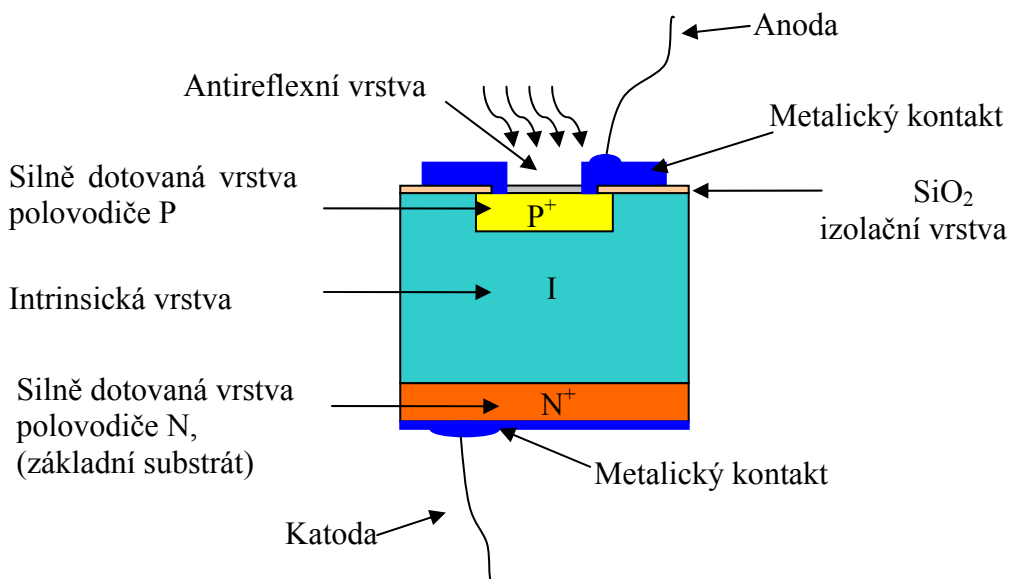
$$I = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right] - I_L, \quad (1)$$

- kde
- I ... je proud protékající diodou,
 - I_0 ... je proud v závěrném směru,
 - U ... je napětí na fotodiodě,
 - U_t ... je teplotní napětí,
 - I_L ... je fotoproud úměrný zářivému toku.

1.1.4 Fotodioda PIN

Jak název napovídá, není vytvořen přímý PN přechod. Vložením intrinsické vrstvy (polovodič s vlastní vodivostí) mezi polovodiče P a N vznikne široká vrstva s vysokou intenzitou elektrického pole. Tato intenzita zapříčiní, že elektrony a díry se budou pohybovat velkou rychlostí. Další obecnou vlastností je jejich velmi malý temný proud a malý šum. Struktura PIN fotodiody je na následujícím obrázku. Tloušťka i vrstvy

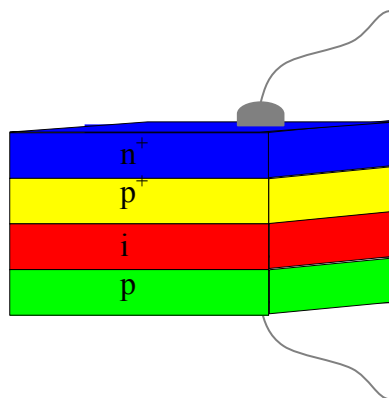
bývají několik desítek μm . V obvodu se používá v závěrném směru, protože v této oblasti vykazuje větší citlivost a rychlejší odezvu.



Obrázek 2: Řez fotodiodou PIN.

1.1.5 Lavinová fotodioda

Naproti PIN diodě je přidána ještě další vrstva (viz. obrázek 3), ve které dochází k násobícímu efektu nosičů náboje. Aby k tomuto došlo, je potřeba velkého závěrného napětí cca od desítek do stovek voltů, což bývá často problematické. Toto napětí urychlí nosiče vzniklé elektrony, které pak se svojí velkou energií narážejí na další atomy a způsobují lavinovou reakci. Tato dioda má velkou citlivost na úkor šumu, který vzniká díky náhodnosti lavinové ionizace.



Obrázek 3: Řez lavinovou fotodiodou .

1.1.6 Náhradní model fotodiody

Reálnou fotodiodu můžeme nahradit odvodem skládající se z diskrétních prvků.

Na následujícím obrázku 4 představuje dioda D ideální diodu. Zdroj proudu I_p charakterizuje proud vzniklý přijatou zářivou energií.

Nejvíce se projevující částí obvodu je kapacita diody C_D , která ovlivňuje jak její šířku pásma, tak i její šumové vlastnosti.

$$C_D = \frac{\varepsilon_{Si} \varepsilon_0 A}{W_d} \quad (2)$$

Kde ε_{Si} ... je relativní permitivita křemíku,
 ε_0 ... je permitivita vakua,
 W_d ... je tloušťka ochuzené oblasti,
 A ... je difúzní plocha spojení.

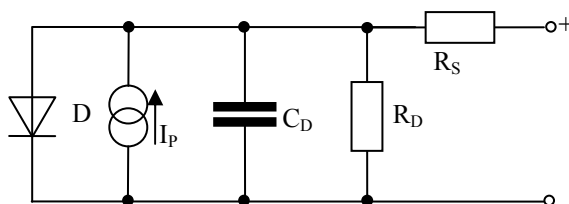
Rezistor R_D představuje vodivost fotodiody za neosvětleného stavu, tedy když jí protéká proud za tmy. Určuje tedy směrnici křivky, kdy je napětí na diodě rovno 0 V. V ideálním případě by měl být nekonečný. V reálu nabývá hodnot desítek a tisíců M Ω .

Posledním odvodovým prvkem je sériový odpor, jenž představuje odpor polovodiče a odpor metalických přívodů. Velikost tohoto odporu je rovna podle následujícího vzorce [13].

$$R_s = \frac{(W_s - W_d) \rho}{A} + R_C \quad (3)$$

Kde W_s ... je tloušťka substrátu,
 W_d ... je tloušťka ochuzené oblasti,
 A ... je difúzní plocha spojení,
 ρ ... je měrný odpor substrátu,
 R_C ... je přechodový odpor.

Ideálně by tento odpor měl být nulový, typicky se však pohybuje v rozsahu od 10 do 1000 Ω .



Obrázek 4: Náhradní schéma fotodiody.

1.1.7 Optické parametry fotodiody

Citlivost (*responsivity*)

Pod pojmem citlivost fotodiody rozumíme míru citlivosti na světlo, která je rovna jako poměr fotoelektrického proudu I_P k výkonu P dopadajícího světla v dané vlnové délce.

$$S = \frac{I_P}{P} \quad (4)$$

Lze říci, že je to míra přeměny dopadajícího světla na elektrický proud. Jeho velikost je závislá na změnu vlnové délky, závěrného napětí a teploty.

Protože není citlivost v celém rozsahu konstantní, definuje se také *vlnová délka maximální citlivosti* (*Wavelength of max. sensitivity*). Závislost citlivosti na vlnové délce udává graf *spektrální citlivosti* (*Relative spectral sensitivity*). Tento průběh je závislý na materiálu fotodiody a parametrech PN přechodu.

Kvantová účinnost (Quantum Efficiency, Q.E.) [14]

Je definována jako procentuální poměr počtu N_{el} nosičů proudu generovaných do obvodu a počtem nosičů N_{ph} dopadajících na aktivní plochu fotodiody.

$$\eta = \frac{N_{el}}{N_{ph}} = \frac{hc}{e\lambda} S \quad (5)$$

Kde h ... je Planckova konstanta,
 c ... je rychlost světla ($3 \cdot 10^8$ m/s),
 e ... je velikost elementárního náboje $1,602 \cdot 10^{-19}$ C.

Proud za temna (Dark current)

Na rozdíl od normální diody se u fotodiody zavádí i parametr proud za temna, jímž je popisován proud, který teče neosvětlenou diodou. Tento proud nabývá velikosti řádově desetin až desítek nA a je značně závislý na teplotě a jiných okolních jevech. Jeho velikost je zejména dána materiálem, z kterého je fotodioda vyrobena. Fotodiody vyrobené z InGaAs mají výrazně menší temný proud než Ge diody. Pokud se tato dioda používá jako světelný detektor, je temný proud klíčový pro určení odstupu signálu od šumu.

NEP (Noise Equivalent Power)

Je optický výkon, který vyvolá elektrický proud stejně velký jako je celkový proud šumu v šířce 1 Hz.

$$NEP = \frac{I_{TN}}{S} \quad (6)$$

Nabývá hodnot od 10^{-11} W/Hz u diod s velkými aktivními oblastmi a až 10^{-15} W/Hz pro fotodiody s malými aktivními oblastmi. Proud, označen jako I_{TN} , je celkový proud šumu, který se skládá ze dvou složek a to z výšřelového šumu I_{sn} a Johnsonova šumu I_{jn} .

$$I_{TN} = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} \quad (7)$$

Výšřelkový šum způsobuje náhodná fluktuace nosičů náboje, které procházejí potenciálovou bariérou PN přechodu. Jeho velikost je dána vztahem (8).

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_P + I_D)\Delta f} \quad (8)$$

Kde I_P je proud vygenerovaný optickým výkonem, I_D je proud za temna Δf je frekvenční šířka měřeného šumu.

Druhým proudem je Johnsonův šum, jenž se vytváří na vnitřním paralelním odporu fotodiody. Tento šum je elektrické napětí vyvolané pohybem elektronů. Ty se pohybují díky dodané tepelné energii okolí, které má teplotu vyšší než absolutní nula. Elektrický proud vzniklý z tohoto pohybu je:

$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R_{SH}}} \quad (9)$$

Kde k_B ... je Boltzmannova konstanta,
 T ... je teplota v Kelvinech,
 R_{SH} ... je paralelní odpor fotodiody.

Linearita (Linearity)

Fotodioda je považována za lineární, pokud se vygenerovaný fotoproud lineárně zvyšuje s dopadajícím světelným výkonem. Linearita bývá porušena pro malé výkony rovny NEP a vysoké výkony, kdy dochází k saturaci fotodiody.

2 ZÁKLADNÍ TEORIE - ELEKTRICKÝ POHON

Elektrickým pohonem rozumíme soustavu neboli systém, který přeměňuje elektrickou energii na mechanickou. Vstupní veličinou soustavy jsou řídicí signály, které pomocí ovladače řídí mechanický měnič, který mění elektrickou energii na výstupní mechanickou konkrétně pohyb. Tyto pohony lze rozdělit na elektromotory a speciální pohony (lineární pohony, magnetostrikční pohony a piezoelektrické pohony). Pro natáčení hlavice aktivního sledování optického svazku jakož i pro jiné zařízení, kde je potřeba nastavovat polohu či rychlost bez zpětné vazby, se nejvíce hodí krokové motory.

2.1 Krokový motor

V poslední době, kdy se zejména k řízení používá číslicová technika, se dává přednost krokovým motorům, které se dají řídit impulsně. Krokové motory se hlavně používají k přesnému nastavení své polohy, kterou by měly i přes působící vnější síly udržet. Tudíž na rozdíl od ostatních motorů se netočí spojitě. Z toho vyplývá i jednu z jejich hlavních nevýhod a to trvalý odběr proudu, i když motorem neotáčíme. Druhou nevýhodou je i malý poměr výkonu (kroutícího momentu) ku hmotnosti motoru. Jak název naznačuje, poloha rotoru se mění o diskretní přírůstek, tedy krokem. Proto i ovládací impulzy mají podobu posloupností diskretního pulzů. Počet pulzů obecně určuje míru pootočení a frekvence rychlost pootočení. Z toho vyplývá, že se krokové motory dále používají tam, kde je potřeba řídit proměnlivou rychlost otáčení. Jako další výhody lze zmínit rychlou odezvu na požadavek k rozběhu a zastavení, malé chybovosti kroku (u dobrých motorů 3 až 5%), které se s přibývajícím počtem nesčítají. Tyto motory jsou určeny pro malé výkony, tedy v rozmezích od desetin W až k nejvíce stovkám W. Krokové motory mají široké využití v elektronice (skenery, tiskárny, disky), u obráběcích strojů a u podobných zařízení. [3].

2.2 Základní parametry krokového motoru

Pokud chceme používat ve svých zařízeních krokové motory, je třeba se seznámit s jejich základními parametry. První skupina těchto parametrů se dá pojmenovat jako statické. Tedy parametry, které se projeví v ustáleném stavu, kdy je motor zastaven. Druhou skupinou jsou dynamické parametry, které se týkají rychlosti a momentu, když se motor rozebíhá a nebo když už běží.[5]

2.2.1 Statické parametry

Úhel kroku

Je základní úhel, o který se motor pootočí při přepnutí fází, tedy za jeden řídicí impuls. Tento úhel závisí na typu motoru a způsobu řízení, jak je uvedeno dále a je dán

vztahem [4]:

$$\Theta_k = \frac{360^\circ}{N_f \cdot N_r}, \quad (10)$$

kde N_f je počet fází a N_r počet zubů rotoru.

Magnetická klidová poloha

Magnetická klidová poloha je poloha, kterou zaujme rotor nabuzeného motoru, jestliže je statický úhel zátěže roven nule. Jinými slovy: poloha rotoru je sesouhlasena s magnetickým polem statoru. Tato klidová poloha je však závislá na zatížení motoru a na statickém tření. Vykazuje tudíž poměrně široké toleranční pole. Tato klidová magnetická poloha se mění se změnou připojením fází.

Statický úhel zátěže

Je to úhel β [°], o který se rotor krokového nabuzeného motoru vychýlí z klidové magnetické polohy při dané zátěži na hřídeli.

Statický moment

Statický moment je moment v rovnováze s kroutícím momentem působící na hřídel nabuzeného stojícího krokového motoru a označuje se M_S . Jeho závislost na statickém úhlu se označuje jako statická charakteristika.

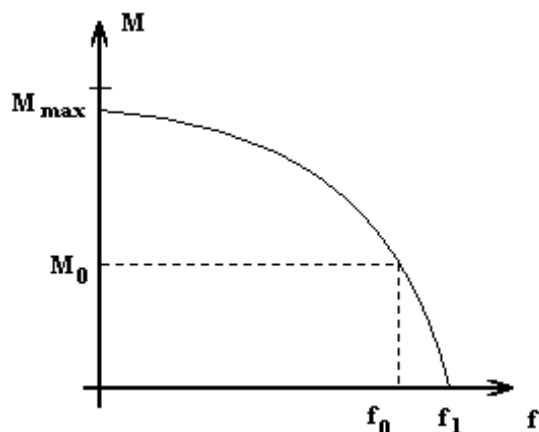
- Statický vazební moment - je největší statický moment, kdy ještě nedojde k roztržení magnetické vazby u nabuzeného krokového motoru.
- Statický vazební moment nenabuzeného motoru - je největší statický moment, kdy ještě nedojde k roztržení magnetické vazby, ale u nenabuzeného krokového motoru.

2.2.2 Dynamické parametry

Druhou skupinou jsou dynamické parametry, které se týkají rychlosti a momentu, když se motor rozeběhá a nebo když už běží.

Rozběhový moment

Je to moment, se kterým se může rozeběhnout bez přídavné vnější setrvačné hmoty tak, aby nedošlo k chybě kroku při definovaném řídicím kmitočtu. S rozběhovým momentem lze definovat i rozběhovou charakteristiku, která znázorňuje mezní frekvenci, kdy se motor rozeběhne bez ztráty kroku.



Obrázek 5: Rozběhová charakteristika[4].

Nejvyšší rozběhový kmitočet

Je to nejvyšší možný řídicí kmitočet, kdy se motor bez zátěže rozběhne start-stop bez ztráty kroku.

Mezní rozběhový kmitočet

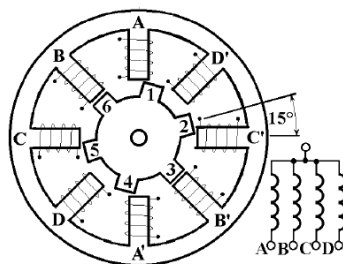
Je nejvyšší řídicí kmitočet, kdy se motor s určitou zátěží rozběhne i zastaví bez ztráty kroku.

2.3 Členění krokových motorů podle způsobu konstrukce

Pokud na tyto motory hledíme z pohledu konstrukce, lze je rozdělit na motory s proměnnou reluktancí (lze je nazvat i s pasivním motorem či reakční; v anglické literatuře označovány jako Variable Reluctance Motors - VRM) a na motory s aktivním rotorem.

2.3.1 Motory s proměnnou reluktancí

Motory s proměnnou reluktancí se skládá ze dvou částí. První je stator s vinutími a druhá je rotor z magneticky měkkého materiálu, jak je uvedeno na následujícím obrázku 6. Stator je opatřen tzv. vyjádřenými póly, mezi kterými jsou vzduchové mezery. Toto uspořádání rotoru zapříčiňuje jeho proměnný magnetický odpor po obvodu (reluktaci).



Obrázek 6: Řez motorem s proměnnou reluktancí [4].

Motor na obrázku se nachází ve stavu, kdy je proud přiveden k sériově spojeným cívkám B a B'. Rotor motoru je v takové pozici, kdy je magnetický odpor obvodu (rotoru a pólů) minimální. Abychom posunuli rotor o jeden krok dopředu, odpojíme dvojici B-B' a přivedeme proud na sériovou dvojici cívek C a C'. V tu chvíli se pól 5 díky magnetické síle přitáhne k cívce C a zároveň logicky i pól 2 k cívce C'. Cyklus pak pokračuje připojením dvojic cívek D, D' pak A, A'; B, B' atd. Převrácením cyklu spínání docílíme i otáčení na druhou stranu motoru.

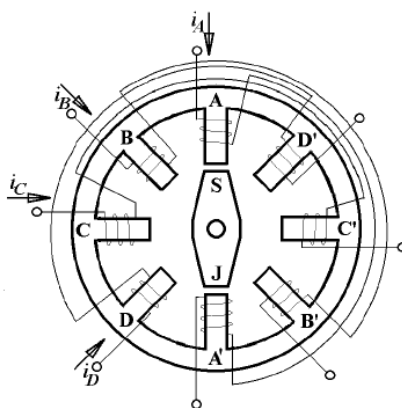
Úhel pootočení motoru s počtem N_s zubů statoru a N_r zubů rotoru lze tedy vyjádřit vztahem (11):

$$\Theta_k = 360 \cdot \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right). \quad (11)$$

Stejného výsledku dosáhneme i podle vzorce (10), kde N_f je počet kroků, které je potřeba k tomu, aby byl k vinutí opět připojen proud.

2.3.2 Motory s aktivním rotorem

Zatímco motory s proměnnou reluktancí jsou historicky starší, v současnosti jsou více rozšířeny motory s aktivním rotorem, tedy s rotorem s permanentním magnetem. Jejich princip lze vysvětlit podle následujícího Obrázek 7.



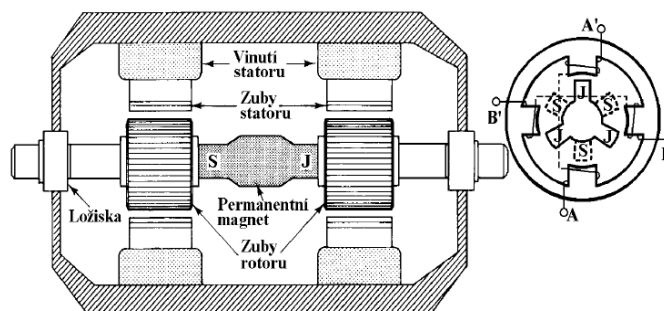
Obrázek 7: Řez krokovým motorem s permanentním magnetem [4].

Stav podle Obrázek 7 nastane, pokud prochází dvojicemi cívek A a A' proud tak, aby pomocí pravidla pravé ruky byl cívkou A přitahován severní pól magnetu a cívkou A' jižní pól magnetu. Pro otočení o 360° je třeba postupně přivádět proud B, B'; C, C' a D, D'. Poté se musí změnit směr proudu (tedy i polarizace magnetického pole cívky) a cívky opět postupně připojit. Výhodou těchto motorů je jednoduchá výroba. Nevýhodou je však velká délka kroků a komplikovanější řízení, kdy se musí měnit polarita proudu.

2.3.3 Hybridní krokový motor

Kombinací těchto dvou základních typů motorů vznikl motor označovaný jako hybridní.

Rotor motoru se skládá z axiálně orientovaného magnetu s na konci umístěnými feromagnetickými nástavci, jež mají póly vzájemně natočeny, jak je naznačeno na následujícím obrázku. Zub na jedné straně odpovídá mezeře na druhé straně. Cívky statoru jsou v řezu propojeny a buzeny proudem tak, aby tvořily magnetický tok stejného směru. Na obrázku je zobrazeno dvojfázové provedení, ale často se používají i tři a pěti fázové.



Obrázek 8: Řez hybridního krokového motoru [4].

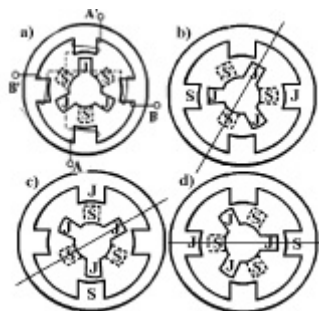
Nevýhodou těchto motorů je složitější výroba, která se projevuje i na ceně. Naopak výhodou je větší vyvinutý moment a větší rozběhový a provozní moment. Takto provedené motory jde řídit buď jednofázově (je vždy připojena jen jedna cívka), dvoufázově (připojují se obě cívky najednou a při změně stavu se přepólují) a řízení s mezikrokem (kombinace předešlých dvou možností).

2.4 Způsoby řízení krokových motorů

Řízení krokových motorů lze rozdělit podle několika hledisek. Prvním hlediskem rozdělení je počet připojení fází. Dalšími způsoby řízení jsou unipolární a bipolární řízení, která spočívají v rozdílném zapojení cívek. Posledními zvláštními způsoby jsou řízení s polovičním krokem a s mikrokrokem.

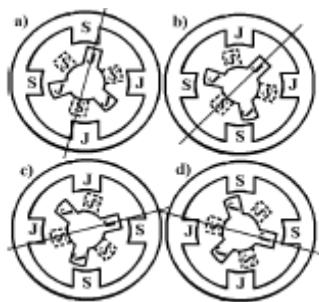
2.4.1 Jednofázové a dvoufázové řízení

U jednofázového řízení, jak je z názvu zřejmé, se vždy přivádí proud jen do jednoho vlnutí motoru. Princip toho řízení lze vysvětlit pomocí následujícího obrázek 9. První poloha označena jako a) nastane, pokud k vývodu A přivedeme kladné napětí a vývod A' uzemníme. Pro vytvoření dalšího kroku (poloha c)) nejprve odpojíme fázi A a následně připojíme kladné napětí na vývod B a B' uzemníme. Další dva kroky spočívají v tom, že se kladné napětí přivede na vývod A' a poté na B', kdy je druhý vývod fáze opět uzemněn. Pro otáčení na druhou stranu se jen zamění pořadí kroků.



Obrázek 9: Jednofázové řízení [4].

Druhou variantou je dvoufázové řízení. V každém kroku se připojují dvě vinutí, což má za příčinu větší odběr elektrické energie, ale na druhou stranu je vytvořené magnetické pole dvojnásobně silné a tudíž motor má i silnější moment. Způsob řízení lze vysvětlit opět pomocí následujícího obrázku 10.



Obrázek 10: Dvoufázové řízení [4].

První pozici znázorněnou na obrázku jako a) docílíme tak, že na vývody A a B přivedeme kladné napětí a na čárkované vývody zem. Rotor se v tomto stavu nahne do polohy magnetické rovnováhy vytvořené oběma vinutími. Pro další krok se následně otočí polarita ve vinutí A. Rotor je pak v poloze jak znázorňuje poloha b). Další stav docílíme změnou polaritu ve vinutí B.

2.4.2 Řízení s polovičním krokem

Z výše uvedených obrázků je vidět, že polohy jednofázového a dvoufázového vinutí jsou si vzájemně mezipolohami. Tyto metody řízení mají krok o velikosti 30° . Kombinováním kroků obou metod lze vytvořit řízení s takzvaným mezikrokem. Touto metodou dostaneme mezikrok o velikosti 15° . Nevýhodou je proměnnost momentu na hřídeli, kdy se střídá připojení jednoho a dvou vinutí (při připojení dvou vinutí je moment asi o 40% větší). Nerovnoměrnost momentu lze srovnat zvětšením procházejícího proudu vinutím o zmíněných 40%, kdy je zapojeno jen jedno vinutí. Tento způsob se v praxi nejvíce používá a jeho nevýhodou je jen větší složitost řídicí jednotky.

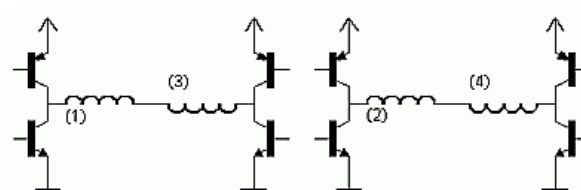
2.4.3 Mikrokování

Pokud potřebujeme nastavit určitou polohu rotoru, lze použít mikrokování.

Principem tohoto způsobu je rozdělení kroku na mikrokroky pomocí změny velikosti napětí přivedeného na jednotlivé vinutí. Rovnoměrným snižováním na prvním vinutí a zároveň zvyšováním napětí na druhém vinutí lze dosáhnout libovolné polohy rotoru motoru. Druhou výhodou je odstranění rezonance, která nastává, když se na vinutích mění skokově polarita napětí.

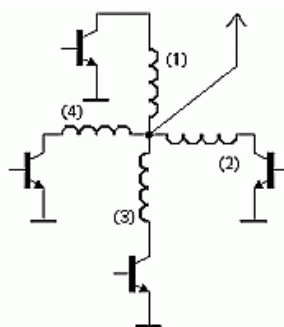
2.4.4 Bipolární a unipolární řízení

Metody řízení lze také rozdělit na bipolární a unipolární. Bipolární spočívá v tom, že dvě protilehlé cívky jsou propojené s obrácenou orientací magnetického pole a o směru proudu vždy rozhoduje jedna s dvojice tranzistorů, jak ukazuje následující obrázek 11. Toto uspořádání má větší kroutící moment a i spotřebu.



Obrázek 11: Bipolární uspořádání motoru [7].

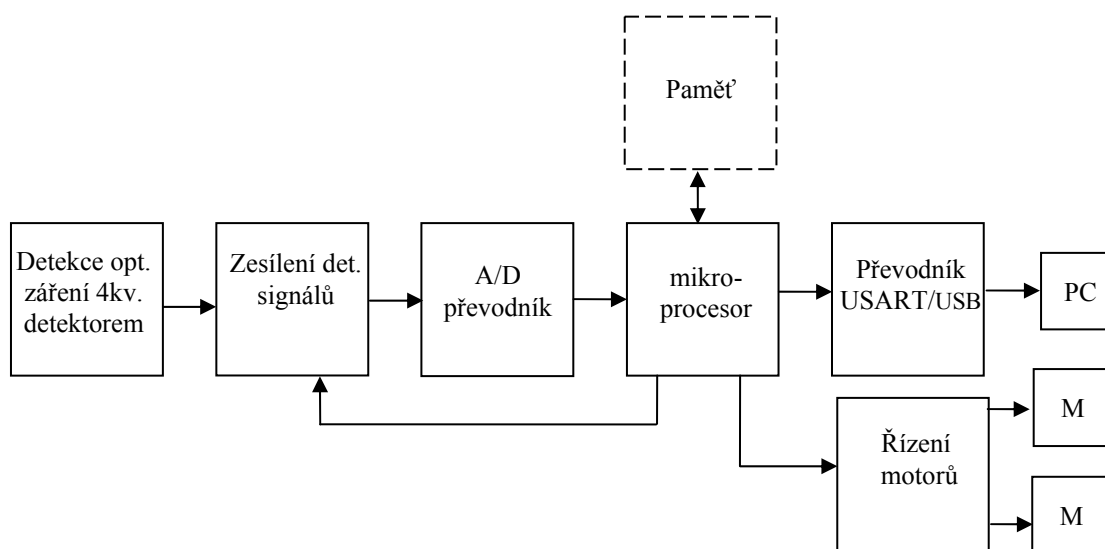
Naopak unipolární metoda spočívá v tom, že všechny cívky jsou v jednom bodu propojeny, kde je přivedeno kladné napětí. Aktivní cívka je pak přes tranzistor uzemněna. Výhodou je poloviční počet tranzistorů. Nevýhodou je menší kroutící moment a výhodou odpovídající nižší spotřeba.



Obrázek 12: Unipolární uspořádání motoru [7].

3 NÁVRH DIGITÁLNÍHO ZAPISOVAČE DAT

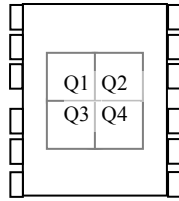
Samotný návrh Digitálního zapisovače dat se skládá z bloků uvedených na obrázku 13. První blok detekce optického zařízení provede převedení optického signálu na elektrickou veličinu. Tento signál se musí připravit pro AD převod. To má za úkol druhý blok, jenž signál zesílí. Zesílení bude provedeno pomocí zesilovače s řízeným zesílením, který bude řízen mikroprocesorem. Dalším blokem je převodník AD, který přemění signál na digitální, aby jej mohl mikroprocesor zpracovat do podoby pro propočítání podmínek řízení motorů a komunikaci s PC.



Obrázek 13: Blokové schéma.

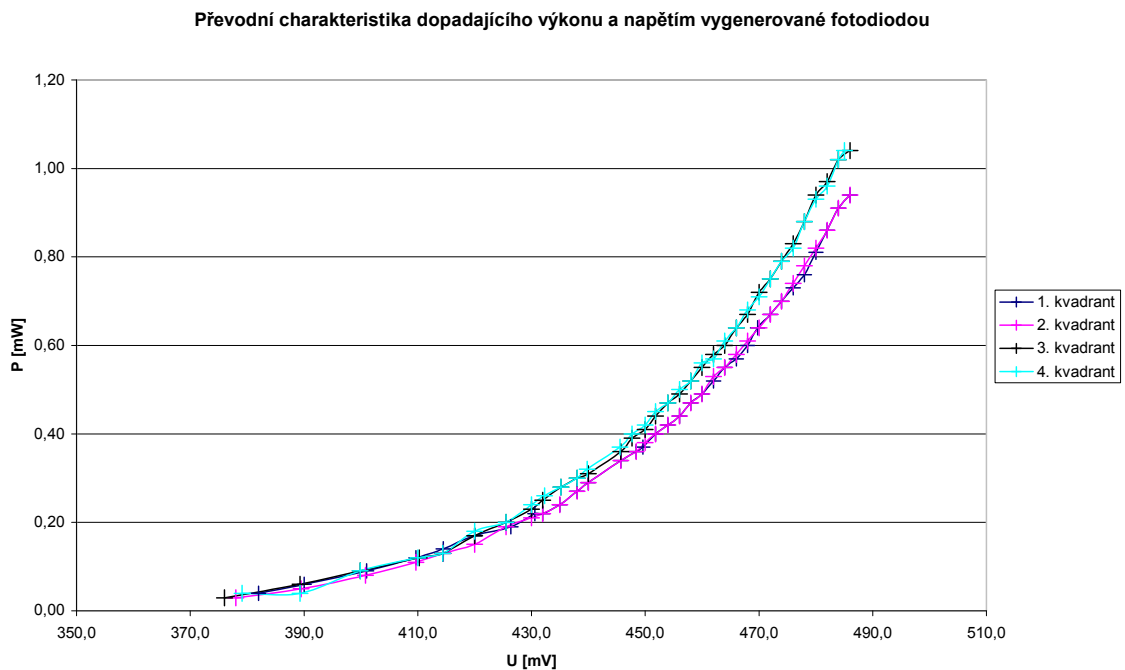
3.1 Čtyřkvadrantový detektor

Úkolem aktivního sledovače, jenž je součástí digitálního zapisovače dat, je se co nejlépe prostorově přizpůsobit příjmu optického svazku, což ve skutečnosti znamená změnit svoji polohu tak, aby optický svazek směřoval přesně doprostřed aktivní oblasti fotodiody. Jednou z možností pro zjišťování polohy optického svazku je použití kvadrantového detektoru, což je fotodioda, která má upravený substrát na dvě nebo čtyři části. Části jsou odděleny buď mezerou nebo mrtvou oblastí. Pokud je optický svazek v centru detektoru, je generován ze všech oblastí stejný fotoproud. V opačném případě lze pomocí vzniklých proudů určit relativní polohu optického svazku. Důležitou podmínkou je, že světelný bod musí překrývat všechny části, tedy že nesmí být menší než mrtvá oblast. Další podmínkou je, že světelný bod musí mít jednotný zdroj.



Obrázek 14: Čtyřkvadrantový detektor.

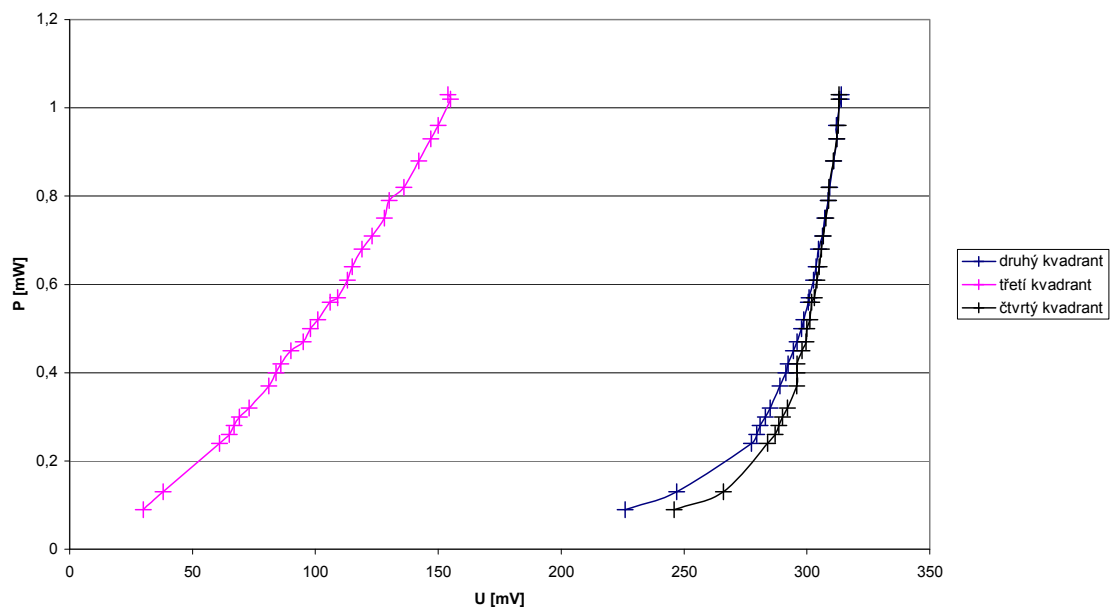
Pro zapisovač bude použit čtyřkvadrantový detektor s výrobním označením VBO 036 A v.č.1780605. Tato dioda je konstrukčně uspořádána tak, že díky společnému substrátu má vodivě propojené katody a samostatné anody. Protože od zmíněné čtyřkvadrantového detektoru nebyly nalezeny žádné dokumentace, byla proměřena převodní charakteristika, která určuje závislost mezi dopadajícím výkonem a detekovaným napětím na fotodiodě. Měření bylo prováděno na zátěži $1\text{k}\Omega$. Byl použit laser HL6312G: $\lambda = 635\text{ nm}$, šířka svazku $1,5\text{ mm}$. Samotný detektor má aktivní plochu kvadrantu $3,5 \times 3,5\text{ mm}$.



Obrázek 15: Převodní charakteristika mezi dopadajícím výkonem a napětím vygenerovaným fotodiodou.

Pro měření pozice optického svazku je dále důležité zjistit přeslechy v ostatních kanálech, když je optický svazek směřován do jednoho kvadrantu.

Měření přeslechů čtyřkvadrantové diody (při namířeném paprsku na 1. kvadrant)



Obrázek 16: Měření přeslechů čtyřkvadrantové diody.

Když laserový paprsek nedopadal na detektor (měřeno při pološeru), bylo na jednotlivých diodách naměřeno napětí okolo 20mV. Výše uvedená charakteristika znázorňuje přeslechy kanálů pro zbylé kvadranty. Optický svazek byl směřován do prvního kvadrantu do místa, kde bylo naměřeno největší napětí na fotodiode (pozn. naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A). Jak je vidět, tak přeslechy ve vedlejších kvadrantech dosahují asi 3/5 signálu dopadajícího na první kvadrant. Přeslech v posledním kvadrantu je zřetelně menší než u sousedních a tvoří ho asi 1/3 velikosti napětí na prvním kvadrantu. I když jsou přeslechy značné, bude je možné rozlišit podle poměru velikostí ze všech čtyř diod. Dalším měřením je velikost detekovaných napětí, pokud je optický svazek namířen do středu čtyřkvadrantového detektoru tak, aby opt. svazek překrýval všechny čtyři kvadranty najednou. V následující tabulce jsou uveřejněny hodnoty, jenž byly takto naměřeny na druhém a třetím kvadrantu.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty napětí na diodách, když opt. svazek směřuje na střed 4kv. detektoru.

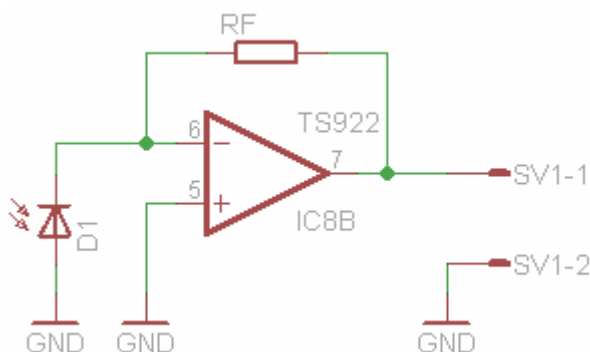
| | kvadrant nahore vpravo | kvadrant dole vlevo |
|-------|---------------------------|------------------------|
| P[mW] | U[mV] | U[mV] |
| 1,04 | 415 | 412 |
| 0,90 | 412 | 410 |
| 0,80 | 407 | 408 |
| 0,70 | 402 | 407 |
| 0,60 | 406 | 398 |
| 0,50 | 399 | 397 |
| 0,40 | 397 | 387 |
| 0,30 | 389 | 381 |
| 0,20 | 383 | 365 |
| 0,10 | 302 | 399 |

3.2 Zesílení detekovaného signálu

Jelikož nejdříve bylo předpokládáno jiné konstrukční uspořádání čtyřkvadrantového detektoru, jsou zde uvedeny dvě možnosti konstrukce.

3.2.1 Optoelektrický převodník

Detekce záření bude provedena pomocí výše uvedeného čtyřkvadrantového detektoru. Výstupní již elektrickou veličinu z detektoru je nejdříve potřeba zesílit na určitou úroveň, která bude vyhovující pro další zpracování signálu. Jako jedna z možností zapojení je optoelektrický převodník s operačním zesilovačem. Což je transimpedanční zesilovač zapojený s fotodiodou na invertujícím vstupu, která má uzemněnou anodu. Dioda se v tomto zapojení chová jako zdroj proudu. Tento zesilovač pak může být napájen jen kladným napětím.



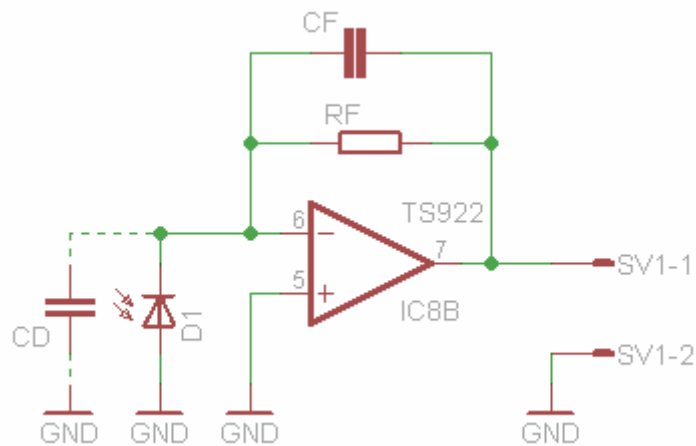
Obrázek 17: Optický převodník s transimpedančním zesilovačem.

Pokud mají fotodiody ve 4-kvadrantovém detektoru aktivní plochu S_A , spektrální citlivost S_λ a intenzita světla je Φ , výkon dopadající na diodu bude $P = \phi \cdot S_A$.

Samotné zapojení operačního zesilovače je v režimu převodník proud-napětí. Napětí na výstupu bude tedy o velikosti:

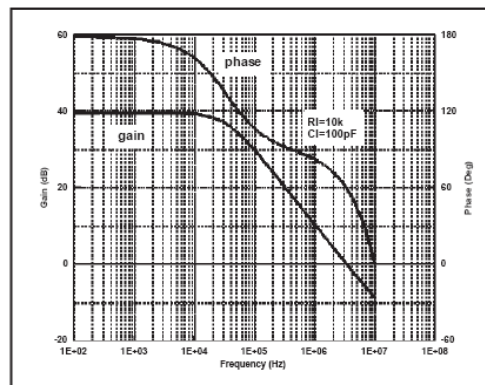
$$U_0 = -R_F \cdot I_Z \quad (12)$$

Jak bylo uvedeno výše, tak samotná dioda má značnou kapacitu. Pak tedy, když zvolíme R_F vysoké kvůli zesílení, ovlivníme tím i časovou konstantu $\tau = R_F \cdot C_D$. Dalším aspektem při volbě hodnot pasivních součástek je snaha se vyhnout oscilaci, jež způsobuje vstupní kapacita operačního zesilovače. K zabránění tomuto nežádoucímu jevu lze předejít upravením schématu podle následujícího obrázku 18.



Obrázek 18: Upravené zapojení

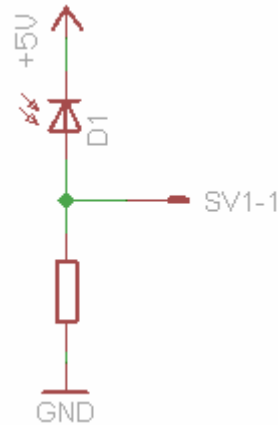
Pro optoelektrický převodník lze zvolit např. nízkošumový operační zesilovač TS922. Tento Real-to-real (napájení 2,7-12V) zesilovač se vyznačuje nízkým šumem ($9\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$), vysokým výstupním proudem 80mA (při zátěži 32Ω), velkou rychlostí 4MHz a je vyráběn v pouzdru SO8.



Obrázek 19: Závislost zesílení a fáze na frekvenci [16].

Druhou možností je zapojení diody v tzv. fotovodivostním režimu, kdy se dioda chová jako pasivní součástka, která má svůj odpor závislý na osvětlení. Toto zapojení

jsem užil i v mém případě, když jsem měl k dispozici detektor s uspořádáním se společnými katodami. Při změně osvětlení se pak proud fotodetektořem a tedy i napětí na rezistoru.



Obrázek 20: Dioda v odporovém režimu.

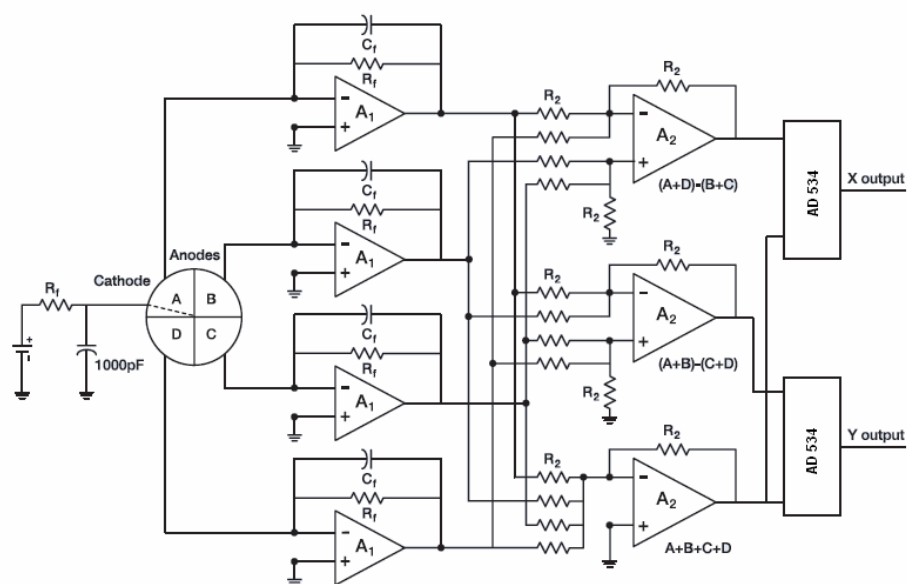
3.2.2 Zapojení s analogovou úpravou signálů

Jednou z možností zjišťování polohy je zapojení uvedené v [13], kde katoda čtyřkvadrantového detektoru je napájena napětím pomocného zdroje. Jednotlivé anody jsou pak připojeny na převodníky proud-napětí tvořeny operačními zesilovači se zesílením A_1 . Na jednotlivých výstupech převodníků dostáváme čtveřici napětí. Jednotlivé napětí je úměrné velikosti optického výkonu dopadajícího na příslušný segment detektoru. Úkolem senzoru polohy optického svazku je vytvořit na výstupu elektrické veličiny, jež budou signalizovat polohu optického svazku od středu čtyřkvadrantového detektoru. Vytvoří tedy dva signály reprezentující odchylku v ose X a Y.

$$X = \frac{(A+D)-(B+C)}{A+B+C+D} \quad (13)$$

$$Y = \frac{(A+B)-(C+D)}{A+B+C+D} \quad (14)$$

Kde A, B, C, D jsou napětí za převodníky jednotlivých segmentů. Obvodově toho docílíme použitím dalších dvou operačních zesilovačů zapojených jako kombinace součtového a rozdílového zesilovače pro výpočet převážující části dopadu optického svazku v dané polorovině. Polarita napětí udává, v jaké polorovině paprsek převládá. Třetí OZ je zapojen jako součtový zesilovač, kde se sčítají všechna čtyři napětí, aby se pak pomocí obvodu analogové násobičky mohl vytvořit relativní poměr. Ten je důležitý pro odstranění vlivu intenzity dopadajícího svazku. Takže výstupní napětí nám dává jen představu o pozici svazku jakékoliv intenzity.

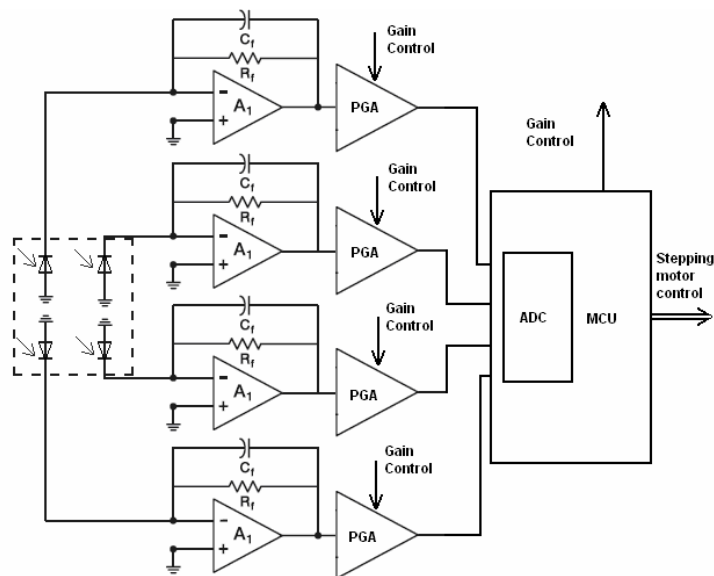


Obrázek 21: Typické zapojení obvodu pro detekci polohy optického svazku [13].

Zapojení s digitálním výpočtem pozice

Praktičtější a mnou vybrané je zapojení, kdy úrovně jednotlivých napětí příslušných segmentů zesílíme nejlépe pomocí zesilovačů s říditelným zesílením. Jednotlivé napětí s upravenou úrovní pak převádíme na analogově číslicový převodník. Vzniklý číslicový signál je předán mikroprocesoru, který v prvním kroku zkontroluje a popřípadě pozmění zesílení říditelných OZ, aby úroveň pro AD převod byla co nejideálnější.

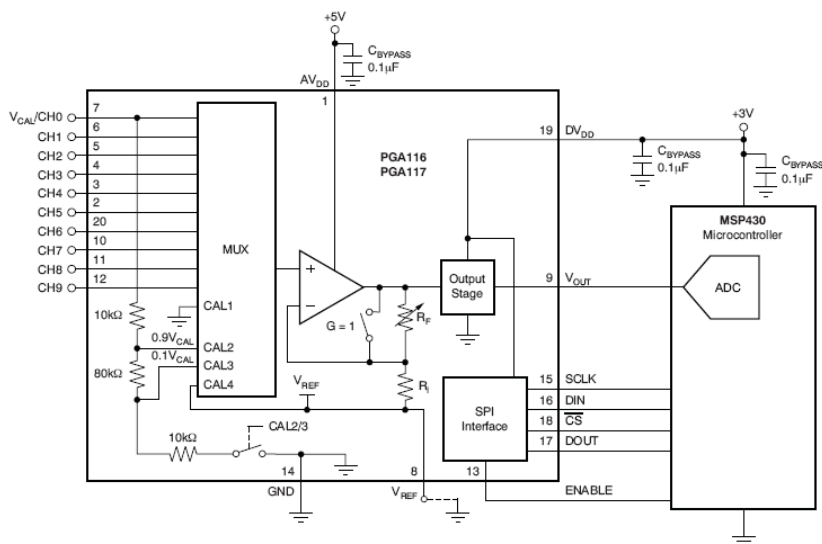
V druhém kroku pracuje mikroprocesor, kdy musí rozhodnout, zda detekované signály nejsou šumy. Následně proběhne algoritmus, kdy MCU porovná velikosti naměřeného napětí. Rozhodne, zda se jedná o přeslechy, nebo zda optický svazek dopadá na více kvadrantů. Výsledek srovnání rozhoduje o posunutí krokového motoru v daném směru. Jak pro osu X tak i pro osu Y.



Obrázek 22: Zapojení obvodu pro digitální výpočet detekce polohy optického svazku.

3.2.3 Digitálně řízené zesílení

Než se signál převede z analogové hodnoty na digitální, je ho potřeba patřičně zesílit. K tomu dopomůže operační zesilovač s řízeným zesílením. Mezi tyto OZ patří obvody PGA116 (binární zesílení) a PGA117 (desítkové zesílení) od výrobce Texas Instruments. Jsou to Real-to-real nízkošumový zesilovače ($10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$) s deseti přepínatelnými vstupy pomocí vnitřního multiplexoru viz obrázek 22.

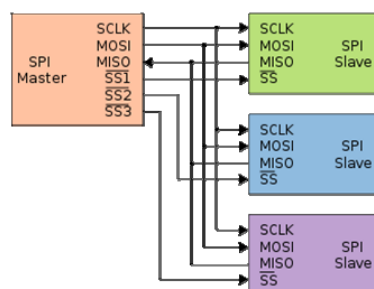


Obrázek 23: Vnitřní struktura obvodu PGA116 (PGA117).

Řízení zesílení probíhá u těchto obvodů pomocí sériového periferního rozhraní SPI. Je k tomu použita Trojice signálů DOUT (MISO), DIN (MOSI), SCLK a CS (SS).

Serial Peripheral Interface

SPI je sériové periferní rozhraní používající se hlavně ke komunikaci mezi mikroprocesory a periferními integrovanými obvody jako je paměť, A/D převodníky a displeje. Zařízení na sběrnici se dělí na Master, který řídí pomocí signálů SS0 až SSn podřízené Slave, který bude následně s hodinovým signálem po sběrnici komunikovat.



Obrázek 24: Serial Peripheral Interface [18].

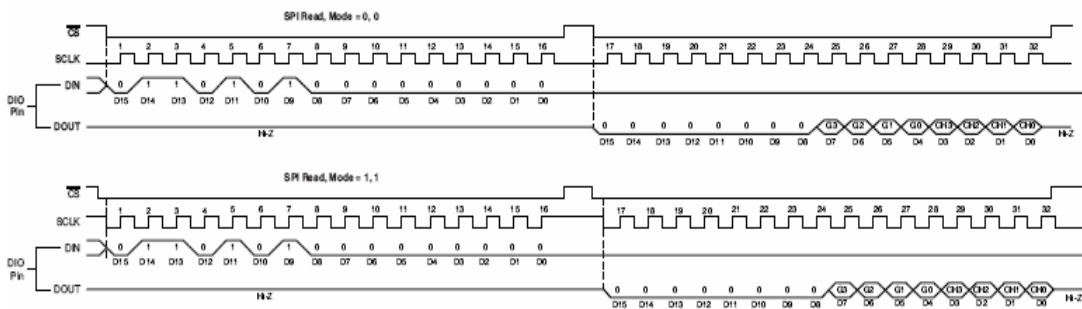
Komunikace tedy probíhá tak, že master nastaví u zařízení, s kterým chce komunikovat, SS log. 0. Následně začne generovat hodinový signál SCLK a v tu chvíli začne komunikaci se Slave, kdy po MOSI (Master výstup, Slave vstup) odesílá data Master a po MISA (Master vstup, Slave výstup) data odesílá Slave. Komunikaci opět ruší Master, tím že přestane vysílat SCLK a na SS změni do log. 1.

Při komunikaci rozhodují o vztahu (polaritou a fází) mezi hodinovým signálem a daty konfigurační bity CPOL a CPHA. Bit CPOL udává klidovou úroveň hodinového signálu (CPOL=0...klid. poloha je log. 0). Druhý bit CPHA udává při jakém přechodu hodin je čtena hodnota dat (CPHA=0...hodnota je čtena při přechodu z klidové do aktivní hodnoty). Podle těchto bitů lze SPI sběrnici rozdělit na módy, viz tabulka.

Tabulka 2: SPI módy.

| Mode | CPOL | CPHA |
|------|------|------|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 2 | 1 | 0 |
| 3 | 1 | 1 |

U obvodů PGA116/117 je nastavení zesílení a kanálu prováděna pomocí 16 bitů podle následujících tabulek.



Obrázek 25: Komunikační protokol PGA116/117

Tabulka 3: význam bitů SPI komunikace.

| D15 | D14 | D13 | D12 | D11 | D10 | D9 | D8 | D7 | D6 | D5 | D4 | D3 | D2 | D1 | D0 | SPI |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Čtení |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | G3 | G2 | G1 | G0 | CH3 | CH2 | CH1 | CH0 | Psaní |

Tabulka 4. Nastavení zesílení u PGA116/117.

| G3 | G2 | G1 | G0 | Binární zesílení | Normální zesílení |
|----|----|----|----|------------------|-------------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 4 | 5 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 8 | 12 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 16 | 20 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 32 | 50 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 64 | 100 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 128 | 200 |

Tabulka 5: Přepínání kanálů.

| CH3 | CH2 | CH1 | CH0 | PGA116/117 |
|-----|-----|-----|-----|------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | CH0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | CH1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | CH2 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | CH3 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | CH4 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | CH5 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | CH6 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | Ch7 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | CH8 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | CH9 |

3.3 A/D převod

Většina fyzikálních veličin má analogový charakter. Aby mohl být změřený signál zpracován pomocí PC, musí se signál převést ze spojité podoby na diskrétní (neboli digitální). Zmíněný převod provádí A/D převodník. U A/D převodníku bývá jako vstupní veličina většinou napětí a jako výstup pak datové slovo.

Samotný převod je prováděn ve dvou krocích - vzorkování a kvantování. Vzorkování znamená rozdělení průběhu signálu na určité množství vzorků. Z každého se vždy bere jen jedna hodnota. Při každém vzorkování je třeba dbát na aliasing, což je chyba vzorkování frekvencí, která není, jak říká Shannonův teorém, minimálně dvakrát větší než nejvyšší frekvence harmonické složky signálu. Druhou částí je kvantování, kdy každému vzorku přiřadíme velikost.

Při přidělování hodnoty kvantovacím úrovním se používá několik druhů kódování. Mezi základní patří:

- přímý dvojkový kód
- dvojkový kód prvního doplňku
- dvojkový doplňkový kód
- posunutý dvojkový kód
- dvojkově desítkový kód BC

Parametry převodníku se dají rozdělit na dvě skupiny. První skupinou jsou parametry určené z převodní charakteristiky, které nazýváme statické (více je uvedeno v [9]). Mezi statické parametry patří:

- rozsah
- přesnost
- chyba monotónnosti
- chyba nastavení nuly
- integrální nelinearita INL a diferenciální nelinearita DNL
- rozlišení převodníku
- a např. hystereze

Druhou skupinou parametrů jsou dynamické parametry, které se vyhodnocují z frekvenčního spektra.

- odstup signál-šum SNR
- harmonické zkreslení THD
- efektivní počet bitů ENOB
- SINAD-odstup signál-šum a zkreslení
- SFDR- dynamický rozsah bez parazitních složek a další.

Jednou z možností, jak docílit A/D převod, je použití A/D převodníků

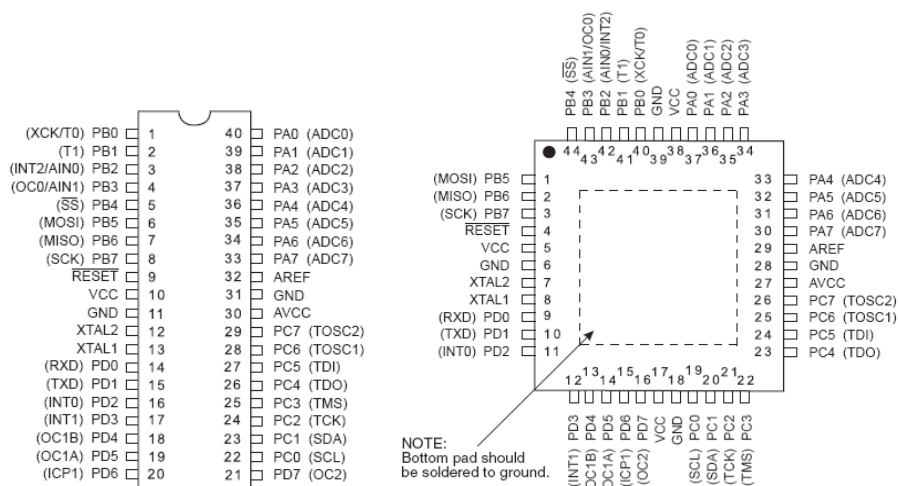
v mikrokontroléru.

3.4 Mikrokontrolér

Veškeré řízení a logiku bude mít na starosti jednočipový mikrokontrolér. Pro Dig. zap. dat je volen ATmega16, nízkopříkonový 8bitový mikrokontroler založený na rozšířené architektuře AVR RISC [10].

- pouzdro DIP 40, TQFP 44
- paměť programu – vnitřní Flash 16kB (počet přeprogramování 1000 cyklů)
- datová paměť RAM – 1 kB
- datová paměť EPROM 512B
- 4 x osmibitový vstupně výstupní porty (celkem 32 pinů)
- 32 osmibitových registrů
- 2 x osmibitové a 1 x šestnáctibitový časovač/čítač
- 4 x PWM kanály
- A/D převodník (desetibitový), analogový komparátor
- zabudovaný RC oscilátor
- jednotky WDT, Power-on reset
- jednotky UART, SPI, TWI (podpora I²C)
- rozhraní JTAG

Na následujícím obrázku 25 je uvedeno, rozložení pinů jak pro pouzdro DIP 40 tak i pro TQFP 44. Jak bylo zmíněno, tak Atmega16 obsahuje 32 vstupně výstupních pinů. Protože má obvod celkem 40 pinů, sdílí vst/výst. porty piny s ostatními perifériemi. Tedy s použitou periférií se možnost použití portu ztrácí.



Obrázek 26: Uspořádání vývodů u mikrokontroleru ATmega16 [11].

Tabulka 6: Názvy a významy vývodů u ATmega16 [10].

| Vývod: | Název/význam: |
|---|--|
| PA _x , PB _x , BC _x , PD _x | vstupně výstupní porty |
| XCK | Hodinový signál pro synchronní režim USART |
| T0 | Hodinový vstup čít./čas. 0 |
| T1 | Hodinový vstup čít./čas. 1 |
| INT0 | Vstup vnějšího přerušení 0 |
| INT1 | Vstup vnějšího přerušení 1 |
| INT2 | Vstup vnějšího přerušení 2 |
| AIN0 | Vstup analogového komparátoru (+) |
| AIN1 | Vstup analogového komparátoru (-) |
| SS | Slave Select kanálu SPI |
| MOSI | Master Out/Slave In kanálu SPI |
| MISO | Master In/Slave Out kanálu SPI |
| SCK | Hodinový signál SPI |
| RESET | Nulovací vstup |
| RXD | Vstup USART |
| TXD | Výstup USART |
| OC0 | Output Compare čít./čas. 0 |
| OC1A | Output Compare čít./čas. 1 (kanál A) |
| OC1B | Output Compare čít./čas. 1 (kanál B) |
| OC2 | Output Compare čít./čas. 2 |
| ICP | Input Compare čít./čas. 1 |
| ADC _x | Kanály AD převodníku |
| TDI | JTAG rozhraní (vstup) |
| TDO | JTAG rozhraní (výstup) |
| TMS | JTAG rozhraní - výběr režimu |
| TCK | JTAG rozhraní – hodinový signál |
| SDA | Datový signál TWI (I ² C) |
| SCL | hodinový signál TWI (I ² C) |

3.4.1 A/D převodník mikrokontroléru ATmega16

Jak bylo uvedeno mikrokontrolér ATmega16 je opatřen interním A/D převodníkem, který lze dobře použít pro měření napětí a po přidání externího převodníku i pro jiné fyzikální veličiny. Jeho A/D převodník pracuje na základě postupné aproximace. Na jeho vstupu je připojený multiplexer, který na vstup přepíná piny ADC0-ADC7 nebo

referenci 2,56V či pin analogové země AGND. Vstupy lze sledovat normálně nebo diferenčně. Vzorkování obstarává obvod S/H a zesilovač, který při vzorkování udržuje stejnou hodnotu napětí. Výsledkem je desetibitové slovo.

Základní parametry AD převodníku [10]:

- 10 bitové rozlišení
- integrální nelinearita 0,5 LSB
- absolutní chyba ± 2 LSB
- doba převodu 65 až 260 μ s
- rychlost převodu až 15kSPS
- 7 diferenční vstupní kanály
- režimy jednoduchý převod, automatické spuštění nebo volný běh
- přerušení po dokončení převodu, atd.
- možnost spouštět A/D převod pomocí dalšího přerušení
- potlačení šumu v režimu Idle

3.5 Komunikace mezi mikrokontrolérem a PC

Jak bylo zmíněno výše, mikrokontrolér může komunikovat pomocí UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter). V dnešní době je však vhodné, aby komunikace s PC byla přes rozhraní USB (Universal Serial Bus), které je v současnosti nejvíce používané. Jedno z řešení je použití integrovaných obvodů od britské firmy FTDI (Future Technology Devices International Ltd.). Pomocí těchto integrovaných obvodů se pak zařízení připojené přes USB jeví z hlediska PC jako připojené přes sériový port.

Dnes je na trhu několik obvodů od této firmy, které se liší různým využitím a parametry:

FT232 je převodník USB – USART disponující přenosovou rychlostí 300 Bd až 3MBd. Integrovaný obvod obsahuje také interní vyrovnávací paměť o velikosti 384B (PC→zařízení) a 128B (zařízení→PC). Komunikace prostřednictvím RS 232 je pomocí tří hlavních vodičů RXD (příjem), TXD (vysílání) a společné zemi GND. FT232BM zpracuje i další signály pro plné hardwarové řízení (RTS, CTS, DTS, DTR, DSR, DCD). Obvod může pracovat jak s 5V tak i 3,3V logikou. Napájecí napětí je 4,35-5,25V a je možné ho napájet přímo z USB.

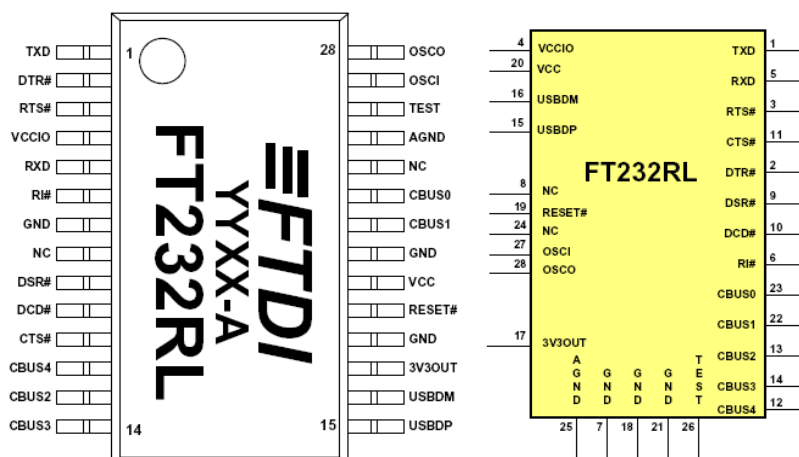
Na trhu jsou od firmy FTDI varianty FT232BM, FT232BL a FT232BQ, které se liší pouze typem pouzdra.

Nejnovější varianta tohoto čipu je prodávána pod názvem FT232RL. Naproti předešlým typům má následující změny:

- integrované hodiny (6, 12, 24 a 48 MHz), které mohou být vyvedeny
- integrovaná 1024 B interní EEPROM.
- možnost připojení 5V; 3,3V; 2,8V; 1,8V logiku

- integrované USB rezistory
- napájecí napětí 3,3 – 5,25V

Na následujícím obrázku je naznačeno rozmístění pinů u FT232R a tabulce 7 jejich pojmenování a význam.



Obrázek 27: Rozložení pinů u FTDI FT232RL.

Tabulka 7: Názvy a významy vývodů u FTDI FT232RL [15].

| Název: | Význam: |
|-----------------------------------|--|
| TXD, RXD | Výstup a vstoup UART. |
| DTR#, RTS#, RI#, DSR#, DCD#, CTS# | Signály pro RS232. |
| VCC | Napájení IO (3,3 – 5,25V). |
| GND | Zemnicí pin. |
| VCCIO | Napájení pro UART a CBUS. |
| AGND | Analogové země. |
| 3V3OUT | Výstupní napětí 3,3V. |
| RESET# | Externí reset. |
| OSCI, OSCO | Piny pro připojení externího oscilátoru 12MHz. |
| USBDP, USBDM | Piny pro připojení USB rozhraní |
| CBUS0-4 | Konfigurovatelný CBUS port. |

FT245 je převodník USB na FIFO a dosahuje maximální přenosovou rychlost 1MB/s. Opět má integrovanou vyrovnávací paměť o velikosti 384B (PC→zařízení) a 128B (zařízení→PC). Čip lze připojit k 5V i 3,3V logice. Napájecí napětí je 4,35V – 5,25V.

FT2232 je jednočipový dvojitý převodník USB – UART/FIFO. Přičemž může být každý nakonfigurovaný v jiném režimu.

3.6 Krokový motor a jeho řízení

K posunu čtyřkvadrantové fotodiody budou použity dva krokové motory, které mají čtyři vývody. Jedná se tedy o bipolární motory a to typu SX17-0602. Katalogové listy uvádějí parametry, viz následující tabulka 8.

Tabulka 8: Technické parametry krokového motoru.

| Typ | Statistický moment (Nm) | Jmen. proud (A) | Indukčnost (mH) | Odpor (Ω) | Zbytkový moment (Nm) | Moment setrvačnosti rotoru (gcm ²) | Hmotnost (kg) |
|-----------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------|----------------------|--|---------------|
| SX17-0402 | 0,22 | 0,42 | 38,4 | 20 | 0,02 | 35 | 0,22 |

Dále je třeba uvést, že motorek je konstruován pro velikost kroku 0,9° s tolerancí ±0,1°.

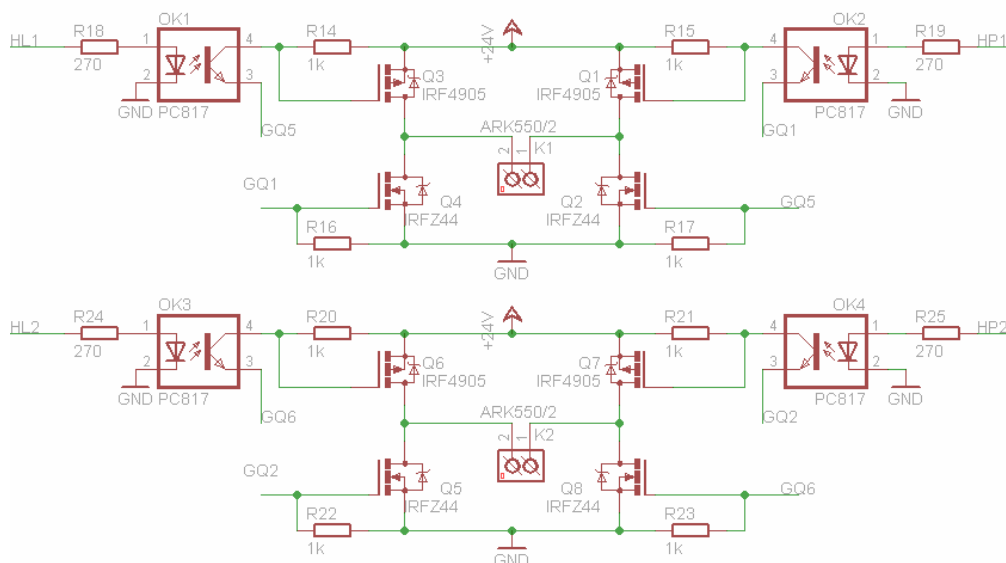
Bipolární krokový motor má naproti unipolárnímu motoru složitější řízení. K řízení se používá H–můstek, jenž obsahuje čtyři spínací prvky. Pro řízení bipolárního motoru se dvěma vinutími je potřeba dva můstky. Jako spínací prvky budou použity MOSFET tranzistory typu IRF4905 a IRFZ44, které budou spínány pomocí optočlenů PC817. Výpočet odporů omezující proud optočlenem:

$$R_{18,19} = \frac{U_{HL} - U_{OPT}}{I_{INOP}} = \frac{5 - 1,2}{0,01} = 380 \cong 390\Omega$$

Pro otáčení motoru se musí dodržovat posloupnost znázorněná v následující tabulce. Kdy se přepíná polarita napětí na obou vinutí motoru.

Tabulka 9: Posloupnost spínání krokového motoru.

| Krok | A | A' | B | B' |
|------|---|----|---|----|
| 1. | + | - | - | + |
| 2. | - | + | - | + |
| 3. | - | + | + | - |
| 4. | + | - | + | - |



Obrázek 28: Schéma H – můstku.

4 CELKOVÉ SCHÉMA A VÝVOJOVÝ DIAGRAM PRO OBSLUŽNÝ PROGRAM

Celkové schéma (viz příloha B) nakonec doplní už jen zdrojová část obvodu. DZ bude napájen stejnosměrným napětím o hodnotě 24V. Toto napětí dále upraví stabilizátory na požadované napětí 5V. Jedna větev bude napájet krokové motory, druhá větev digitální část a třetí větev analogovou část.

4.1 Popis programu procesoru

Na následujícím obrázku 30. je uveden vývojový diagram obslužného programu mikroprocesoru. Hlavní funkce main() nejdříve vyvolá funkce usart_init(), adc_init(), spi_init() a povolí přerušení.

Funkce usart_init() povolí vysílání USART (registr UCSRB bit TXEN), příjem (registr UCSRB bit RXEN), přerušení po příjmu (registr UCSRB bit RXCIE) a nastaví osmi bytové slovo (registr UCSRC bity UCSZ0-2) a rychlost přenosu (registry UBRR0L, UBRR0H).

Funkce adc_init() nastaví referenci (registr ADMUX bit REFS0), zapne převodník (registr ADCSRA bit ADEN) a nastaví předděličku (ADPS0-ADPS2).

Funkce spi_init() nastaví příslušné porty jako výstupní a pomocí registru SPCR aktivuje bit SPE SPI kanál, bit MSTR určí procesor jako mastera a bit SPEI povolí přerušení pomocí dokončené komunikace SPI.

Zbytek funkce main tvoří nekonečná smyčka, která podle přijatých instrukcí v podobě znaku char od PC určuje jaký výkon se má vykonávat. První možný přijatý char znak je 's', což je začátek automatického hledání. Po této instrukci změní program

napětí na všech rezistorech, které úměrně odpovídají intenzitě dopadajícího světla na jednotlivé kvadranty. Uloží si je do proměnných a postupně přejede do všech rohů rozsahu a spočítá průměrnou hodnotu. Tato hodnota je výchozí pro zjištění, zda je na senzoru přítomen optický svazek. Po tomto úkonu přechází program do režimu vyhledávání. Z měření uvedené výše jsem určil rozhodovací poměr (HRANICE) pro následující podmínku, kdy intenzitu úměrnou naměřenému napětí považuji za intenzitu dopadajícího optického svazku. V proměnné `nejvetsi` je uložena hodnota z větve, kde se naměřilo největší napětí.

```

    If (okoli_1<(nejvetsi*HRANICE))
    {
    ...
    }

```

Samotné měření napětí se skládá z následujících bodů nejprve pomocí funkce `prevod()` zjistí čtyři velikosti signálů. Následuje zjištění nejnižšího zesílení a zesílení všech segmentů stejným zesílením. Pokud je signál zaměřen, tak se začne směřovat optický svazek na střed čidla.

Logika směřování paprsku spočívá v sečtení dvou sousedící kvadrantů a porovnání se součtem druhé dvojice kvadrantů, ke které přičteme toleranční konstantu `POM`.

```

if ((vstup_1+vstup_2)>(vstup_3+vstup_4+POM))
//zapojeno tak, ze 1 a 2 je leva část a 3 a 4 je pravá část
{if ((x<MAX) && (x>1))
{
    krok_x(x, ZPOZD);
    x++;
}
}

```

Pokud optický svazek není zaměřen, začne se senzor pohybovat s větším krokem systematicky po čtverci, který je schopno zařízení monitorovat. Další možností je navést senzor manuálně pomocí tlačítek tak, aby optický svazek na něj dopadal (zasílají se znaky '<', '>', 'u' a 'd').

Poslední instrukcí je zastavení procesu instrukcí 'k', kdy senzor opět dojde na počáteční souřadnice. Obslužný program je opatřen tlačítky `Err x` a `Err y`, které v případě neočekávané kolize, jako je nenadálé přerušování napájecího napětí, vrátí motory po opětovném připojení napájecího napětí do počáteční pozice.

Po celou dobu běhu programu je monitorována poloha `x` a `y`, kdy program hlídá, aby se nepřesáhly krajní pozice hřídelky motorů.

V programu jsou užita následující makra a funkce:

| | | |
|----------|-----|--|
| ZPOZDENI | ... | zpoždění užívané pro posun motoru |
| FOSC | ... | frekvence procesoru |
| BAUD | ... | rychlost přenosu pro USART |
| WRITE | ... | sekvence pro nastavení PGA |
| PROCENTO | ... | rozhodovací úroveň pro detekci opt. svazku |
| MAX | ... | maximální rozpětí motorů |
| KROK | ... | krok pro automatické hledání opt. svazku |

| | | |
|---|-----|--|
| SKOK | ... | krok pro manuální posun čidla |
| HRANICE | ... | rozhodovací poměr k rozlišení signálu od okolí |
| POM | ... | toleranční konstanta pro sledování opt. svazku |
| | | |
| usart_init(void); | ... | inicializace USART |
| adc_init(void); | ... | inicializace A/D převodníku |
| spi_init(void); | ... | inicializace SPI |
| krok_x(int x); | ... | funkce pro posun motoru v x-ové ose |
| krok_y(int x); | ... | funkce pro posun motoru v y-ové ose |
| prevod (uint8_t vstup); | ... | zjistí potřebné zesílení |
| zesileni(uint8_t zes,uint8_t vstup); | ... | zesílí kanál pomocí požadovaného zesílení |
| write_spi(uint8_t povel, uint8_t prikaz); | ... | pošle příkaz PGA |
| posli(int x, int y,int nas, int LH,int PH, int LD, int PD); | ... | pošle komunikační protokol obslužnému programu |

Funkce pro posunutí motoru fungují tak, že vstupní proměnná je již inkrementovaná a proto následná procedura rozhodne, který ze čtyř kroků má být proveden a podle toho nastaví porty pro ovládání optočlenů.

```
void krok_x(int x)
{
    switch (x&0x03){
        case 0:{PORTB|=0b00000001;PORTC|=0b00001000;} break;
        case 1:{PORTB|=0b00000010;PORTC|=0b00001000;} break;
        case 2:{PORTB|=0b00000010;PORTC|=0b00000100;} break;
        case 3:{PORTB|=0b00000001;PORTC|=0b00000100;} break;
    }
    _delay_ms(ZPOZDENI);
    PORTB&=~(1<<PB0|1<<PB1);
    PORTC&=~(1<<PC3|1<<PC2);
}
```

Funkce pro komunikaci SPI nejdříve nastaví SS do nízké úrovně a pak zapíše na registr SPDR sekvenci zapisovacího příkazu a čeká, až se dokončí komunikace. Následuje odeslání příkazu pro nastavení vstupu a zesílení PGA.

```

void write_spi(uint8_t povel, uint8_t prikaz)
{
    PORTB&=~(1<<PB4);
    SPDR=povel; //nastaveni vstupu
    while(!odeslano);
    odeslano=0;
    SPDR=prikaz;
    while(!odeslano);
    odeslano=0;
    PORTB|=(1<<PB4);
}

```

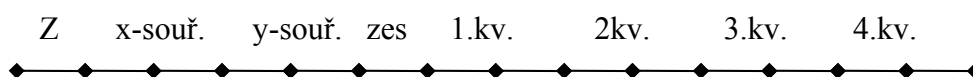
Komunikační protokol mezi procesorem a PC:

Obslužný program zasílá následující osmi bitové příkazy, jenž mají dvojkový význam následujících ASCi znaků:

| | | |
|-----|-----|---|
| ‘s‘ | ... | start programu |
| ‘p‘ | ... | zastavení programu |
| ‘>‘ | ... | manuální posun doleva |
| ‘<‘ | ... | manuální posun doprava |
| ‘u‘ | ... | manuální posun nahoru |
| ‘d‘ | ... | manuální posun dolů |
| ‘x‘ | ... | manuální posun do výchozí pozice případě neočekávané kolize |
| ‘y‘ | ... | manuální posun do výchozí pozice případě neočekávané kolize |
| ‘g‘ | ... | potvrzení příjmu paketu |
| ‘e‘ | ... | žádost o opětovné poslání paketu po kolizi |

Procesor zasílá buď komunikační paket s naměřenými hodnoty nebo informační hlášky:

Komunikační paket:



Obrázek 29: Komunikační paket.

Komunikační paket uvozuje ASCi znak ‘Z’, za kterým následují x a y souřadnice, hodnota zesílení a čtyři hodnoty naměřené na segmentech. Obslužný program v PC si hlídá přijaté pakety, a pokud je doručený poškozený paket, pošle si požadavek o opakování komunikace. Na druhé straně procesor čeká na potvrzení příjmu, aby se komunikaci neztrácela naměřená data.

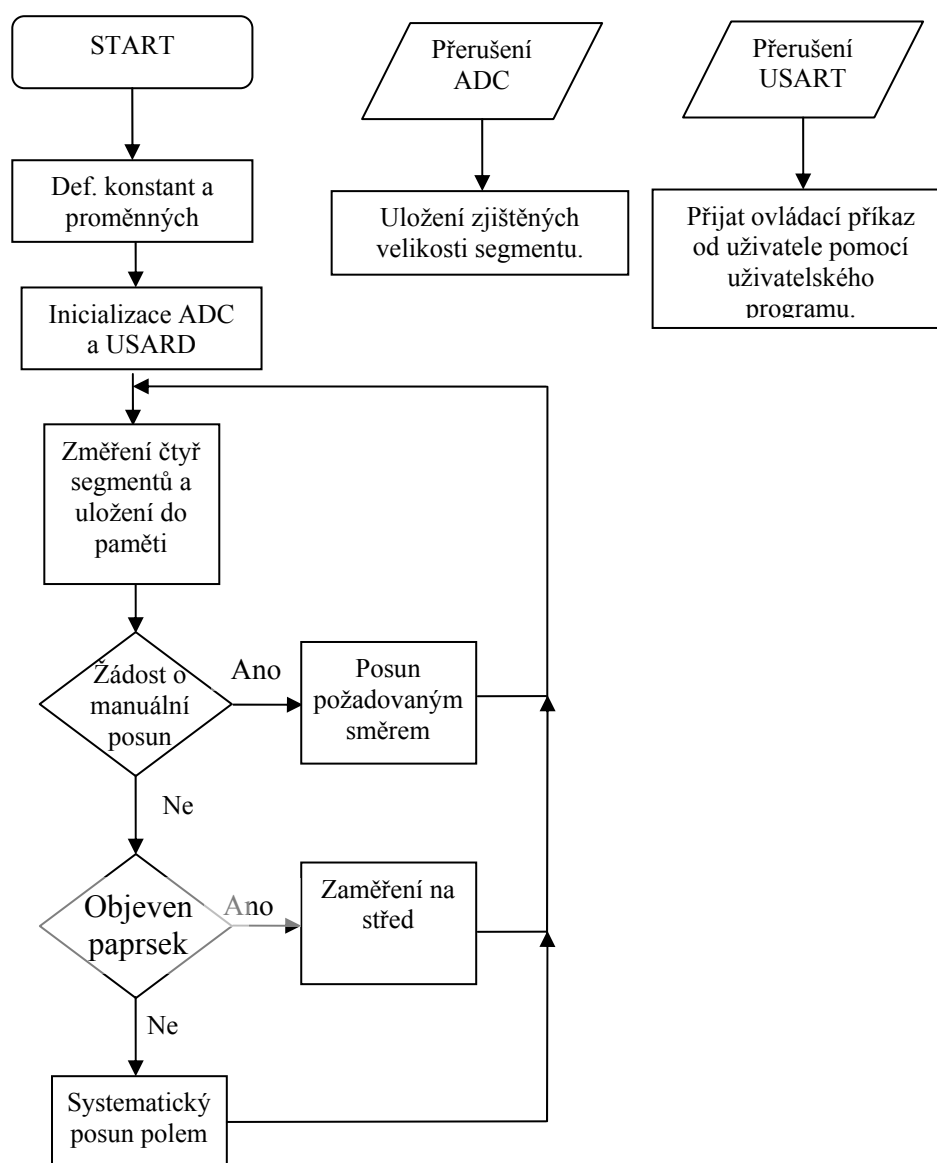
```

void posli(int x , int y,int nas, int LH,int PH, int LD, int PD)
{
do {
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //posle zahajovaci
byte
UDR='Z';
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //posle x souradnici
UDR=x;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=x>>8;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //posle y souradnici
UDR=y;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=y>>8;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //posle zesileni
UDR=nas;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //posle hodnotu 1 segmentu
UDR=LH;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=LH>>8;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //prilis hodnotu 2 segmentu
UDR=PH;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=PH>>8;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //prilis hodnotu 3 segmentu
UDR=LD;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=LD>>8;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE); //prilis hodnotu 4 segmentu
UDR=PD;
loop_until_bit_is_set(UCSRA,UDRE);
UDR=PD>>8;
while (potvrzeni==1);
potvrzeni=1;
} while (oprava==1);
oprava=0;
}

```

Zasílané chybové hlášky procesorem:

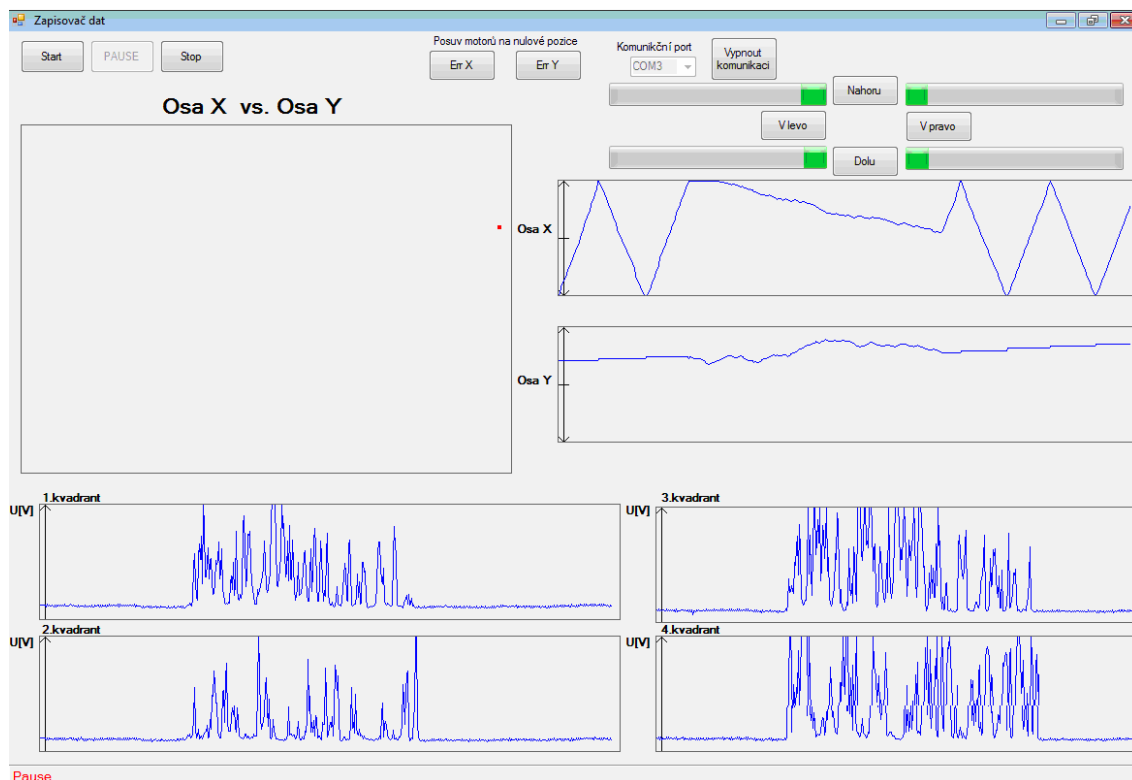
- ‘N‘ ... optický svazek nenalezen.
- ‘H‘ ... senzor se dostal nekrajní pozici posunu.



Obrázek 30: Vývojový diagram obslužného programu.

4.2 Popis obslužného programu pro PC

Obslužný program byl naprogramován jazykem C# ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010. Na následujícím obrázku je vyobrazen ovládací formulář programu.



Obrázek 31: Formulář obslužného programu.

Formulář obsahuje v horním pravém rohu nabídku komunikačního portu a tlačítko spouštějící komunikaci mezi zařízením a PC. Pokud není na tomto zařízení připojeno žádné zařízení, objeví se v dolním informačním řádku hláška o nepřipojení žádného zařízení na tomto portu: „No device detected on this port“. Nalevo od tlačítka spouštějící komunikaci se nacházejí tlačítka Err X a Err Y. Tyto tlačítka slouží k návratu motoru do počáteční pozice při nečekané kolizi. Vlevo nahoře pak jsou umístěna tlačítka Start, Pause a Stop, která zahajují, přerušují a ukončují funkci automatického vyhledání laserového paprsku a jeho následující sledování.

U prostřed formuláře jsou umístěny tlačítka pro manuální panel nazvaný picBox, ve kterém se zobrazuje posun optického svazku v 2D zobrazení. Vpravo od 2D zobrazení jsou umístěna tlačítka pro manuální posun senzoru, bargrafy znázorňující aktuální napětí na kvadrantech dvě postupně se vykreslující časové charakteristiky závislosti poloh x a y v reálném čase. V dolní části panelu se nacházejí čtyři časové charakteristiky jednotlivých napětí na segmentech.

4.2.1 Popis funkce programu

Program se spustí po kliknutí na tlačítko spustit komunikaci, jenž nejprve naváže komunikaci se zařízením pomocí sériového portu. Dojde k nastavení portu a přenosové rychlosti spojení. Poté následuje zpuštění nového vlákna, jenž běží na pozadí a obstarává rutinu ovládání programu, což způsobí možnost ovládání formulářem během přenosu dat. Nové vlákno přivoláme pomocí funkce:

```
Thread komunikace = new Thread(spustse);
komunikace.Start();
```

Nové vlákno v bloku try otevře sériový port a vyšle příkaz „g“, který signalizuje započítí komunikace a v informačním řádku 2 zobrazí velikost přenosové rychlosti:

```
if (!serialPort1.IsOpen)
    serialPort1.Open();
serialPort1.Write("g");
StavRadek1W("Komunikační rychlost: 250 kBaud", false);
```

Po této rutině následuje nekonečná smyčka, která sleduje kliknutí na další tlačítka. Tento podmět způsobí zaslání asci znaku popřípadě schování tlačítka.

Rutina po kliknutí na tlačítko:

```
private void ErrorYposunB_Click(object sender, EventArgs e)
{
if (KomBut.Text == "Vypnout komunikaci")
    posunY = true;
}
```

Rutina uvnitř nekonečné smyčky:

```
if (posunY)
{
posunY = false;
serialPort1.Write("y");
Thread.Sleep(20);
}
```

Dále je v nekonečné smyčce hlídáný příjem ze sériového portu pomocí funkce switch. Pokud je přijat zahajující znak ‘Z’ komunikačního paketu, je přijatý zbytek bytů a pomocí funkce cti(); jsou načteny poslané hodnoty od procesoru, které jsou hned zkontrolovány, zda jde o požadované hodnoty. Pokud se o ně nejedná je procesoru zaslána chyba o příjmu „e“. Vyčistí se vstupní buffer a odešle se potvrzení o příjmu. Poté se vyvolají funkce obsluhující bargraffy, uložení dat do souboru a funkce zajišťující překreslení všech grafů.

```
switch (serialPort1.ReadByte())
{
case 'Z':
    while (serialPort1.BytesToRead < 13)
        Thread.Sleep(1);
    if ((xPos = cti()) > 2300)
        {serialPort1.Write("e");
        chyba = true;}
    ...
    if ((prdoKvadrant = cti()) > 1024)
        {serialPort1.Write("e");
        chyba = true;
        }
    serialPort1.DiscardInBuffer();
    serialPort1.Write("g");
    if (!chyba)
        {UlozitDoSouboru(xPos.ToString()+" "+ ...
        "+ "+(nasobPrev).ToString());

    LHbarW(lehoKvadrant); //cteni bargrafu
    LDbarW(ledoKvadrant);
    PHbarW(prhoKvadrant);
    PDbarW(prdoKvadrant);
```

```

    Prefres(); //zapis do grafu
    Prefres2();
    ...
    Prefres7();
    }...}

```

Funkce cti() načte vždy dva byty

```

UInt16 cti()
{
    byte[] mala = new byte[2]; // alokace pameti
    if (serialPort1.BytesToRead >= 2) //podminka dvou zbyvajících bytu
    {
        serialPort1.Read(mala, 0, 2); //precteni dvou bytu
        return (BitConverter.ToUInt16(mala, 0));
    }
    else return (0xffff);
}

```

Do souboru se ukládá pomocí funkce UlozitDoSouboru. Při volání této funkce se do ní vkládá proměnná datového typu string. Proto je třeba převést integerové typy pomocí funkce ToString() na typ string a poté sestavit řetězec, který se bude ukládat.

```

UlozitDoSouboru(xPos.ToString() + ";" + yPos.ToString() + ";" +
    (lehoKvadrant).ToString() + ";" + (lehoKvadrant).ToString() + ";" +
    (prhoKvadrant).ToString() + ";" + (prdoKvadrant).ToString() + ";" +
    (nasobPrev).ToString());

```

Protože chceme aby, soubor který vytváříme mohl být přečten v tabulkovém kalkulátoru jako je Excel, tato funkce vytvoří soubor typu CSV. Hodnoty oddělujeme středníkem, což tento souborový formát vyhodnotí jako sloupce sloupců. Nejdříve vytvoříme soubor s názvem vysledek_mereni.csv a pak pomocí funkce WriteLine(sb) do něj ukládáme vytvořené řetězce.

```

FileInfo fi=new FileInfo(Path.Combine(Environment.CurrentDirectory,
    "vysledek_mereni.csv"));
...
public void UlozitDoSouboru(string sb)
{
    StreamWriter sw = fi.AppendText();

    sw.WriteLine(sb);
    sw.Close();
    fi.Refresh();
}

```

Poslední důležitou částí je vykreslování aktuálního pohybu v pictureBoxu pomocí následující rutiny, která zobrazuje pohyb a velikost bodu úměrnému zesílení pomocí funkce e.Graphics.FillEllipse, kterou jsou vykreslovány i časové průběhy, kdy se v každém cyklu přepisují hodnoty pole o velikosti okna grafu a pokaždé se celý graf překreslí:

```

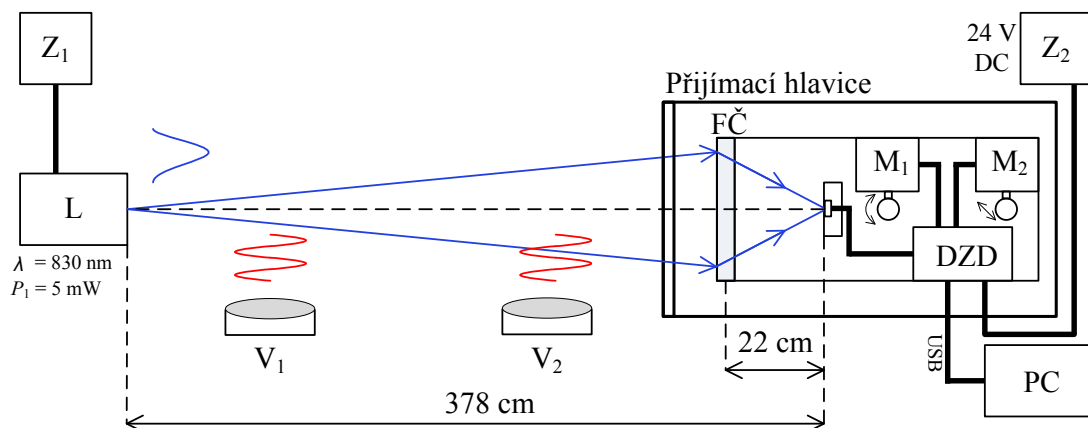
private void pictureBox_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{
    if (nasobPrev == 200) velBod = 5 ;
    if (nasobPrev == 100) velBod = 6;
    if (nasobPrev == 50) velBod = 7;
    if (nasobPrev == 20) velBod = 8;
    if (nasobPrev == 10) velBod = 9;
    if (nasobPrev == 5) velBod = 10;
    if (nasobPrev == 2) velBod = 12;
    if (nasobPrev == 1) velBod = 14;
}

```

```
e.Graphics.FillEllipse (Brushes.Red, xPos * (pictureBox.Width-velBod-3) / 2200, yPos * (pictureBox.Height-velBod-3) / 2200, velBod, velBod);
}
```

5 MĚŘENÍ A OVĚŘENÍ FUNKCE AKTIVNÍHO VYHLEDÁVÁNÍ OPT. SVAZKU

Měření byla prováděna v laboratoři Optoelektroniky a fotoniky na Ústavu radioelektroniky FEKT VUT za světla zářivek. Měření bylo provedeno na pracovišti znázorněné na následujícím obrázku. K otestování byl použit polovodičový laser o vlnové délce 830nm, divergenci 2mRad, vysílací apertury 20mm a výkonu 5mW ve vzdálenosti 378cm od čtyřkvadrantové diody. Konfigurace tohoto laseru odpovídá používaným laserům u těchto hlavic. Přijímací hlavice, do které byl zapisovač zamontován má na vstupu ve vzdálenosti 22 cm od senzoru Fresnelovu čočku. Digitální zapisovač dat DZD byl napájen stejnosměrným zdrojem Diametral P230R51D o napětí 24V.

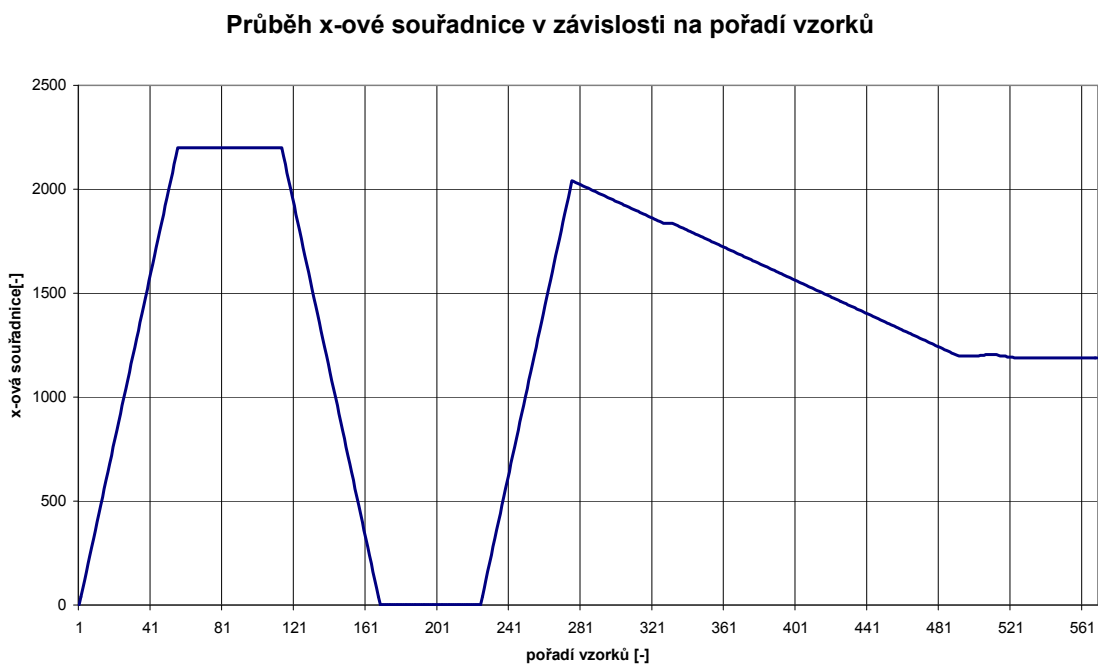


Obrázek 32: Zapojení pracoviště při zkušebním měření.

První série grafů znázorňuje průběhy x a y-ových souřadnic a měřených napětí úměrných dopadajících intenzit na jednotlivé kvadranty při vyhledávání středu optického svazku.

Na průbězích x a y-ové osy je nejdříve vidět, jak senzor objede rohové body kvůli zjištění průměrné velikosti napětí odpovídající intenzitě světla okolí. Pak protože měřený laser měl velmi vysoký výkon, senzor hned zaznamenal přítomnost optického svazku a jeho Gausovo rozložení intenzity ho přímo navedlo do středu svazku. Potom co senzor najde střed svazku, hlídá poměr na kvadrantech a v závislosti na zadané citlivosti konstantou POM popřípadě pohybuje senzorem. Při měření bylo nastaveno, aby pohyb hlavic způsobila změna součtu dvojice kvadrantů o 1,9 % z rozsahu. U námi průměrně naměřených 1,56V je to úbytek 49mV pro jeden kvadrant.

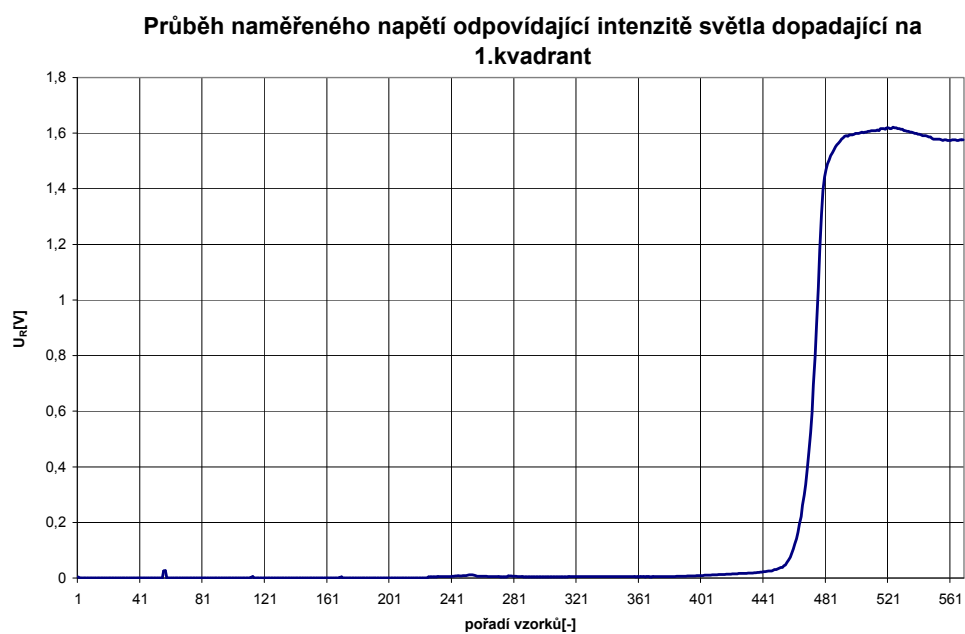
Podle potřeby lze toto číslo zmenšit až na chybu A/D převodníku.



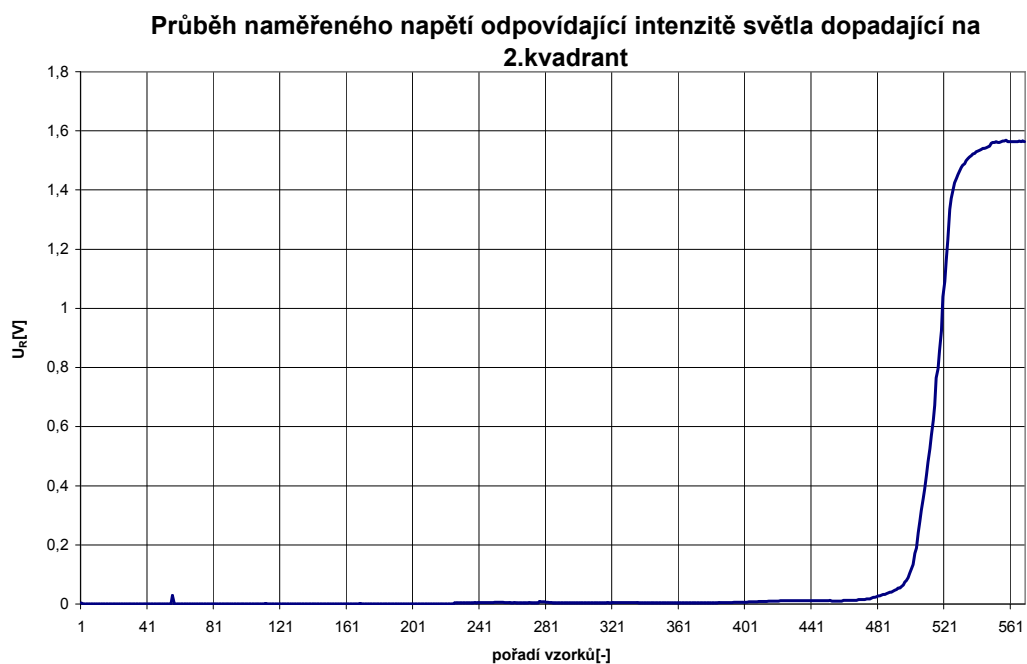
Obrázek 33: Posun senzoru v x-ové ose při vyhledávání optického svazku.



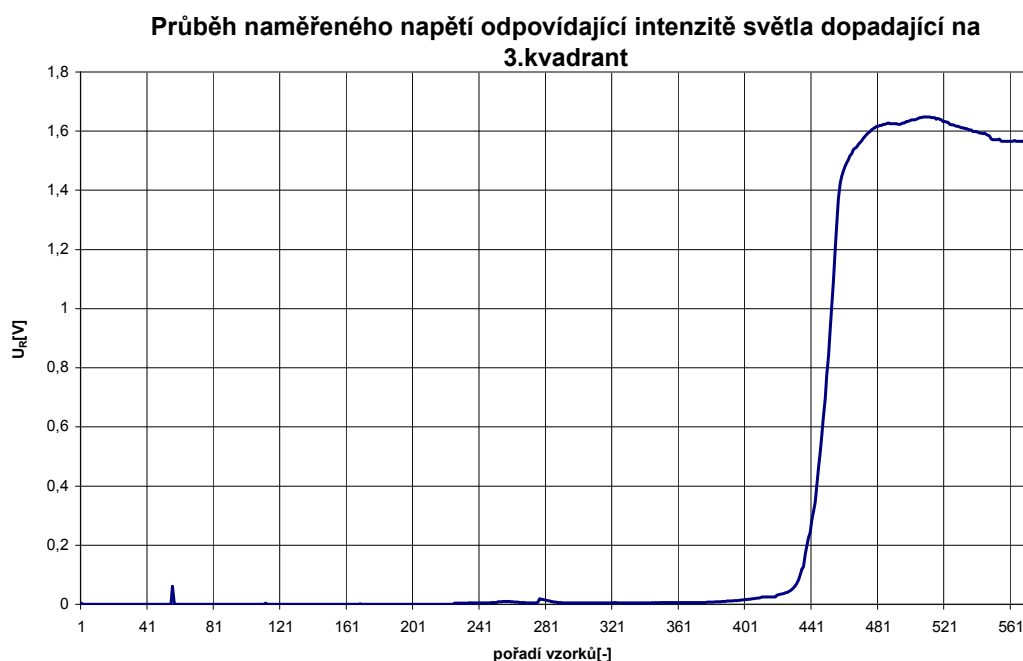
Obrázek 34: Posun senzoru v y-ové ose při vyhledávání optického svazku.



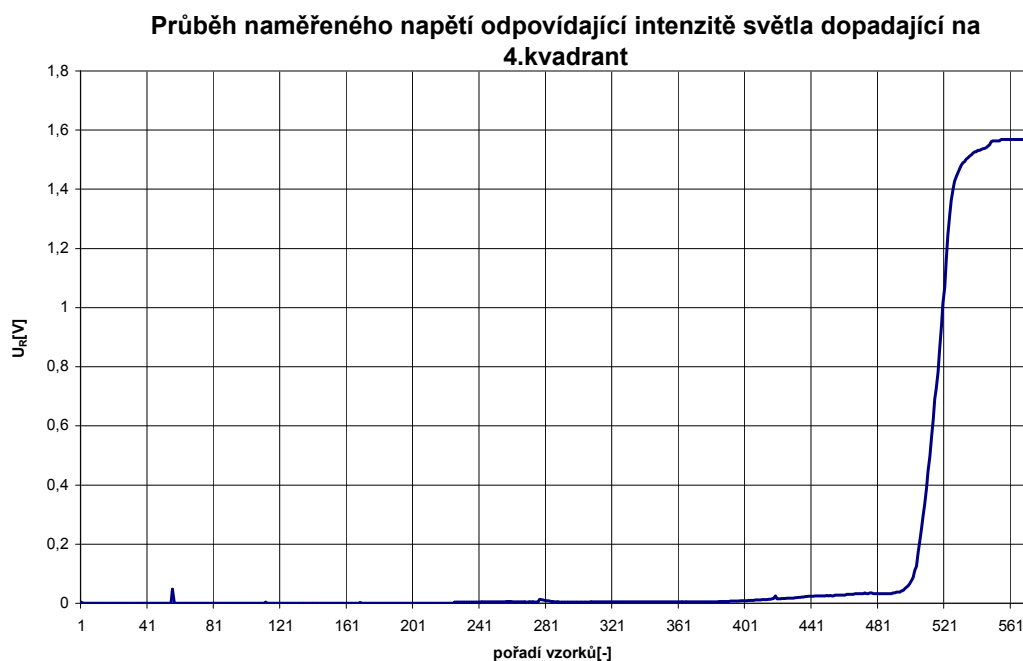
Obrázek 35: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 1. kvadrant.



Obrázek 36: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 2. kvadrant.



Obrázek 37: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 3. kvadrant.

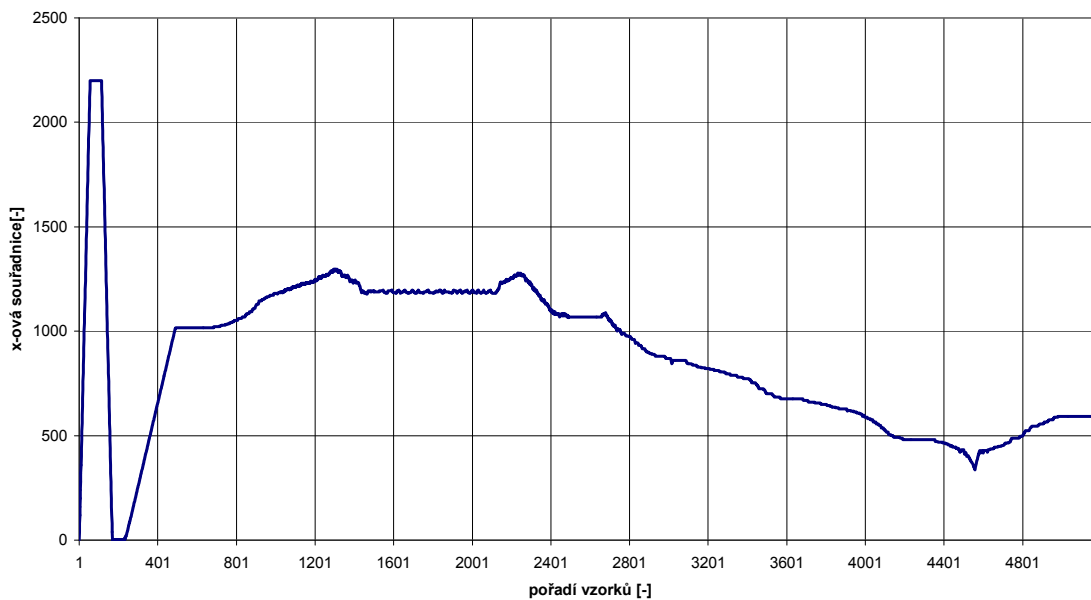


Obrázek 38: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 4. kvadrant.

Jako druhé měření byla prověřena pohyblivost senzoru při manuálním pohybu laseru. Pohyb byl prováděn ručně pomocí mikrometrických posuvných šroubů v ose x. Následující grafy ukazují, jak se tyto posuny projeví na posunu. Kolem kroku 1200 byl udělán posun podstavce, po opětovném nalezení optického svazku byl pomocí

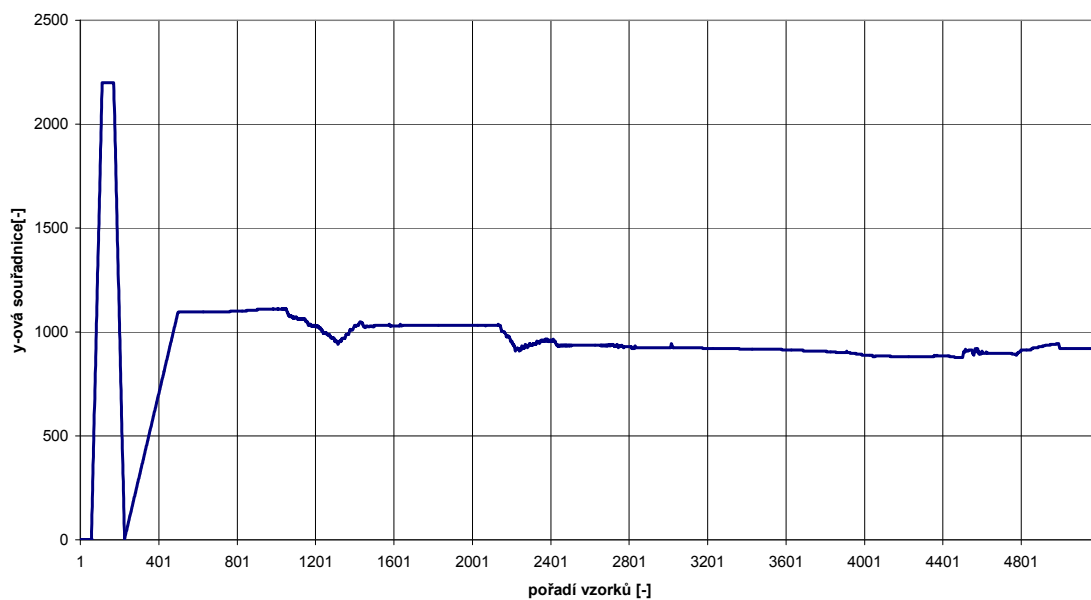
mikrometrického posuvného šroubu, který senzor bez problémů sledoval.

Průběh x-ové souřadnice v závislosti na pořadí vzorků při posunu

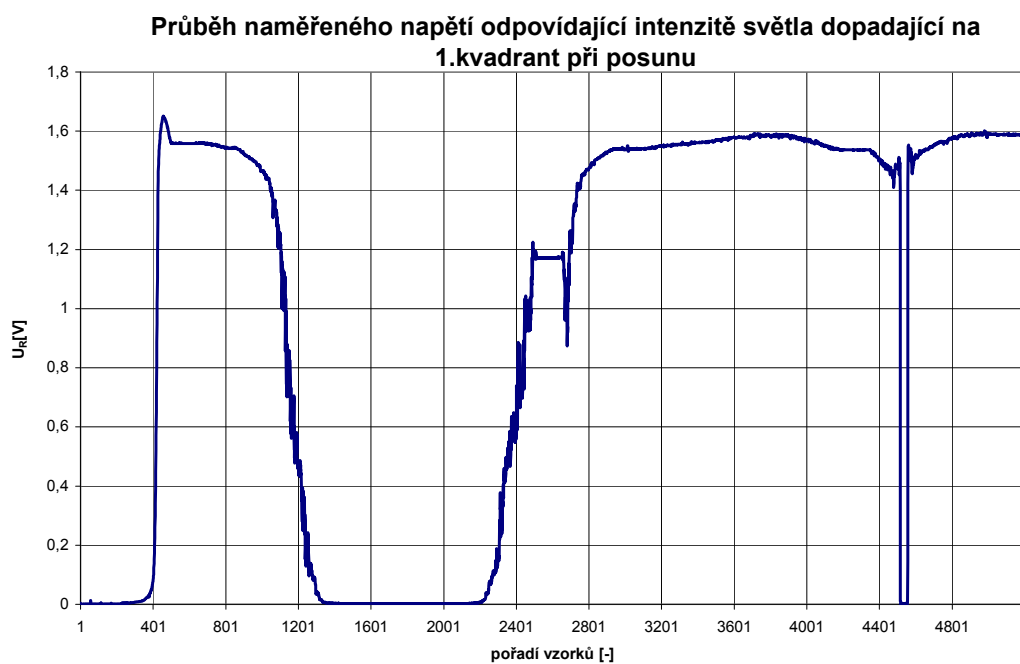


Obrázek 39: Průběh x-ové souřadnice při posunu optického svazku.

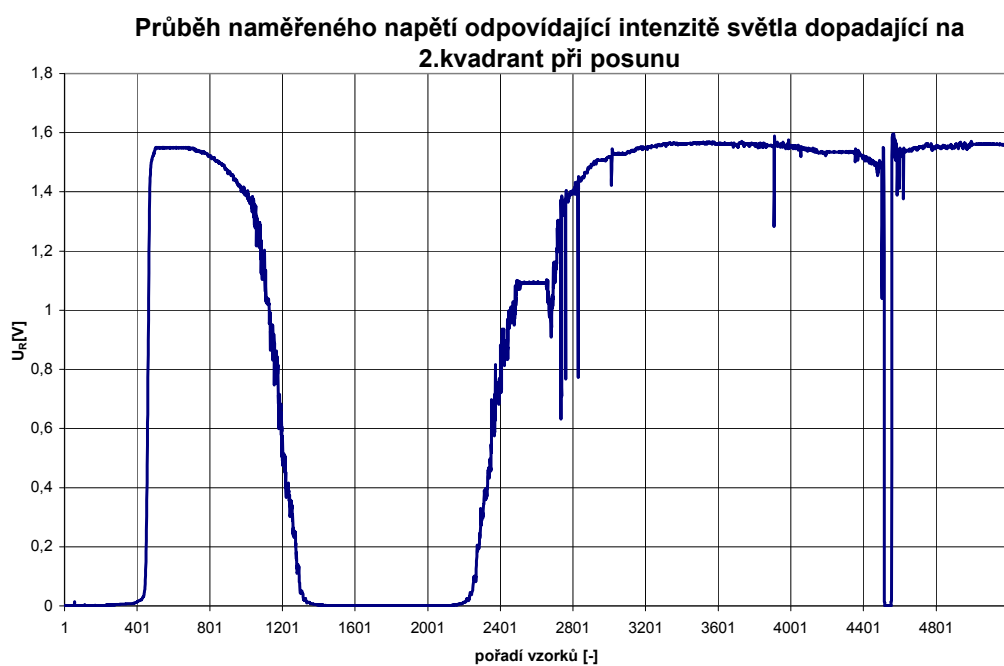
Průběh y-ové souřadnice v závislosti na pořadí vzorků při posunu



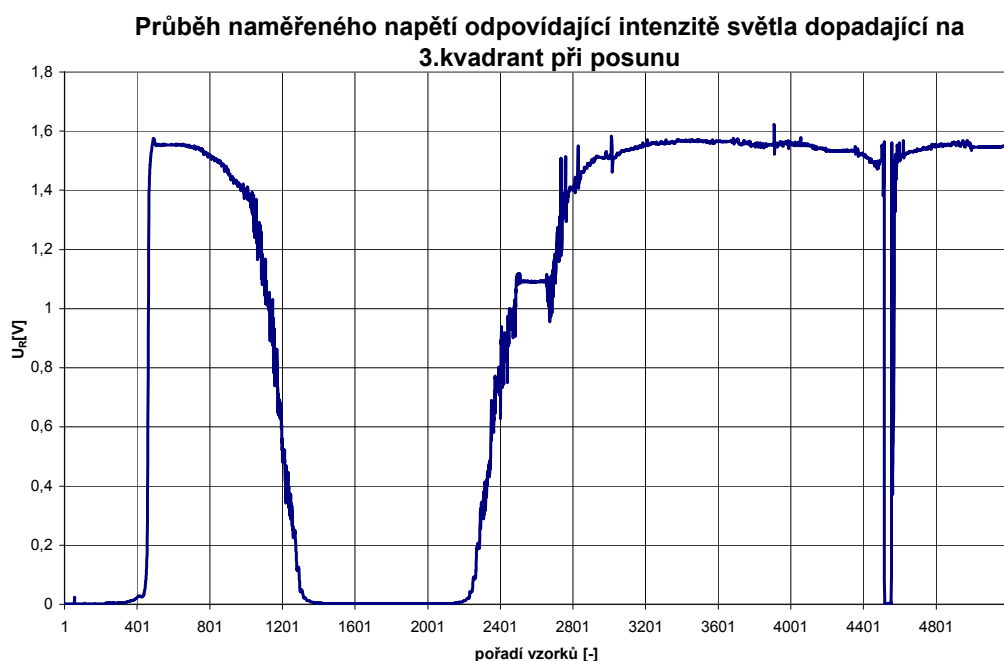
Obrázek 40: Průběh y-ové souřadnice při posunu optického svazku.



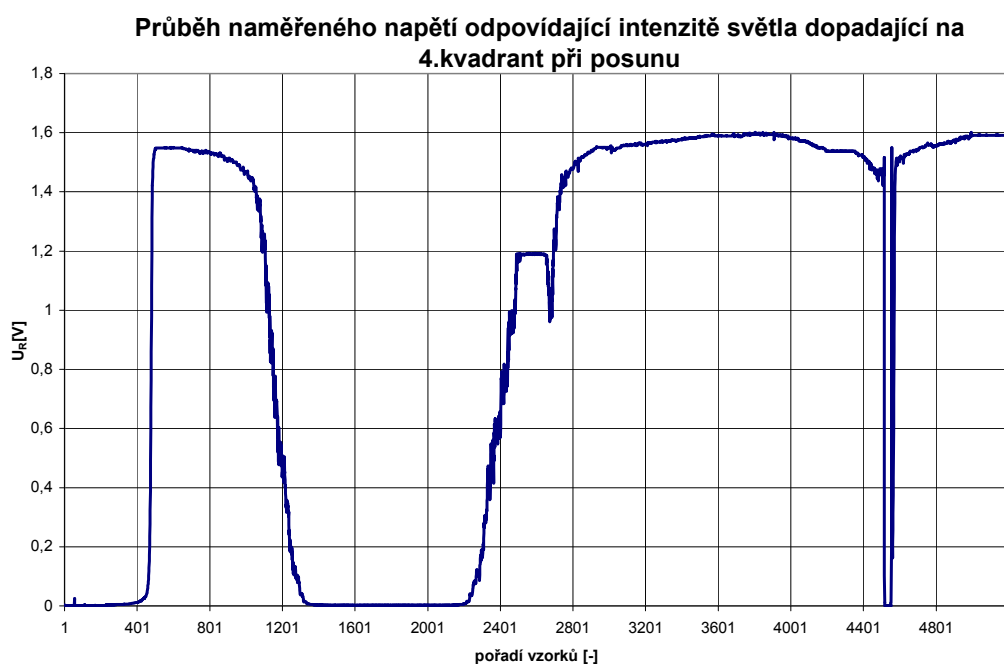
Obrázek 41: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 1. kvadrant při posunu.



Obrázek 42: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 2. kvadrant při posunu.



Obrázek 43: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 3. kvadrant při posunu.

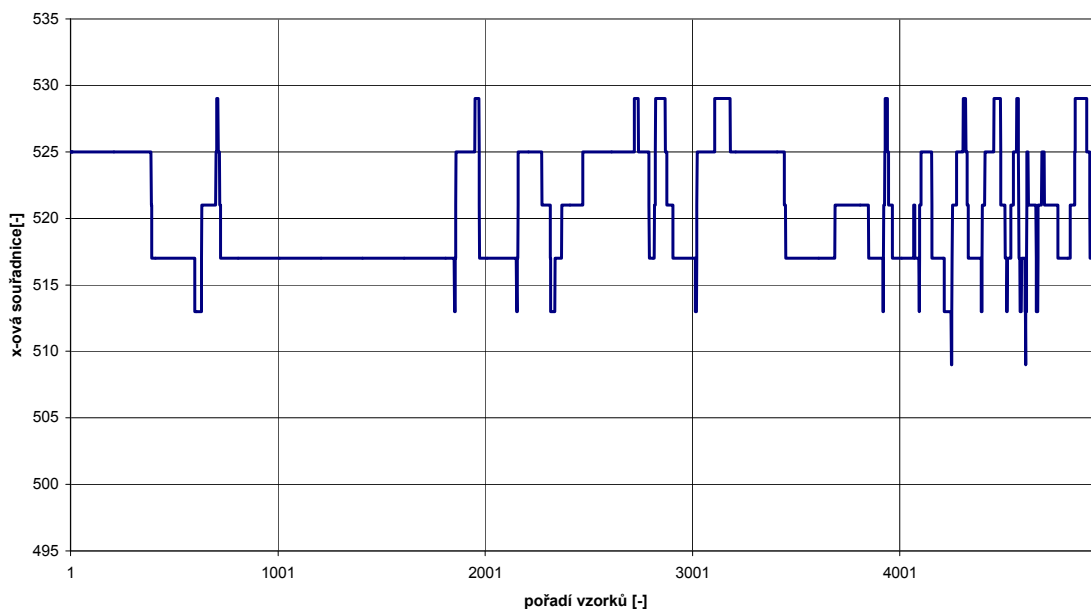


Obrázek 44: Průběh naměřeného napětí odpovídající intenzitě světla dopadající na 4. kvadrant při posunu.

Jako poslední měření byl proveden pokus, kdy se pod paprsek laseru umístily zdroje sálavého tepla (vařiče na obr. 32 označeny V1 a V2). Vyzařované teplo

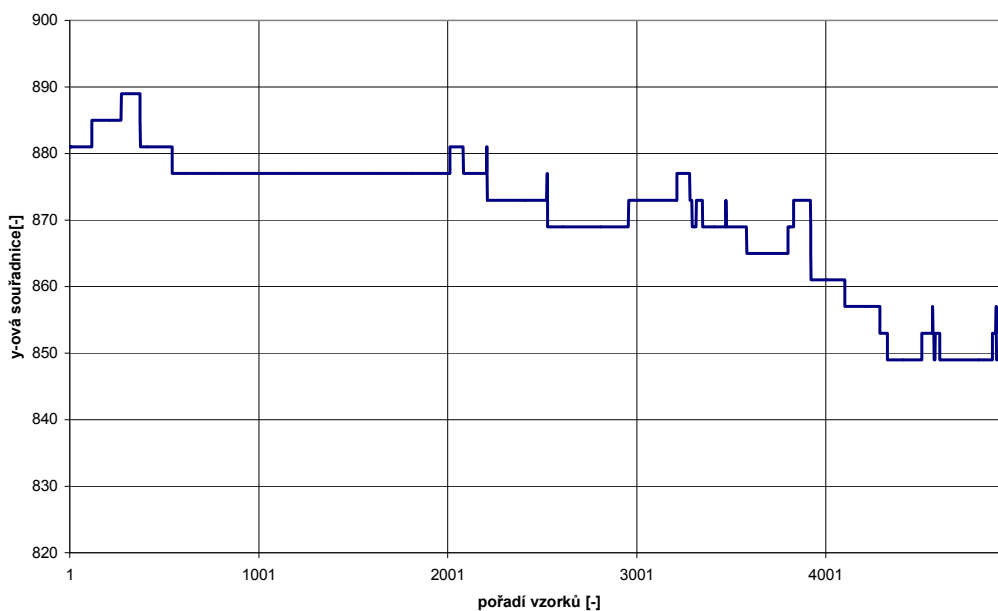
způsobilo díky teplotní roztažnosti vzduchu atmosférické změny, které rozpochovaly paprsek. Na následujících obrázcích jsou opět zobrazeny změny souřadnic a naměřených napětí vyvolaný zmíněnou atmosférickou změnou.

Průběh x-ové souřadnice v závislosti na pořadí vzorků při posunu

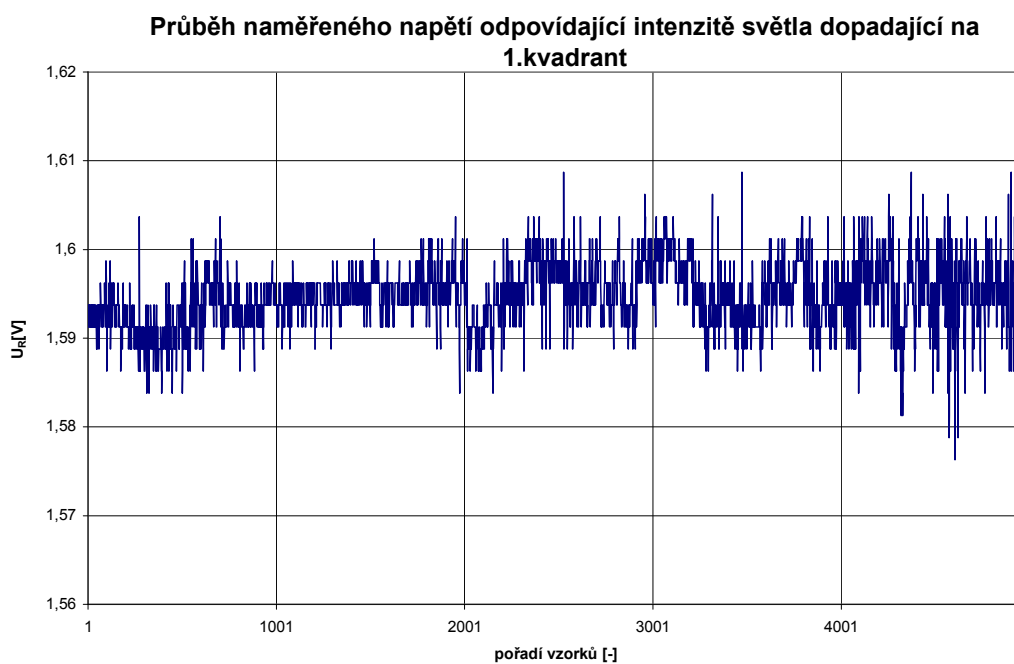


Obrázek 45: Změna x-ové souřadnice při zahřívání atmosférické cesty.

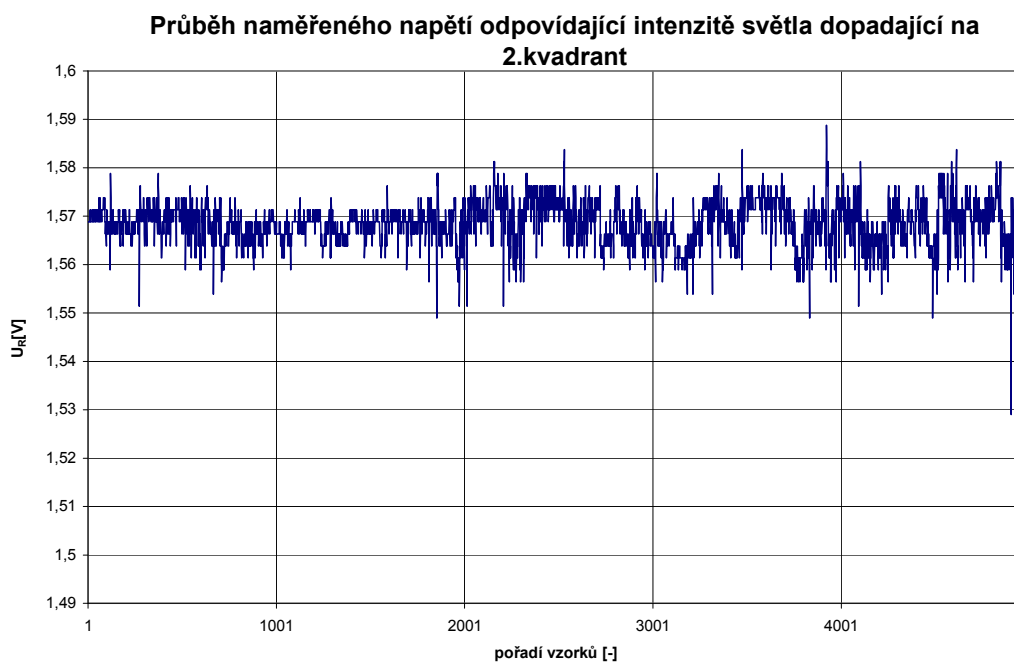
Průběh y-ové souřadnice v závislosti na pořadí vzorků



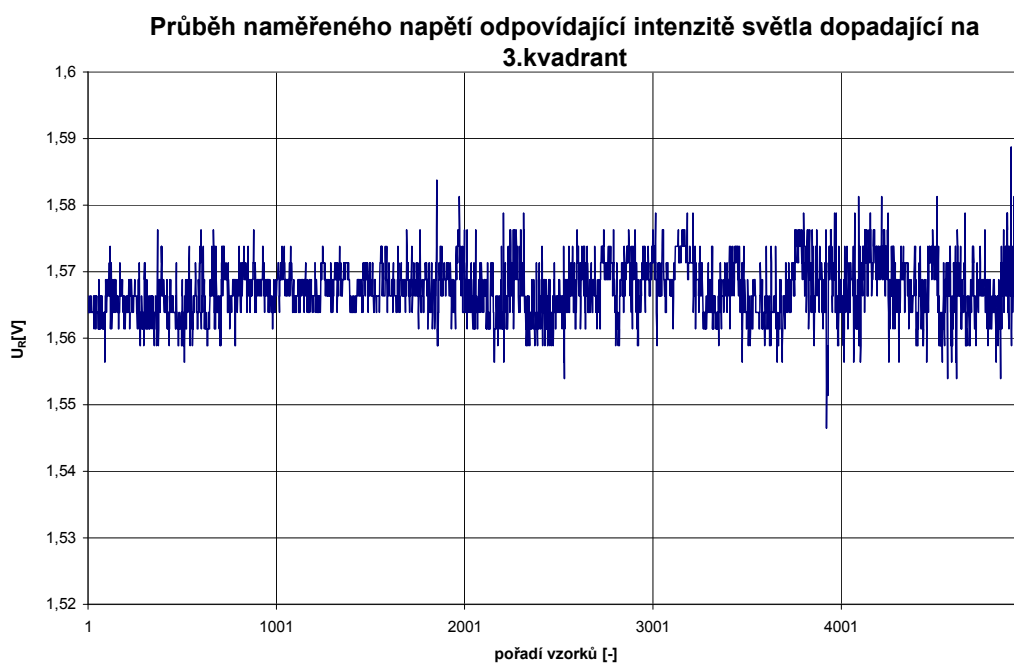
Obrázek 46: Změna y-ové souřadnice při zahřívání atmosférické cesty.



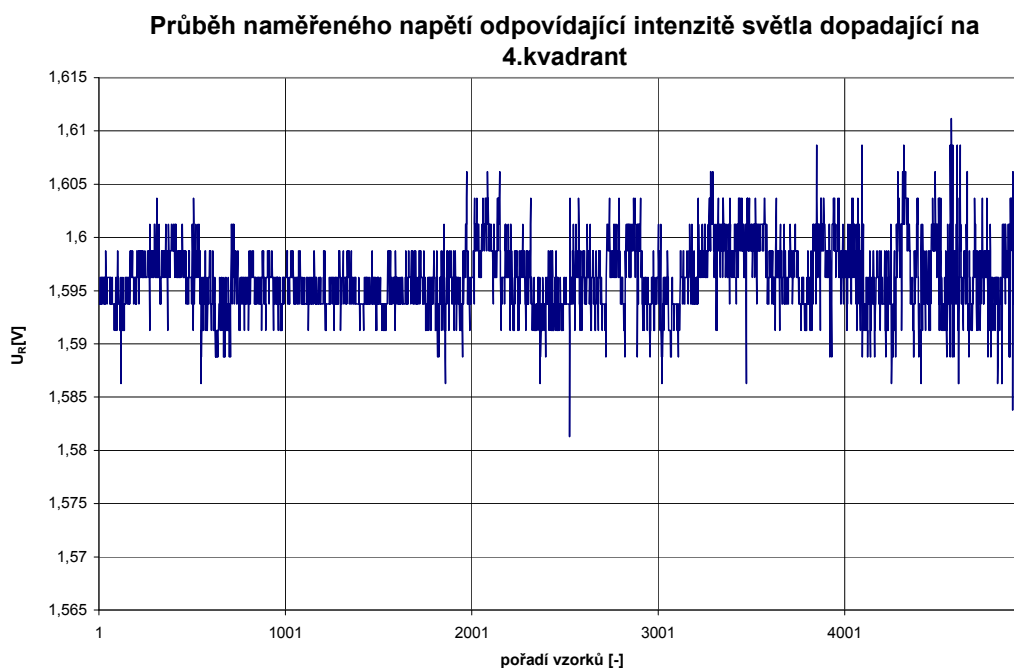
Obrázek 47: Průběh napětí 1. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty.



Obrázek 48: Průběh napětí 2. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty.



Obrázek 49: Průběh napětí 3. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty.



Obrázek 50: Průběh napětí 4. kvadrantu při zahřívání atmosférické cesty.

Pozn.: veškeré naměřené hodnoty a celé programy jsou na příloženém CD.

ZÁVĚR

Diplomová práce Digitální zapisovač dat s aktivním vyhledáním optického svazku měla za úkol navrhnout, zhotovit, oživit a prověřit senzor, který vyhledá optický svazek a následně dokáže monitorovat a kopírovat jeho pohyb. Tohoto lze poté využít pro automatické směřování hlavic nebo ke kompenzaci či měření parametrů turbulentní atmosféry.

Proto je první část práce zaměřena na teorii detekce optického svazku pomocí fotodiody. Je zde také uvedena teorie týkající se krokových motorů, které jsou použity k nalezení laserového paprsku a následného monitorování jeho pohybu.

Podle teoretických předpokladů jsem vytvořil návrh systému, vyhledal jsem si potřebné součástky a vytvořil návrh desek plošných spojů. Jelikož byl ke sledování optického svazku použit jiný senzor, než byl původně předpokládán. Jsou zde uvedeny dva návrhy v odlišných režimech fotodiod. Po osazení desky jsem naprogramoval řídicí program pro procesor, obslužný program v PC a určil pravidla pro jejich vzájemnou komunikaci a kontrolu předaných dat. Z původního nápadu používat externí paměť jsem upustil a dal přednost online posílání se zpětnou kontrolou, protože pro další využití senzoru bude důležitá okamžitá poloha senzoru.

Po úspěšném oživení a vyladění obou programů jsem proměřil a vynesl do grafů časové průběhy X a Y souřadnice a průběhy napětí úspěšného zaměření optického svazku. Protože měřený laser měl vysoký výkon a měření bylo prováděno asi na vzdálenost 378cm, detektor hned po kalibraci detekoval optický svazek a přímou nejbližší cestou zaměřil na střed optického svazku. Nakonec jsem prověřil odezvu senzoru na posun zdroje a monitorování pohybu svazku vyvolanou teplotní roztažností vzduchu.

LITERATURA

- [1] Urban, F., Mikel, B., Optoelektronika a optické komunikace. Skriptum VUT Brno, 2003.
- [2] WILFERT, O. Optoelektronika. Skriptum VUT Brno.
- [3] BENEŠ, P., CHLEBNÝ, J., LANGER, J., MARTINÁSKOVÁ, M. VORÁČEK, M., Automatizace a automatizační technika 3. Computer Press, a.s.
- [4] HLAVA, J. Automatické řízení a inženýrská informatika. Skriptum ČVUT Praha, 2000
http://www.fsid.cvut.cz/cz/u12110/par2/skripta_par.pdf
- [5] Krokové motory.
http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12135-VSZ/download/obor_stud/PSSI_-_2351088/Krokove_motory.pdf
- [6] Krokové motory, článek na stránkách firmy GEGULACE – AUTOMATIZACE BOR, spol. s r.o. http://www.regulace.cz/CZ/KM/km_vu.html
- [7] Řezáč, K.:Krokové metody, článek dostupný na <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [8] PUNČOCHÁŘ, J., Operační zesilovače v elektronice, 5 vydání. Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2002.
- [9] HÁZE, J., VRBA, R., FUJCIK, L., SAJDL, O., Teorie vzájemného převodu analogového a číslicového signálu. Skriptum VUT Brno.
- [10] MATOUŠEK, D., Atmel AVR ATmega16 - 4díl, Nakladatelství BEN – technická literatura, Praha 2006
- [11] Datasheet mikrokontroléru ATmega16 od firmy Atmel. Dostupný na [www: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/atmel/2466S.pdf>](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/atmel/2466S.pdf).
- [12] MAŤÁTKO, J. Elektronika, SNTL - Nakladatelství technické literatury, Praha 1987.
- [13] Applicatio notes od firmy OSI Optoelectronics. Dostupný na [www: http://www.osioptoelectronics.com/application-notes.asp](http://www.osioptoelectronics.com/application-notes.asp)
- [14] Bartůšková, I., Dušek, M., Fiurášek, J., Hradil, Z., Ježek, M., Mičuda, M., Slodička, L., Vláknová optika na telekomunikačních vlnových délkách–soubor experimentálních úloh. FRVŠ 2008 Dostupný na: http://muj.optol.cz/download/projects/frvs2008_Hradil_skriptum.pdf
- [15] Datasheet FTDI FT232RL od firmy FTDI (Future Technology Devices International Ltd.). Dostupný na [www: http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R_v104.pdf](http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R_v104.pdf)
- [16] Datasheet TS922 od firmy ST Microelectronics Dostupný na [www: http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/5150.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/5150.pdf)
- [17] Datasheet AT24C08 od firmy ATMEL. Dostupný na [www: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc0180.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc0180.pdf)
- [18] Seriál Peripherall Interface Bus, from Wikipedia, the free encyclopedia. Dostupný na [www: http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus](http://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus)

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

| | | |
|------------|-----|--|
| DZ | ... | digitální zapisovač dat |
| U | ... | elektrické napětí [V] |
| I | ... | elektrický proud [A] |
| R | ... | elektrický odpor [Ω] |
| W | ... | energie [eV] |
| C | ... | kapacita [F] |
| ϵ | ... | permitivita [F/m] |
| S | ... | citlivost |
| P | ... | výkon [W] |
| h | ... | Planckova konstanta |
| c | ... | rychlost světla ($3 \cdot 10^8$ m/s) |
| e | ... | velikost elementárního náboje $1,602 \cdot 10^{-19}$ C |
| λ | ... | vlnová délka [m] |
| f | ... | frekvence [Hz] |
| k_B | ... | Boltzmannova konstanta |
| T | ... | teplota v Kelvinech |
| ρ | ... | měrný odpor materiálu |
| IO | ... | integrovaný obvod |
| USB | ... | Univerzální sériové rozhraní |
| OZ | ... | Operační zesilovač |
| SPI | ... | Sériové periferní rozhraní |

SEZNAM PŘÍLOH

| | | |
|----------|---|-----------|
| A | Naměřené hodnoty čtyřkvadrantového detektoru | 54 |
| A.1 | Měření převod. char. dopadajícího výkonu na napětí fotodiody | 54 |
| A.2 | Měření přeslechů 4kv. detektoru | 55 |
| A.3 | Měření napětí fotodiod při dopadajícím paprsku na střed detektoru | 56 |
| B | Celkové schéma návrhu | 57 |
| B.1 | Analogová a digitální část celkového schématu pro senzor s oddělenými vývody nebo se společnými anodami – verze 1. | 57 |
| B.2 | Analogová a digitální část celkového schématu pro senzor se společnými katodami –verze 2..... | 58 |
| B.3 | Část s ovládáním kokových motorů..... | 59 |
| C | Podklady pro výrobu DPS | 60 |
| C.1 | Deska plošných spojů – verze 1, strana součástek top | 60 |
| C.2 | Deska plošných spojů – verze 1, strana spojů bottom | 61 |
| C.3 | Deska plošných spojů – verze 2, strana součástek top | 62 |
| C.4 | Deska plošných spojů – verze 2, strana spojů bottom | 63 |
| D | Osazovací výkresy a seznamy součástek | 64 |
| D.1 | Osazovací výkres – verze 1, top | 64 |
| D.2 | Osazovací výkres – verze 1, bottom | 65 |
| D.3 | Osazovací výkres – verze 2, top | 66 |
| D.4 | Osazovací výkres – verze 2, bottom | 67 |
| D.5 | Seznam součástek | 68 |
| E | Fotopříloha | 69 |
| E.1 | Senzor s čtyřkvadrantovou diodou. | 69 |
| E.2 | Hlavice s digitálním zapisovačem dat. | 70 |
| E.3 | Měření detekce a zaměření optického svazku. | 71 |

A NAMĚŘENÉ HODNOTY ČTYŘKVADRANTOVÉHO DETEKTORU

A.1 Měření převod. char. dopadajícího výkonu na napětí fotodiody

| kvadrant vlevo nahore | | kvadrant vpravo nahore | | kvadrant vlevo dole | | kvadrant vpravo dole | |
|--------------------------|-------|---------------------------|-------|------------------------|-------|-------------------------|-------|
| U[mV] | P[mW] | U[mV] | P[mW] | U[mV] | P[mW] | U[mV] | P[mW] |
| 486,0 | 0,94 | 486,0 | 0,94 | 486,0 | 1,04 | 485,0 | 1,04 |
| 484,0 | 0,91 | 484,0 | 0,91 | 484,0 | 1,02 | 484,0 | 1,02 |
| 482,0 | 0,86 | 482,0 | 0,86 | 482,0 | 0,97 | 482,0 | 0,96 |
| 480,0 | 0,81 | 480,0 | 0,82 | 480,0 | 0,94 | 480,0 | 0,93 |
| 478,0 | 0,76 | 478,0 | 0,78 | 478,0 | 0,88 | 478,0 | 0,88 |
| 476,0 | 0,73 | 476,0 | 0,74 | 476,0 | 0,83 | 476,0 | 0,82 |
| 474,0 | 0,70 | 474,0 | 0,70 | 474,0 | 0,79 | 474,0 | 0,79 |
| 472,0 | 0,67 | 472,0 | 0,67 | 472,0 | 0,75 | 472,0 | 0,75 |
| 469,8 | 0,64 | 470,0 | 0,64 | 470,0 | 0,72 | 470,0 | 0,71 |
| 468,0 | 0,60 | 468,0 | 0,61 | 468,0 | 0,67 | 468,0 | 0,68 |
| 466,0 | 0,57 | 466,0 | 0,58 | 466,0 | 0,64 | 466,0 | 0,64 |
| 464,0 | 0,55 | 464,0 | 0,55 | 464,0 | 0,60 | 464,0 | 0,61 |
| 462,0 | 0,52 | 462,0 | 0,53 | 462,0 | 0,58 | 462,0 | 0,57 |
| 460,0 | 0,49 | 460,0 | 0,49 | 460,0 | 0,55 | 460,0 | 0,56 |
| 458,0 | 0,47 | 458,0 | 0,47 | 458,0 | 0,52 | 458,0 | 0,52 |
| 456,0 | 0,44 | 456,0 | 0,44 | 456,0 | 0,49 | 456,0 | 0,50 |
| 454,0 | 0,42 | 454,0 | 0,42 | 454,0 | 0,47 | 454,0 | 0,47 |
| 451,8 | 0,40 | 451,8 | 0,40 | 451,8 | 0,44 | 451,8 | 0,45 |
| 449,6 | 0,37 | 450,0 | 0,38 | 450,0 | 0,41 | 450,0 | 0,42 |
| 448,4 | 0,36 | 448,4 | 0,36 | 447,7 | 0,39 | 447,7 | 0,40 |
| 445,7 | 0,34 | 445,7 | 0,34 | 445,7 | 0,36 | 445,6 | 0,37 |
| 440,0 | 0,29 | 440,0 | 0,29 | 440,0 | 0,31 | 439,8 | 0,32 |
| 438,0 | 0,27 | 438,0 | 0,27 | 438,0 | 0,30 | 438,0 | 0,30 |
| 435,0 | 0,24 | 435,0 | 0,24 | 435,2 | 0,28 | 435,2 | 0,28 |
| 432,0 | 0,22 | 432,0 | 0,22 | 432,0 | 0,25 | 432,3 | 0,26 |
| 430,6 | 0,22 | 430,0 | 0,21 | 430,0 | 0,23 | 430,0 | 0,24 |
| 426,4 | 0,19 | 425,5 | 0,19 | 425,5 | 0,20 | 425,5 | 0,20 |
| 420,0 | 0,17 | 420,0 | 0,15 | 420,0 | 0,17 | 420,0 | 0,18 |
| 414,5 | 0,14 | 414,5 | 0,13 | 414,4 | 0,13 | 414,4 | 0,13 |
| 409,7 | 0,12 | 409,7 | 0,11 | 410,3 | 0,12 | 410,0 | 0,12 |
| 401,0 | 0,09 | 400,8 | 0,08 | 399,9 | 0,09 | 399,9 | 0,09 |
| 390,0 | 0,06 | 389,5 | 0,05 | 389,3 | 0,06 | 389,3 | 0,04 |
| 382,0 | 0,04 | 378,0 | 0,03 | 376,0 | 0,03 | 379,1 | 0,04 |

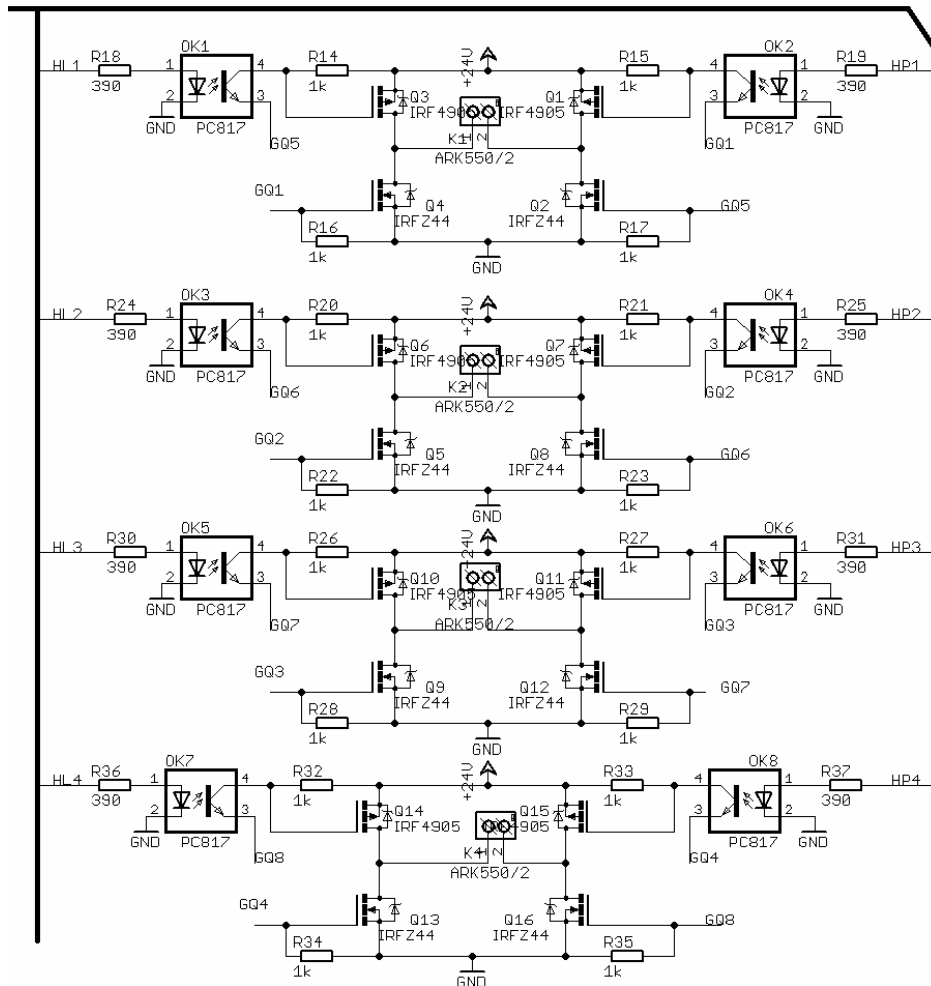
A.2 Měření přeslechů 4kv. detektoru

| | 2. Kvadrant | 3. Kvadrant | 4. Kvadrant |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| P[mW] | U[mV] | U[mV] | U[mV] |
| 1,03 | 314,0 | 154,0 | 313,0 |
| 1,02 | 314,0 | 155,0 | 313,0 |
| 0,96 | 312,0 | 150,0 | 312,8 |
| 0,93 | 312,2 | 147,0 | 312,2 |
| 0,88 | 311,0 | 142,0 | 310,8 |
| 0,82 | 309,3 | 136,0 | 309,0 |
| 0,79 | 308,6 | 130,0 | 308,8 |
| 0,75 | 307,3 | 128,0 | 307,7 |
| 0,71 | 306,3 | 123,0 | 306,7 |
| 0,68 | 304,7 | 119,0 | 305,9 |
| 0,64 | 303,7 | 115,0 | 305,0 |
| 0,61 | 302,7 | 113,0 | 304,0 |
| 0,57 | 300,9 | 109,0 | 303,0 |
| 0,56 | 300,5 | 106,0 | 302,0 |
| 0,52 | 298,7 | 101,0 | 301,1 |
| 0,50 | 297,9 | 98,0 | 300,0 |
| 0,47 | 296,0 | 95,0 | 299,7 |
| 0,45 | 294,5 | 90,0 | 298,0 |
| 0,42 | 292,4 | 86,0 | 296,0 |
| 0,40 | 291,5 | 84,0 | 296,0 |
| 0,37 | 289,0 | 81,0 | 295,8 |
| 0,32 | 285,0 | 73,0 | 292,0 |
| 0,30 | 283,0 | 69,0 | 290,0 |
| 0,28 | 281,0 | 67,0 | 288,6 |
| 0,26 | 279,6 | 65,0 | 287,0 |
| 0,24 | 277,4 | 61,0 | 284,0 |
| 0,13 | 247,0 | 38,0 | 266,0 |
| 0,09 | 226,0 | 30,0 | 246,0 |

A.3 Měření napětí fotodiod při dopadajícím paprsku na střed detektoru

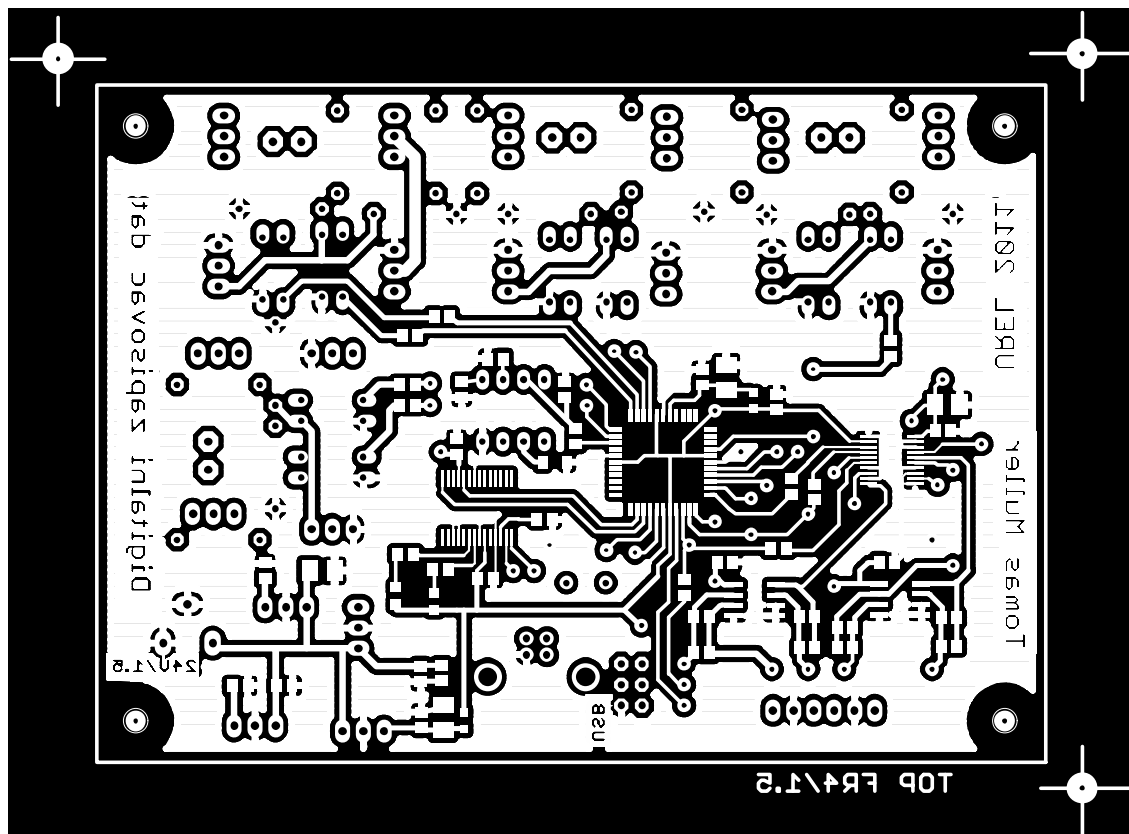
| | kvadrant nahore vpravo | kvadrant dole vlevo |
|-------|---------------------------|------------------------|
| P[mW] | U[mV] | U[mV] |
| 1,04 | 415 | 412 |
| 0,90 | 412 | 410 |
| 0,80 | 407 | 408 |
| 0,70 | 402 | 407 |
| 0,60 | 406 | 398 |
| 0,50 | 399 | 397 |
| 0,40 | 397 | 387 |
| 0,30 | 389 | 381 |
| 0,20 | 383 | 365 |
| 0,10 | 302 | 399 |

B.3 Část s ovládáním kokových motorů

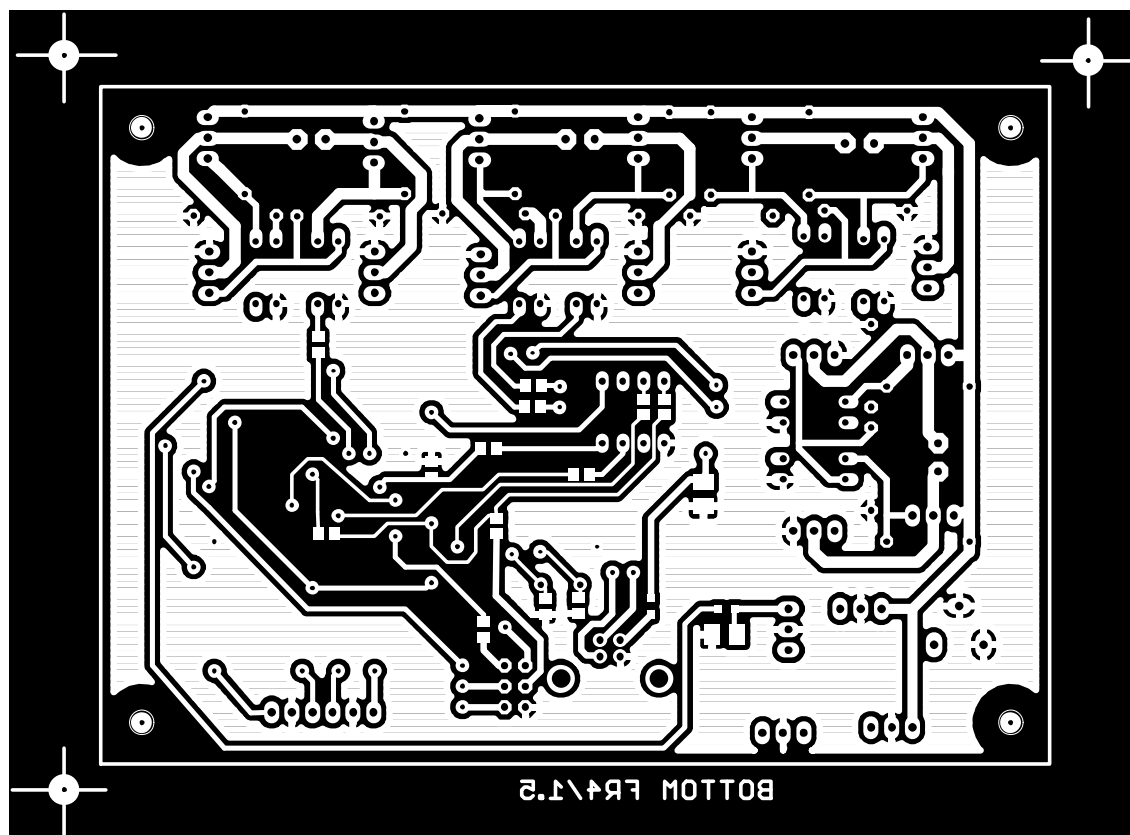


C PODKLADY PRO VÝROBU DPS

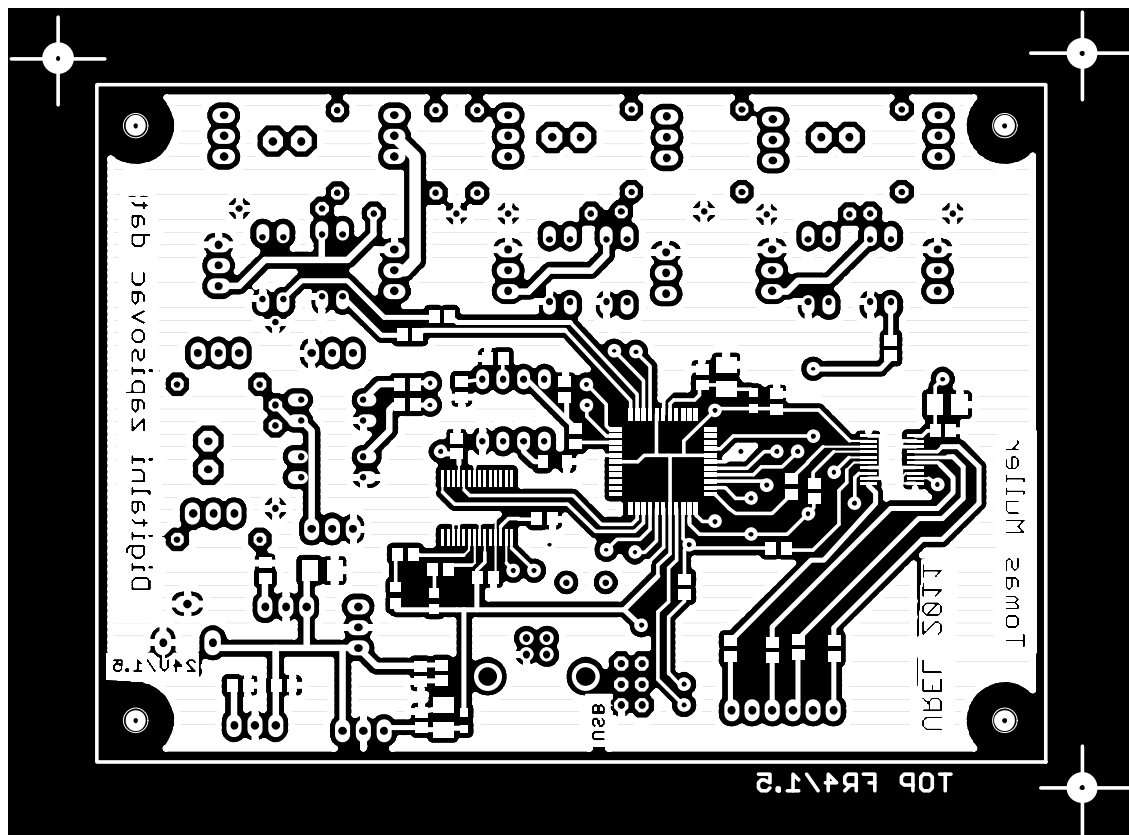
C.1 Deska plošných spojů – verze 1, strana součástek top



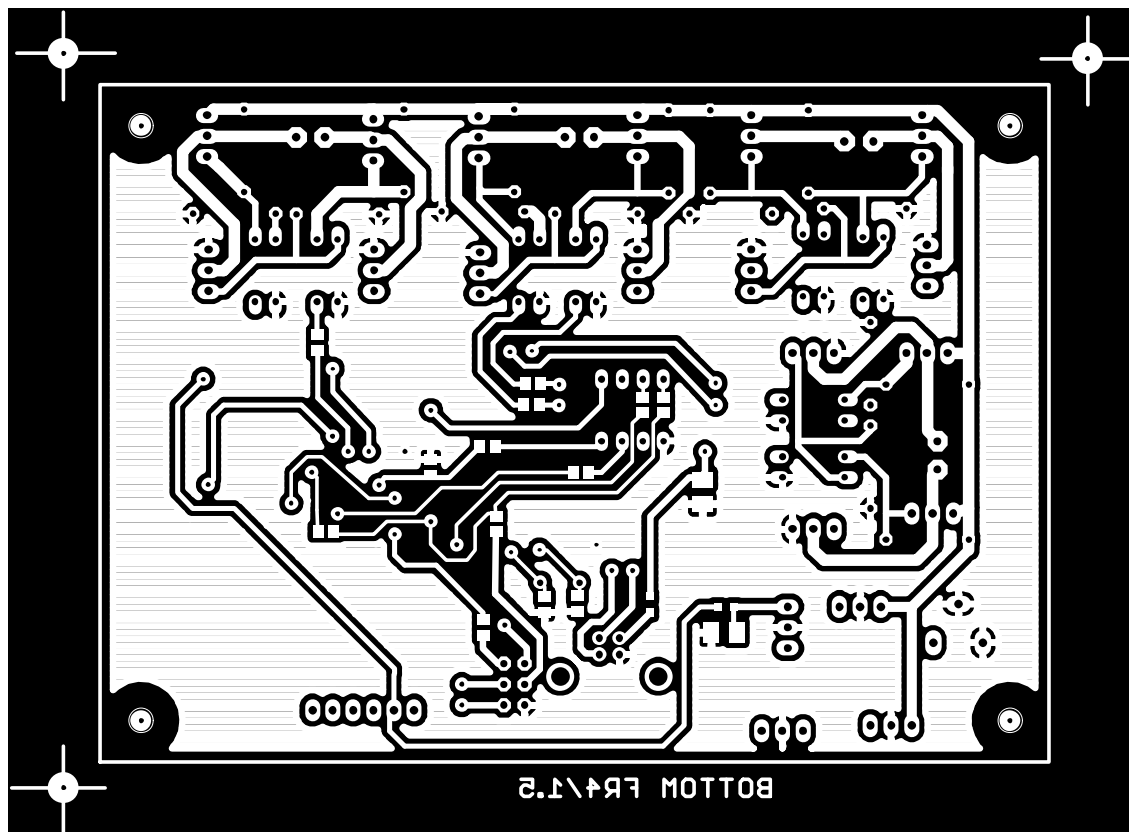
C.2 Deska plošných spojů – verze 1, strana spojů bottom



C.3 Deska plošných spojů – verze 2, strana součástek top

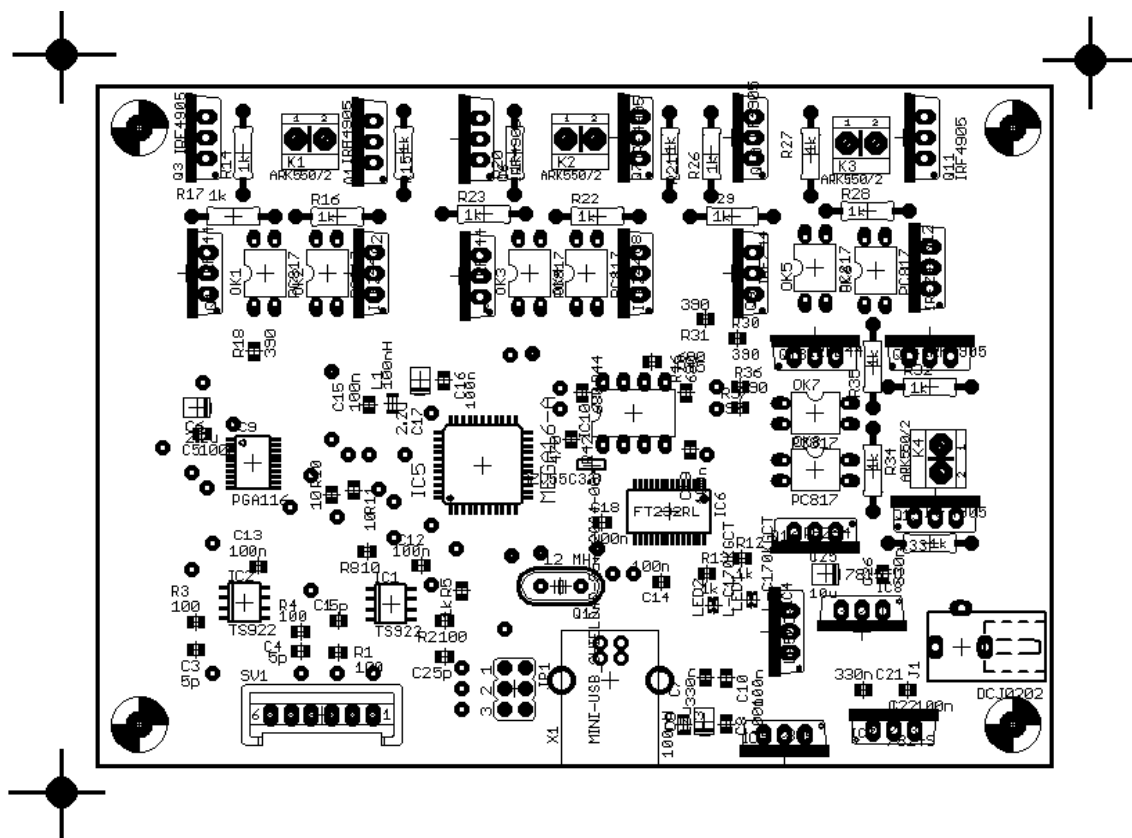


C.4 Deska plošných spojů – verze 2, strana spojů bottom

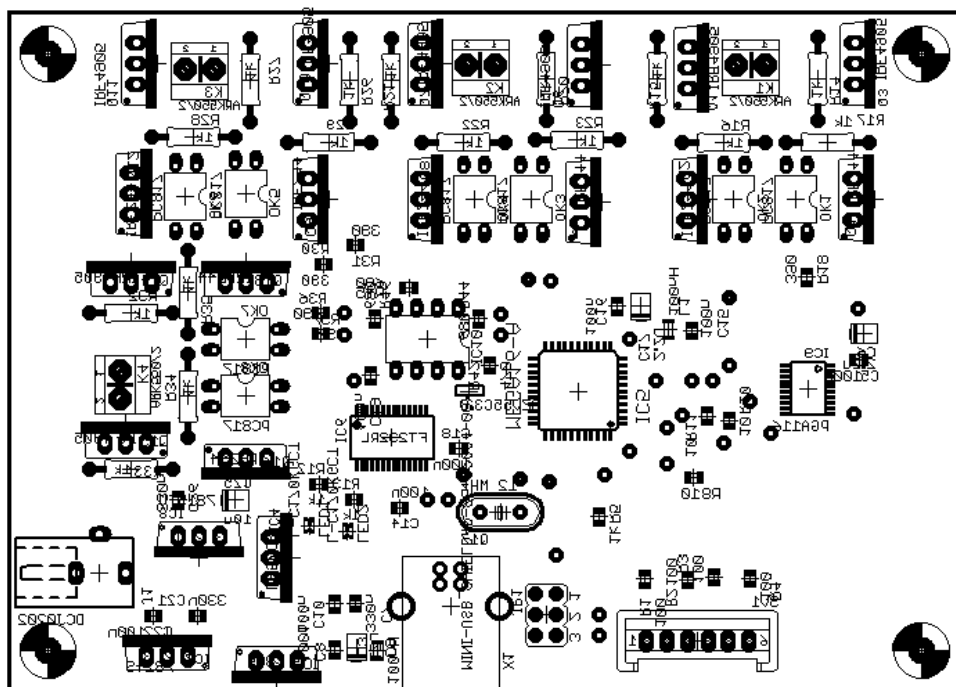


D OSAZOVACÍ VÝKRESY A SEZNAMY SOUČÁSTEK

D.1 Osazovací výkres – verze 1, top



D.3 Osazovací výkres – verze 2, top

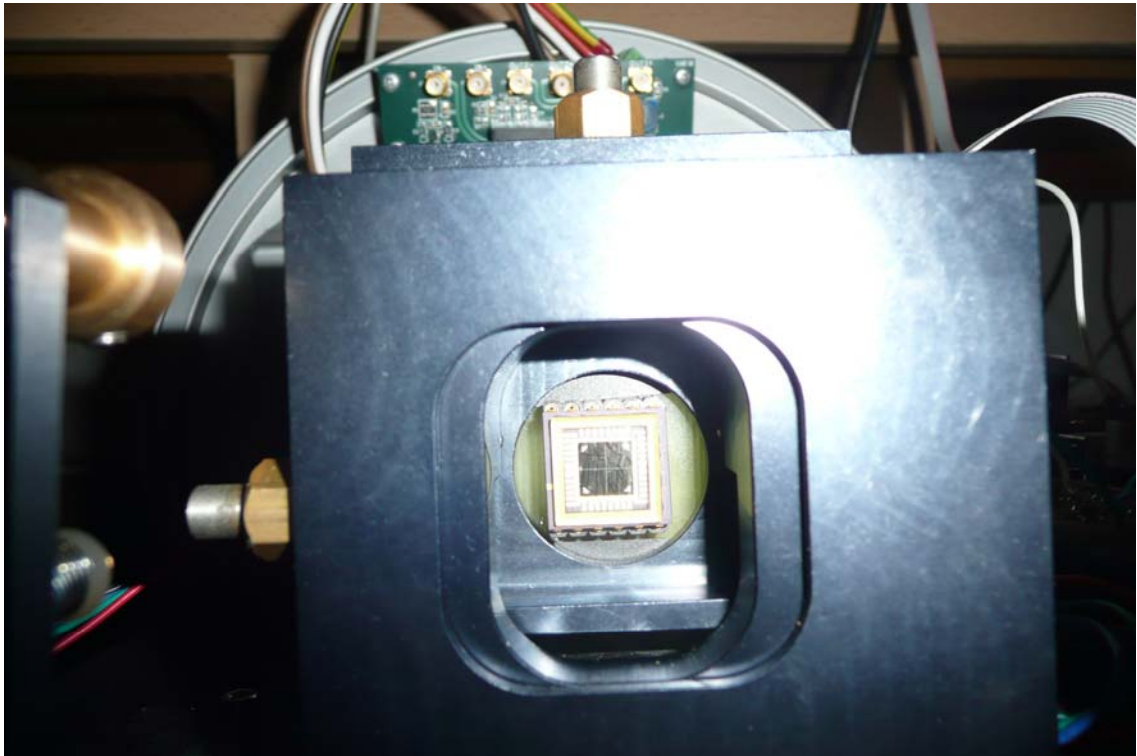


D.5 Seznam součástek

| Název | Hodnota | Detail, pouzdro | Počet |
|---|------------|-----------------|-------|
| C1,C2,C3,C4 | 5pF | C-EUC0805K | 4 |
| C5,C8,C10,C12,C13,C14,C15,C16,C18,C19,C22 | 100nF | C-EUC0805K | 11 |
| C6,C17,C20 | 2,2uF | CPOL-EUA/3528 | 3 |
| C7,C21 | 330nF | C-EUC0805K | 2 |
| C9 | 10uF | CPOL-EUA/3528 | 1 |
| C23,C24 | 22pF | C-EUC0805K | 2 |
| IC1, IC2 | TS922 | S008 | 2 |
| IC3 | 7805 | TO220 | 1 |
| IC4 | LF50CV | TO220 | 1 |
| IC5 | MEGA16-A | TQFP44 | 1 |
| IC6 | FT232RL | SSOP28 | 1 |
| IC7 | 7824C | TO220 | 1 |
| IC8 | 24C08 | DIL08 | 1 |
| IC9 | PGA116 | TSSOP-20 | 1 |
| J1 | DCJ0202 | DCJ0202 | 1 |
| JP1 | | JP3Q | 1 |
| K1,K2,K3,K4 | | ARK550/2 | 4 |
| L1,L2 | 100nH | L2012C | 2 |
| LED1, LED2 | L-C170KGCT | 0805 | 2 |
| OK1,OK2,OK3,OK4,OK5,OK6,OK7,OK8 | PC817 | DIL05 | 8 |
| Q1,Q3,Q6,Q7,Q10,Q11,Q14,Q15 | IRF4905 | TO220 | 8 |
| Q2,Q4,Q5,Q8,Q9,Q12,Q13,Q16 | IRFZ44 | TO220 | 8 |
| Q17 | 12 MHz | HC49/S | 1 |
| R1,R2,R3,R4 | 100 | R-EU_R0805 | 4 |
| R8-R11 | 10Ω | R-EU_R0805 | 3 |
| R5-R7,R12 | 1kΩ | R-EU_R0805 | 4 |
| R13-R17,R20-R23,R26-R29,R32-R35 | 1kΩ | R-EU_R0207 | 16 |
| R18,R19,R24,R25,R30,R33,R36,R37 | 390Ω | R-EU_R0805 | 8 |
| SV1 | | S06P | 1 |
| X1 | MINI-USB | 85-32004-00X | 1 |

E FOTOPŘÍLOHA

E.1 Senzor s čtyřkvadrantovou diodou.



E.2 Hlavice s digitálním zapisovačem dat.



E.3 Měření detekce a zaměření optického svazku.

