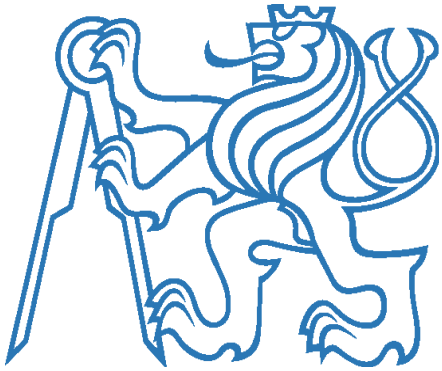
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ŘÍDICÍ TECHNIKY



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kalibrace kapacitního senzoru

Jaroslav Švoma

2011

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Jaroslav Švoma**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (magisterský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření, blok KM1 - Řídicí technika

Název tématu: **Kalibrace kapacitního senzoru**

Pokyny pro vypracování:

1. Zprovozněte ovládání xy stolku s kapacitním senzorem polohy.
2. Navrhněte proceduru pro kalibraci senzoru bez možnosti externího ověření polohy.
3. Experimentálně verifikujte správnost kalibrační procedury. V případě neshody kalibrační proceduru upravte.

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Ondřej Holub

Platnost zadání: do konce letního semestru 2010/2011

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

Prohlášení

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

V Praze, dne 21. 12. 2010 ..... Jaroslav Šroma .....

podpis

Anotace:

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a sestavit zadaný kapacitní senzor, řídicí a vyhodnocovací elektroniku senzoru, navrhnout kalibrační proceduru a experimentálně ověřit její funkčnost. Jde o senzor pracující na principu proměnné plochy překrytí elektrod. Tento senzor určuje polohu pohyblivého elementu v aplikacích bez vedení. Převodní charakteristika senzoru je ovlivněna řadou parazitních jevů. S ohledem na parazitní jevy byla navržena kalibrační procedura. Dále byla vytvořena měřicí procedura, umožňující vyhodnocení polohy pohyblivého elementu. Kalibrační i měřicí procedury byly implementovány do řídicího mikroprocesoru. Na základě externí verifikace byla ověřena funkčnost sestaveného senzoru.

Annotation:

The aim of this diploma thesis was to propose and to realize capacitive sensor, control and evaluate electronic of this sensor. There was proposed procedure for calibration of this sensor and experimentally verified it's functionality. The sensor is a differential capacitive position sensor with variable overlapping of electrodes. This sensor is applied in applications without direction. The sensor characteristic is influenced by parasitic phenomena. Calibration procedure was proposed with regard to parasitic phenomena. Further there was created measure procedure, which allows to evaluate position of movable element. These procedures were implemented into control microprocesor. Functionality of constructed sensor was externally verified.

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Ondřejovi Holubovi za vedení mojí práce a cenné informace, které mi poskytl. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Žohovi a Ing. Jiřímu Zemánkovi, kteří mi pomohli s některými laboratorními úkony.

OBSAH:

1 Úvod....7

2 Popis senzoru....8

2.1 Fyzikální princip senzoru....8
2.2 Popis polohovacího stolku a jeho ovládání....9
2.3 Dvouelementový senzor....11

3 Návrh a realizace hardwarových modulů....13

3.1 Budicí elektronika....13
3.2 Snímací elektronika....14
3.3 Vyhodnocovací a řídicí elektronika....15
3.4 Komunikace mezi moduly....17
3.4.1 SPI rozhraní....18

4 Popis funkčnosti senzoru....20

4.1 Odvození vztahů popisujících chování senzoru....20
4.2 Popis parazitních jevů....22
4.3 Zpracování dat....23
4.4 Určení citlivosti senzoru....24
4.4.1 Ověření robustnosti polohovací stanice....25

5 Návrh a realizace měřicích procedur....27

5.1 Kalibrační procedura....27
5.1.1 Teoretický rozbor....27
5.1.2 Realizace kalibrační procedury....29
5.1.2.1 LS odhad měřených dat....30
5.2 Určení polohy pohyblivé desky....31
5.2.1 Výpočet skutečné polohy....34
5.2.2 Celoplošné proměření senzoru....36

6 Implementovaný firmware....40

7 Verifikace měření....42

8 Závěr:....47

Literatura:....48

Příloha A – Schémata zapojení 49

Příloha B – Obsah přiloženého CD....53

1 Úvod

Úvodem této diplomové práce bych rád seznámil čtenáře se smyslem a využitím navrženého kapacitního senzoru. Jde o senzor schopný určit polohu pohyblivého elementu v aplikacích bez vedení, u kterých dochází při pohybu k parazitnímu natáčení kolem osy kolmé na příslušný posuv.

Motivace pro návrh tohoto senzoru vzešla z výzkumného projektu Golem, v rámci něhož byl vyvinut xy stolek pro přesné polohování vzorků zkoumaných optickým mikroskopem. O horizontální pohyb stolku se starají tři piezomotory s rozlišením pohybu v řádu mikrometrů. Pro měření polohy stolku byl zvolen kapacitní senzor, neboť umožňuje dostatečně přesné měření polohy stolku a přitom splňuje omezení na velikost senzoru plynoucí ze způsobu konstrukce xy stolku.

Tato práce se zabývá uvedením kapacitního senzoru do provozu a návrhem, realizací a ověřením procedury pro jeho kalibraci. Jde o deskový rozdílový kapacitní senzor s proměnnou plochou překrytí elektrod, jehož vlastnosti byly zkoumány např. v [1].

Text práce je členěn následujícím způsobem. V druhé kapitole je popsán fyzikální princip navrhovaného senzoru. Je zde popsán polohovací stolek a jeho ovládání. Dále je v této části vysvětlen vliv polohování bez vedení na nutnou podobu senzoru. Třetí kapitola se věnuje návrhu a sestavení hardwarových modulů pro buzení a snímání senzoru, mikroprocesorového řízení a komunikaci mezi moduly.

Čtvrtá kapitola se věnuje odvození matematických vztahů popisujících chování daného senzoru. Jsou zde popsány vlivy ovlivňující měření senzoru.V poslední části této kapitoly je rozebrán způsob zpracování měřených dat a ověření citlivosti senzoru a sestavené polohovací stanice.

V páté kapitole je popsána kalibrace senzoru. Nejprve je proveden teoretický rozbor kalibrační procedury a následně její praktické řešení. Po kalibraci senzoru je popsán způsob měření polohy pohyblivé desky stolku tímto senzorem. Šestá kapitola se věnuje popisu softwaru implementovaného do řídicího mikroprocesoru

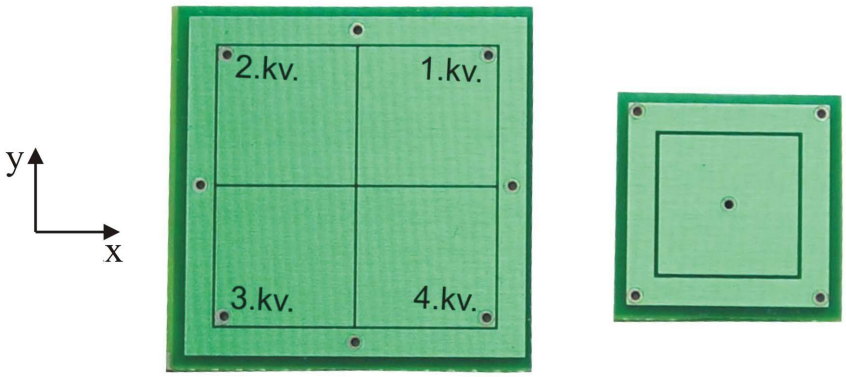
V sedmé kapitole je popsána verifikační metoda ověřující správnost navrženého zařízení. Verifikace je prováděna pomocí externí kamery. V této kapitole jsou rozebrána dvě ukázková měření kapacitním senzorem a výsledky jsou porovnány s měřením polohy z externí kamery.

2 Popis senzoru

Tato kapitola se věnuje základnímu popisu daného kapacitního senzoru. Jsou zde popsány jeho fyzikální vlastnosti a princip jeho měření. V další části této kapitoly je popsán piezoelektrický polohovací stolek, na který je tento senzor navrhován. Popis se věnuje také způsobu ovládání tohoto stolku. Poslední část této kapitoly je zaměřena na návrh a princip dvouelementového senzoru. Takový senzor byl navržen kvůli tomu, že jde o aplikaci bez vedení.

2.1 Fyzikální princip senzoru

Kromě fyzikálního principu je zde popsán způsob měření tímto senzorem. Jak bylo uvedeno výše, jde o deskový rozdílový senzor s proměnnou plochou překrytí. Senzor se skládá z budicího a snímacího elementu, které se nad sebou horizontálně pohybují. Aby bylo možné určit polohu snímacího elementu nad budicím, je budicí element rozdělen na čtyři kvadranty (elektrody). Oba elementy jsou zobrazeny na Obr.2.1. Po obvodu jednotlivých elementů a také z jejich celých zadních stran jsou nataženy zemnící plochy kvůli omezení vlivu venkovního rušení a omezení okrajových jevů vzájemných kapacit.

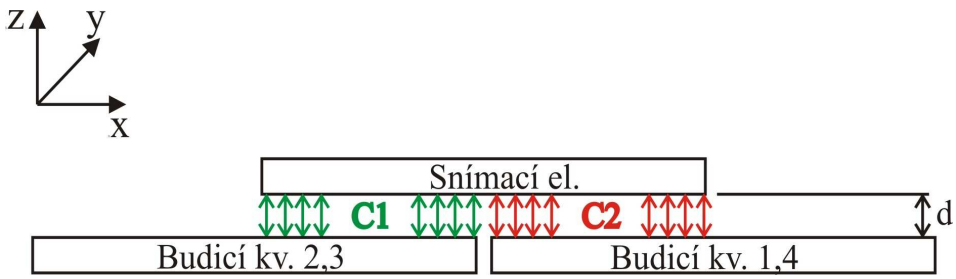


Obr.2.1 Budicí a snímací element

Senzor se chová jako rovinný deskový kondenzátor s homogenním polem podle vztahu:

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \tag{2.1}$$

kde $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ jsou permitivita vakua a relativní permitivita, jejíž hodnota závisí na dielektriku kondenzátoru. Dále *d* je vzdálenost dvou desek kondenzátoru a *S* vyjadřuje plochu vzájemného překrytí těchto desek. Celá situace v řezu je znázorněna na Obr.2.2.

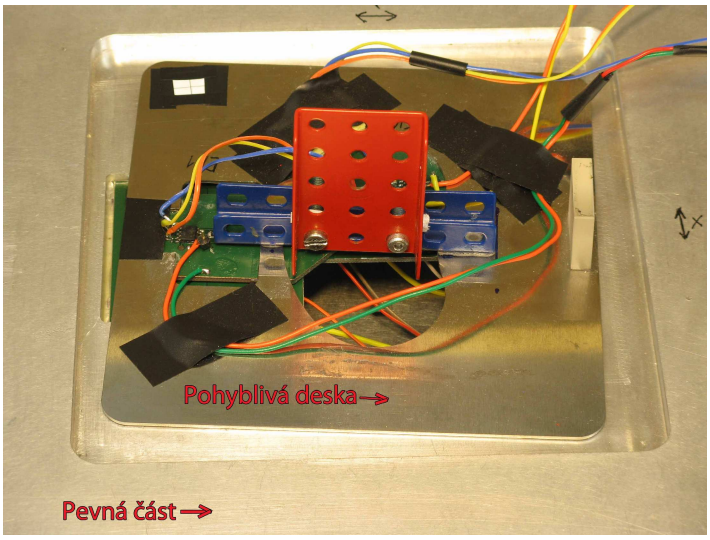


Obr.2.2 Bokorysný pohled na celý senzor

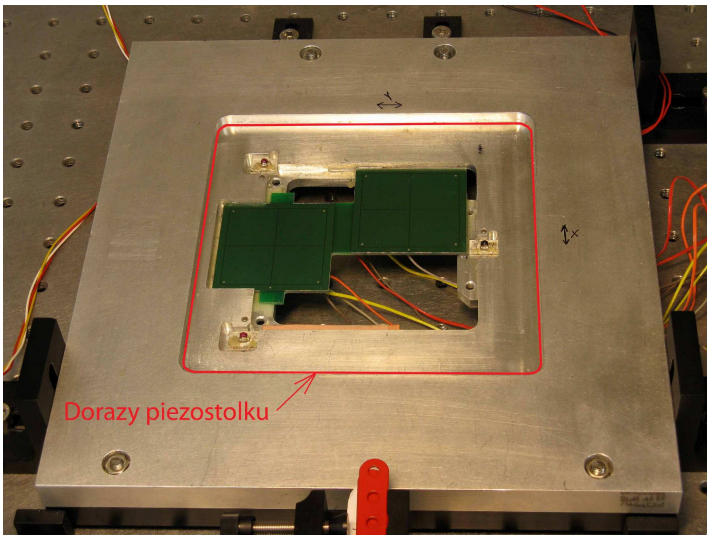
Samotný princip měření na senzoru je následující. Budicí elektrody jsou buzeny obdélníkovým signálem. Na Obr.2.2 jde o měření polohy snímacího elementu ve směru osy x, proto kvadranty 2, 3 budicího elementu jsou buzeny stejným signálem a kvadranty 1, 4 signálem inverzním. Detailně budou budicí signály popsány v dalším textu práce. Je-li střed snímacího elementu nad osou dělící různě buzené elektrody budicího elementu, jak je tomu na Obr.2.2, kapacity *C1* a *C2* jsou stejné a vliv inverzních budicích signálů se vyruší. To znamená, že na snímacím elementu není žádný signál. Pohybem snímacího elementu ze střední pozice převažuje účinek některého z budicích signálů a na snímacím elementu se naindukuje signál s fází převažujícího signálu. Amplituda snímaného signálu je závislá na amplitudě budicích signálů, vzdálenosti elementů *d* a na ploše překrytí snímací elektrody a daných budicích elektrod. Toto byl teoretický popis dané situace, v reálné aplikaci působí na měření řada parazitních jevů, které budou popsány dále.

2.2 Popis polohovacího stolku a jeho ovládání

V této podkapitole jsou popsány jednotlivé části stolku, na který je senzor navrhován. Dále je zde popsán způsob ovládání stolku. Samotný stolek je speciálně vyrobená stanice umožňující pohyblivému elementu jeho horizontální pohyb bez vedení. Pohyblivým elementem je v tomto případě ocelová deska, znázorněná na Obr.2.3. Pohyb této desky je na stolku omezen dorazy, které jsou patrné na Obr.2.4. Na následujících obrázcích jsou tedy popsány důležité části stolku. Je tak sjednoceno názvosloví, které bude v celé následující práci používáno.

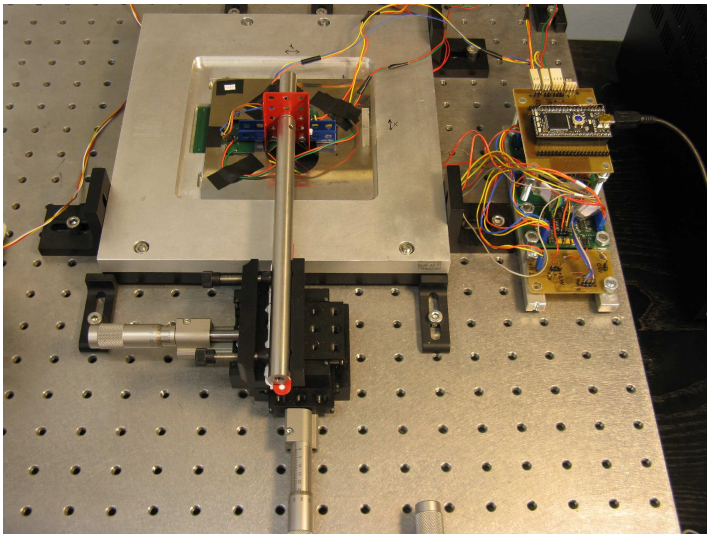


Obr.2.3 Detailní pohled na části stolku



Obr.2.4 Ukázka dorazů stolku

XY stolek je vybaven třemi piezomotorky, které se mají starat o pohyb pohyblivé desky. Tyto motory pracují na tzv. stick-slip efektu [3] a jsou schopny posuvu v řádu stovek nm. Tento zdroj pohybu však v této práci použit nebyl. Pohyblivá deska se posunovala pomocí dvou mikrošroubů [4]. Těmito mikrošrouby je možné posouvat pohyblivou desku v řádech mikrometrů ve směru osy *x* a *y*. Uchycení pohyblivé desky k mikrošroubům je zobrazeno na Obr.2.5.

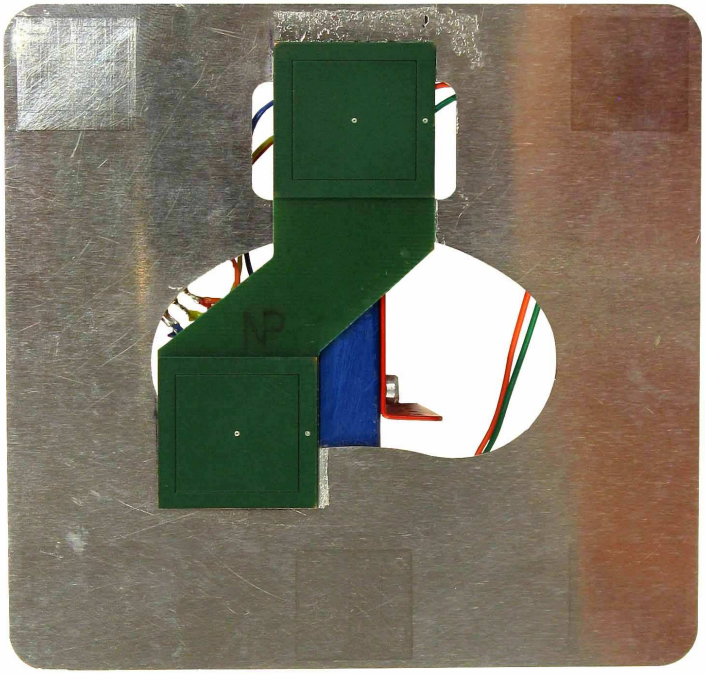


Obr.2.5 Mikrometrická polohovací stanice

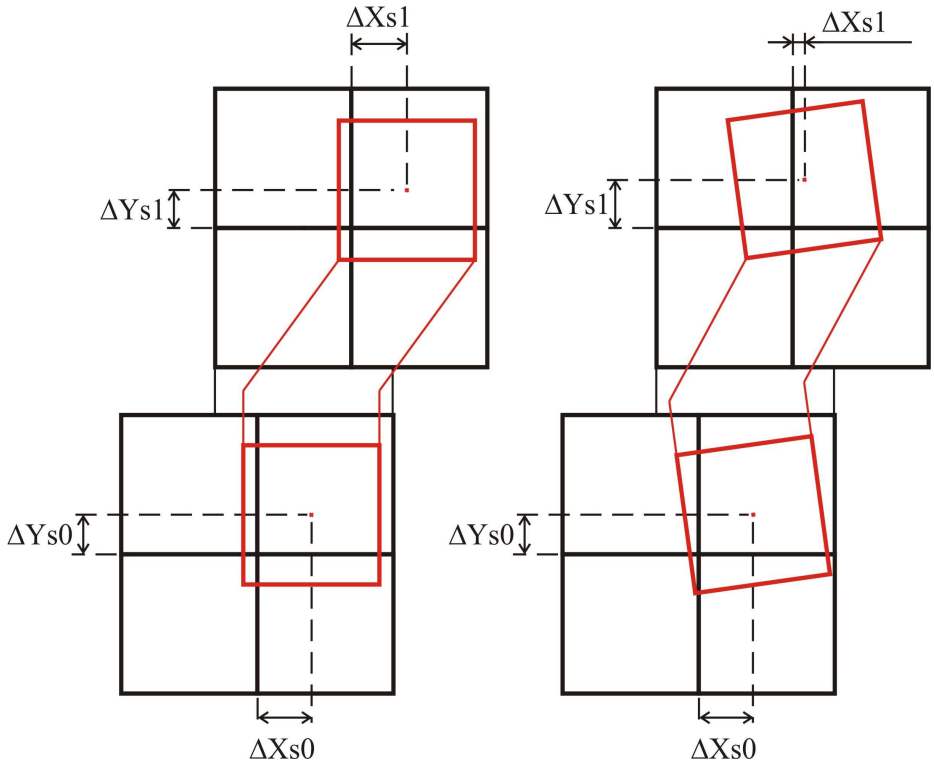
2.3 Dvouelementový senzor

Kvůli absenci vedení se pohyblivá deska stolku nechtěně natáčí kolem svislé osy. Toto natočení mění jednotlivé plochy překrytí mezi snímacími a budicími elektrodami a způsobuje chybu v měření posuvů *x* a *y*. Z jednoho měřicího elementu není možné posuv a natočení odlišit, proto byl zkonstruován senzor se dvěma měřicími elementy, tj. dvěma páry měřicího a budicího elementu. V této práci budou značeny jako „element 0" a „element 1“. Jejich vzdálenost je pevná a desky senzoru byly navrženy tak, aby byla co možná největší. Byla tak dosažena maximální možná citlivost senzoru na natáčení pohyblivé desky. Deska se snímacími elementy je upevněna na pohyblivou desku stolku, viz Obr.2.6, budicí elementy jsou uchyceny na pevnou část stolku, viz Obr.2.4.

Princip takto zkonstruovaného senzoru je následující. Není-li natočena pohyblivá deska kolem osy *z*, středy obou snímacích elementů mají stejnou polohu vůči středům příslušných budicích elementů, což je signalizace nenatočené pohyblivé desky. Při natočení pohyblivé desky kolem osy *z* však pozice jednotlivých snímacích středů jsou různé vůči příslušným budicím středům, což je indikace, že došlo k natočení pohyblivé desky kolem osy *z*. Pro představu jsou obě popisované situace znázorněny na Obr.2.7.



Obr.2.6 Uchycení snímacích elementů dvouelementového senzoru



Obr.2.7 Znázornění dvouelementového senzoru nenatočeného a natočeného kolem osy z

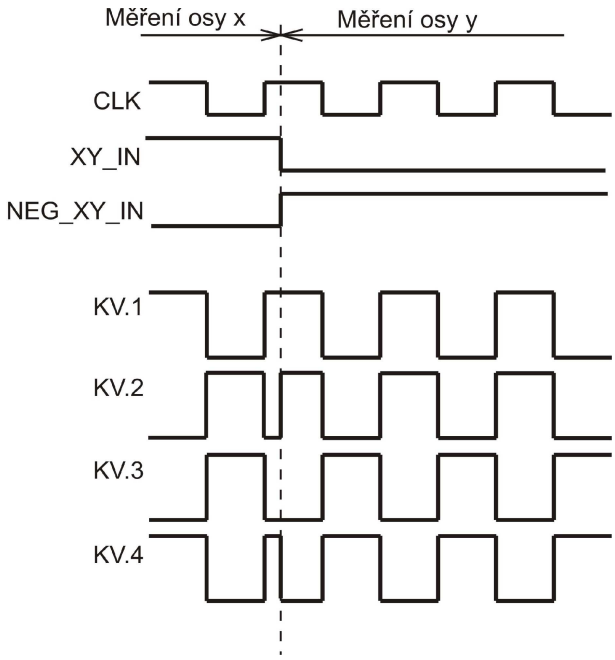
3 Návrh a realizace hardwarových modulů

V této kapitole budou nejprve popsány jednotlivé elektronické moduly připojené k senzoru, jejich schéma zapojení, význam, vstupy a výstupy. Na základě znalosti potřebných I/O signálů bude popsána komunikace mezi jednotlivými moduly.

Koncepce celého senzoru spočívá v buzení jednotlivých elektrod budicích elementů, přičemž na snímacích elementech se sleduje signál odpovídající vzájemnému poměrnému překrytí snímací elektrody a jednotlivých budicích elektrod budicího elementu. Tento signál je přiveden do operačního zesilovače, který je zapojen jako sledovač napětí, a z něho do 16-ti bitového A/D převodníku AD7980. Data z A/D převodníku jsou po SPI rozhraní posílána do mikroprocesoru LPC2368, kde jsou zpracována.

3.1 Budicí elektronika

Jak bylo řečeno, jednotlivé elektrody budicích elementů musí být buzeny periodicky se měnícími signály. Při požadavku měření polohy snímacího elementu ve směru osy *x* musí být 1., 4. resp. 2., 3. kvadrant budicího elementu buzen stejným budicím signálem. Při měření polohy ve směru osy *y* se budí stejným signálem 1.,2. resp. 3.,4. kvadrant budicího elementu. Budicí signály jsou tvořeny logickým skládáním tří signálů, CLK, XY_IN, NEG_XY_IN. Signál CLK je základní signál synchronizující buzení senzoru a následný odběr dat. Je to signál o frekvenci 100 kHz a střídě 50%. Tato frekvence byla zvolena na základě malých kapacit používaného senzoru, čili jeho velké impedanci. Velkou frekvencí buzení se sníží impedance senzoru a potlačí se vliv souhlasných jevů z rušivé 50 Hz frekvence. Logickou úrovní signálů XY_IN, NEG_XY_IN se nastavuje měření ve směru osy *x, y.* Schéma zapojení generující z těchto tří signálů potřebné budicí signály kvadrantů budicích elementů je v příloze A. Výstupní hradlo NAND bylo použito typu CMOS kvůli možnosti pohybovat se s logickou 0 v oblasti záporných napětí. Spodní úroveň logických budicích signálů je tedy log 0 = -10V a horní log 1 = +10V. Na Obr.3.1 je zobrazen časový diagram, na němž je patrná souvislost řídicích signálů buzení a budicích signálů připojených k jednotlivým elektrodám budicího elementu při změně směru měření z osy *x* na *y*.



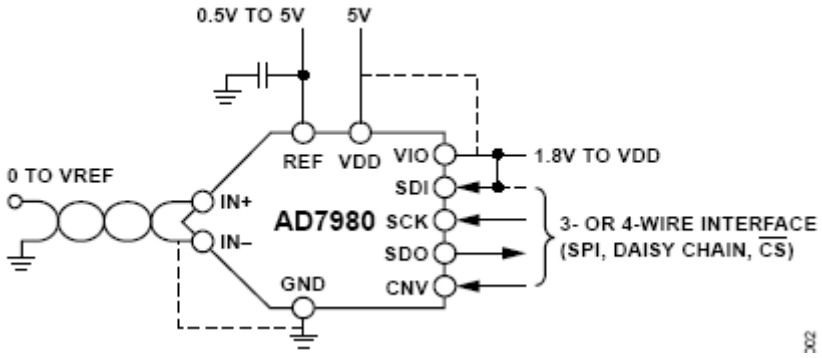
Obr.3.1 Časový diagram budicích signálů

3.2 Snímací elektronika

Zatímco budicí elektronický obvod byl společný pro oba páry elementů, snímací vyhodnocovací obvody jsou nutné separátní pro každou snímací elektrodu senzoru. Na výstup snímací elektrody je připojen operační zesilovač OPA129U v zapojení napěťového sledovače. Sledovač je zařazen kvůli impedančnímu přizpůsobení zdroje signálu s nezaručeným vnitřním odporem.

Za sledovačem napětí je zapojen obvod podle doporučení[5], jehož hlavními prvky jsou diferenciální zesilovač ADA4941 [6] a 16-ti bitový A/D převodník AD7980[7]. Schéma celého zapojení je v příloze A. Výstupní napětí obvodu ADA4941 se na pinu OUTN pohybuje 2.5V ± IN. Snímací elektrody byly tedy nastaveny do takových vzdáleností od budicích elementů, aby špičkové napětí na nich bylo v rozmezí $\pm 2.5V$. Výstup OUTN obvodu ADA4941 byl připojen na vstup IN+ obvodu AD7980. Vstup IN- byl připojen na zem.

Piny A/D převodníku VIO a SDI byly připojeny na napětí 3.3 V, čímž byla definována úroveň logiky digitálních vstupů a výstupů. Řídicími a komunikačními piny AD7980 jsou CNV, SCK a SDO, stejně se budou označovat signály přiváděné na tyto piny, viz Obr.3.2. Náběžná hrana signálu CNV startuje konverzi analogového napětí mezi piny IN+ a IN- na 16-ti bitovou digitální hodnotu, viz. Tab.3.1. Konverze trvá maximálně 750 ns, poté se CNV musí nastavit na logickou 0, aby bylo možné data z A/D převodníku vyčíst . Jakmile je CNV nastaveno do log. 0, MSB bit přenosu je přiveden na výstupní pin SDO. Přivedením 16-ti pulsů na pin SCK jsou postupně odeslána všechna data na pin SDO.



Obr.3.2 Digitální a analogové vstupy/výstupy AD7980 [7]

Popis	Analogový vstup Vref = 5V	Digitální výstup [Hexa]
FSR – 1 LSB	4.999924 V	FFFF
Midscale	2.5 V	8000
-FSR + 1 LSB	76.3 μV	0001
-FSR	0 V	0000

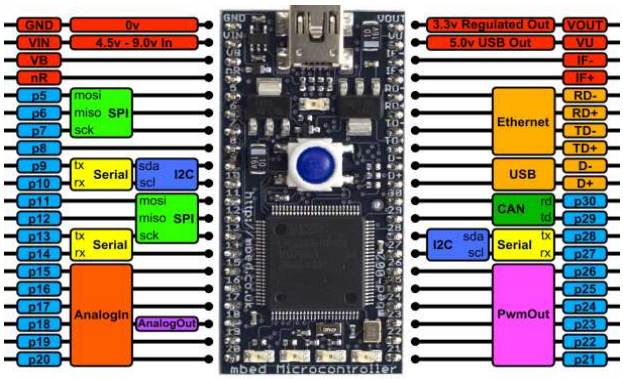
Tab.3.1 Převodní tabulka A/D převodníku AD7980

3.3 Vyhodnocovací a řídicí elektronika

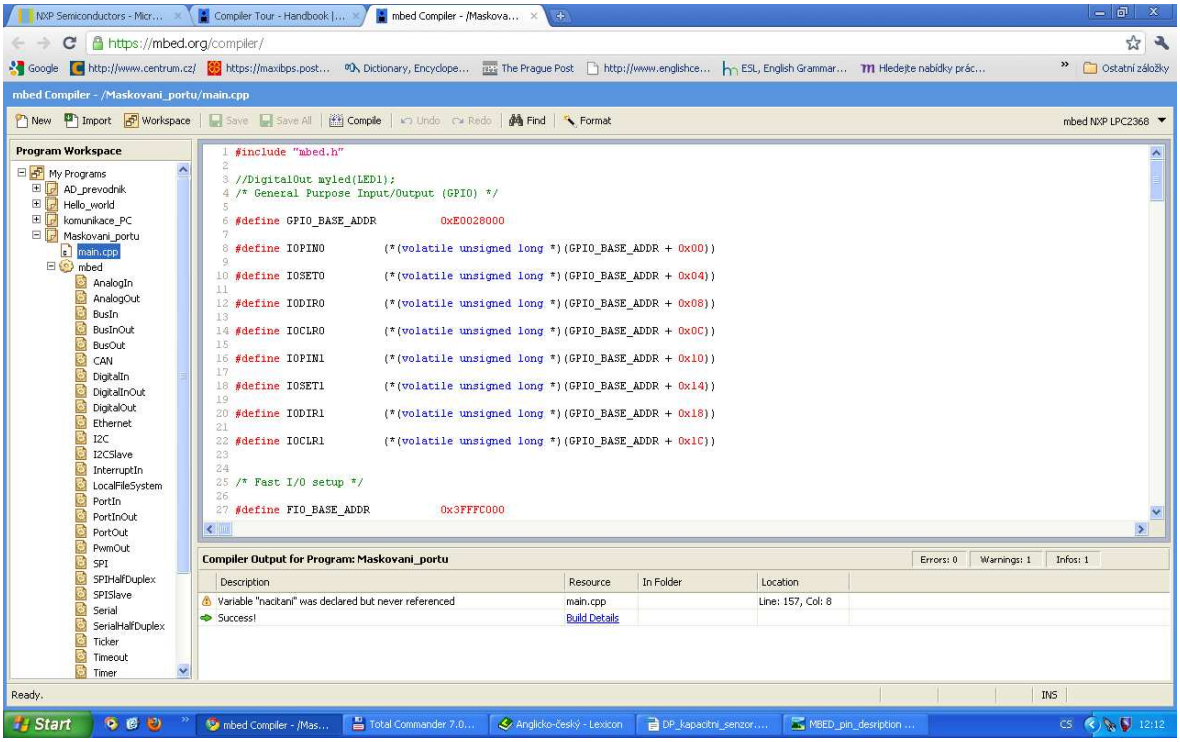
Pro řízení všech elektronických modulů a zpracovávání dat byl použit 32-bitový mikrokontrolér LPC2368 s jádrem ARM7 [8]. Výčet používaných periferií tohoto čipu byl převzat z [9] a je následující:

- 32-Bit ARM7® Core Architecture
- 72MHz operation (64 Dhrystone MIPs)
- Up to 512kB on-chip Flash and 58kB SRAM
- USB 2.0 full-speed
- three SPI/SSP

S tímto čipem byl zakoupen vývojový kit MBED [10], zobrazený na Obr.3.3. Výhodou tohoto kitu je jeho nízká cena a snadné použití, což je u této práce vhodné kvůli zaměření vývoje na samotný senzor. Tento kit má vyvedeny všechny periferie, které byly potřebné (SPI, PWM, GPIO). Pro použití PWM periferie byla využita knihovna *mbed.h*, dostupná na [10], ostatní periferie byly nastavovány klasicky pomocí registrů daného procesoru. U MBEDu je vnitřní frekvence procesoru nastavena na 60 MHz. Nastavením registrů fázového závěsu PLL je možné tuto frekvenci nastavit na maximálních 72 MHz.



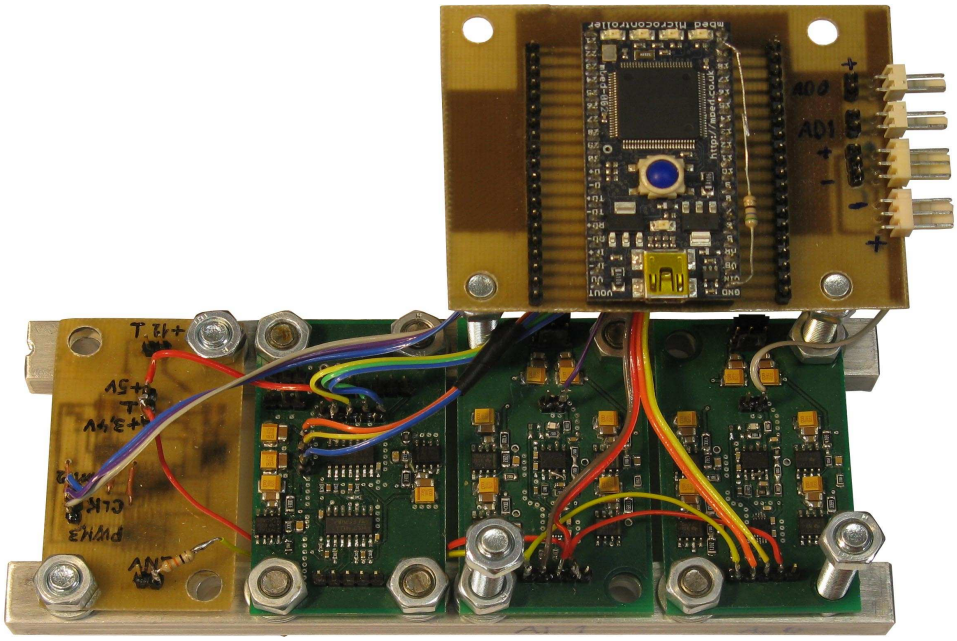
Obr.3.3 Kit MBED s popisem vyvedených periferií



Obr.3.4 Ukázka vývojového prostředí kitu MBED

Posledním elektronickým modulem, který byl potřeba navrhnout, je obvod tvorby signálu CNV pro časování odběru dat A/D převodníku. Schéma zapojení tohoto obvodu je v příloze A. Vstupy obvodu jsou tři PWM signály, jejichž logickým skládáním se generuje signál CNV. Bližší popis těchto vstupních signálů bude v kapitole 3.4.

Všechny sestavené moduly jsou v propojeném stavu zobrazeny na Obr.3.5. Zleva je to modul tvorby signálu CNV, vedle deska s budicí elektronikou a dvě pravé destičky jsou moduly A/D převodníků, nad nimiž je umístěn kit s mikroprocesorem. Dalším vývojem lze samozřejmě navrhnout jeden plošný obvod obsahující všechny zmíněné moduly, čímž odpadne potřeba drátových propojek mezi jednotlivými deskami. Jelikož jde o prvotní vývoj, byly navrženy jednotlivé obvody separátně.



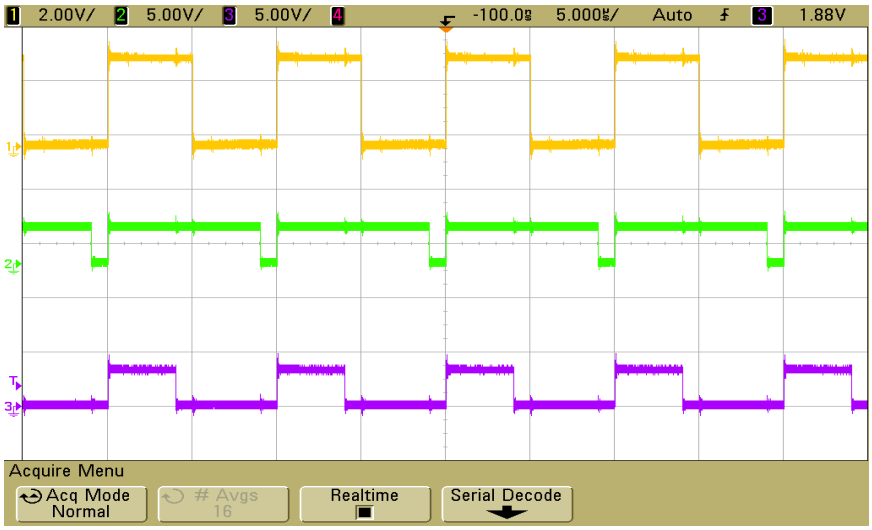
Obr.3.5 Sestavené elektronické moduly

3.4 Komunikace mezi moduly

Komunikaci mezi jednotlivými popsanými moduly má na starosti řídicí mikroprocesor. Z periodicky měnícího se napájení elektrod budicího elementu je patrná potřeba synchronizace buzení a okamžiku odběru dat ze snímacích elementů.

Základním synchronizačním signálem je signál CLK. Tento signál je generován procesorem pomocí PWM periferie na frekvenci 100 kHz a střídě 50%. Byly provedeny testy MBED kitu na stabilitu PWM výstupů[1], které dopadly úspěšně. Kdyby PWM periferie nebyly časově stabilní, musel by být pro synchronizaci použít externí signál. Signály XY_IN a NEG_XY_IN z kapitoly 3.1 jsou nastavovány pomocí rychlých FGPIO pinů procesoru. Po změně TTL úrovně signálu CLK dochází ke skokové změně napětí na budicích elektrodách a tím pádem i na snímací elektrodě. Odběr napětí ze snímací elektrody startuje náběžná hrana signálu CNV, ke které dochází asi 1µs před změnou napěťové úrovně signálu CLK. V tomto okamžiku odezněl přechodový děj ustalování napětí na snímací elektrodě. Pro vytvoření pulsu CNV jsou na vstup obvodu tvorby signálu CNV z kapitoly 3.3 přivedeny tři PWM signály. Nevýhodou PWM výstupů u LPC2368 je skutečnost, že všechny PWM výstupy mají stejnou periodu signálu. Separátně lze nastavovat pouze střída jednotlivých PWM výstupů. Z tohoto důvodu nebylo možné generovat signály CNV změnou frekvence některého z PWM výstupů. Jeden PWM signál je CLK (100kHz), tím je nastavena hodnota periody všech PWM signálů na 10 µs. Střída druhého PWM výstupu byla nastavena asi na 0,4 a střída druhého PWM signálu byla nastavena přibližně na 0,9, viz Obr.3.6.

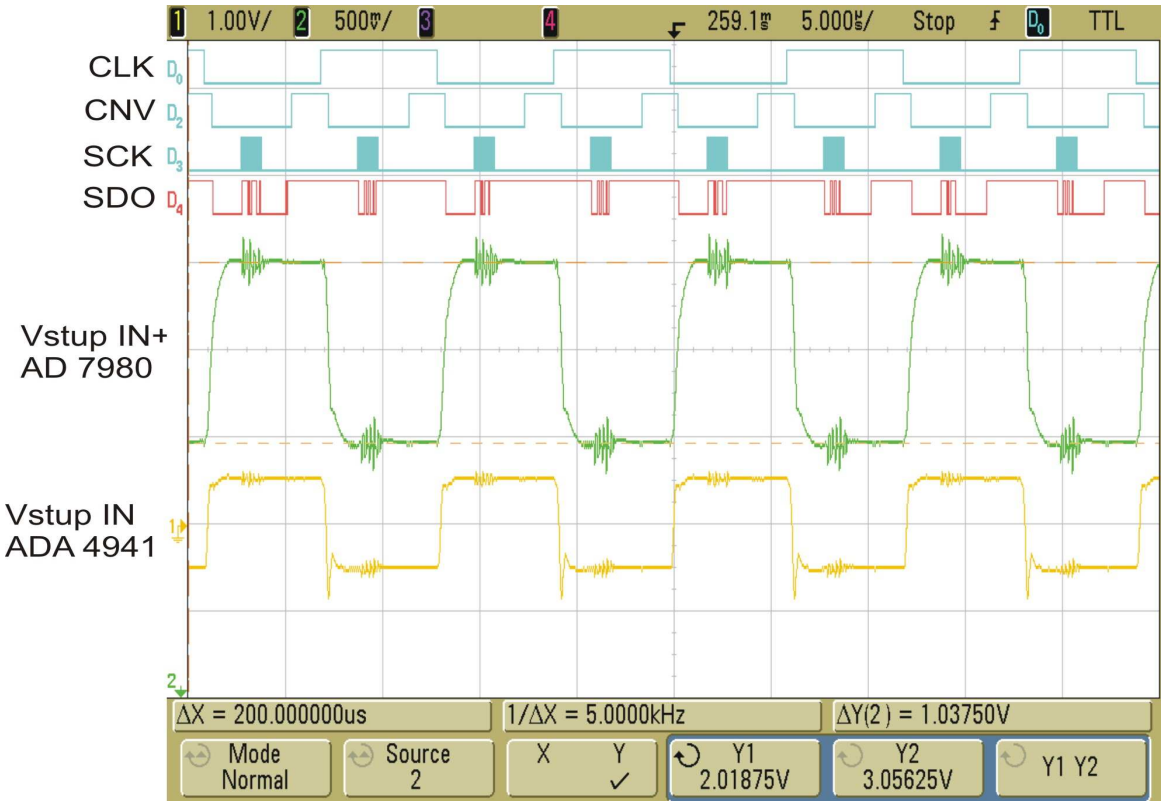
1 Pro synchronizační signál je časová stabilita nutná.



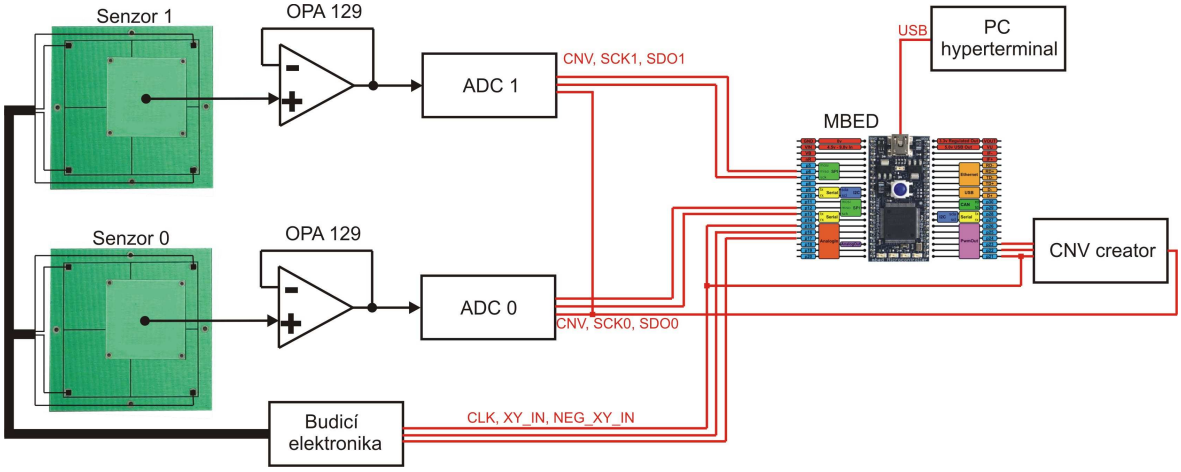
Obr.3.6 Vstupní PWM signály modulu tvorby signálu CNV

3.4.1 SPI rozhraní

Komunikace mezi mikroprocesorem a A/D převodníky probíhá přes SPI rozhraní. Použitý kit disponuje dvěmi periferiemi SSP, které lze nastavit do módu SPI. SPI je zde 4-wire interface, kde ale signál CS není používán, protože každý A/D převodník má svoje SPI rozhraní na čipu. Čip v této komunikaci figuruje jako master, A/D převodníky jako slave. Na straně masteru byl nastaven příjem prvního data jako MSB, což odpovídá sekvenci odesílání dat z A/D převodníků. Komunikace s oběma A/D převodníky probíhá paralelně. Hodinový signál generovaný čipem, který je připojen na vstup SCK A/D převodníku, byl nastaven na frekvenci 18 MHz. Na 16 pulsů tohoto signálu reaguje A/D převodník postupným odesláním dat do čipu. Synchronizace přenosu dat je opět závislá na signálu CLK. Na kitu byl nastaven jeden vstup reagující na hrany externího přerušení, na tento vstup byl připojen signál CLK. V obslužné rutině externího přerušení v čipu dochází ke generování signálů SCK obou SPI rozhraní a k příjmu dat z A/D převodníků. Obsluha přerušení musí být velmi rychlá a efektivní kvůli zachování časové stability přenosu. Signály SCK přenosu způsobují silné zarušení měřeného signálu na snímací elektrodě. Z tohoto důvodu bylo také nutné, aby se v žádném případě neodebíral vzorek napětí A/D převodníkem v okamžiku, kdy dochází k přenosu dat po SPI. Ze všech popsaných vlastností celé komunikace vyplývá velká časová náročnost na stabilitu všech popsaných signálů, která byla experimentálně ověřena. Popsané signály pro jeden A/D převodník jsou zobrazeny na Obr.3.7. Schéma propojení všech elektronických modulů je na Obr.3.8.



Obr.3.7 Řídicí signály jednoho A/D převodníku



Obr.3.8 Schéma propojení jednotlivých modulů

4 Popis funkčnosti senzoru

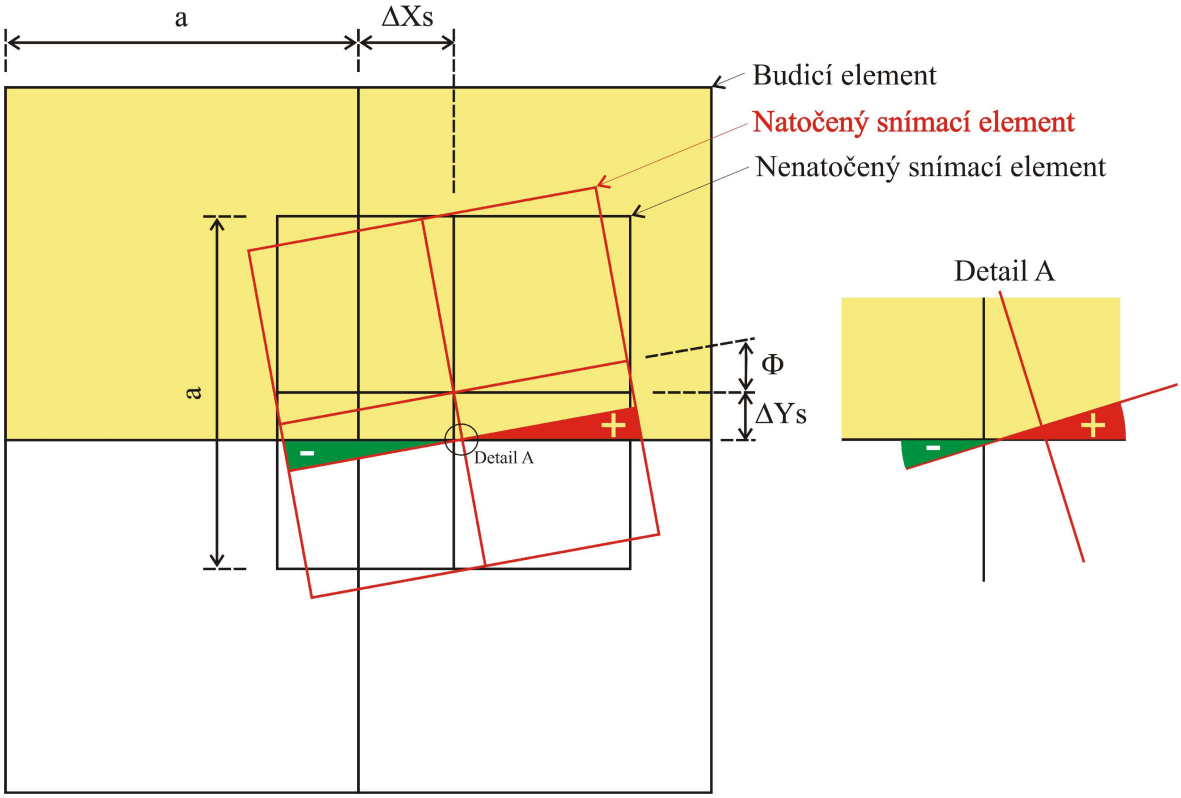
V této kapitole jsou odvozeny vztahy, díky kterým je možné určovat správnou polohu středů snímacích elementů. Do těchto vztahů se dosazuje poloha získaná měřením. Měřená poloha může být vlivem natáčení pohyblivé desky kolem osy *z* chybná. Na sestavený senzor působí různé parazitní jevy, které mají vliv na samotné měření polohy. Jedna z podkapitol tedy bude věnována popisu těchto parazitních jevů. V následující části bude popsán způsob zpracování měřených dat. Na závěr této kapitoly bude vyhodnocena citlivost použitých A/D převodníků a robustnost sestavené polohovací stanice.

4.1 Odvození vztahů popisujících chování senzoru

Pozice středu snímacího elementu nad budicím elementem se určuje ve směru osy *x* a *y*. Pro zjištění pozice ve směru osy *x* jsou buzeny stejným budicím signálem kvadranty 1, 4 budicího elementu a k němu inverzním signálem kvadranty 2, 3. Z naměřeného signálu na snímacím elementu se určí poloha jeho středu ve směru osy *x*. Stejným principem probíhá měření ve směru osy *y*. Kapacity mezi jednotlivými budicími kvadranty a snímacím elementem jsou dány plochami jednotlivých překrytí S1, S2, S3, S4. Dosazením těchto ploch překrytí do vztahů (4.1) se získá měřený poměr poloh středu snímacího elementu ve směru osy *x* a *y*..

$$\Delta X_m = \frac{S1+S4-S2-S3}{S1+S2+S3+S4} = \frac{Sx14-Sx23}{Sx23+Sx14} \qquad (4.1)$$
$$\Delta Y_m = \frac{S1+S2-S3-S4}{S1+S2+S3+S4} = \frac{Sy12-Sy34}{Sy12+Sy34}$$

Ze vztahů (4.1) vyjde bezrozměrná veličina. Tato hodnota je převedena na fyzikální reprezentaci pomocí vztahů (4.3) při dosazení $\phi = 0°$. Takto převedená hodnota udává správnou polohu středu snímacího elementu pouze v případě, nejsou-li snímací a budicí elementy vzájemně natočeny kolem osy *z*. Jak bylo zmíněno, u tohoto senzoru bude k takovému natáčení docházet, protože jde o aplikaci polohování bez vedení. Cílem dalšího zkoumání bylo zjistit, zda plochy překrytí jednotlivých budicích kvadrantů a snímacího elementu jsou stejné při natáčení snímacího elementu kolem osy *z*. Toto platí pouze v případě, kdy středy snímacích a budicích elementů jsou přímo nad sebou ve směru osy *z*, pak natáčení nemá na plochy překrytí vliv. Obecný případ popisuje Obr.4.1, ze kterého byly odvozeny vztahy (4.2). Na tomto obrázku je situace měření ve směru osy *y* (kvadranty 1,2 resp. 3,4 jsou buzeny stejným signálem). Je zde zobrazen snímací element s natočením i bez natočení. Na Obr.4.1 je plocha překrytí *Sy12* snímacího elementu a 1. a 2. kvadrantu budicího elementu, v případě nenatočeného snímacího elementu, rovna $Sy12 = a \cdot (\frac{a}{2} + \Delta Y_s)$. Natočením o daný úhel ϕ se plocha překrytí *Sy12* zmenší o zelený trojúhelník a zvětší o červený trojúhelník, viz detail A Obr.4.1. Detail ukazuje, že tyto trojúhelníky nejsou totožné. Plochy překrytí *Sy12* při natočeném a nenatočeném snímacím elementu tedy stejné nejsou, proto měřený poměr polohy ze vztahů (4.1) vyjde v obou případech jiný. Toto je důvod, proč měřená poloha středu snímacího elementu je vlivem úhlu natočení pohyblivé desky odlišná od skutečné polohy středu snímacího elementu.



Obr.4.1 Vliv natočení snímacího elementu na plochy překrytí S1, S2, S3, S4

Z Obr.4.1 byly odvozeny rovnice (4.2), popisující vývoj ploch překrytí jednotlivých kvadrantů budicího elementu a snímacího elementu v závislosti na pozici středu snímacího elementu a úhlu natočení snímacího elementu kolem osy *z*.

$$Sy12 = a\cdot\left(\frac{a}{2}+\Delta Y_s\right)+\frac{\left(\frac{c}{2}+r_y\right)^2\cdot\sin(\phi)}{2}-\frac{\left(\frac{c}{2}-r_y\right)^2\cdot\sin(\phi)}{2} \qquad (4.2)$$

$$Sy34 = a^2 - Sy12$$

$$Sx14 = a\cdot\left(\frac{a}{2}+\Delta X_s\right)+\frac{\left(\frac{c}{2}+r_x\right)^2\cdot\sin(\phi)}{2}-\frac{\left(\frac{c}{2}-r_x\right)^2\cdot\sin(\phi)}{2}$$

$$Sx23 = a^2 - Sx14$$

$$c = \frac{a}{\cos(\phi)}$$

$$r_y = \frac{\Delta Y_s\cdot(1-\cos(\phi))}{\sin(\phi)\cdot\cos(\phi)}$$

$$r_x = \frac{\Delta X_s\cdot(1-\cos(\phi))}{\sin(\phi)\cdot\cos(\phi)}$$

a - délka strany snímací elektrody
ϕ - vzájemné natočení elementů kolem osy *z*
ΔX_s, ΔY_s - souřadnice středu snímací elektrody vůči středu budicího elementu (skutečné polohy)

Dosazením (4.2) do (4.1) a postupným vyjádřením skutečných poloh byly získány vztahy (4.3). Z nich se určí skutečná poloha středu snímacího elementu v závislosti na měřené poloze středu a úhlu natočení ϕ.

$$\Delta X_s = \frac{\Delta X_m \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} \qquad (4.3)$$
$$\Delta Y_s = \frac{\Delta Y_m \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))}$$

$\Delta X_s, \Delta Y_s$ - skutečné pozice [mm]
$\Delta X_m, \Delta Y_m$ - měřený poměr ploch [-]

Jak je patrné z rovnic (4.3), pro určení skutečné polohy středu snímacího elementu je zapotřebí znalost jeho měřené polohy a úhlu natočení kolem osy *z*. Momentálně je k dispozici pouze informace o překrytí snímacího elementu a jednotlivých kvadrantů budicího, tedy měřená poloha. Natočení kolem osy *z* však z této informace není možné určit. Z tohoto důvodu byl zkonstruován dvouelementový senzor, jehož funkčnost byla popsána v kapitole 2.3. Celý dvouelementový senzor popisují vztahy (4.4).

$$\Delta X_{s0} = \frac{\Delta X_{m0} \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} \qquad (4.4)$$
$$\Delta Y_{s0} = \frac{\Delta Y_{m0} \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))}$$
$$\Delta X_{s1} = \frac{\Delta X_{m1} \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))}$$
$$\Delta Y_{s1} = \frac{\Delta Y_{m1} \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))}$$

4.2 Popis parazitních jevů

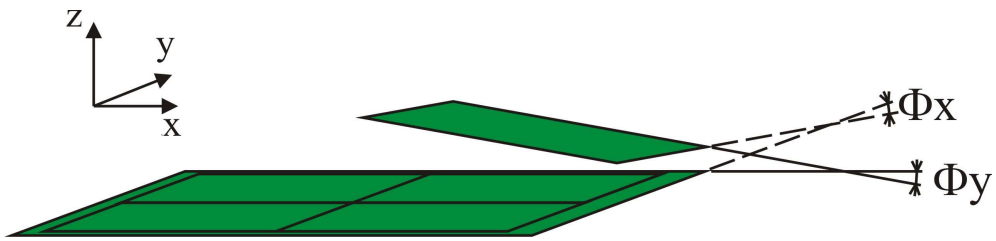
Parazitními jevy jsou myšleny mechanické a konstrukční vady daného senzoru. Jelikož jde o velmi citlivý senzor, tyto jevy mohou mít mikrometrické rozměry, a přesto ovlivňují měřenou polohu.

Jedním z mechanických parazitních jevů je prohnutí desek senzoru. Toto prohnutí by bylo možné eliminovat celoplošným uchycením desek senzoru na vysoce rovný a pevný materiál, maximálně odolný teplotním, vlhkostním a jiným vlivům. Takové uchycení nebylo v této práci zajištěno, proto je možné, že desky budou nějakým způsobem zprohýbané, což může mít vliv na přesnost tohoto senzoru.

Na přesnost měření senzoru má také vliv změna okolní teploty. Vlivem změny teploty se

mění rozměry jednotlivých desek. Velikost roztažnosti použitých desek se pohybuje v rozmezí 10 - 70 ppm/K , viz [11]. Pro zamezení této roztažnosti je nutné zajistit konstantní teplotu v okolí senzoru.

Dalším parazitním jevem ovlivňujícím měření je různoběžnost budicích a snímacích elementů, viz Obr.4.2 . K této různoběžnosti dochází nedokonalým připevněním budicích a snímacích elementů k částem stolku, popř. nedokonalostí samotného stolku. Jak je patrné z pohledu na Obr.4.2, k této různoběžnosti může docházet jak kolem osy *x*, tak *y*.



Obr.4.2 Znázornění různoběžnosti elementů

4.3 Zpracování dat

Tato podkapitola pojednává o zpracování měřených dat a jejich užití. Princip odběru jednotlivých dat byl již popsán v předchozí kapitole, kde každá datová hodnota musela být odebrána v přesně definovaném okamžiku.

Pro zpřesnění určení polohy pohyblivé desky stolku se měřená data průměrují. Pokud je proměnlivost měřených dat způsobena aditivním bílým šumem s normálním rozdělením, zprůměrováním *M* vzorků se získá měření s rozptylem $\sqrt{M}$ krát menším. Pokud nemají měřená data charakter nekorelovaného normálně rozloženého šumu, může průměrování vést k zavádějícímu odhadu měřené veličiny. Přítomnost takového šumu v měřeném signálu je nevyhnutelná – mezi typické příčiny patří mj. zvlnění napájecího napětí, nebo datová komunikace mezi digitálními obvody měřicího systému. Otázkou tedy je, jak velký počet vzorků *M* má ještě smysl použít pro průměrování sebraných dat. Pro stanovení *M* byl použit přibližný „empirický“ postup namísto testování hypotéz o statistických vlastnostech šumu měření. Pro rostoucí *M* byl vyhodnocován tvar histogramu průměrovaných dat. Bylo zvoleno *M* = 16, pro které ještě nedošlo ke změně tvaru histogramu, pouze k jeho zúžení.

Počet dat, která jsou pro průměrování nutná, byl určen následovně. Počet dat *M* musí být konečné číslo. Data, která se průměrují, musí mít symetrické rozložení, pokud možno Gaussovské. Z definice rozptylu normálního rozdělení platí:

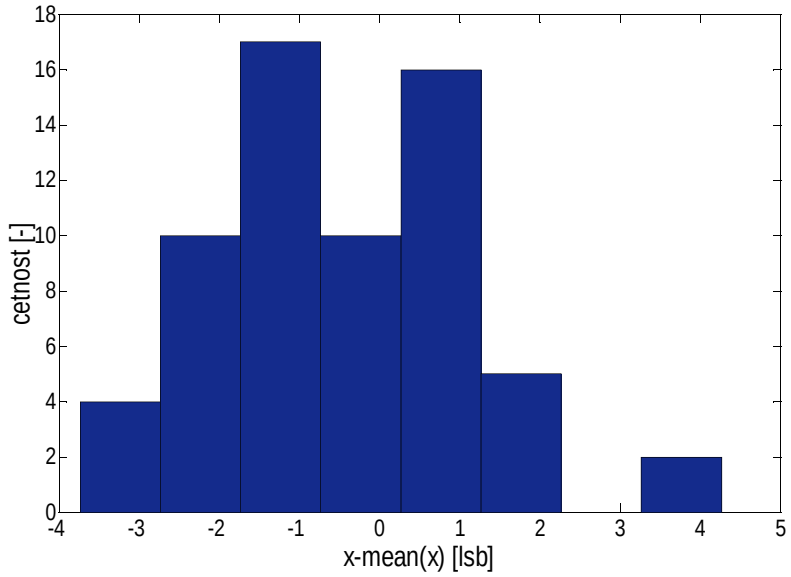
$$M = \left(\frac{\pm 3\sigma}{\Delta x} \right)^2 \tag{4.5}$$

M - počet dat
Δx - šířka binu histogramu

Pro určení kolik dat je nutné pro průměrování byla odebrána ze senzoru sada dat. Byl zobrazen jejich histogram s šířkou binu 1 lsb. Pro tento bin mají data ještě přibližně symetrické normální rozložení, viz Obr.4.3. Podle vztahu (4.5) vyjde počet dat potřebných pro průměrování následující:

$$M = \left(\frac{\pm 3\sigma}{\Delta x} \right)^2 = \left(\frac{\pm 3 \cdot 1.55}{1} \right)^2 = 21.62\, dat$$

Kvůli správnému rozložení průměrovaných dat je výsledná datová hodnota průměrována z 16-ti dat..



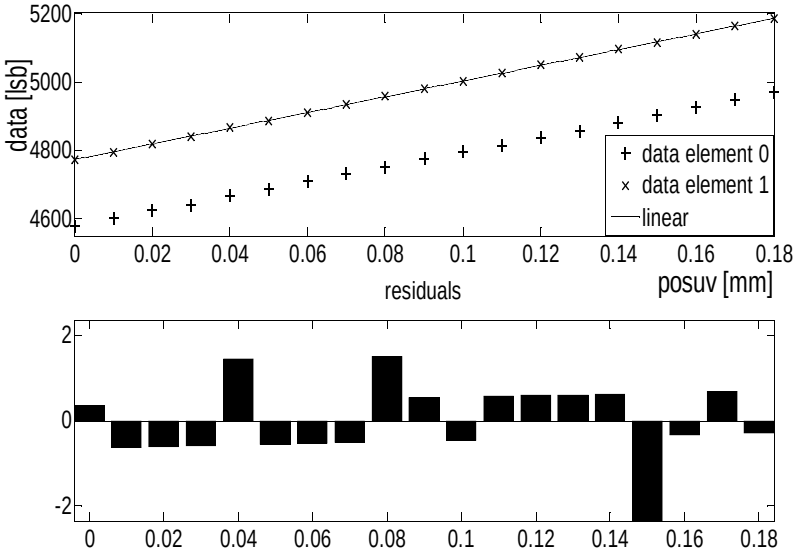
Obr.4.3 Rozložení měřených dat

Pro další práci se senzorem je nutné mít informaci, nad kterým kvadrantem budicího elementu se nachází střed snímacího elementu. Tato informace se získá velmi snadno. Odebere se jedna datová hodnota a to na sestupnou hranu CLK signálu. Porovnáním tohoto data se středem rozsahu A/D převodníku, což je 0x8000, se získá informace, kde střed snímacího elementu leží. Je-li tato datová hodnota větší než 0x8000, tak pro měření ve směru osy x se střed snímacího elementu nachází nad 1., 4. kvadrantem snímacího elementu a pro měření ve směru osy *y* se nachází nad 3.,4. kvadrantem. Pro snadnou představu poslouží Obr.3.1 z kapitoly 3.1.

4.4 Určení citlivosti senzoru

Parametrem, který udává citlivost senzoru, je vliv změny vzájemné polohy snímacího a budicího elementu na výstupní data A/D převodníku. V kapitole 2.2 byl popsán způsob polohování pohyblivé desky stolku. Tato deska se polohuje pomocí mikrometrických šroubů, jejichž pohyb je přenášen přes několik mechanických spojů na pohyblivou desku stolku. Je na místě tedy provést měření, které určuje vliv těchto mechanických spojů na skutečnou polohu pohyblivé desky. Toto měření bude v této podkapitole také rozebráno.

Pro zjištění rozlišení vyrobeného senzoru byla proměřena převodní charakteristika mezi daty A/D převodníku a posunem pohyblivé desky po dorazu stolku. Pohyblivá deska se posouvala krokem 0.01 mm a v těchto pozicích se odebírala data. Změřená data jsou vynesena na Obr.4.4. Posuv pohyblivé desky o 10 μm odpovídal změně měřených dat asi o 22 lsb. Z toho plyne, že rozlišení použitých A/D převodníků dovoluje měření tímto senzorem v řádu jednotek mikrometrů.

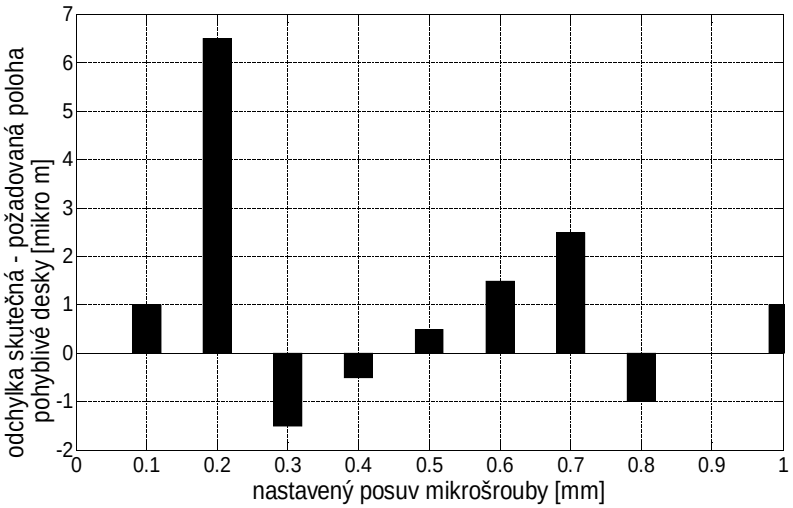


Obr.4.4 Převodní charakteristika data ADC - posuv pohyblivé desky

4.4.1 Ověření robustnosti polohovací stanice

V této podkapitole bude popsáno zmiňované měření ověřující robustnost sestavené polohovací stanice. Pohyblivá deska stolku je posouvána pomocí mikrometrických šroubů. Pro zjištění, zda se pohyblivá deska posunula o vzdálenost nastavenou na mikrošroubu byla použita laboratorní kamera [12]. Na pohyblivou desku byla připevněna snímaná značka. Velikost posuvu této desky byla určena ze změny polohy snímané značky na obrázku z kamery. Detailní informace o způsobu ověřování polohy kamerou budou uvedeny v kapitole 7 o verifikaci měření, kde se tato kamera bude používat pro celkové ověřování funkčnosti sestaveného senzoru.

V tomto měření byla pohyblivá deska posouvána po dorazu stolku, kde jde již o polohování s vedením. Pružina jednoho mikrošroubu přitlačovala pohyblivou desku k dorazu a druhým mikrošroubem byl prováděn její posuv. Výsledek tohoto měření je na Obr.4.5. Na tomto obrázku jsou zobrazeny odchylky mezi polohou pohyblivé desky určenou kamerou a nastavenou mikrošrouby. Je patrné, že odchylky se pohybují v řádech mikrometrů, což je zřejmě způsobeno nejistotou v nastavování polohy mikrošrouby, která je asi ±1 μm. Z tohoto poznatku plyne, že sestavená stanice je poměrně kvalitní a pohyb se přes ni přenáší se zanedbatelnými ztrátami.



Obr.4.5 Vyhodnocení přesnosti polohování mikrošrouby

5 Návrh a realizace měřicích procedur

Text v této kapitole je věnován návrhu a realizaci měřicích procedur senzoru. Tato kapitola je rozdělena na dvě podkapitoly, první pojednává o návrhu kalibrační procedury, druhá o měřicí proceduře. U obou procedur byly navrženy speciální postupy, které budou následně popsány.

5.1 Kalibrační procedura

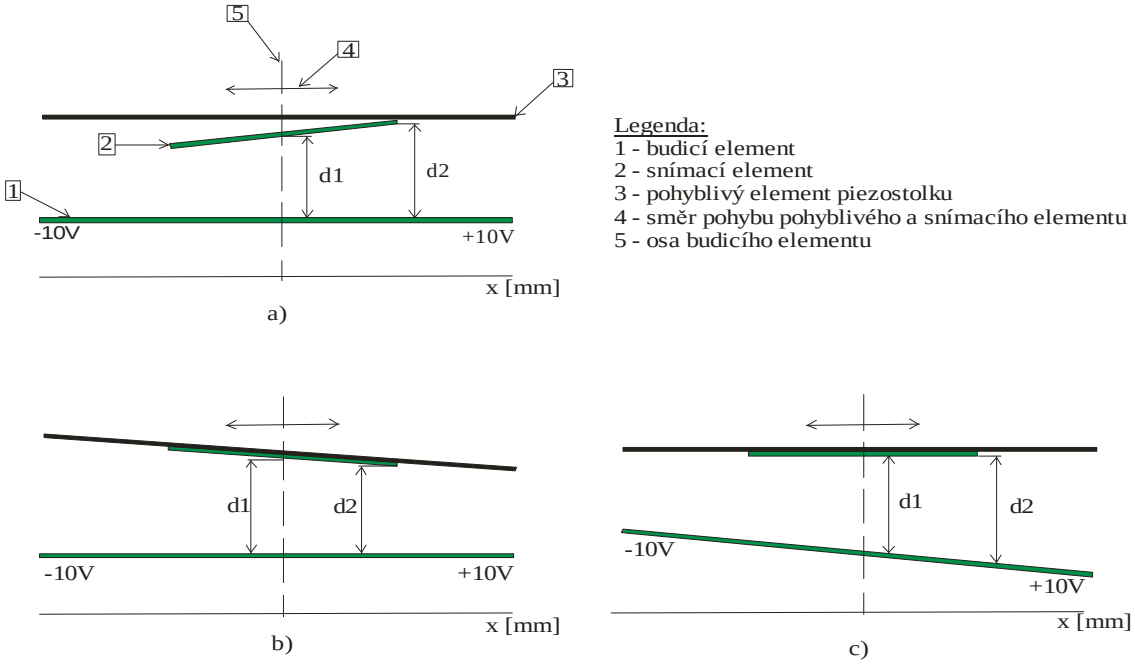
Na úvod by bylo vhodné vysvětlit, proč se kalibrační procedura vlastně provádí. Jde o senzor, který pracuje na bázi kondenzátoru a mají na něj vliv veškeré okolní jevy, jako jsou teplota, vlhkost okolí. Tyto jevy jsou časově nestálé, proto před užíváním senzoru je nutné provést kalibraci. V kapitole 4 byly popsány vlastnosti chování senzoru a parazitní jevy, které na něj působí. Dalším cílem kalibrační procedury je od sebe odlišit parazitní jevy a vliv polohování bez vedení (natáčení kolem osy *z*). Při pohybu pohyblivé desky se její natáčení kolem osy *z* mění, naopak různoběžnost příslušných snímacích a budicích elementů je stále stejná.

Bylo potřeba najít takové místo na senzoru, kde je možné z naměřených dat separovat vliv různoběžnosti elementů a jejich natočení kolem osy *z.*

Takového stavu se docílí doražením pohyblivé desky na doraz stolku. Posuvem této desky po dorazu se nemění její natočení kolem osy *z*, protože se již jedná o pohyb s vedením. Pohyblivá deska se posouvá po konstantních krocích po dorazu a v těchto krocích se odebírají data odpovídající poloze pohyblivé desky. Stejným způsobem se proměří všechny čtyři dorazy stolku. Následné zpracování a užití těchto kalibračních dat je popsáno dále.

5.1.1 Teoretický rozbor

Teoretický rozbor objasní vliv různoběžnosti elementů na měřená kalibrační data. V případě, kdy snímací a budicí elementy jsou rovnoběžné, je vývoj odebraných kalibračních dat lineární. Jak je tomu při jejich různoběžnosti ukáží následující úvahy. K různoběžnosti elementů může dojít několika způsoby. První možnost je taková, že budicí element je rovnoběžný s pohyblivou deskou, na kterou je však snímací element uchycen různoběžně, viz. Obr.5.1 a). Druhá a třetí možnost je rovnoběžné uchycení snímacího elementu k pohyblivé desce, různoběžnost je však mezi touto deskou a budicím elementem. Obr.5.1 b), c).



Obr.5.1 Možné varianty různoběžnosti elementů v řezu

Vývoj měřených dat nejprve odvodíme pro první případ, viz Obr.5.1 a). Je uvažována situace, kde kvadranty 2, 3 budicího elementu jsou napájeny -10V a kvadranty 1, 4 +10V. Kapacita mezi snímacím elementem a jednotlivými půlkami budicího elementu je popsána vztahem (2.1). Změna plochy překrytí snímacího a polovin budicího elementu má v závislosti na posunu po dorazu stolku lineární charakter:

$$S(x)=k_1 x+q_1 \tag{5.1}$$

Vývoj vzdálenosti snímacího elementu od budicího elementu je následující. Pohybuje-li se pohyblivý element na Obr.5.1 a) doprava, vzdálenost *d2* zůstává konstantní, ale vzdálenost *d1* se zmenšuje. Uvažováním vzdálenosti *d,* ve vztahu (2.1), jako aritmetický průměr $d=\frac{d_1+d_2}{2}$ je patrné, že při pohybu pohyblivé desky po dorazu stolku je vývoj *d* také lineární, tedy:

$$d(x)=k_2 x+q_2 \tag{5.2}$$

Vývoj kapacity při posuvu snímacího elementu po dorazu stolku je tedy následující:

$$C(x)=\varepsilon\frac{S(x)}{d(x)}=\frac{k_1\cdot x+q_1}{k_2\cdot x+q_2} \tag{5.3}$$

Pokud by byl průběh funkce *C(x)* lineární, pak by derivace $C(x)'$ byla konstanta:

$$C(x)'=\varepsilon\frac{(k_1 x+q_1)'\cdot(k_2 x+q_2)-(k_1 x+q_1)\cdot(k_2 x+q_2)'}{(k_2 x+q_2)^2}=\frac{k_1 q_2-k_2 q_1}{(k_2 x+q_2)^2} \tag{5.4}$$

Je patrné, že $C(x)'$ obecně není konstanta, proto průběh *C(x)* nebude lineární. Tato nelinearita měřených kapacit je tedy způsobena různoběžností snímacího a budicího elementu.

Odvození pro druhou a třetí možnost, Obr.5.1 b), c), je stejné jako pro první případ. Z těchto obrázků je patrné, že vývoj plochy je stejný jako v prvním případě, tedy lineární. Vývoj průměrné vzdálenosti snímacího a budicího elementu je v závislosti na posuvu pohyblivého elementu také lineární. Z toho plyne, že průběh kapacity *C(x)* je v závislosti na posuvu pohyblivého elementu také nelineární.

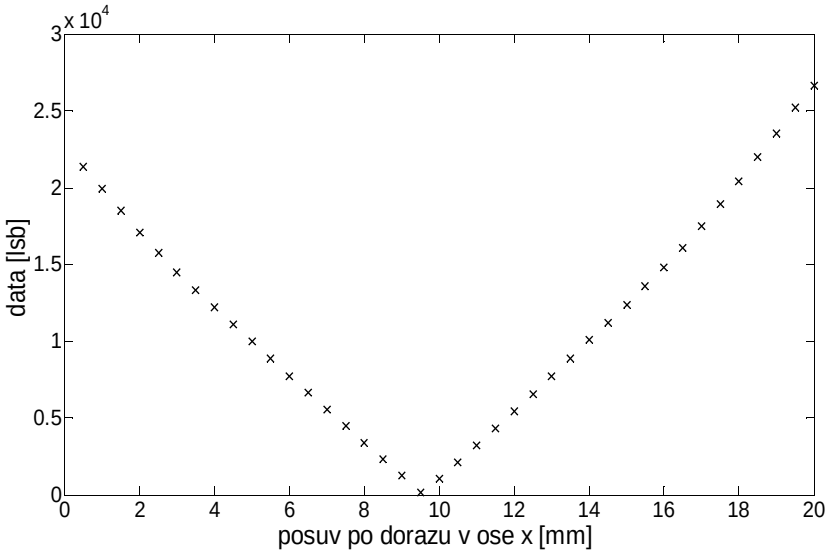
Změřená data se tedy budou prokládat polynomem druhého řádu. Aproximace kalibračních dat tímto polynomem byla nejlepší ze všech testovaných rovnic regrese. Tento polynom je také výhodný kvůli monotónosti svého průběhu.

5.1.2 Realizace kalibrační procedury

V předchozí podkapitole byla kalibrační procedura popsána teoreticky, nyní bude popsána její praktická realizace. Pohyblivá deska se posouvá po dorazu stolku po konstantních krocích, byl zvolen krok 0.5 mm. Pohyb se provádí pomocí zmiňovaných mikrošroubů.

Ukázka dat získaných projetím jednoho dorazu stolku (dále kalibračních dat) je na Obr.5.2. Měření probíhalo následně. Pohyblivá deska se jedním mikrošroubem přirazila na doraz stolku. Druhým mikrošroubem, vykonávajícím posuv v kolmém směru, se nastavila startovní poloha měření a následně se odebrala data. Následoval posuv mikrošroubem o 0.5mm a nový odběr dat. Toto se opakovalo až do cílové pozice. Takto navržená kalibrační procedura by byla v budoucnu realizovatelná i při pohybování pomocí piezomotorů. Pohyb vytvořený piezomotory by mohl být takový, že pohyblivá deska by byla přitlačována k dorazu a zároveň by byl vykonáván posuv po dorazu stolku.

Z Obr.5.2 Je patrný klesající a následně rostoucí trend měřených dat. Data se tedy rozdělí na dvě množiny, data patřící do klesající části a data patřící do rostoucí části. Tyto dvě množiny určují, nad kterou polovinou budicího elementu se nacházel střed snímacího elementu. Při odběru jednotlivých dat se tato informace také ukládá. Jak tuto informaci získat bylo popsáno v kapitole 4.3. Z popsaného plyne, že tímto postupem kalibrace se získá 8 množin dat na každý pár elementů. Jak bylo odvozeno v kapitole 5.1.1, data v každé z těchto množin mají charakter polynomu druhého řádu. Data tedy budou proložena postupem popsaným v následující kapitole.



Obr.5.2 Kalibrační data změřená na jednom dorazu stolku

5.1.2.1 LS odhad měřených dat

Data získaná předchozím postupem se využijí pro určování pozice snímacího elementu nad budicím. Data však byla odebírána pouze s krokem 0.5 mm, proto se proloží polynomem. Jak bylo v kapitole 5.1.1 teoreticky odvozeno, proklad se bude provádět polynomem druhého řádu. K odhadu polynomu byla použita metoda nejmenších čtverců, která minimalizuje odchylky kvadrátů prokládaných dat od daného polynomu. Rovnice hledané regrese je následující

$$y = a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \tag{5.5}$$

Pro všechna měřená data se sestaví přeurčená soustava rovnic: $y = \boldsymbol{A} x + e$, kde

$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$ je vektor měřených dat,

$x = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}$ je vektor odhadovaných parametrů,

$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix}$ je matice složena tak, aby odpovídala rovnice regrese a

e je vektor chyb.

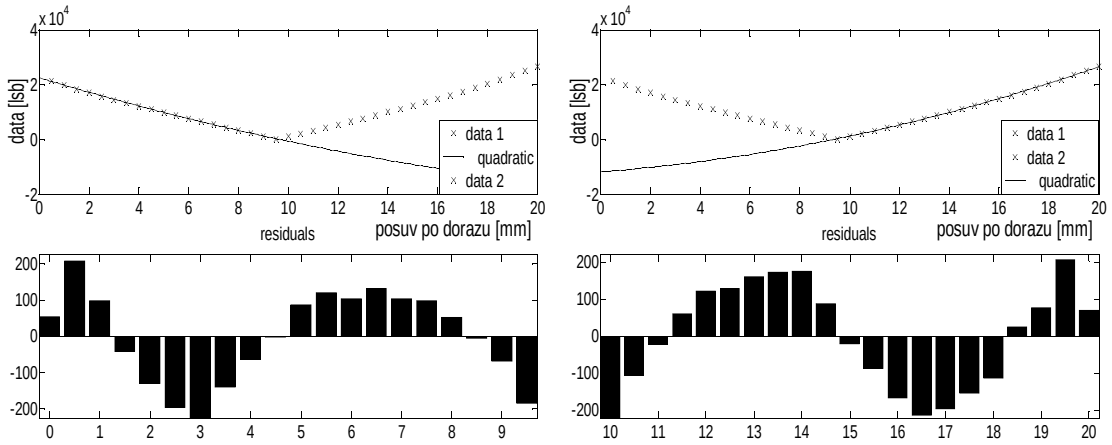
Odhad nejoptimálnějšího vektoru parametrů *x* z hlediska nejmenších čtverců se provede na základě minimalizace kritéria:

$$x_{LS} = arg\,\min_{x} = \{e^T e\} \tag{5.6}$$

Výsledkem řešení (5.6) je získán nejlepší odhad parametrů (5.7), odvození viz [2].

$$x_{LS} = (A^T A)^{-1} A^T y \tag{5.7}$$

Po odhadu regresní křivky není důvod pamatovat si uložená kalibrační data. Místo těchto dat se uloží rezidua[2] jednotlivých kalibračních dat od regrese. V dalším textu bude popsán způsob, jak se měření pomocí reziduí zpřesní. Ukázka prokladu dat parabolami a rezidua jsou na Obr.5.3.



Obr.5.3 Proklad kalibračních dat parabolami

5.2 Určení polohy pohyblivé desky

Popis samotného určení polohy pohyblivé desky stolku ze znalosti dat získaných při kalibraci je uveden v této části práce. Výsledkem určení polohy budou souřadnice středů obou snímacích elementů vůči referenčnímu bodu na stolku. Referenčním bodem byl zvolen startovní bod kalibrace senzoru. Středy snímacích elementů mají vůči sobě a pohyblivé desce neměnnou polohu. Pohyblivá deska může být umístěna kdekoli v prostoru omezeném dorazy stolku. Kalibrace ovšem byla provedena pouze na dorazech stolku. To znamená, že jsou známa pouze okrajová data, ze kterých se musí určovat pozice v celém daném prostoru.

Následující text popíše a zdůvodní způsob, jak se určí poloha středu jednoho snímacího elementu. Uvažujme měření ve směru osy *y*, tj. kvadranty 3, 4 budicího elementu jsou buzeny stejným signálem, kvadranty 1,2 signálem inverzním. Změří se data náležící

2 Rezidua jsou odchylky kalibračních dat od regrese.

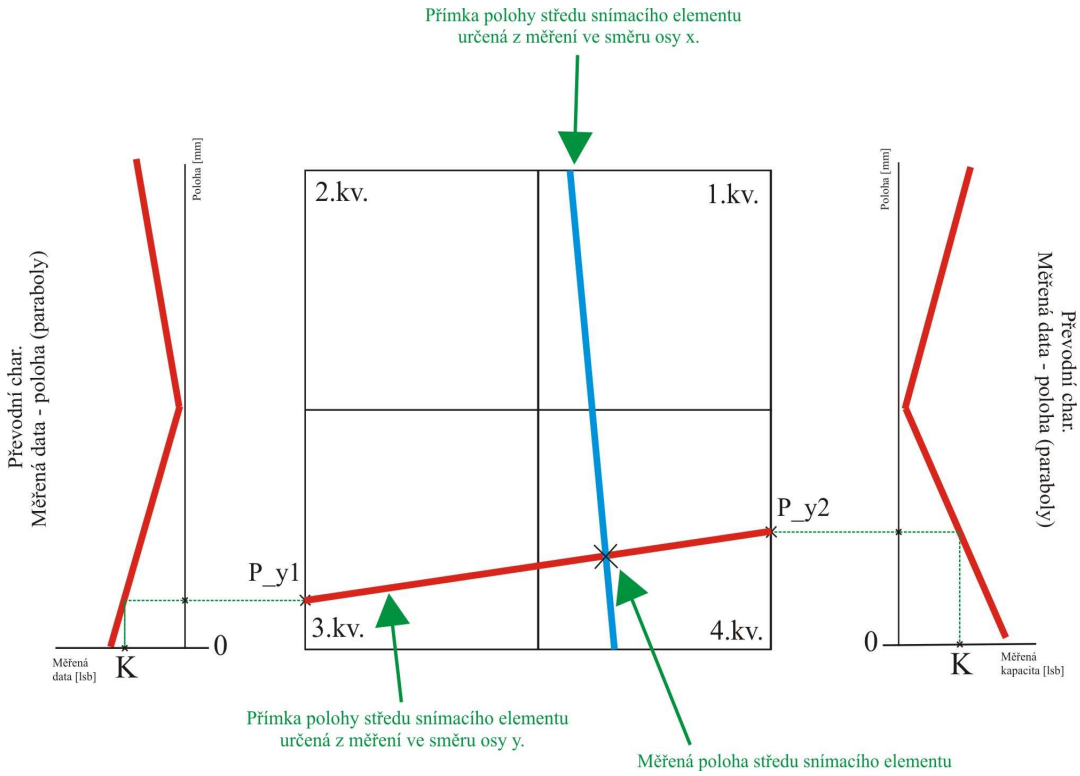
aktuální pozici snímacího elementu a *K* je hodnota jejich průměru, jak bylo popsáno v kapitole 4.3. Z data signalizujícího hrubou polohu středu snímacího elementu se rozhodne, kterou z okrajových parabol použít. Na ukázkovém Obr.5.4 to jsou paraboly příslušící kvadrantům 3, 4 budicího elementu. Měřená data *K* se dosadí do obou protilehlých dorazových parabol a obě paraboly dají v obecném případě různou polohu středu snímacího elementu *P_y1*, *P_y2* ve směru osy *y* [3].

Použití převodní paraboly pro určení polohy středu snímacího elementu je ještě zpřesněno aplikací zmiňovaných reziduí. Parabola byla totiž získána LS odhadem z měřených kalibračních dat. Při kalibraci byla uložena rezidua měřených kalibračních dat od získané parabolické regrese. Na Obr.5.5 je ukázán postup, jak se pomocí reziduí zpřesňuje měření. Měřená data se vždy nacházejí mezi dvojicí kalibračních dat *D1, D2*. Tato dvojice se propojí přímkou. Měřená data *K* se vynesou na odhadnutou parabolickou regresi a zde se určí rozdíl v datech mezi regresí a přímkou spojující *D1, D2*. Rozdíl se označí *Data_rez*. Nová, přesnější poloha se určí úpravou měřených dat *K* o *Data_rez*, jak je na Obr.5.5. Takto korigovaná data se opět vynesou na odhadnutou parabolickou regresi a jsou získány nové okrajové polohy středu snímacího elementu *P_y1, P_y2*.

V případě pouhé různoběžnosti elementů lze tyto dvě okrajové pozice(*P_y1, P_y2*) spojit přímkou. Vliv, který by takovému propojení bránil, by byla křivost jednotlivých desek senzoru. Pak by bylo spojení nutné provést vyšším stupněm polynomu. Tento stupeň by musel dobře modelovat křivost jednotlivých desek. Přesné zjištění celoplošné křivosti by však v praxi byl velmi náročný úkol. Pro zajištění rovnosti desek by bylo vhodné použít kvalitnější materiály na jejich výrobu a zajistit profesionální připevnění jednotlivých desek k částem stolku.

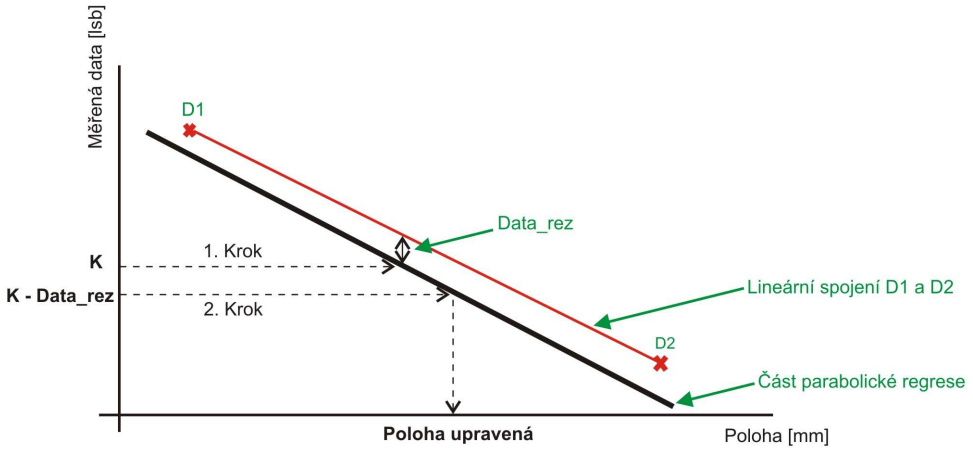
V této práci nebyly jednotlivé desky připevněny profesionálně (průmyslovou technologií), proto jejich křivost nebyla vyloučena. Z tohoto důvodu bylo provedeno měření, jehož cílem bylo zjistit alespoň přibližné celoplošné pokřivení desek. Postup a výsledek tohoto měření je uveden v podkapitole 5.2.2.

3 Tato odlišnost je dána různou vzdáleností snímacího a budicího elementu na dorazech stolku, čili různoběžností elementů, nyní kolem osy *y*.



Obr.5.4 Určení polohy středu snímacího elementu z kalibračních dat

Stejný postup je opakován pro určení polohy středu snímacího elementu ve směru osy *x*. Výsledkem celého měření je získání dvou přímek, které se protínají v měřeném středu snímacího elementu, viz Obr.5.4. Takto popsaným způsobem se získaly měřené polohy středů obou snímacích elementů. Názvosloví „měřené polohy“ je zvoleno úmyslně, protože tyto polohy ještě nemusí být skutečnými polohami středů.



Obr.5.5 Aplikace reziduí pro zpřesnění určené polohy

V případě, že měřené polohy obou snímacích elementů budou stejné, pohyblivá deska stolku nebyla natočena kolem osy *z* a měřené polohy středu jsou již skutečné. V případě, že měřené polohy obou snímacích elementů jsou různé, pohyblivá deska je natočena kolem osy *z* o zatím neznámý úhel ϕ. Měřená a skutečná poloha středu snímacího elementu je vázána právě úhlem natočení ϕ (4.4).

5.2.1 Výpočet skutečné polohy

Jak bylo v této práci zmíněno, měřená poloha středu snímacího elementu nemusí být jeho skutečnou polohou. Vlivem natočení pohyblivé desky kolem osy *z* se tyto polohy liší. V této podkapitole je rozebrán vliv úhlu natočení ϕ na rozdíl mezi měřenou a skutečnou polohou středu snímacího elementu. K ukázání tohoto vlivu je zde vyřešen teoretický přepočet mezi těmito polohami. K simulacím jsou použity vztahy odvozené v kapitole 4.1. Konstanty jsou voleny podle skutečných parametrů používaného senzoru.

$a = 21\,mm$ - délka strany jednotlivých elektrod
$x_d = 20\,mm$ - vzdálenost středů snímacích elementů v ose *x*
$y_d = 56\,mm$ - vzdálenost středů snímacích elementů v ose y
$d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$
$\phi = 3°$ - volba úhlu natočení

V prvním kroku simulace se zvolí předpokládaná skutečná poloha středu snímacího elementu 0 od středu příslušného budicího elementu a úhel natočení ϕ. Poloha středu snímacího elementu 1 se dopočítá ze znalosti zvoleného úhlu natočení ϕ a ze skutečnosti neměnné vzdálenosti obou snímacích elementů (jsou vyrobeny na jedné desce).

$$\Delta Xs_0 = 5\,mm$$
$$\Delta Ys_0 = 1\,mm$$
$$\Delta Xs_1 = -\left(\sin\left(\phi + atan\left(\frac{x_d}{y_d}\right)\right)\cdot d - (20 + \Delta Xs_0)\right) = 2{,}0966\,mm$$
$$\Delta Ys_1 = \sqrt{(d^2 - (20 + Xs_0 - Xs_1)^2)} - y_d + yS_0 = -0.1234\,mm$$

V druhém kroku se provede simulace měření skutečným senzorem. Podle vztahů (4.2) se spočítají jednotlivá překrytí natočeného snímacího elementu a kvadrantů budicího elementu. Vztahem (4.1) se vyjádří měřené poměry ploch ΔXm_0, ΔYm_0, ΔXm_1, ΔYm_1, které jsou bezrozměrné. Jelikož je kalibrace prováděna pro nenatočené snímací elementy, tyto poměry ploch se převedou na fyzikální reprezentaci pomocí vztahu (4.4) při $\phi = 0°$. Jsou tak tedy získány simulace měřených hodnot senzorem, které jsou značeny ΔXsm_0, ΔYsm_0, ΔXsm_1, ΔYsm_1

$$\Delta Xsm_0 = \frac{\Delta Xm_0 \cdot a}{2} = 5.0069\,mm$$
$$\Delta Ysm_0 = \frac{\Delta Ym_0 \cdot a}{2} = 1.0014\,mm$$

$$\Delta Xsm_1 = \frac{\Delta Xm_1 \cdot a}{2} = 2.0995\,mm$$
$$\Delta Ysm_1 = \frac{\Delta Ym_1 \cdot a}{2} = -0.1236\,mm$$

Toto jsou tedy simulací získané hodnoty, které reálný senzor vrací jako měřené hodnoty. Je patrné, že vlivem úhlu natočení ϕ jsou tyto hodnoty odlišné od zvolených skutečných pozic středů snímacích elementů. Pro $\phi = 3°$ jsou tyto odlišnosti v měřených polohách od skutečných v řádech mikrometrů.

Ve třetím kroku se provede přepočet měřených poloh na polohy skutečné. Pro tento přepočet se použijí vztahy (4.4), kde je nutná znalost úhlu natočení ϕ. Jeden způsob jak tuto úlohu vyřešit by bylo dosadit vztahy (4.4) do (4.1). Pro dva páry elementů se takto tedy získají 4 rovnice o 5-ti neznámých. Z pomyslného pravoúhlého trojúhelníka spojujícího středy snímacích elementů je možné sestavit pátou rovnici. Řešení takovéto soustavy je realizovatelné, ale je značně složité. Postupnými pokusy bylo navrženo řešení jiné. Je důležité zjistit úhel natočení. Úhel natočení se tedy spočítá z měřených hodnot $\Delta Xsm_0, \Delta Ysm_0, \Delta Xsm_1, \Delta Ysm_1$. Otázkou je, jak moc chybný takto vypočítaný úhel bude. Výpočet úhlu ϕ opět vychází z pomyslného pravoúhlého trojúhelníka, který je tvořen ze středů snímacích elementů, a je následující:

$$\phi = atan\left(\frac{x_d + Xsm_0 - Xsm_1}{y_d + Ysm_1 - Ysm_0}\right) - atan\frac{x_d}{y_d} = 3.00412°$$

Je patrné, že byl získán úhel, který se liší nepatrně od zadaného úhlu $\phi = 3°$. Nyní lze užít vztahy (4.4) pro přepočet na skutečnou polohu.

$$\Delta Xs_0 = \frac{\Delta Xm_0 \cdot a}{2 \cdot (1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} = \frac{\Delta Xsm_0}{(1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} = 4.99998\,mm$$
$$\Delta Ys_0 = \frac{\Delta Ysm_0}{(1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} = 0.99999\,mm$$
$$\Delta Xs_1 = \frac{\Delta Xsm_1}{(1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} = 2.09659\,mm$$
$$\Delta Ys_1 = \frac{\Delta Ysm_1}{(1 + \cos^{-2}(\phi) - \cos^{-1}(\phi))} = -0.12346\,mm$$

Z těchto poloh se vypočítá nový úhel natočení, který v tomto případě vyjde $\phi = 2.99998°$, a znovu se dosadí do vztahu (4.4). Tento algoritmus nakonec zkonverguje do správných skutečných hodnot středů snímacích elementů. Následuje ukázka implementace tohoto cyklického algoritmu v mikroprocesoru.

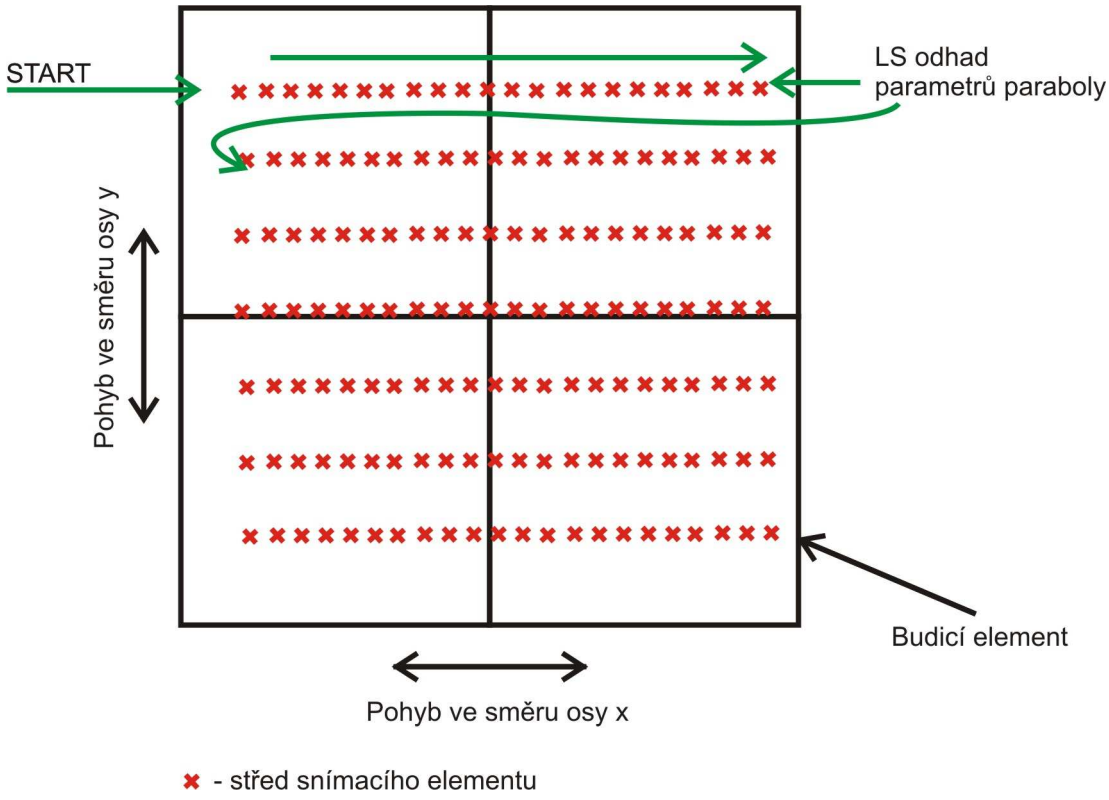
```
fi_old = 10;
presnost = 0.000001;
//výpočet fi

while(fi_old < fi – presnost  || fi_old > fi + presnost)
{

        fi_old = fi;

        Xs0 = Xsm0 / (1+ (2/(2-fi*fi))*(2/(2-fi*fi)) - (2/(2-fi*fi)));
        Xs1 = Xsm1 / (1+ (2/(2-fi*fi))*(2/(2-fi*fi)) - (2/(2-fi*fi)));
        Ys0 = Ysm0 / (1+ (2/(2-fi*fi))*(2/(2-fi*fi)) - (2/(2-fi*fi)));
        Ys1 = Ysm1 / (1+ (2/(2-fi*fi))*(2/(2-fi*fi)) - (2/(2-fi*fi)));

        //výpočet fi

}
```

Implementace funkce *cos* v mikroprocesoru se provádí využitím prvních dvou členů Taylorova rozvoje této funkce, což je pro úhly v intervalu $\langle -10°, 10° \rangle$ dostatečně přesná náhrada.

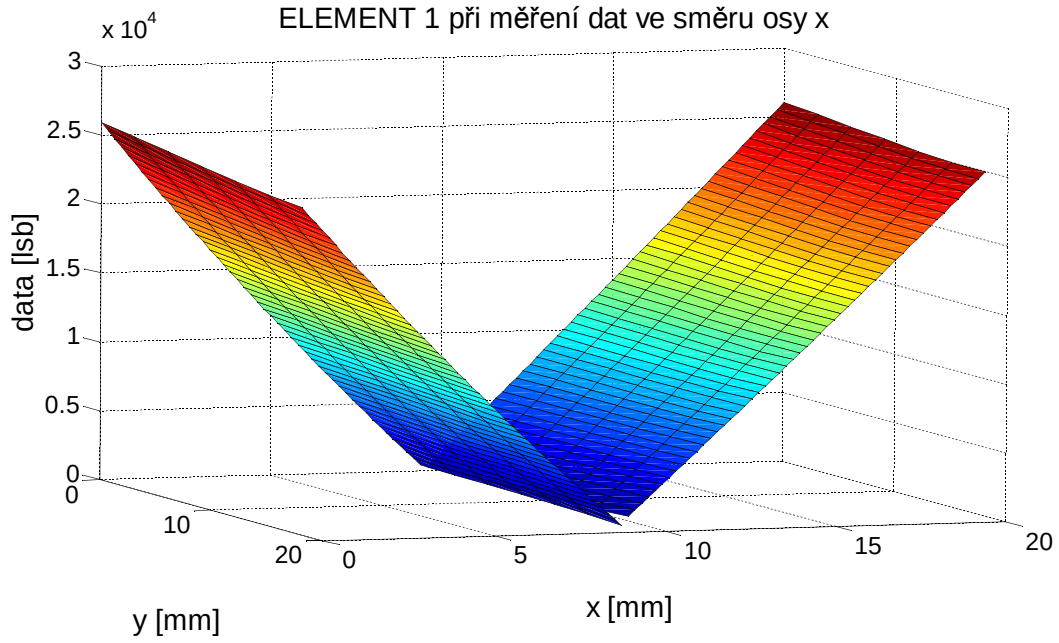
$$\cos\phi = 1 - \frac{\phi^2}{2} \tag{5.7}$$

5.2.2 Celoplošné proměření senzoru

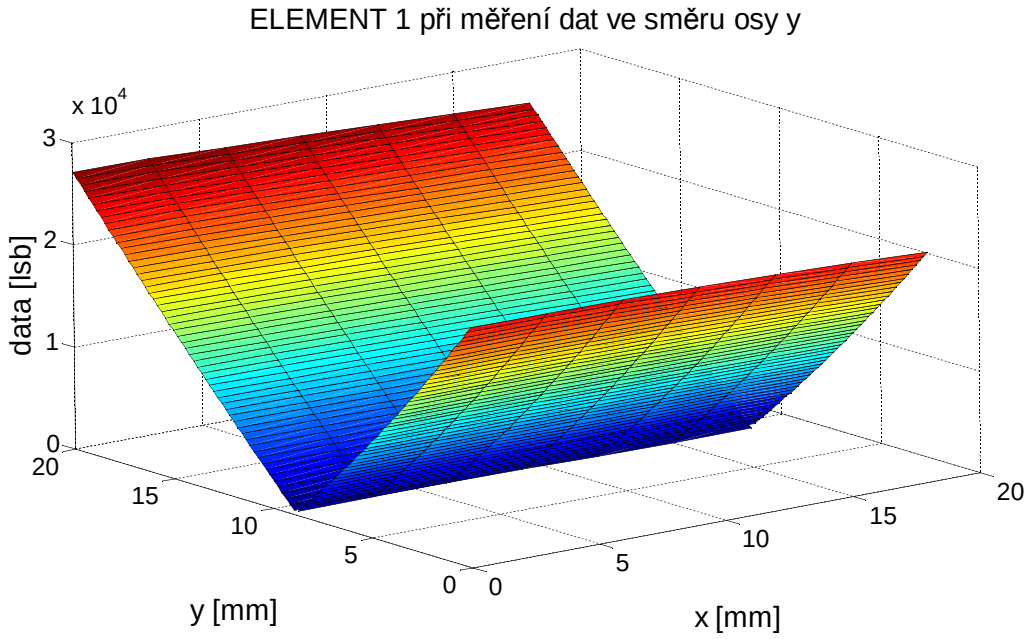
Cílem tohoto měření bylo zjistit skutečné zakřivení měřicích elementů. Z měření probíhajících při kalibraci je patrné, že desky jednotlivých senzorů jsou vůči sobě různoběžné, neví se však, zda nejsou nějakým způsobem prohnuté v prostředních částech elementů, kde se kalibrace neprovádí. Samotná velikost reziduí ukazuje na prohnutí elementů. Při upevnění jednotlivých elementů na pevné a rovné povrchy by bylo jejich prohnutí téměř vyloučeno, v našem případě tomu tak není. Aby bylo možné toto měření uskutečnit, bylo nutné eliminovat vliv proměnného vzájemného natáčení kolem osy *z* snímacího a budicího elementu. Měření proto bylo prováděno mimo dorazy stolku. Vzájemné natočení elementů kolem osy *z* tedy nebylo nulové, ale bylo konstantní.



Obr.5.6 Ilustrační obrázek způsobu celoplošného měření ve směru osy *x*



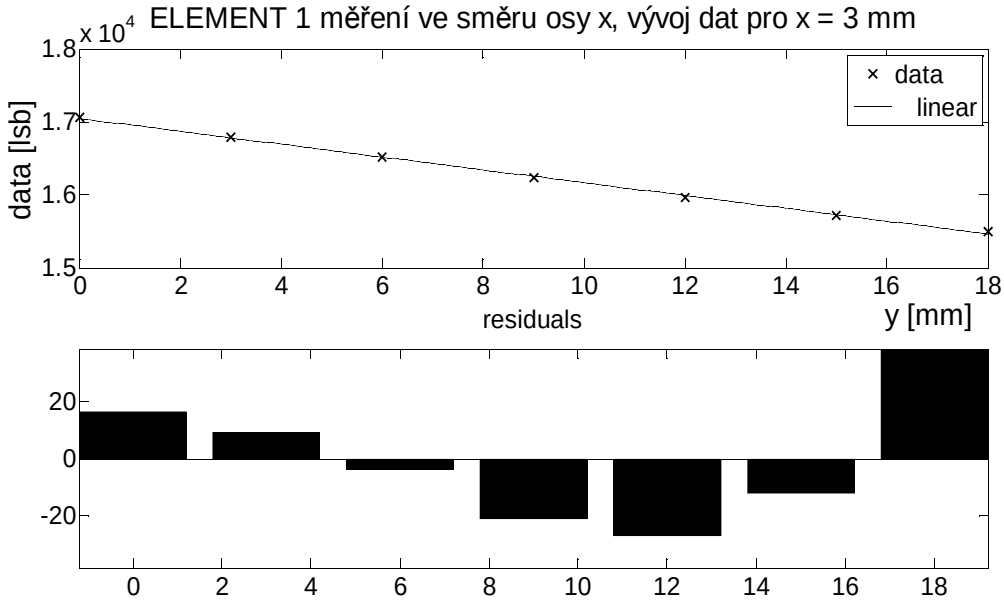
Obr.5.7 Výsledky celoplošného proměření elementů 1



Obr.5.8 Výsledky celoplošného proměření elementů 1

Vyhodnocení měření:

Vyhodnocení měření lze ukázat na Obr.5.9. Regresní přímka je klesající z důvodu různoběžnosti snímacího a budicího elementu kolem osy *x*. Z reziduí je patrné, že měřená data se od regrese liší. Tyto odlišnosti jsou dány zakřivením desek měřicích elementů. Maximální odchylka měřených dat od lineární regrese je 89 lsb. V kapitole 4.3 byla změřena citlivost senzoru 2.2 lsb/μm. Vlivem zakřivení desek senzoru může tedy docházet k maximálním chybám měření asi 40 μm. Zde lze tedy pro budoucí zpřesnění senzoru hledat cestu. V prvním kroku ve výrobě a upevnění kvalitnějších elementů, dále v propojení krajních parabol polynomem jiného řádu než prvního, viz 5.2, což je ale velmi složitá úloha.



Obr.5.9 Ukázka vyhodnocení celoplošného měření

Obr.5.10 Ukázka vyhodnocení celoplošného měření

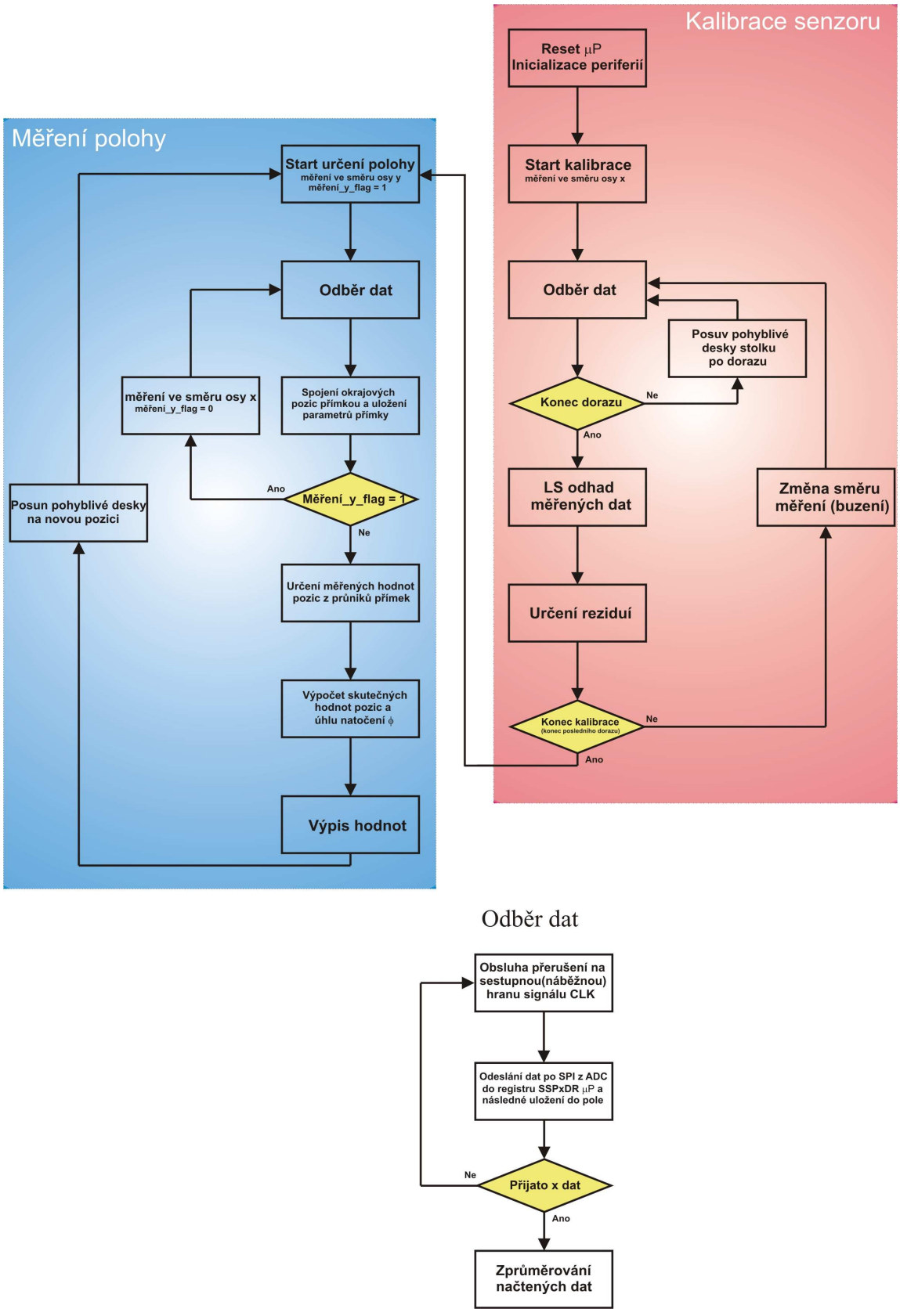
6 Implementovaný firmware

V této kapitole bude popsána softwarová část implementovaná v mikroprocesoru. Software se stará o tvorbu řídicích a komunikačních signálů a následně o zpracování a vyhodnocení měřených dat. Vývojový diagram programu je zobrazen na Obr.6.1. Samotný program startuje po restartu procesoru, kdy se inicializují používané periferie. Pod tuto inicializaci spadá volba nastavení rychlých I/O portů (fast GPIO), dále se provede přetaktování vnitřní hodinové frekvence čipu na 72MHz, což je u tohoto čipu maximum. Přetaktování spočívá ve vhodném nastavení konkrétních registrů děliček fázového závěsu PLL. Dále proběhne inicializace SPI přenosu, kde se nastaví čip do pozice mastera přenosu a děličkou se nastaví rychlost přenosu dat na 18MHz. Směr přenosu dat je nastaven na MSB first. Dále se nastaví citlivost jednoho pinu I/O brány P0 na externí přerušení, jehož význam bude následně popsán. Jako poslední se nastavují PWM periferie. Pro jejich nastavení je použita knihovna *mbed.h* dodaná ke kitu MBED. Příkazem *pwm2.period_us(6)*; se nastaví perioda PWM signálu a *pwm2.write(0.7f);* nastaví jeho střídu. Tato knihovna byla použita vzhledem k její vhodné implementaci obsluhy potřebných PWM periferií, přičemž časová stabilita generovaných PWM signálů byla ověřena měřeními.

Po inicializaci periferií začne kalibrační procedura senzoru, která začíná posuvem pohyblivé desky po dorazu stolku ve směru osy *x*. Jak bylo popsáno v kapitole 3.1, směr měření se řídí pomocí logických úrovní signálů XY_IN a NEG_XY_IN, které se nastavují pomocí konkrétních pinů I/O brány P0. Měření ve směru osy *x* se provádí nastavením výstupního portu na hodnotu FIO0SET |= 0x01000000;.

Odměr jednotlivých dat je programově vyřešen v obsluze externího přerušení, které je vyvoláváno na hrany synchronizačního signálu CLK. Citlivost na jednotlivé hrany tohoto signálu se nastavuje na pinu brány P0.23. V obsluze přerušení je vytvořeno 16 hodinových pulsů signálu SCK o frekvenci 18MHz, při kterých jsou přenesena data z A/D převodníku do registru SSPxDR. Tato data se uloží do pole, aby je po určitém počtu takto odebraných dat bylo možné zprůměrovat. Všechny operace prováděné v obsluze přerušení musejí být velmi rychlé, synchronizační signál CLK je totiž nastaven na frekvenci 100kHz. Na vyvolání a obsluhu přerušení jsou tedy 4 μs. Půl periody signálu CLK je 5 μs, poslední mikrosekundu probíhá odběr dat A/D převodníkem (zde nesmí probíhat SPI přenos dat, kvůli zarušení napětí na snímací elektrodě). Po zprůměrování dat se vyčká na posuv pohyblivé desky stolku na další pozici, kde se provede další odměr dat. Nyní je toto implementováno pouze časovou smyčkou a k posunu pohyblivé desky dojde ručně pomocí mikrošroubů. V budoucnu zde bude implementována komunikace s budičem piezomotorů, které posuv vykonají automaticky. Po projetí celého dorazu stolku se provede proklad měřených kalibračních dat polynomem druhého řádu pomocí LS odhadu parametrů, jak bylo popsáno v 5.1.2.1. Do dvourozměrných polí se uloží parametry regrese a rezidua kalibračních dat od regrese. Popsaný postup se opakuje pro všechny čtyři dorazy stolku, po jejichž projetí se ukončí kalibrační procedura a přejde se do stavu aktivního měření senzorem.

Kroky samotného měření byly detailně popsány v předchozí kapitole a jsou patrné z následujícího vývojového diagramu, viz Obr.6.1. Výsledná pozice středů snímacích elementů vůči příslušným budicím elementům a úhel natočení ϕ je přes USB rozhraní přenesena do hyperterminálu PC a data jsou tak zpřístupněna uživateli.



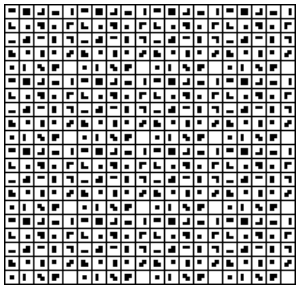
Odběr dat

Obr.6.1 Vývojový diagram firmwaru

7 Verifikace měření

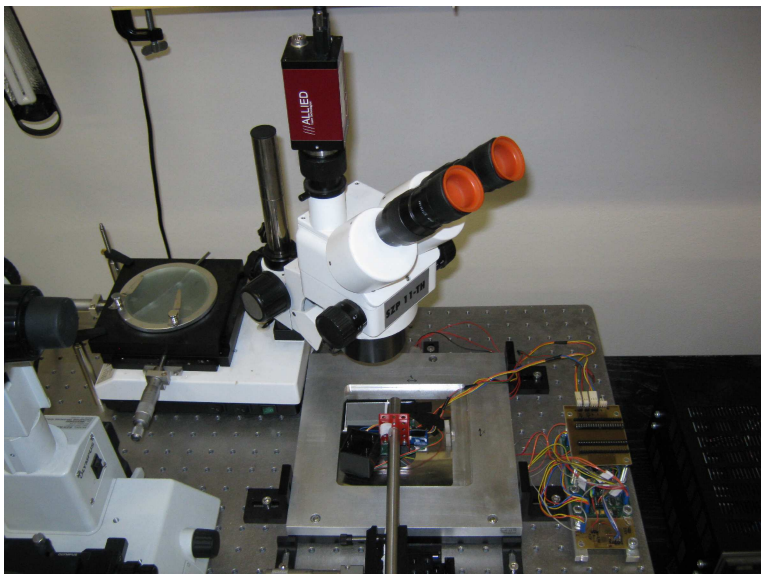
V této kapitole jsou sepsány výsledky měření navrženým kapacitním senzorem. Výstupem těchto měření je poloha středů snímacích elementů vůči startovní pozici. Tyto výsledky jsou následně experimentálně ověřeny.

Na doporučení vedoucího práce byla pro verifikaci použita laboratorní kamera [12], která je propojena s PC a tak je možné online sledovat pořizovaný obraz. Aby bylo možné touto kamerou snímat dostatečně detailní pohyb, byla upevněna na tubus mikroskopu. Na pohyblivou desku stolku byl připevněn sledovaný motiv, který byl vyroben metodou osvitu na transparentní fólii. Ukázka části motivu je na Obr.7.1. Jednotlivé čtverečky v tomto motivu mají ve skutečnosti rozměr 100 x 100 μm. Používaná kamera pracovala v rozlišení 640 x 480 bodů na snímek. Po maximálním možném zvětšení mikroskopem bylo dosaženo rozlišení 4,5 μm na jeden obrázkový pixel. To znamená, že určená pozice kamerou je dána s přesností $\pm 4{,}5\,\mu m$, což je k přesnosti sestaveného kapacitního senzoru dostačující.

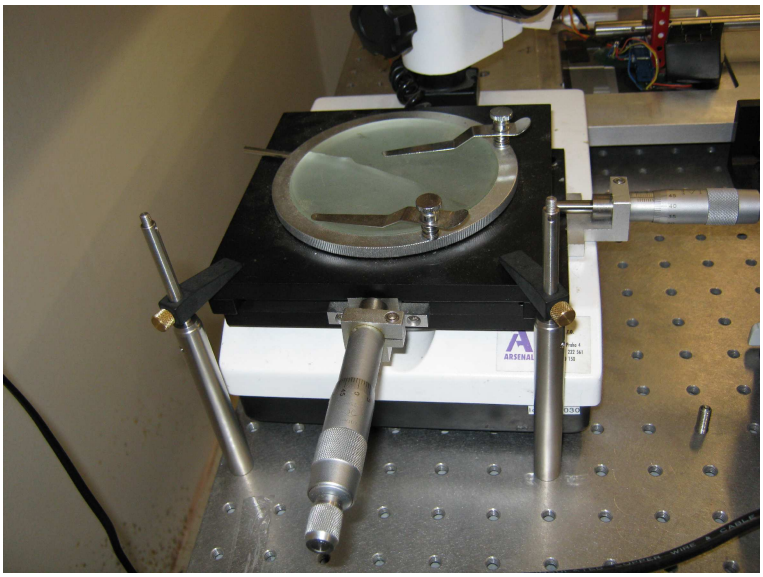


Obr.7.1 Sledovaný motiv

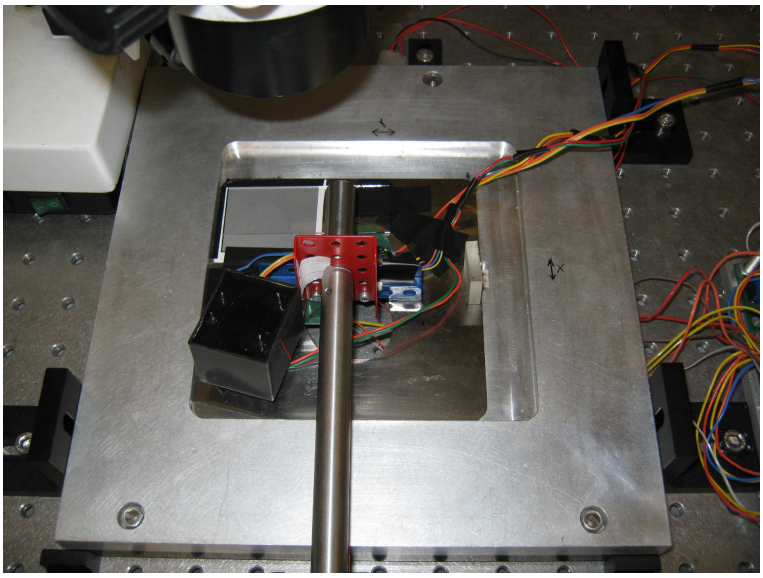
Vyhodnocení polohy z kamery probíhá na základě pohybu konkrétních bodů (pixelů) snímaného motivu. Detailní ukázky celého měřicího a verifikačního aparátu jsou na Obr.7.2 – 4.



Obr.7.2 Ukázka verifikační stanice



Obr.7.3 Zaaretování pozice mikroskopu



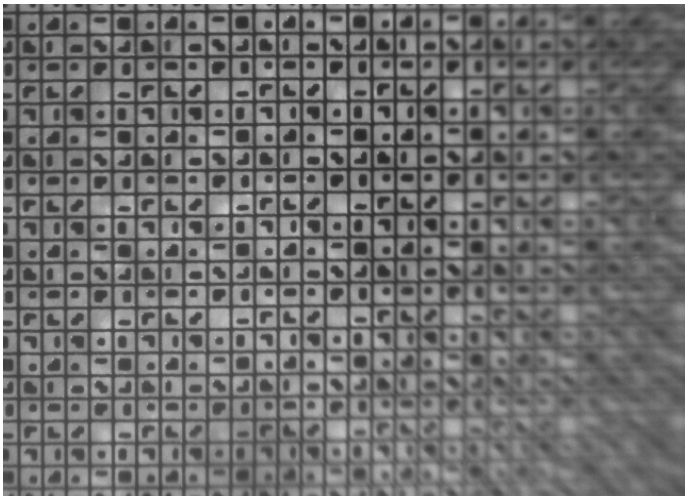
Obr.7.4 Připevnění snímaného motivu k pohyblivé desce

První ověřující měření bylo provedeno pro nenatočenou pohyblivou desku stolku kolem osy *z*. V tomto případě je posuv všech bodů na pohyblivé desce stolku stejný. Byla tedy provedena kalibrace kapacitního senzoru a následně byla pohyblivá deska umístěna do náhodné pozice tak, aby její hrany byly optimálně vodorovné s dorazy stolku a byl změřen její posuv od startovní pozice. Startovní pozice je myšlena první měřená poloha při kalibraci. Zde udávají kalibrační paraboly hodnoty poloh středů snímacích elementů $[0,\ 0]mm$. Změřené polohy středů obou snímacích elementů od startovní pozice jsou následující.

$$[\Delta Xs0,\ \Delta Ys0] = [6.143,\ 1.274]\ mm$$
$$[\Delta Xs1,\ \Delta Ys1] = [6.167,\ 1.303]\ mm$$

Polohy středů obou snímacích elementů by měly být teoreticky shodné, protože v tomto případě není pohyblivá deska natočena kolem osy *z*. Je zapotřebí brát v úvahu všechny nejistoty měření sepsané v předchozím textu práce.

Nyní se získané pozice z kapacitního senzoru ověří ze snímků pořízených kamerou. Na měřené pozici byl vyfocen Obr.7.5.



Obr.7.5 Cílová poloha snímaného motivu, měření bez natočení

Porovnáním posuvu pixelů mezi startovními obrázky a Obr.7.5 v osách *x, y* byla určena poloha pohyblivé desky na:

$$[\Delta Xs_k,\ \Delta Ys_k] = [6.111,\ 1.217] \pm 0.0045\ \ mm$$

Rozdíl výsledků udávaných kapacitním senzorem a verifikační kamerou je:

$$\Delta x0 = 0.032\ \ mm$$
$$\Delta y0 = 0.057\ \ mm$$
$$\Delta x1 = 0.056\ \ mm$$
$$\Delta y1 = 0.086\ \ mm$$

Druhé ověřující měření bylo provedeno pro natočenou pohyblivou desku. Byla provedena dvě měření, a to pro kladný a záporný úhel natočení ϕ. V tomto případě se nebude verifikace provádět na základě porovnání posuvu středů snímacích elementů a pixelů na obrázku z kamery[4]. Verifikace se zde provede na základě porovnání úhlu natočení ϕ získaného měřicí procedurou a vyhodnocením fotek z kamery. V tomto měření bude patrný vliv úhlu natočení pohyblivé desky na rozdíl mezi měřenou a skutečnou polohou středů snímacích elementů.

4 Vlivem úhlu natočení ϕ je posun jednotlivých bodů pohyblivé desky, vůči startovní pozici, různý.

a) Měření s kladným úhlem natočení ϕ:

$$[\Delta Xm0\,,\ \Delta Ym0] = [7.561\,,\ 7.967]\ mm$$
$$[\Delta Xm1\,,\ \Delta Ym1] = [2.157\,,\ 5.708]\ mm$$

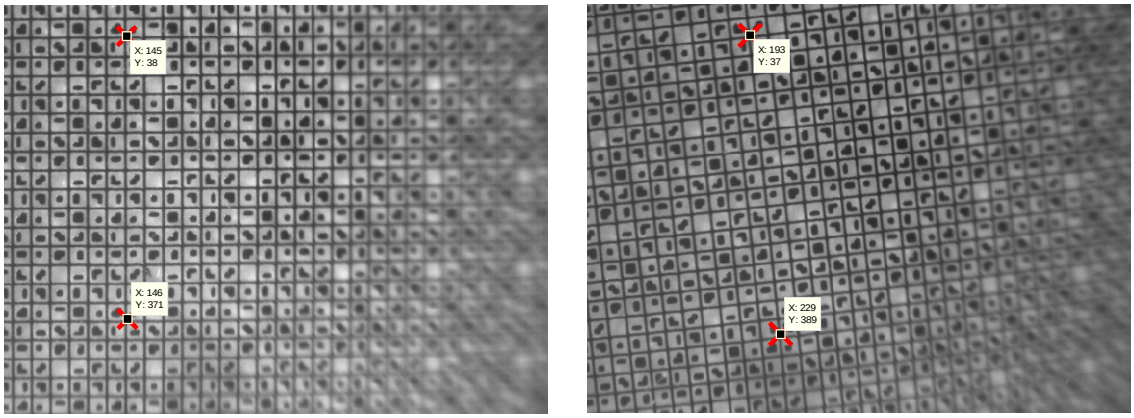
Aplikací algoritmu odvozeného v kapitole 5.2.1 byly z těchto pozic určeny skutečné pozice středů snímacích elementů vůči startovním pozicím a úhel natočení pohyblivé desky kolem osy *z*. Výsledné hodnoty jsou následující:

$$[\Delta Xs0\,,\ \Delta Ys0] = [7.523\,,\ 7.927]\ mm$$
$$[\Delta Xs1\,,\ \Delta Ys1] = [2.146\,,\ 5.679]\ mm$$
$$\phi = 5{,}704°$$

Pro tento úhel natočení je patrný vliv na rozdíl měřených a skutečných hodnot středů snímacích elementů v řádech desítek mikrometrů.

Verifikace určeného úhlu natočení je následující. Na Obr.7.6 jsou obrázky získané z kamery. Jde o obrázky ze startovní pozice pohyblivé desky ve směru osy *x* a o cílovou pozici měření. Na těchto obrázcích jsou vyznačeny body, ze kterých byla spočítána změna úhlu natočení ϕ mezi startovní a cílovou pozicí snímané značky. Postup výpočtu je následující:

$$\phi_k = \phi_{cil} - \phi_{start} = atan\left(\frac{229-193}{389-37}\right) - atan\left(\frac{146-145}{371-38}\right) = 5.667°$$



Obr.7.6 Startovní a cílové polohy snímaného motivu, měření a)

Rozdíl výsledků udávaných kapacitním senzorem a verifikační kamerou je:

$$\Delta\phi = 0.037°$$

b) Měření se záporným úhlem natočení ϕ:

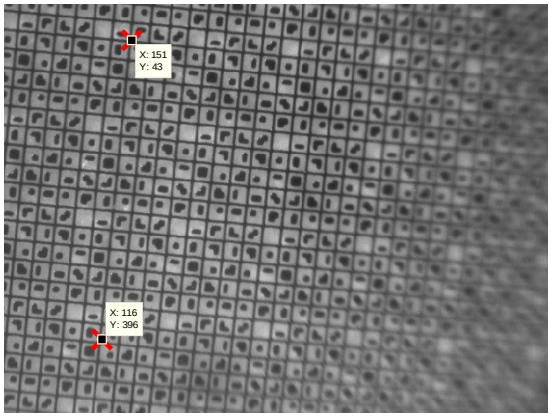
Postup vyhodnocení měření pro záporný úhel natočení je stejný jako v předchozím případě. Pozice středů snímacích elementů dané kapacitním senzorem byly:

$$[\Delta Xm0,\ \Delta Ym0] = [3.610,\ 3.397]\ mm$$
$$[\Delta Xm1,\ \Delta Ym1] = [9.485,\ 5.372]\ mm$$

$$[\Delta Xs0,\ \Delta Ys0] = [3.592,\ 3.380]\ mm$$
$$[\Delta Xs1,\ \Delta Ys1] = [9.437,\ 5.345]\ mm$$
$$\phi = -5.748\,°$$

Startovní snímek pro verifikaci je stejný jako v případě a), obě měření byla totiž provedena po jedné kalibrační proceduře.

$$\phi_k = \phi_{cil} + \phi_{start} = atan\left(\frac{116-151}{396-43}\right) - atan\left(\frac{146-145}{371-38}\right) = -5.834\,°$$



Obr.7.7 Cílová poloha snímaného motivu, měření b)

Rozdíl výsledků udávaných kapacitním senzorem a verifikační kamerou je:

$$\Delta\phi = 0.086\,°$$

8 Závěr:

Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit funkční kapacitní senzor, dále navrhnout a otestovat kalibrační proceduru tohoto senzoru. Senzor pracuje na principu proměnného překrytí ploch elektrod a je určen pro snímání polohy pohyblivého elementu v aplikacích bez vedení. Vývoj tohoto senzoru přímo navazuje na poznatky z [1]. Vyrobený senzor je navržen na dodaný XY stolek a kvůli polohování bez vedení je dvouelementový. K senzoru byly vytvořeny elektronické moduly. Jedná se o budicí elektroniku, která napájí budicí elektrody senzoru, a snímací elektroniku, která má za úkol sběr dat ze snímacích elektrod senzoru. Řídicí mikroprocesor má pak za úkol veškerou komunikaci, řízení, sběr a zpracování měřených dat.

Vlivem polohování bez vedení dochází u pohyblivého elementu nejen k jeho posunu, ale i k natáčení kolem osy *z*. Byly odvozeny, otestovány a implementovány matematické vzorce, popisující chování navrženého dvouelementového senzoru. Tyto vzorce umožňují určit skutečnou polohu natočeného pohyblivého elementu, která je z principu měření tímto senzorem určována chybně. Kromě vlivu polohování bez vedení působí na senzor celá řada parazitních jevů, zkoumaných např. v [1]. Nejzásadnějšími parazitními jevy jsou různoběžnost elektrod senzoru a jejich křivost. Vliv různoběžnosti byl důkladně prozkoumán teoreticky i prakticky a byl aplikován v kalibrační i v měřicí proceduře.

V další části práce byla popsána kalibrační a měřicí procedura senzoru. Kalibrační procedura byla navržena tak, aby byla schopna odlišit vliv polohování bez vedení a parazitních jevů. Data získaná při kalibraci senzoru jsou použita v měřicí proceduře, která určí polohu pohyblivého elementu od zvolené pozice. Obě tyto procedury se skládají z prvotních postupů.

Na závěr práce byla provedena verifikace funkčnosti sestaveného senzoru. Výsledky této verifikace jsou v kapitole 7. Teoretické posuvy měřitelné sestaveným senzorem se pohybují v jednotkách mikrometrů. Prakticky sestavený senzor se však na této přesnosti nepohybuje. Podařilo se sestavit senzor určující polohu pohyblivého elementu ve dvou osách s přesností pohybující se v řádech desítek mikrometrů. V textu práce byly průběžně zjišťovány vlivy, které tuto přesnost ovlivňují. Z řádové analýzy vyplynulo, že největší vliv na přesnost senzoru má křivost desek jednotlivých elementů, zde byla určena možná chyba měření zhruba 40 μm. Korekce této chyby by byla možná při výrobě desek elementů z kvalitnějšího materiálu a při zajištění profesionálnějšího uchycení těchto desek k částem stolku. Další možností by bylo detailně proměřit nerovnosti jednotlivých desek a z tohoto měření vytvořit následně mapu křivostí těchto desek. V měřicí proceduře by se poté používala tato mapa místo lineárního prokladu krajních poloh stolku. Tento přístup by však byl značně náročný. Další jevy ovlivňují přesnost měření pouze v řádech jednotek mikrometrů. Jsou to: nedokonalost polohování mikrošrouby, vlivy okolního rušení (pohyb osob, zdroje el.mag. záření), změny teploty v okolí senzoru, rozlišení A/D převodníku.

V celé práci byla použita řada prvotních postupů, i přesto byl sestaven funkční senzor, který je schopen určovat pozici pohyblivé desky stolku ve dvou osách v řádech desítek μm.

Literatura:

[1] Švoma, J.: *Kalibrace kapacitního senzoru polohy*. Bakalářská práce, Katedra řídicí techniky, FEL ČVUT Praha, 2008.

[2] Štecha, J.: *Optimální rozhodování a řízení (Kopie transparentů).* Vydavatelství ČVUT, 2004

[3] Breguet, J.-M.; Clavel, R.: *Stick and Slip Actuators: design, control, performances and applications*. International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 1998.

[4] *Stanice Newport.* http://newport.com/ManualPositioning/557153/1033/catalog.aspx

[5] ANALOG DEVICES. http://www.analog.com/en/index.html

[6] *ADA4941-1, Single-supply, Differencial driver.* ANALOG DEVICES. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4941-1.pdf

[7] *AD7980 16-bit, 1 MSPS PulSAR ADC.* ANALOG DEVICES. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD7980.pdf

[8] *LPC2368 datasheet.* http://www.keil.com/dd/docs/datashts/philips/lpc23xx_um.pdf

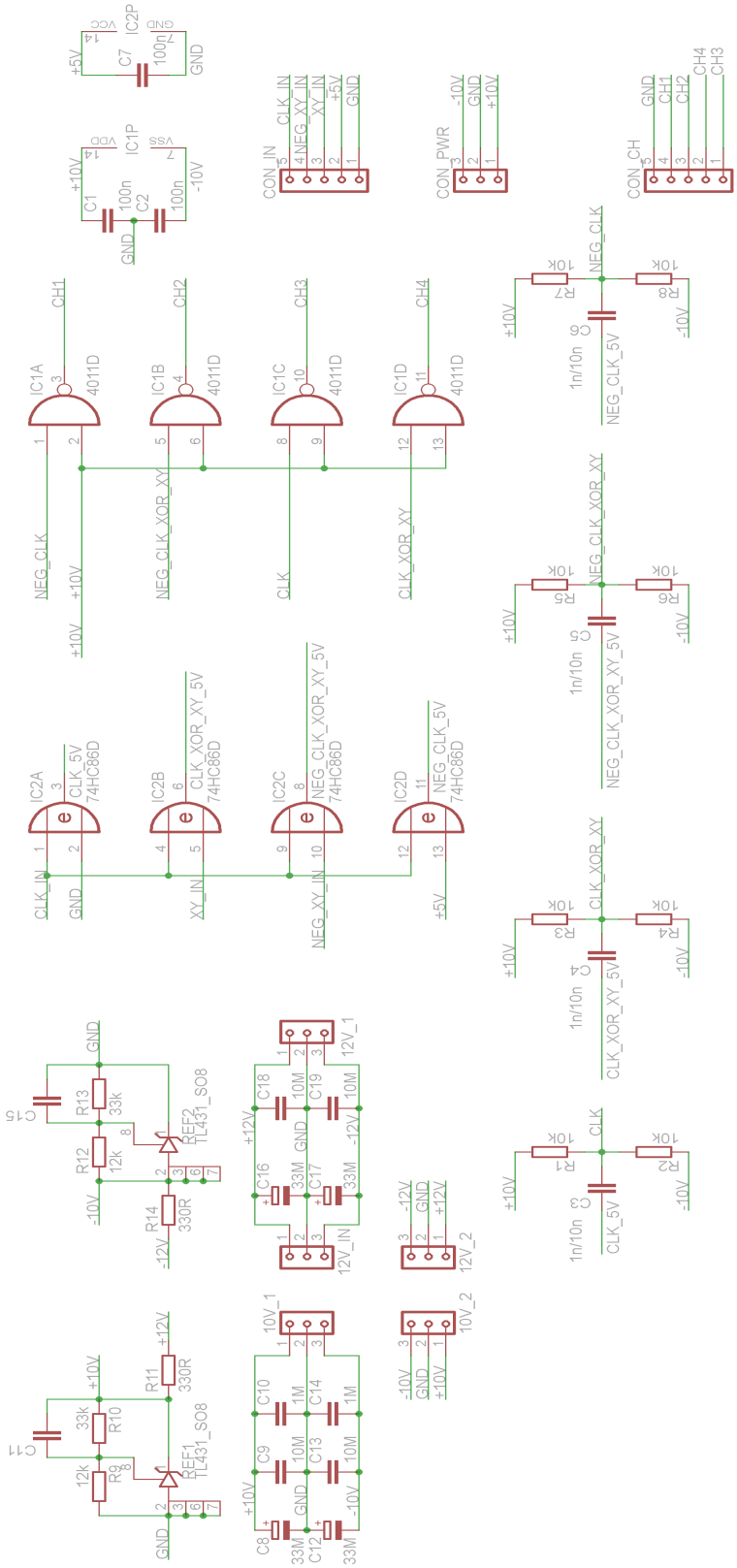
[9] *Přehled periferií LPC 2368. http://ics.nxp.com/products/lpc2000/lpc23xx/*

[10] *MBED kit.* http://www.mbed.org

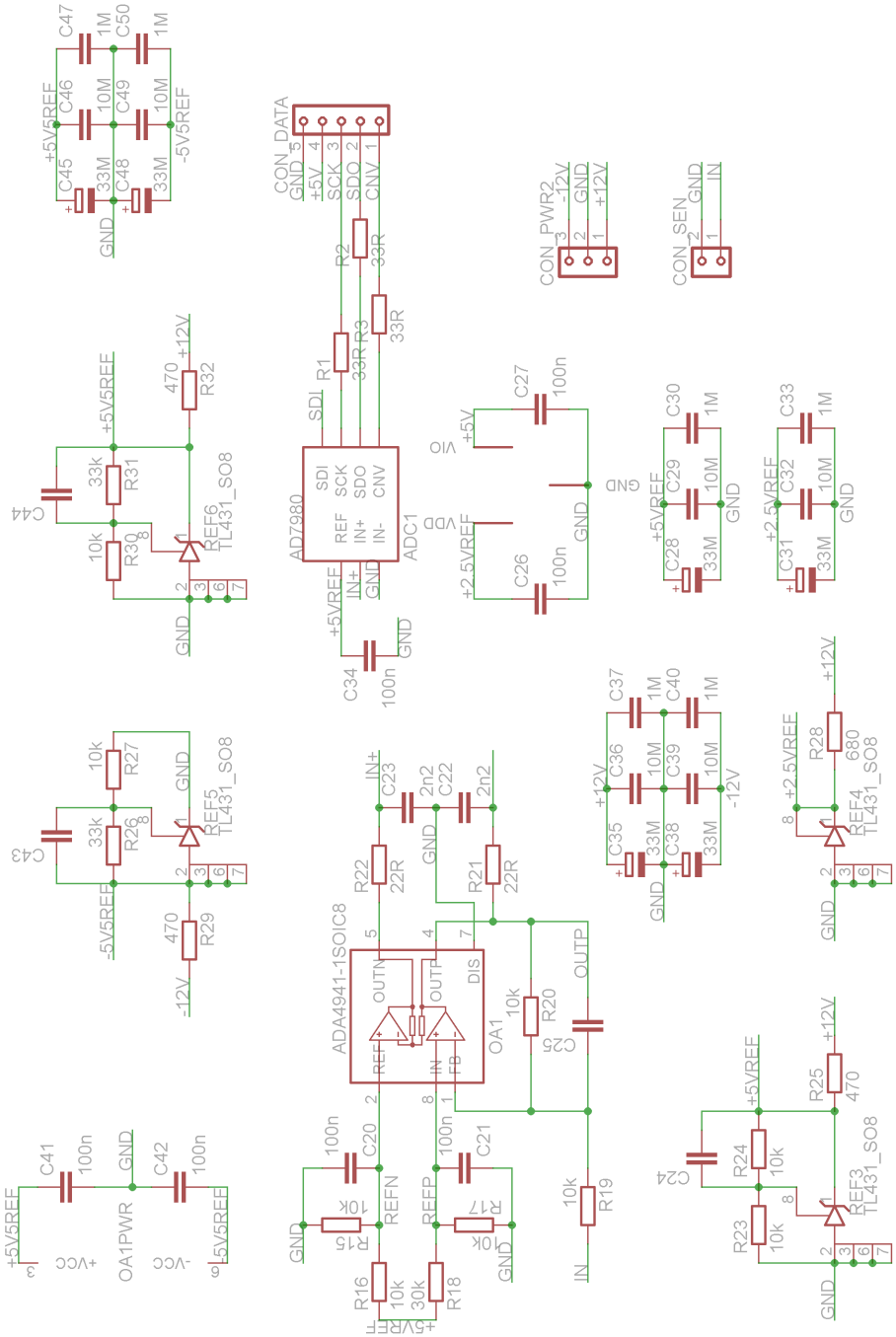
[11] *Specifikace materiálu desek senzoru.* http://www.pragoboard.cz/download/duraver104.pdf

[12] *Laboratorní kamera.* http://www.alliedvisiontec.com/emea/home.html

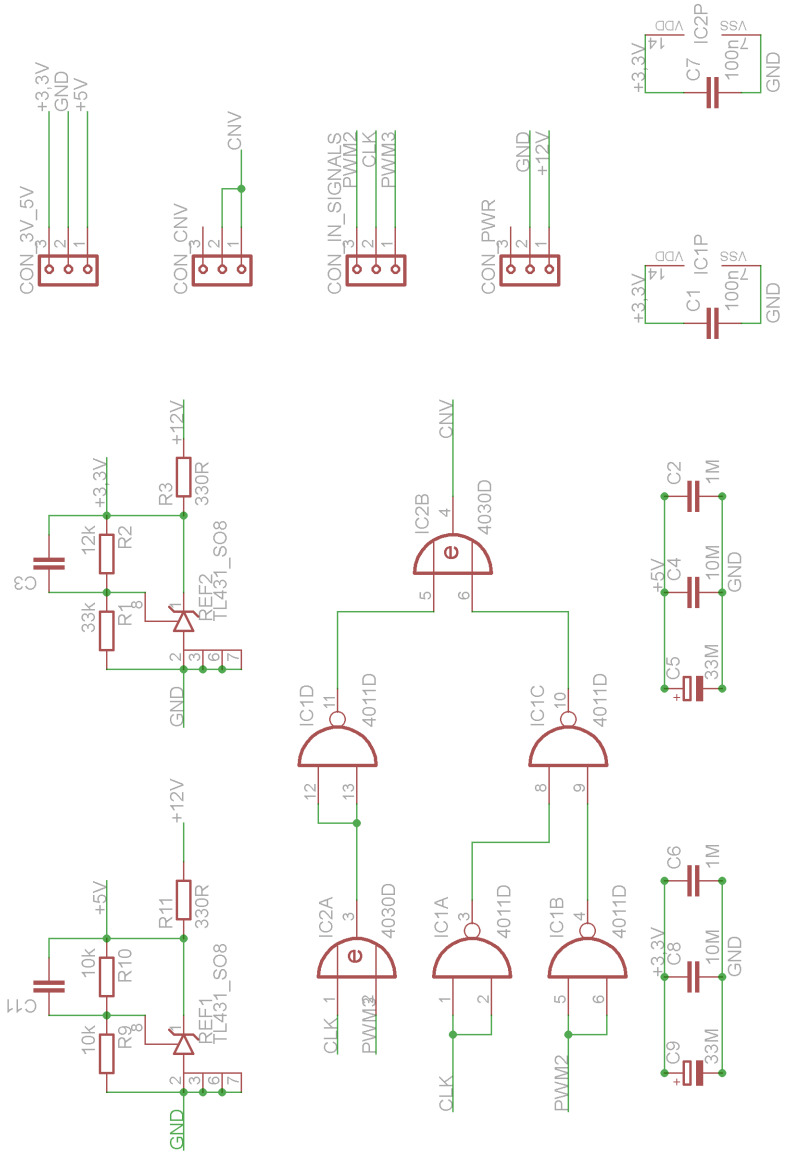
Příloha A – Schémata zapojení



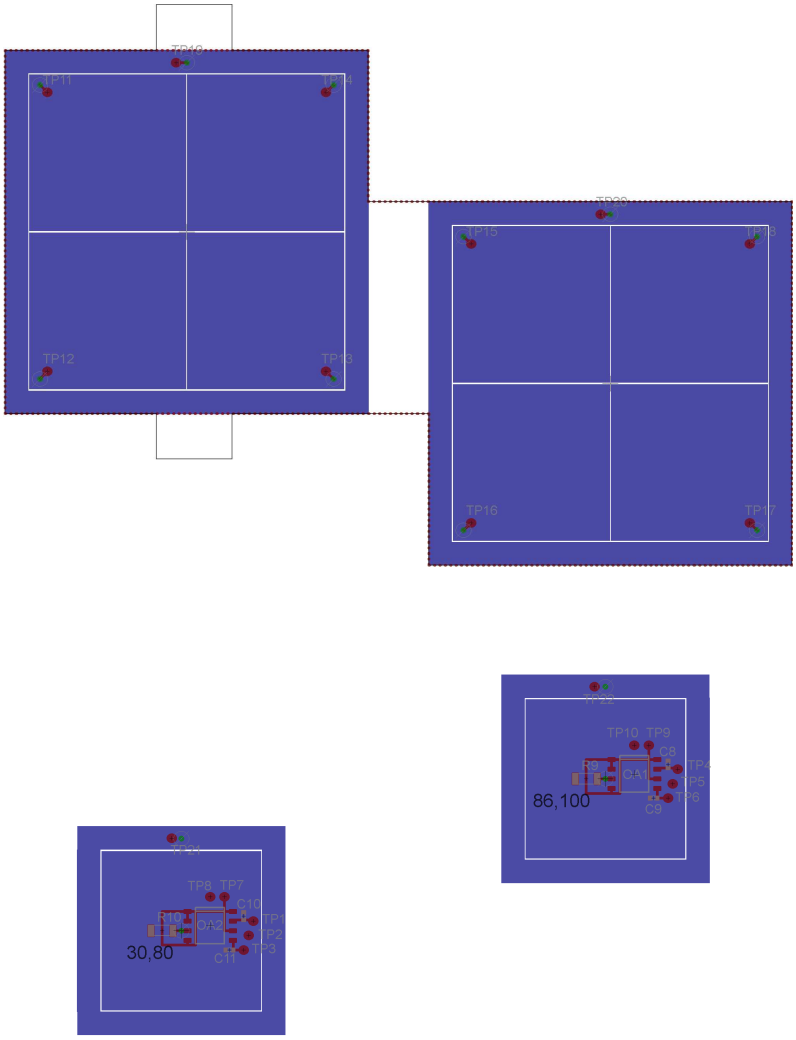
Obr.A.1 Schéma zapojení budicí elektroniky



Obr.A.2 Schéma zapojení snímací elektroniky s A/D převodníkem



Obr.A.3 Schéma zapojení obvodu pro tvorbu signálu CNV



Obr.A.4 Jednotlivé elementy senzoru

Příloha B – Obsah přiloženého CD

/dp_2011_Svoma.pdf	Tento dokument ve formátu PDF.
/schemata (dir)	Schémata elektronických zapojení nakreslená v EAGLu.
/datasheets (dir)	Datasheety nejdůležitějších použitých součástek.
/senzor.c	Zdrojový kód implementovaného firmwaru