ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Kalibrace kapacitního senzoru polohy
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jaroslav Švoma

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Holub
2008

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jaroslav Švoma**

Studijní program: Elektrotechnika a informatika (bakalářský), strukturovaný
Obor: Kybernetika a měření

Název tématu: **Kalibrace kapacitního senzoru polohy**

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s principem měření polohy pomocí absolutního kapacitního senzoru
2. Identifikujte parazitní jevy, které mají vliv na převodní charakteristiku senzoru, a určete míru jejich vlivu
3. Navrhněte proceduru pro kalibraci senzoru, implementujte ji na dodaném HW a otestujte ji na senzoru

Seznam odborné literatury:

Dodá vedoucí práce

Vedoucí: Ing. Ondřej Holub

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2008/2009

L.S.

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Boris Šimák, CSc.
děkan

V Praze dne 25. 2. 2008

Prohlášení:

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

V Praze dne: 7.6.2008 Podpis: Ivoma Jozovka

Anotace:

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat proceduru pro kalibraci kapacitního senzoru. Šlo o kalibraci senzoru, pracujícího na principu proměnné plochy překrytí elektrod. Kalibrační proceduru bylo potřeba navrhnout s ohledem na parazitní jevy, které mají vliv na převodní charakteristiku senzoru. V prvé řadě byly tyto jevy identifikovány a byla zjištěna míra jejich vlivu na převodní charakteristiku senzoru. Následně byl navržen způsob, jak lze tyto jevy od sebe odlišit při měření kapacit senzoru. Toto odlišení parazitních jevů od měřené polohy je základem pro návrh kalibrační procedury.

Annotation:

The aim of this bachelor work was to propose and to realize a procedure for calibration of a capacitive position sensor. The sensor is a differential capacitive position sensor with variable overlapping of electrodes. The calibration procedure had to be proposed with regard to parasitic phenomena, which influence the sensor characteristic. At first, the parasitic phenomena were characterized. In the next step, a simple experiment to separate these parasitic phenomena from the intended position measurement was proposed. This experiment was used as a basis for design of the calibration procedure.

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Ondřeji Holubovi za vedení mojí práce. Vždy mi ochotně vysvětlil danou problematiku a pomáhal mi realizovat některé pokusy. Také bych chtěl poděkovat své rodině a známým za jejich duševní podporu.

OBSAH:

1 Úvod.....7

2 Princip měření polohy kapacitním senzorem.....8

2.1 Odvození základních vzorců popisujících chování senzoru.....10

2.2 Dvouelementový senzor.....14

2.3 Vliv parazitních jevů.....16

3 Návrh a měření vlastností senzoru.....17

3.1 Měření prohnutí destiček elektrod.....17

3.2 Měření vzájemných kapacit senzoru.....19

3.2.1 Měření kapacit bez parazitních vlivů senzoru.....20

3.2.2 Závislost vzájemných kapacit na změně vzdálenosti elektrod.....21

3.2.3 Vliv různoběžnosti elektrod.....22

3.3 Výroba a proměřování velkého senzoru.....23

3.4 Realizace a měření dvouelementového senzoru.....25

4 Návrh kalibrační procedury.....27

4.1 Teoretický návrh kalibrační procedury.....27

4.2 Praktická realizace kalibrační procedury 28

5 Závěr.....30

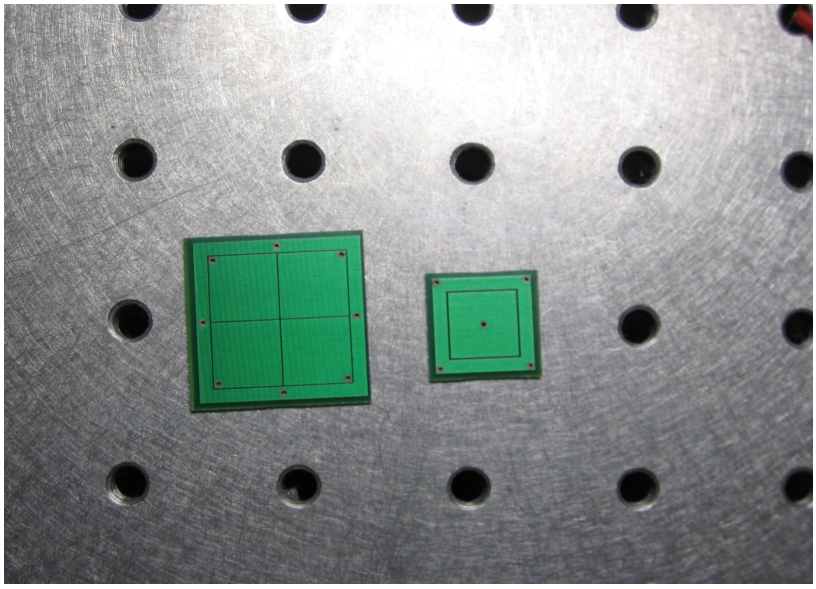
6 Literatura:.....31

6.1 Obsah přiloženého CD.....31

1 Úvod

Na úvod celé práce bych chtěl čtenáře seznámit s budoucím využitím navrhovaného senzoru. Senzor bude používán pro přesné snímání polohy v aplikacích, ve kterých se jedná o polohování bez vedení. To znamená, že v těchto aplikacích nejsou pohybující se elementy drženy v pevných pozicích (např. pomocí vodicích lišt). Konkrétně by mohl být senzor využit v projektu Golem, kde ke zmíněnému polohování bez vedení dochází pomocí piezoelektrických krokových motorů. Posuv pomocí těchto motorů je v řádech mikrometrů, proto ke snímaní polohy je použit kapacitní senzor, který je výhodný kvůli své velké citlivosti.

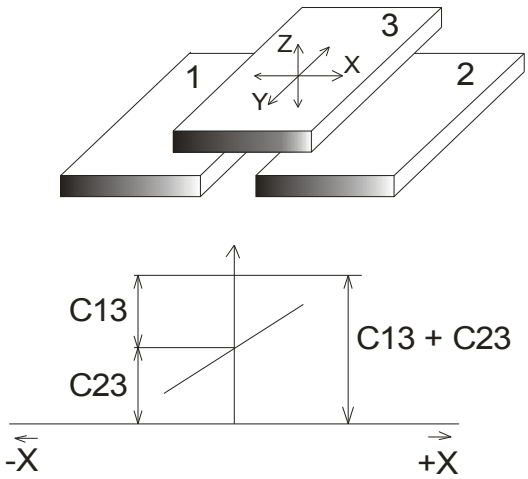
Text je členěn následujícím způsobem. V druhé kapitole práce je zmíněn princip použitého kapacitního senzoru a teoretický návrh jeho funkčnosti. Jsou zde odvozeny vztahy pro identifikaci vzájemného natáčení elektrod, které vzniká v důsledku zmiňovaného pohybování bez vedení. V této kapitole jsou také popsány parazitní jevy senzoru, které komplikují kalibraci senzoru na základě odvovzených vztahů. Ve třetí kapitole jsou zpracována měření všech parazitních jevů, ovlivňujících převodní charakteristiku senzoru a je zhodnocen jejich vliv na převodní charakteristiku. Závěrem práce je teoretický návrh kalibrační procedury. Tento teoretický návrh byl následně ověřen prakticky.



Obr.1.1 Budicí a snímací elektroda

2 Princip měření polohy kapacitním senzorem

Kapacitní senzory jsou vhodné pro měření veličin, které ovlivňují kapacitu kondenzátoru. V této práci je využíván kontaktní kapacitní senzor, kde je měřený objekt spojen s pohyblivou elektrodou senzoru. Je použit deskový rozdílový kapacitní senzor s proměnnou plochou překrytí elektrod. Na Obr.2.1 je znázorněna přibližná funkce tohoto senzoru. Při pohybu elektrody 3 z tohoto obrázku je změna kapacit vůči elektrodám přibližně lineární, při zanedbání okrajového rozptylového pole [2]. V obrázku jsou znázorněny možné posuvy snímací elektrody v osách *x, y, z.* Tento obrázek ukazuje pouze princip použitého senzoru, ovšem v této úloze hrají velký vliv všechny parazitní jevy senzoru, např. i zmíněné rozptylové pole na okraji elektrod.

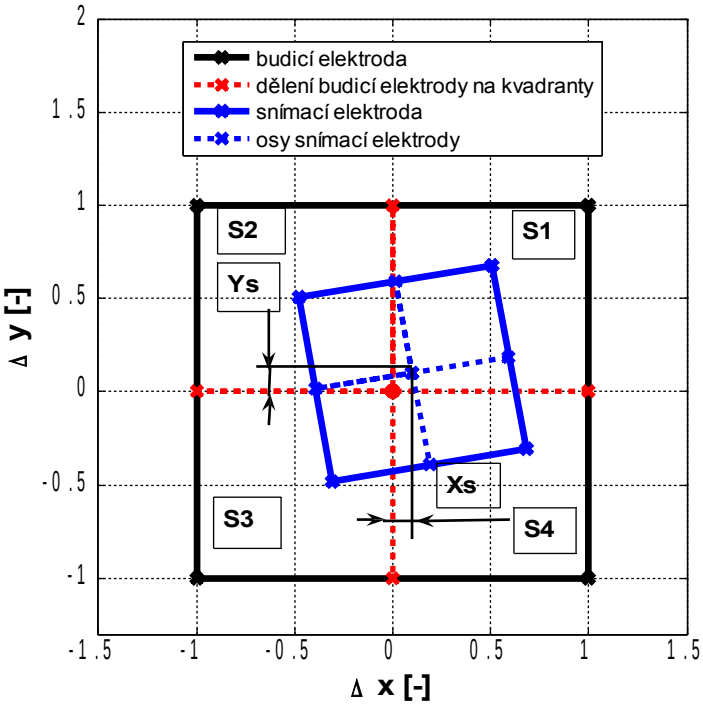


Obr.2.1 Princip kapacitního senzoru s proměnnou plochou překrytí elektrod

Samotný senzor se skládá ze dvou destiček, kde jedna obsahuje snímací a druhá budicí elektrodu senzoru, viz Obr.1.1. Snímací elektroda je umístěna v malé vzdálenosti rovnoběžně nad budicí elektrodou. Senzor bude využíván pro snímání horizontálního pohybu snímací elektrody. Aby bylo možné tento pohyb snímat, je budicí elektroda rozdělena na čtyři kvadranty, které jsou od sebe odděleny osami *x, y* tohoto elementu. Při vzájemném posuvu elektrod se mění plocha překrytí snímací elektrody a jednotlivých kvadrantů budicí elektrody. Se změnou plochy překrytí se samozřejmě mění i vzájemné kapacity. Obě destičky mají po svém obvodu stínicí pruh, který je připojen na elektrickou zem a zamezuje ovlivňování měření okolním elektrickým polem. Navíc přispívá k linearitě převodní charakteristiky.

Před výrobou a měřením senzoru bylo jeho chování předmětem teoretického zkoumání. K tomuto účelu byl vytvořen skript v MATLABu *kresleni_senzoru.m,* který je na přiloženém CD. Tento skript vykresluje snímací a budicí elektrodu. Pomocí skriptu lze pozorovat vzájemné překrytí i uspořádání elektrod při posuvu snímací elektrody a při jejím natáčení kolem osy *z*. Jsou zde ale zanedbány další parazitní jevy senzoru, jako různoběžnost elektrod a mechanická křivost destiček elektrod, které budou popsány v další části této kapitoly. Ukázka výstupu skriptu je na Obr.2.2.

Elektrické pole je v deskovém kondenzátoru homogenní uprostřed elektrod, na okraji elektrod siločáry nejsou homogenní a kapacita v těchto místech neodpovídá vzorci (2.1). Z tohoto důvodu jsme se omezili na pohyb snímací elektrody pouze uvnitř plochy, vymezené budicí elektrodou. Při vychýlení snímací elektrody přes okraj budicí elektrody by bylo velice obtížné odlišit od sebe zkoumané parazitní jevy a nehomogenitu elektrického pole na okraji senzoru.



Obr.2.2 Znázornění senzoru

Snímací elektroda bude umístěna na desce, která bude polohována bez vedení. Vlivem polohování bez vedení dochází k natáčení pohybující se elektrody kolem osy *z*. Cílem práce je tedy navrhnout takovou kalibrační proceduru, která je schopna poznat právě natočení snímací elektrody kolem osy *z* vůči budící elektrodě a spočítat správnou polohu snímací elektrody. Toto natočení je znázorněno na Obr.2.2, kde je ovšem v přehnané velikosti. Ve skutečnosti vzájemné natočení elektrod nemusí být pouhým okem patrné, ale i přesto má zásadní vliv na určení skutečné polohy snímací elektrody.

2.1 Odvození základních vzorců popisujících chování senzoru

Poloha snímací elektrody vůči budící elektrodě je určena vzájemnými kapacitami budicí a snímací elektrody. Píšu kapacitami, protože budicí elektroda je rozdělena na čtyři kvadranty. Kapacity, které udávaj informaci o poloze snímací elektrody, jsou tedy čtyři.

Poloha snímací elektrody je určena ze změřených kapacit vůči budicí elektrodě, které jsou značeny C_1, C_2, C_3, C_4. Všechny zmíněné kapacity jsou závislé na ploše překrytí snímací elektrody a kvadrantů budicí elektrody podle vzorce

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

Plochy překrytí jsou značeny S_1, S_2, S_3, S_4. Poloha středu snímací elektrody vůči středu budicí elektrody se spočte z poměrů zmíněných ploch překrytí, jak je patrné ze vzorců

$$\Delta \boldsymbol{X}_m = \frac{\boldsymbol{S1} + \boldsymbol{S4} - \boldsymbol{S2} - \boldsymbol{S3}}{\boldsymbol{S1} + \boldsymbol{S2} + \boldsymbol{S3} + \boldsymbol{S4}} \tag{2.2.a}$$

$$\Delta \boldsymbol{Y}_m = \frac{\boldsymbol{S1} + \boldsymbol{S2} - \boldsymbol{S3} - \boldsymbol{S4}}{\boldsymbol{S1} + \boldsymbol{S2} + \boldsymbol{S3} + \boldsymbol{S4}} \tag{2.2.b}$$

Výsledkem z těchto vzorců jsou tzv. měřené souřadnice středu snímací elektrody vůči středu budicí elektrody, proto indexy *m* u obou výsledných hodnot. Změřená pozice středu snímací elektrody totiž nemusí být pravdivá, a to při nenulovém vzájemném natočení Φ elektrod kolem osy *z*. Změřenou pozici středu snímací elektrody ovlivňují ještě další jevy, které byly zmíněny. Míra jejich vlivu se musí ověřit až měřením. V následující části jsou

odvozeny vzorce pro popis vzájemného natočení elektrod kolem osy *z*.

Jak je vidět z .2.2, plochy překrytí jednotlivých kvadrantů budicí elektrody a snímací elektrody jsou závislé na poloze snímací elektrody a na jejím natočení kolem osy *z*. Plochy překrytí jsou také závislé na velikosti obou elektrod. Bylo zapotřebí odvodit vzorce, které popisují vzájemné plochy překrytí elektrod pomocí zmíněných vlastností. Kvůli zjednodušení odvození vzorců bylo pracováno s případem, že se natáčí budicí elektroda kolem osy *z*. Byl zkoumán vliv vzájemné polohy elektrod a jejich natáčení na vzájemné plochy překrytí snímací elektrody a jednotlivých kvadrantů budicí elektrody. Pomocí goniometrických vztahů byly odvozeny vzorce

$$\boldsymbol{S_1}=(\frac{a}{2}+\Delta y)(\frac{a}{2}+\Delta x)-\frac{1}{2}tg(\Phi)[(\frac{a}{2}+\Delta x)^2-(\frac{a}{2}+\Delta y)^2] \qquad (2.3.a)$$

$$\boldsymbol{S_2}=(\frac{a}{2}+\Delta y)(\frac{a}{2}-\Delta x)-\frac{1}{2}tg(\Phi)[-(\frac{a}{2}-\Delta x)^2+(\frac{a}{2}+\Delta y)^2] \qquad (2.3.b)$$

$$\boldsymbol{S_3}=(\frac{a}{2}-\Delta y)(\frac{a}{2}-\Delta x)-\frac{1}{2}tg(\Phi)[(\frac{a}{2}-\Delta x)^2-(\frac{a}{2}-\Delta y)^2] \qquad (2.3.c)$$

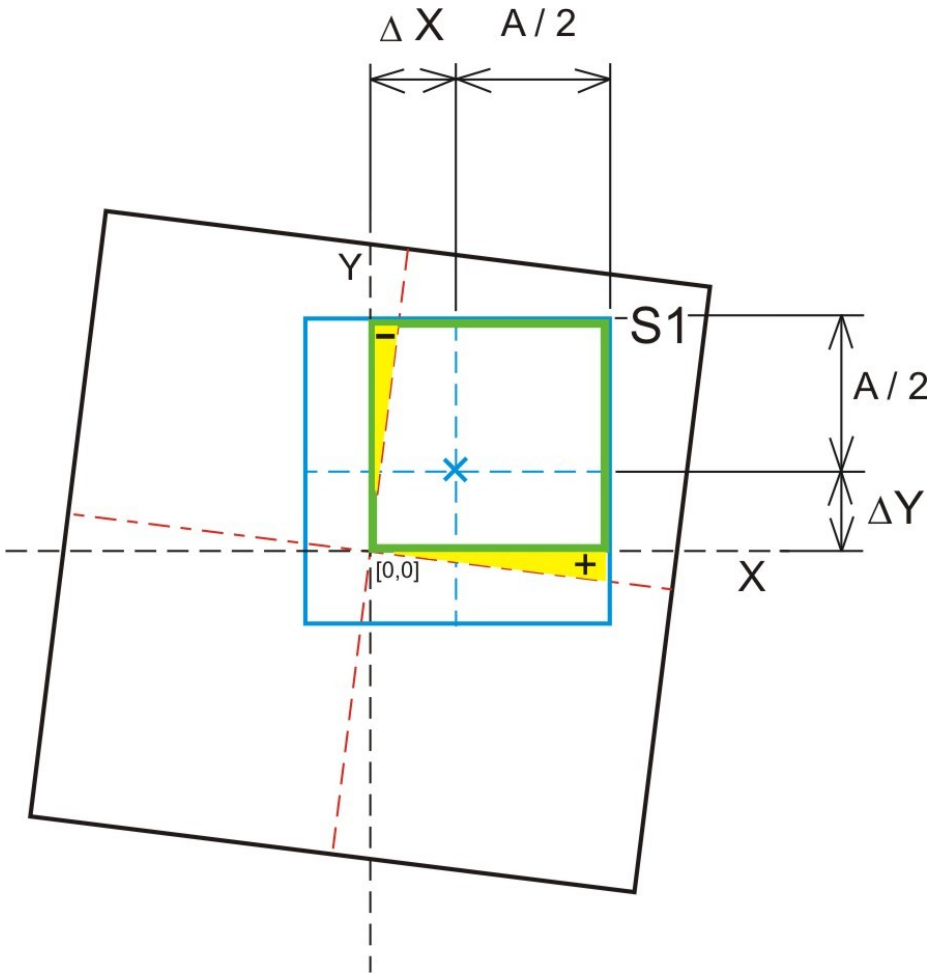
$$\boldsymbol{S_4}=(\frac{a}{2}-\Delta y)(\frac{a}{2}+\Delta x)-\frac{1}{2}tg(\Phi)[-(\frac{a}{2}+\Delta x)^2+(\frac{a}{2}-\Delta y)^2] \qquad (2.3.d)$$

a – délka strany snímací elektrody

Φ úhel vzájemného natočení elektrod

Δx , Δy – souřadnice posuvu středu snímací elektrody

Ke kontrole odvozených vztahů se využil zmiňovaný skript *kresleni_senzoru.m,* vytvořený v MATLABu. Jak bylo popsáno dříve, z důvodu homogenity elektrického pole mezi elektrodami jsme se omezili pouze na polohu snímací elektrody uvnitř plochy budicí elektrody. Vzorce (2.3) jsou také odvozeny pouze pro tuto situaci. Na Obr. 2.3 je znázorněn způsob odvození vztahu (2.3.a). Tento vztah popisuje vzájemné překrytí snímací elektrody a kvadrantu S1 budicí elektrody. Na Obr.2.3 je zeleným čtvercem znázorněna plocha překrytí při nulovém vzájemném natočení elektrod, která je závislá pouze na vzájemné poloze středů snímací a budicí elektrody. Elektrody v tomto obrázku jsou natočeny o úhel $\Phi = -10°$. Žlutě vyznačené trojuhelníky jsou plochy překrytí elektrod způsobené tímto úhlem natočení. Celková plocha překrytí snímací elektrody a kvadrantu S1 budicí elektrody je dána součtem ploch zeleného čtverce a žlutých trojuhelníků, kde jeden z trojuhelníků se přičítá a druhý odčítá.



Obr.2.3 Odvození vztahů (2.3)

Dosazením vztahů (2.3) do (2.2) a jejich úpravou vyšly závislosti

$$\Delta \boldsymbol{X}_s = \frac{a}{2} \cos \Phi (\Delta X_m \cos \Phi - \Delta Y_m \sin \Phi) \tag{2.4.a}$$

$$\Delta \boldsymbol{Y}_s = \frac{a}{2} \cos \Phi (\Delta X_m \sin \Phi + \Delta Y_m \cos \Phi) \tag{2.4.b}$$

ΔX_s, ΔY_s – skutečná poloha snímací elektrody
ΔX_m, ΔY_m – měřená poloha snímací elektrody

pomocí kterých lze přepočítat změřenou polohu snímací elektrody na její skutečnou polohu. Tyto polohy jsou kvůli vzájemnému úhlu natočení elektrod Φ rozdílné.

Ze vztahů (2.4) je patrné, že skutečná poloha snímací elektrody je závislá na její změřené hodnotě a na úhlu natočení elektrod kolem osy *z*. Testování odvozených vzorců bylo provedeno pomocí skriptu *overeni_vypoctu.m* v MATLABu. Pro vizuální kontrolu byl využit skript *kresleni_senzoru.m*, který vykresluje obě elektrody, viz Obr.2.2. Jako parametr skriptu pro ověření spočtených vzorců se zadávala pozice snímací elektrody vůči středu budicí elektrody a úhel natočení budicí elektrody kolem osy *z*. Úhel natočení Φ měl kladný smysl ve směru od kladné části osy *x* ke kladné části osy *y*. Tyto vstupní hodnoty byly dosazeny do vzorců (2.3), pomocí nichž byly spočteny plochy překrytí jednotlivých kvadrantů budicí elektrody a snímací elektrody. Spočtené plochy se dosazovaly do vzorců (2.2).

Tímto postupem se simulovalo měření ideálního senzoru, který nemá jíné parazitní vlastnosti, kromě vzájemného natáčení elektrod kolem osy *z*. Spočtené plochy překrytí odpovídají plochám, vypočteným ze změřených kapacit. Měřená poloha senzoru byla následně dosazena do vzorců (2.4). Výsledkem byla skutečná poloha snímací elektrody, která odpovídala poloze, jenž byla do skriptu zadávána jako vstupní parametr. Tímto postupem byly spočtené vzorce několikrát ověřeny. Jediný krok, který je zatím nekorektní s realitou, je dosazení úhlu natočení Φ do vzorců (2.4). Zatím je tento úhel dosazován do vzorců díky jeho znalosti v umělých testovacích případech. Jak tento úhel zjistit

na reálném senzoru, je popsáno v následující podkapitole.

2.2 Dvouelementový senzor

Ze změřených kapacit jednoho senzoru (jedné budicí a snímací elektrody) nelze zjistit vzájemné natočení elektrod kolem osy *z*. Velikost kapacit totiž dává informaci pouze o tom, jak velké je překrytí snímací elektrody a jednotlivých kvadrantů budicí elektrody. O vzájemném natočení elektrod z těchto hodnot nelze získat žádnou informaci a určená poloha snímací elektrody by byla chybná. Z tohoto důvodu bylo zapotřebí mít dvě čidla, jejichž snímací elektrody jsou pevně spojeny. Budicí elektrody jsou také spojeny.

V kapitole 2.1 jsou odvozeny základní vzorce, které popisují závislost skutečné polohy snímací elektrody na vzájemném natočení elektrod. Tyto vzorce byly použity pro teoretický popis dvouelementového senzoru. Vztahy

$$\Delta \boldsymbol{X}_{s1} = \frac{a}{2} \cos \Phi \left(\Delta X_{m1} \cos \Phi - \Delta Y_{m1} \sin \Phi \right) \tag{2.5.a}$$

$$\Delta \boldsymbol{Y}_{s1} = \frac{a}{2} \cos \Phi \left(\Delta X_{m1} \sin \Phi + \Delta Y_{m1} \cos \Phi \right) \tag{2.5.b}$$

$$\Delta \boldsymbol{X}_{s2} = \frac{a}{2} \cos \Phi \left(\Delta X_{m2} \cos \Phi - \Delta Y_{m2} \sin \Phi \right) \tag{2.5.c}$$

$$\Delta \boldsymbol{Y}_{s2} = \frac{a}{2} \cos \Phi \left(\Delta X_{m2} \sin \Phi + \Delta Y_{m2} \cos \Phi \right) \tag{2.5.d}$$

$$\left(\Delta X_{s1} - \Delta X_{s2} \right)^2 + \left(d + \Delta Y_{s1} - \Delta Y_{s2} \right)^2 = d^2 \tag{2.5.e}$$

d – vzdálenost středů budicích a snímacích elektrod

popisují závislost skutečné polohy snímacích elektrod obou elementů na měřené poloze a na natočení spojených snímacích elektrod v obou elementech senzoru. ΔX_{S1} a ΔY_{S1} jsou souřadnice středu snímací elektrody jednoho elementu a ΔX_{S2}, ΔY_{S2} druhého elementu.

Jelikož oba elementy jsou pevně spojeny, byl z Pythagorovy věty odvozen vztah (2.5.e), díky němuž se tato pětice vztahů stala řešitelná, kvůli počtu proměnných, které v nich jsou obsaženy. Výsledným řešením je vzájemný úhel natočení elektrod, který závisí na poloze snímacích elektrod v obou elementech. Proměnné v těchto vztazích jsou shodné s proměnnými ve vztazích z kapitoly 2.1. Přibyla proměnná *d*, která určuje vzájemnou vzdálenost elementů. Řešením výsledného úhlu natočení vyšla rovnice čtvrtého řádu s následujícími koeficienty

$$\frac{b}{4}\Phi^4+\frac{c}{2}\Phi^3+(g-b)\Phi^2-(c+f)\Phi+e+b=0 \tag{2.6}$$

$$\boldsymbol{g}=(X_{m1}-X_{m2})^2+(Y_{m1}+Y_{m2})^2$$

$$\boldsymbol{b}=(X_{m1}+X_{m2})^2+(Y_{m1}-Y_{m2})^2$$

$$\boldsymbol{c}=4(X_{m1}Y_{m2}+Y_{m1}X_{m2})$$

$$\boldsymbol{e}=\frac{4\mathrm{d}}{a}(Y_{m1}-Y_{m2})$$

$$\boldsymbol{f}=\frac{4\mathrm{d}}{a}(X_{m2}-X_{m1})$$

Při odvození vztahů (2.6) byly použity zjednodušující vztahy pro popis goniometrických funkcí taylorovou řadou.

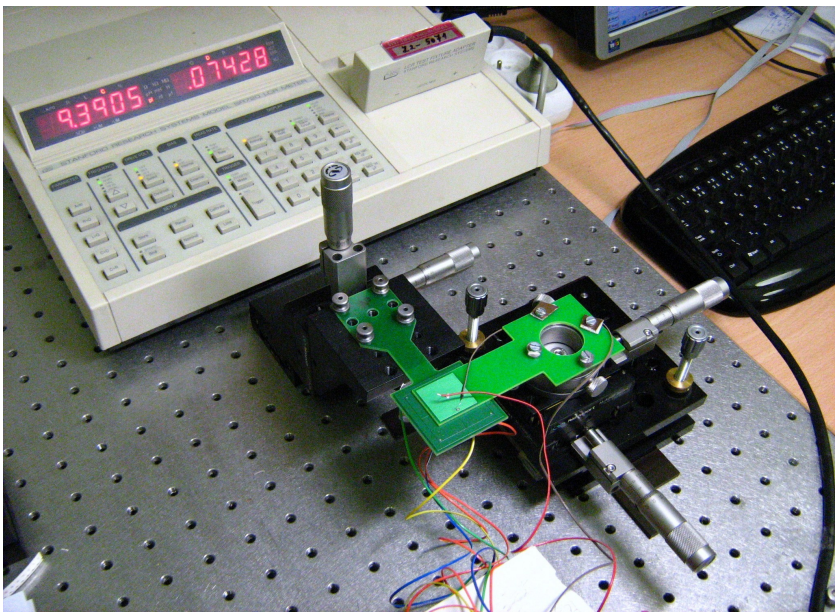
$$\sin\Phi=\Phi \tag{2.7.a}$$

$$\cos\Phi=1-\frac{\Phi^2}{2} \tag{2.7.b}$$

Tyto zjednodušující vztahy jsou použitelné pouze pro malé úhly $|\Phi| < 10°$, což je v úloze zajištěno. Rovnice byly testovány teoreticky i prakticky. Testy bohužel nebyly úspěšné.

2.3 Vliv parazitních jevů

Jevů, které se musí zahrnout do kalibrační procedury, je více. Jedná se o prohnutí a nerovnosti jednotlivých elektrod a různoběžnost snímací a budicí elektrody. Tyto jevy parazitně ovlivňují vzájemné kapacity senzoru. Je důležité všechny tyto jevy dobře prozkoumat. Cílem je totiž určit přesnou polohu snímací elektrody vůči budicí elektrodě a všechny popsané jevy tuto polohu výrazně ovlivňují.



Obr.2.4 Mikropolohovací stanice a uchycení elektrod

Různoběžnost elektrod lze nasimulovat pomocí mikropolohovací stanice Newport, viz Obr.2.4. Lokální nerovnosti povrchu destiček lze zanedbat. Lokálními nerovnostmi jsou myšleny mikroskopické vady, vzniklé výrobou destiček. Prohnutí destiček je potřeba blíže prozkoumat, protože norma umožňuje prohnutí DPS 15 μm / mm délky DPS [7]. Další zásadní fakt je, že elektrody ve skutečnosti nemusí být vůči sobě rovnoběžné. Myslím tím v přesnosti na stovky mikrometrů. Změřené kapacity jsou potom zkreslené a výsledná poloha určena chybně. Vzájemnou různoběžnost je potřeba ze změřených kapacit vyzkoumat a zahrnout ji do kalibrační procedury.

3 Návrh a měření vlastností senzoru

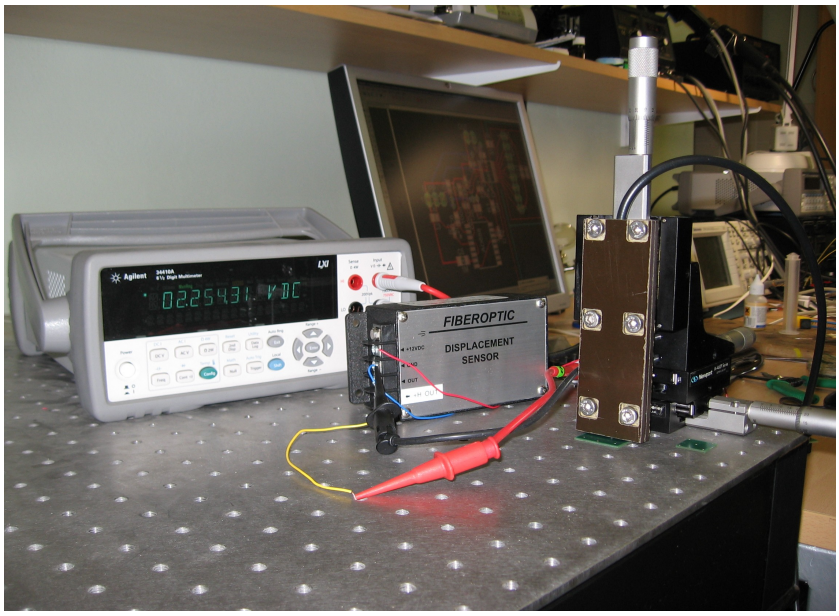
Po teoretickém rozboru senzoru přišel na řadu jeho návrh a samotná výroba. Velikost obou elektrod navrhl vedoucí práce, byl zachován poměr stran desky budicích elementů a snímací elektrody 2:1. Byl navržen způsob upevnění těchto elektrod na polohovací stanici. Aby bylo možné na senzoru simulovat všechny druhy natočení, které byly dříve popsány, bylo zapotřebí použít polohovací stanici, která umožňuje širokou variabilitu pohybu. Byla vybrána ruční mikropolohovací stanice Newport a její bloky M-460P series, M-37 series, M-UTR46S [4]. Z těchto bloků byla sestavena stanice, která je zobrazena na Obr.2.4. Nejprve jsme vyráběli s vedoucím práce desky s elektrodami sami. Pro naše potřeby byla však požadována maximální přesnost elektrod, proto byla tato část práce přenechána specializované firmě Pragoboard. Úkolem bylo navrhnout uchycení elektrod k polohovací stanici. Řešení je patrné na Obr.2.4. Bylo potřeba zajistit pevné uchycení všech bloků stanice, aby nedocházelo k jevům, které by znemožnily dobré výsledky.

3.1 Měření prohnutí destiček elektrod

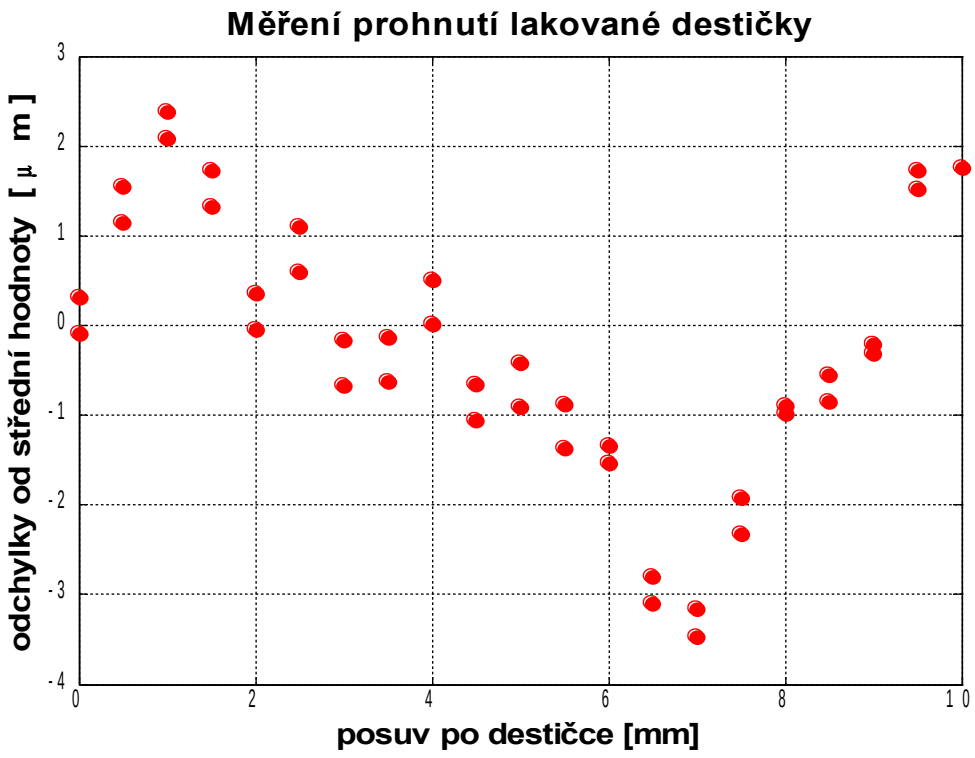
Mezi jevy, které mohou ovlivnit přesnost senzoru, patří prohnutí jednotlivých destiček elektrod senzoru. Toto prohnutí nelze odhadnout, protože prohnutí každé elektrody může mít jinou velikost. Jelikož je prohnutí destiček senzorů negativní jev, je nutné zjistit jeho velikost, aby bylo možné stanovit, zda je nutné zahrnout jeho kompenzaci do kalibrační procedury.

Velikost prohnutí byla určena pomocí optického senzoru polohy PHILTEC D63 [5], který slouží pro měření vzdáleností, pohybu a vibrací. Senzor vyšle paprsek k předmětu a měří čas návratu odraženého paprsku od měřeného předmětu. Výstupem senzoru je napětí, odpovídající vzdálenosti měřeného předmětu. Převodní charakteritika senzoru má dvě oblasti měření – near side a far side. My jsme měřili v přesnější oblasti, tzn. v near side. Měření v této oblasti se dosáhlo maximálním přiblížením hrotu optického senzoru k měřené destičce. Převodní charakteristika senzoru je uvedena v jeho datasheetu [5]. Aby se zjistila velikost prohnutí destiček elektrod, měřila se vzdálenost optického senzoru od destičky elektrody při horizontálním pohybu senzoru nad destičkou. Měřicí přípravek byl opět sestaven z bloků stanice Newport. Uspořádání experimentu, viz Obr.3.1.

Prohnutí bylo měřeno pouze v jednom směru destičky. Všechny hodnoty se měřily dvakrát, jak je vidět z vyhodnocení měření na Obr 3.2. Měřená část snímací elektrody byla dlouhá 10 mm. Změřená citlivost optického senzoru byla 0.0106 V / 1 μm. Z Obr.3.2 tedy plyne, že prohnutí snímací elektrody bylo přibližně 6 μm na vzdálenosti měřených 10 mm. Dalším měřením bylo měření prohnutí části destičky, která není pokryta měděnou vrstvou. Cílem měření bylo zjistit, od jakého povrchu se paprsek optického senzoru odráží. Byla zjištěna citlivost čidla nad měděným a neměděným povrchem, při stejné vzdálenosti čidla od obou povrchů. Citlivost nad měděným povrchem byla asi 30krát větší než nad povrchem bez mědi. Z tohoto pokusu lze vypozorovat, že paprsek čidla se neodráží od vrstvy laku, kterou je destička čidla pokryta. Kdyby se odrážel od laku, citlivost by byla v obou případech přibližně stejná. Z toho plyne, že byla měřena skutečně křivost povrchu vlastní destičky a ne nerovnoměrnost naneseného laku. Při prohnutí destiček elektrod, které bylo změřeno experimentem, není potřeba zahrnovat toto prohnutí do kalibrační procedury.



Obr.3.1 Stanice pro měření prohnutí destiček



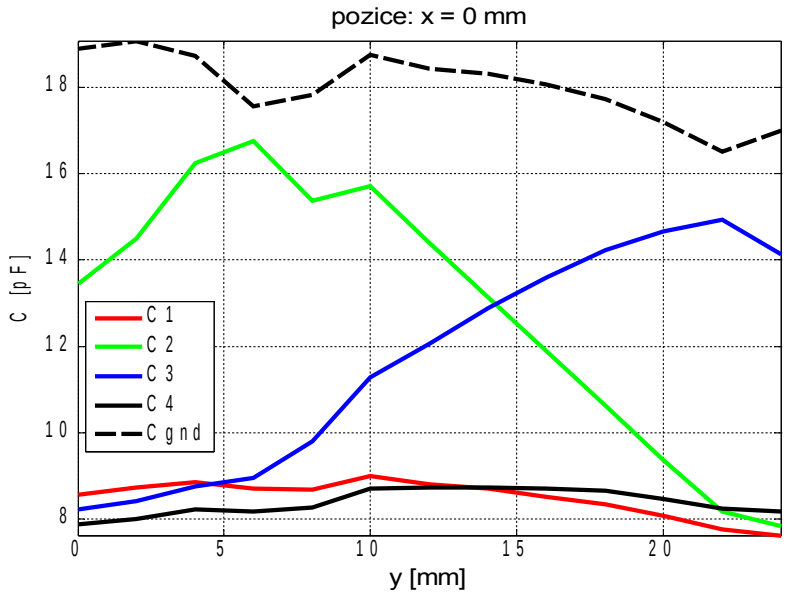
Obr.3.2 Změřené hodnoty prohnutí destičky

3.2 Měření vzájemných kapacit senzoru

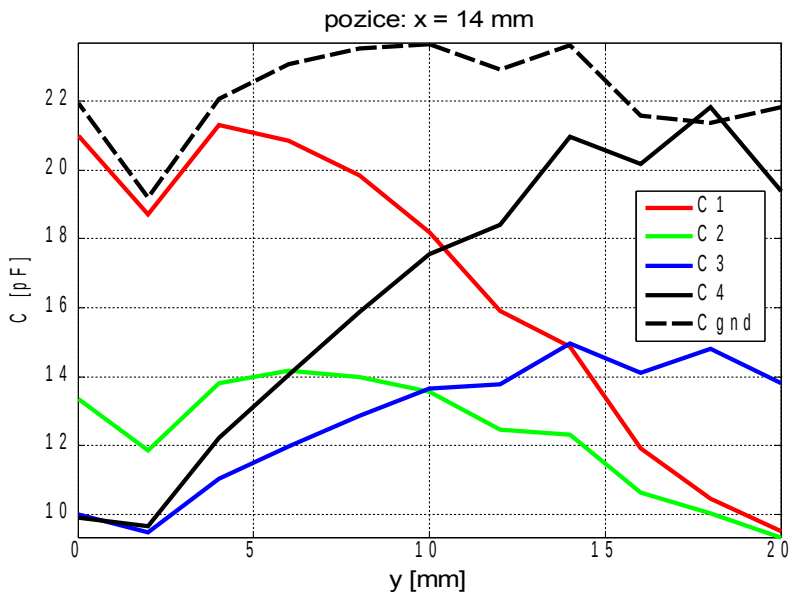
Úkolem měření vzájemných kapacit bylo zjistit, jak se chovají jednotlivé kapacity senzoru při posuvu snímací elektrody vůči budicí elektrodě. Kapacity byly měřeny pomocí RLC mostu SR 720 [6]. Zaznamenávány byly kapacity kvadrantů C_1, C_2, C_3, C_4 budicí elektrody a společné země snímací a budicí elektrody vůči snímací elektrodě. Změny těchto kapacit se zkoumaly při změně polohy snímací elektrody vůči budicí, změně vzdálenosti těchto elektrod a při jejich různoběžnosti. Stanice, která umožnila realizovat všechny uvedené vzájemné polohy elektrod je zobrazena na Obr.2.4. K záznamu hodnot z RLC mostu byl používán skript v MATLABu, dodaný vedoucím práce, který výstupní data průměroval z pěti měřených hodnot. Při měření bylo potřeba ručně přepojovat vývody jednotlivých měřených kapacit. Byl realizován pokus měření zautomatizovat použitím relé, která by automaticky přepínala jednotlivé kapacity. Tento pokus však nevyšel, protože relé mají moc velkou indučnost. Hodnoty měřených kapacit se pohybovaly v řádu jednotek pF, proto indukčnost relé naprosto znemožňovala měření.

3.2.1 Měření kapacit bez parazitních vlivů senzoru

Prvním měřením bylo zjištění závislosti kapacit na poloze snímací elektrody vůči budicí elektrodě. V tomto měření se co nejvíce eliminovaly všechny parazitní jevy, jako vzájemné natočení elektrod kolem osy z a různoběžnost elektrod. Posuv snímací elektrody vůči budicí elektrodě byl prováděn v mřížce s krokem 2 mm. Nastavila se pevná pozice osy x a postupně se měnily hodnoty na ose y a zaznamenávaly se všechny hodnoty kapacit. Následně byla změněna pozice snímací elektrody v ose x a opět se měnily hodnoty osy y. Bylo tak zjištěno chování vzájemných kapacit při pohybu snímací elektrody po celé budicí elektrodě. Na Obr. 3.3 a 3.4 je zobrazeno chování vzájemných kapacit senzoru. Jsou patrné souvislosti mezi jednotlivými kapacitami při pohybu snímací elektrody nad budicí elektrodou. Kapacita snímací elektrody vůči společné zemi se při pohybu snímací elektrody v podstatě nemění. V Obr.3.3 se pohybovala snímací elektroda nad kvadranty C2 a C3 budicí elektrody. Je dobře vidět, že kapacity těchto kvadrantů mají podstatně vyšší hodnoty než kvadrantů C1 a C4 vůči snímací elektrodě. V případě z Obr. 3.4 se situace obrací, protože měření se provádělo v jiné poloze osy x.



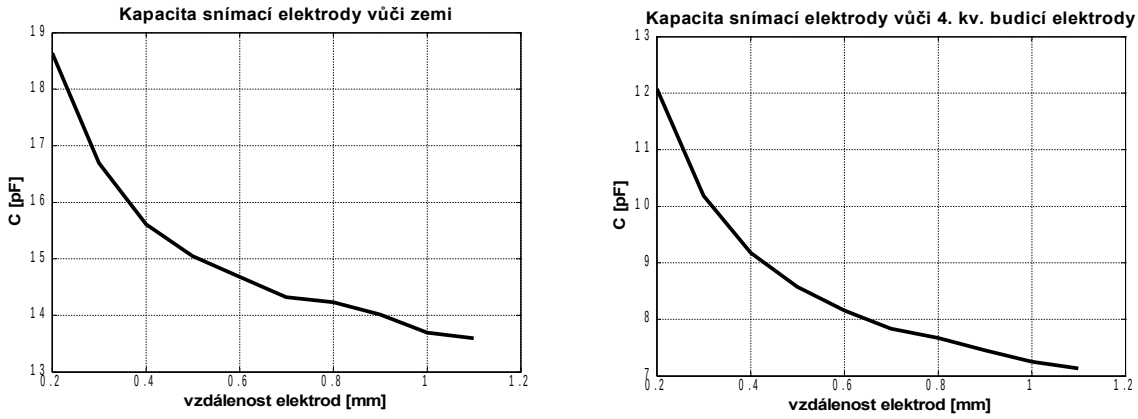
Obr.3.3 Pohyb snímací elektrody nad 2. a 3. kvadrantem budicí elektrody



Obr.3.4 Pohyb snímací elektrody nad 1. a 4. kvadrantem budicí elektrody

3.2.2 Závislost vzájemných kapacit na změně vzdálenosti elektrod

Druhé měření se týkalo zjištění závislosti vzájemných kapacit na vzdálenosti snímací a budicí elektrody. Měřením se ověřil předpoklad, že vzájemné kapacity senzoru mají nepřímo úměrnou závislost na vzdálenosti elektrod, podle vztahu (2.1). Tentokrát byl střed snímací elektrody umisťován pouze do pěti bodů budicí elektrody, do rohů a středu budicí elektrody. Na Obr.3.5 jsou ukázky měřených závislosti. Je patrné, že kapacita mezi zemí a snímací elektrodou je opět vyšší, než mezi jednotlivými kvadranty budicí elektrody a snímací elektrodou.

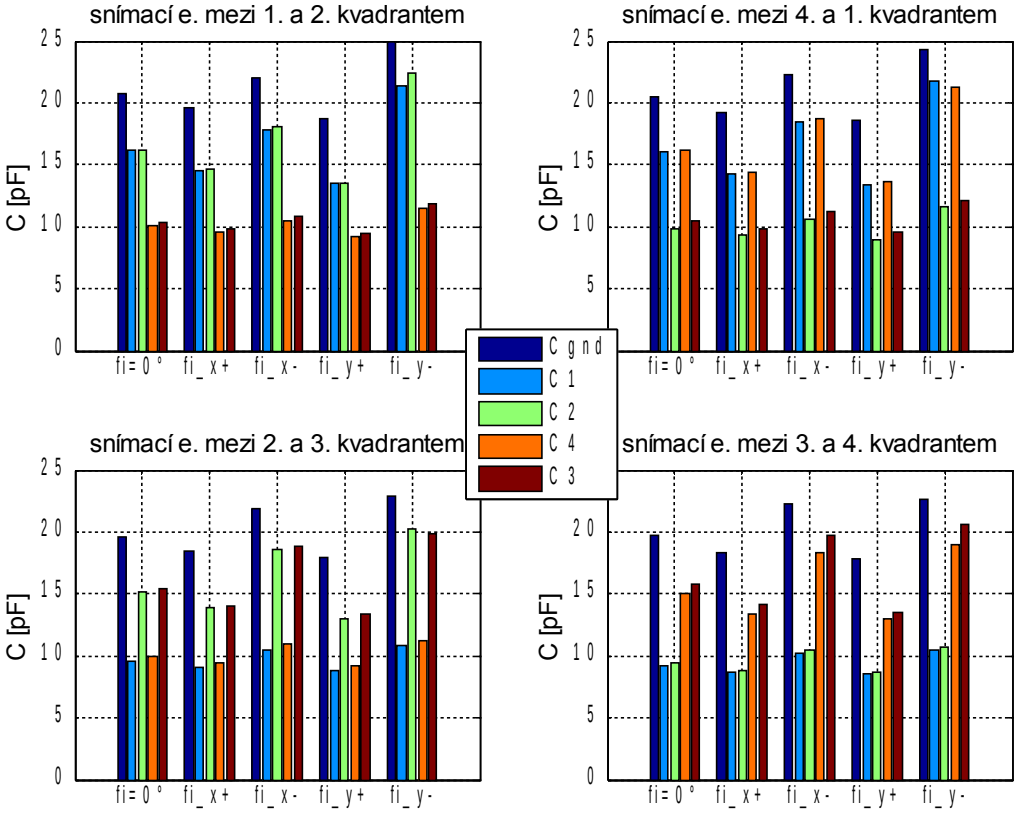


Obr.3.5 Závislosti kapacit na vzdálenosti elektrod

3.2.3 Vliv různoběžnosti elektrod

Elektrody byly umístěny tak, aby vzájemný úhel natočení elektrod kolem osy *z* byl nulový, cílem tohoto měření bylo totiž zjistit vliv různoběžnosti elektrod na vzájemné kapacity. Střed snímací elektrody se posouval do 5 poloh. Na osy *x, y* budicí elektrody tak, aby snímací elektroda nepřesahovala přes okraj budicí elektrody, a do středu budicí elektrody. V každé z těchto poloh se měřily vzájemné kapacity elektrod, čili 5 hodnot kapacit. Měření se prováděla při rovnoběžnosti elektrod, 2krát při natočení kolem osy *x* a 2krát při natočení kolem osy *y*. Výsledek měření je zobrazen na Obr.3.6, kde není znázorněno chování kapacit při umístění snímací elektrody ve středu budicí elektrody.

Změřené hodnoty byly zpracovány pomocí vzorců (2.2) a (2.3). Získali jsme tak měřené polohy snímací elektrody. Tyto hodnoty se lišily kvůli zkoumaným různoběžnostem elektrod. Jsou to ovšem polohy měřené, které jsou jiné než skutečné polohy snímací elektrody. Některé změřené hodnoty však neodpovídaly přesně našim předpokladům, měření mohlo být zkreslené. Desky takto malého čidla lze velmi obtížně nastavit přesně rovnoběžně vůči sobě. Bylo zjištěno, že na mikropolohovací stanici dochází při různoběžnosti elektrod k parazitnímu posunutí středu snímací elektrody. Tento jev mohl také ovlivnit měření. Z naměřených dat byla však dobře patná citlivost senzoru na různoběžnost elektrod, jak je patrné z Obr.3.6. Z tohoto důvodu je třeba tento jev lépe a přesněji prozkoumat. Pokus, který zpřesní měření, je výroba většího senzoru. Na tomto senzoru se budou přesněji nastavovat parametry, jako vzájemné natočení elektrod kolem osy *z* a různoběžnost elektrod.

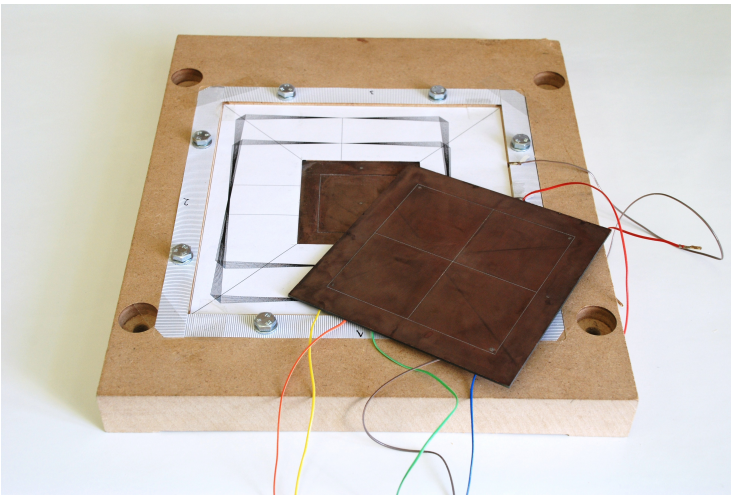


Obr.3.6 Vliv různoběžnosti elektrod na vzájemné kapacity, při různých polohách snímací elektrody vůči budicí elektrodě.

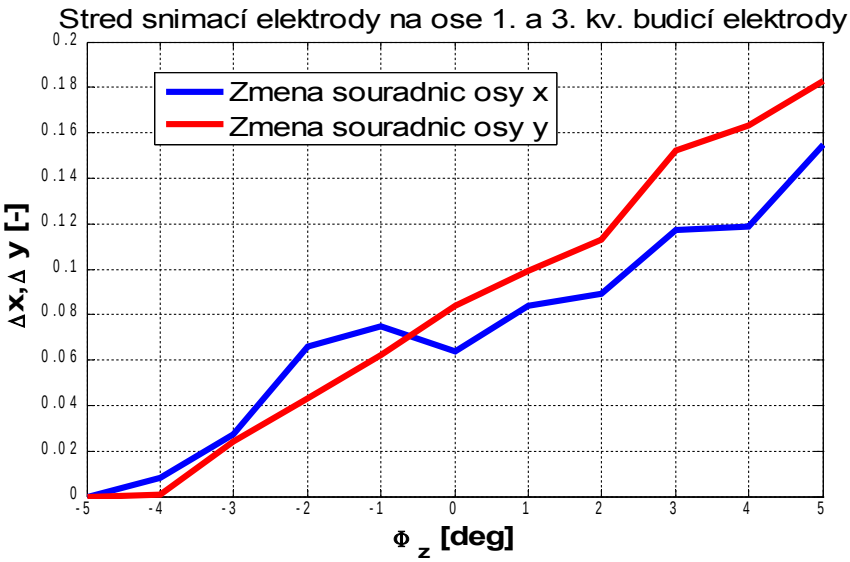
3.3 Výroba a proměřování velkého senzoru

Aby bylo možné simulovat pomocí tohoto velkého senzoru stejné vzájemné polohy snímací a budicí elektrody, vyfrézovali jsme z dřevotřísky polohovací stanici viz Obr.3.7. V tomto senzoru byla pevně uchycena snímací elektroda a budicí elektroda byla pohyblivá. Byla zjištěna závislost chování kapacit na tomto senzoru. Nejprve při poloze snímací elektrody na krajích budicí elektrody. Budicí elektroda byla umístěna na okraj snímací elektrody tak, aby střed snímací elektrody ležel na ose budicí elektrody. Po milimentrovém kroku se posouvalo s budicí elektrodou po okraji snímací elektrody, aby se proměřil celý obvod budicí elektrody. Následovalo měření závislosti vzájemných kapacit při natáčení budicí elektrody kolem osy *z*. Senzor nereaguje na natáčení kolem osy *z* při poloze středu snímací elektrody ve středu budicí elektrody. Vzájemné kapacity všech kvadrantů budicí elektrody a snímací elektrody zůstávají stejné. Nejcitlivější je ovšem při poloze středu

snímací elektrody na osách jednotlivých kvadrantů budicí elektrody. Právě v těchto místech bylo měření realizováno. K získávání dat jsme tentokrát použili vyvíjenou desku s mikroprocesorem [3], která vyhodnocuje poměr kapacit senzoru s větší přesností než RLC most SR 720. Obr. 3.8 byl získán otáčením budicí elektrody kolem osy *z,* při poloze středu snímací elektrody na osách kvadrantů budicí eletkrody. Tento obrázek je spíše ilustrativní, je dobře patrná citlivost senzoru na malé vzájemné natočení elektrod kolem osy *z*. Na Obr.3.7 jsou vidět šablony, do kterých se budicí elektroda nastavovala.



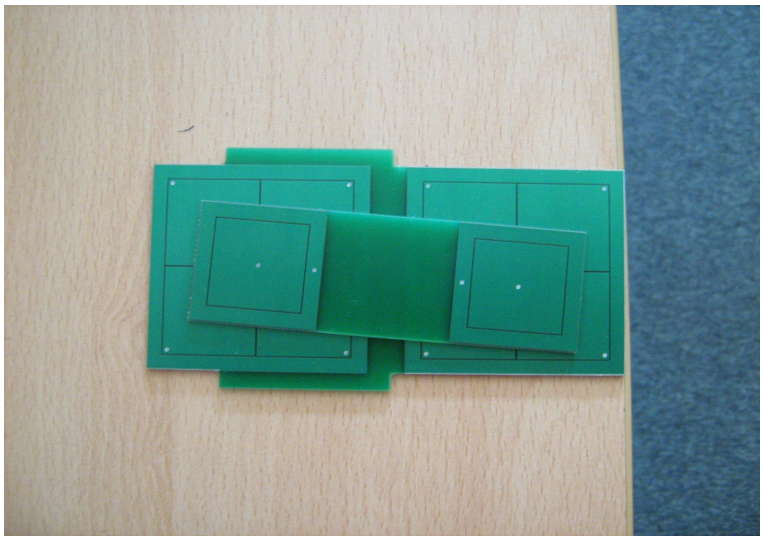
Obr.3.7 Polohovací stanice pro velký senzor



Obr.3.8 Výsledek natáčení budicí elektrody kolem osy z

3.4 Realizace a měření dvouelementového senzoru

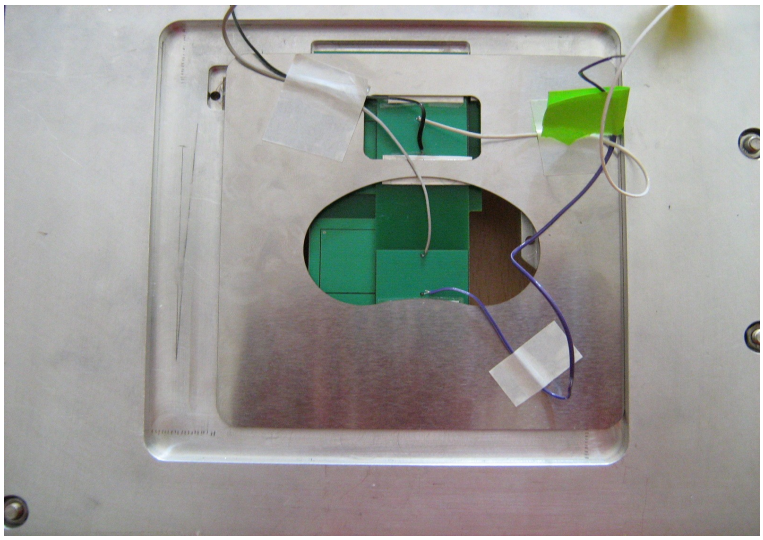
Jak bylo již dříve popsáno, informaci o natočení snímací elektrody vůči budicí elektrodě nelze zjistit použitím jednoho páru elektrod. Při měření polohy snímací elektrody lze získat informaci o vzájemných kapacitách jednotlivých kvadrantů budicí elektrody vůči snímací elektrodě. Z těchto kapacit ale nelze poznat, jestli se snímací elektroda opravdu posunula vůči budicí elektrodě, nebo došlo k jejímu parazitnímu natočení kolem osy z. Řešením popsané situace je navrhnout senzor, který bude obsahovat dva páry budicích a snímacích elektrod. Snímací a budicí elektrody tohoto senzoru budou pevně spojeny, viz Obr.3.9. Díky tomu lze od sebe rozeznat, kdy došlo k posuvu snímacích elektrod a kdy k parazitnímu natočení. Při pouhém posuvu se budou vzájemné kapacity obou elementů měnit stejně. Při natáčení kolem osy z ovšem změny vzájemných kapacit na obou elementech senzoru budou různé, lze tak poznat, že k tomuto natočení došlo. Tento senzor byl navrhován na stolek, ve kterém jsou zabudované tři piezomotory, které pohybují s ocelovou deskou, na kterou byly umístěny spojené snímací elektrody senzoru.



Obr.3.9 Dvouelementový senzor

Na piezoelektrickém stolku je pohyb posouvané desky vymezen dorazy. Velikost pohybu desky je 20,2 mm v obou osách. Tato hodnota byla zásadní pro návrh jednotlivých elektrod. Délka strany snímací elektrody musela být minimálně stejně velká. Snímací elektrody totiž nesmí při pohybu desky opustit hranici vymezenou budicími elektrodami, kde je nehomogenní elektrické pole. Spojené snímací elektrody byly uchyceny k posuvné

desce a budicí pevně k piezoelektrické stanici. Piezoelektrická stanice s dvouelementovým senzorem je zobrazena na Obr.3.10. Bylo nutné slícovat středy jednotlivých snímacích a budicích elektrod (při střední poloze pohyblivé desky) s co největší přesností.



Obr.3.10 Umístění dvouelementového senzoru na piezoelektrickém stolku

S dvouelementovým senzorem bylo provedeno měření pro otestování vztahů (2.5). Na piezoelektrickém stolku se nastavil úhel vzájemného natočení elektrod a změřily se vzájemné kapacity na obou elementech. Dosazením těchto kapacit do poměrových vztahů (2.2) se spočetly měřené hodnoty posuvů elektrod, které byly dosazeny do řešení úhlu natočení (2.6). Výsledný úhel natočení ovšem neodpovídal nastavenému natočení elektrod. Tato část zůstává ještě nedořešena. Bude potřeba důkladněji prozkoumat možnost aplikace vypočtených vztahů na spočtení úhlu natočení elektrod.

4 Návrh kalibrační procedury

Kalibrační proceduru jsem schopen formulovat z nabytých znalostí o chování senzoru následujícím způsobem. Jevy, které ovlivňují kalibraci senzoru, jsou prohnutí destiček elektrod, vzájemné natočení elektrod kolem osy z, různoběžnost elektrod. Jak bylo zmíněno, prohnutí elektrod lze do jisté míry zanedbat. V konkrétních aplikacích by bylo možné upevnit elektrody na desky z nějakého pevného a dokonale rovného materiálu a tím prohnutí elektrod skutečně eliminovat. Zbývá tedy od sebe odlišit vzájemné natočení elektrod kolem osy z a různoběžnost elektrod. Při zajištění rovnoběžnosti elektrod lze pomocí dvouelementového senzoru zjistit vzájemné natočení budicí a snímací elektrody. Přesněji řečeno budicích a snímacích elektrod, protože senzor, kterým lze natočení zjistit, se skládá z dvou párů elektrod. Detailněji je tento senzor popsán v předchozí kapitole. V reálné aplikaci však nelze zajistit naprostou rovnoběžnost obou elektrod.

4.1 Teoretický návrh kalibrační procedury

Nejjednoduším způsobem, jak odlišit natočení elektrod a jejich různoběžnost, je umístit středy snímacích elektrod přesně nad středy budicích elementů. V této poloze jsou elektrody necitlivé na vzájemné natočení kolem osy z. Z velikostí změřených vzájemných kapacit mezi jednotlivými kvadranty budicího elementu a snímací elektrodou by se dala zjistit různoběžnost elektrod. Dokonce by se dal zjistit i směr a velikost různoběžnosti. Teoreticky je tato situace snadno představitelná, měřené kapacity mezi elektrodami se ale pohybují v řádu jednotek pF a v reálné aplikaci na ně působí veškeré rušivé vlivy. Ovšem s jistou neurčitostí by bylo možné tímto způsobem zjistit různoběžnost elektrod a tuto hodnotu následně nastavit jako konstantu v kalibrační proceduře. Problém tohoto řešení spočívá v tom, že umístění středů snímací a budicí elekrody kolmo nad sebe nelze docílit jinak než použitím jiného senzoru. Tímto senzorem by mohla být např. kamera, která by snímala značky umístěné na obou elektrodách. Je však patrné, že by došlo k výraznému zvýšení složitosti celé úlohy.

Další varianta kalibrace senzoru by vycházela pouze z měřených kapacit mezi elektrodami. Jak již bylo zmíněno, pohyb desky na piezoelektrickém stolku je vymezen dorazy, které představují stěny celého stolku. Poloha desky je při pohybu po těchto dorazech bez

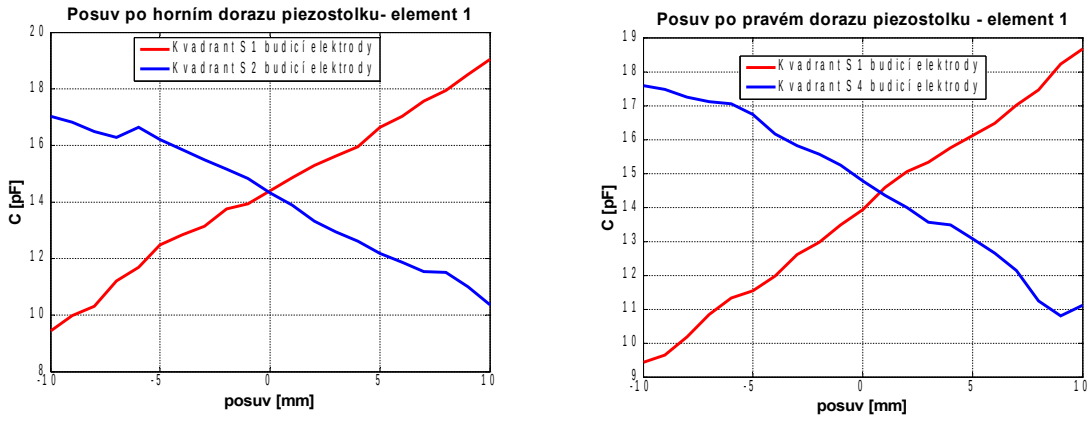
parazitního natočení kolem osy *z,* které vzniká polohováním bez vedení. To znamená, že při dokonalém uchycení snímací a budicí elektrody mají tyto elektrody dvouelementového senzoru nulové vzájemné natočení kolem osy *z.* Pohybem posuvné desky po dorazu je možné změřit charakteristiky změn vzájemných kapacit senzoru. Porovnáním charakte-ristik vzájemných kapacit sousedních kvadrantů budicí elekrody, např. 1. a 4. kvadrantu, vůči snímací elektrodě, lze nalézt stejné hodnoty kapacit. Budou-li tyto hodnoty kapacit odpovídat nulové hodnotě posunu desky po dorazu piezostolku, jsou elektrody ve zkoumaném směru vůči sobě rovnoběžné. Odpovídají-li nulovému posuvu desky různé hodnoty kapacit obou charakteristik, je to znamení různoběžnosti elektrod. Z rozdílu kapacit by se dala vypozorovat i velikost různoběžnosti. Při opakování daného postupu po kolmém dorazu lze zjistit různoběžnost v druhém směru.

4.2 Praktická realizace kalibrační procedury

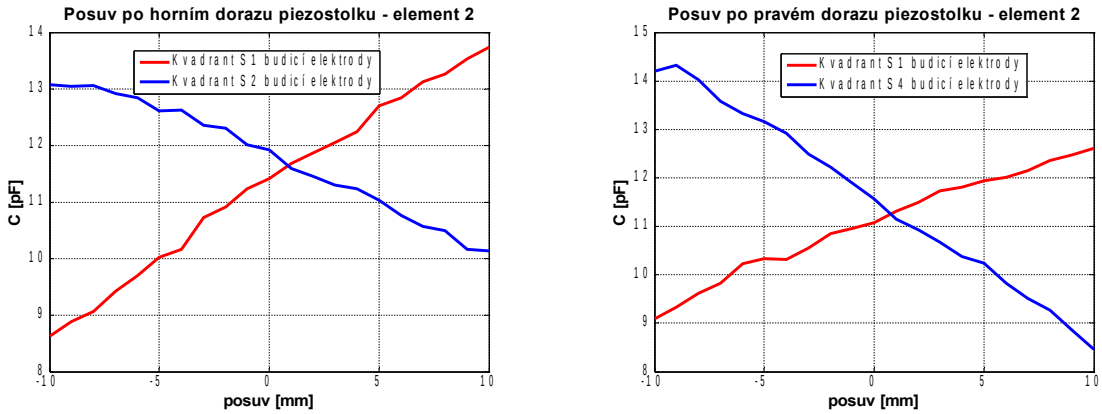
Bylo realizováno měření vzájemných kapacit obou elementů dvouelementového senzoru, při posuvu pohyblivé desky po dorazech piezoelektrického stolku. Měřily se vždy pouze kapacity vůči kvadrantům budicí elektrody, které sousedí s dorazem piezostolku. Měřená data jsou zobrazena na Obr.4.1 a 4.2. Středy snímacích a budicích elektrod obou elementů byly vzdáleny 56 mm. Na Obr.4.1 je znázorněno měření kapacit snímací elektrody vůči vybraným kvadrantům budicího elementu 1 a na Obr.4.2 vůči elementu 2. Použití dvou elementů ještě zpřesňuje popsanou kalibraci v předchozím odstavci, protože elementy jsou od sebe vzdáleny 56 mm a možná různoběžnost elektrod se tak projeví více.

Ze změřených grafů je patrné, že kapacity změřené na elementu 1 jsou vyšší než na elementu 2. Tato skutečnost naznačuje, že snímací elektrody byly vůči budicím elektrodám obou elementů různoběžné v podélném směru dvouelementového senzoru. Tato různoběžnost je patrná i z grafů jednotlivých elementů při posuvu desky po pravém dorazu piezostolku. Průnik křivek v těchto grafech je posunut od střední polohy. Posun průniku křivek od nulové hodnoty posuvu pohyblivé desky signalizuje různoběžnost elektrod v rovnoběžném směru k pravému dorazu piezostolku. Směr různoběžnosti elektrod je shodný se směrem, který udávají rozdílné kapacity na 1. a 2. elementu senzoru. Tato různoběžnost byla dána špatným uchycení elektrod k piezostolku.

Posuv po horním dorazu piezostolku je také zobrazen na Obr.4.1 a 4.2. Na elementu 1 vyšel průnik změřených kapacit přesně na středu posuvu desky piezostolku. To znamená, že ve vodorovném směru k hornímu dorazu piezostolku jsou elektrody rovnoběžné. Na elementu 2 je ovšem signalizace různoběžnosti elektrod v tomto směru. Může to být dáno lokálním prohnutím elektrod, protože elektrody nebyly přichyceny na dokonale rovném materiálu. Pro vyhodnocení velikosti různoběžnosti elektrod by se daly použít charakteristiky závislostí změny kapacity na vzdálenosti elektrod z Obr.3.5. Tímto způsobem lze získat velikost a směr různoběžnosti elektrod. Při používání senzoru se tyto velikosti budou nastavovat jako konstanty do vztahů pro určení polohy snímací elektrody vůči budicí elektrodě. Bude tak možné poznat, kdy došlo k parazitnímu natočení elektrod kolem osy *z* a kdy k vzájemnému posuvu elektrod.



Obr. 4.1 Měření vzájemných kapacit elementu 1



Obr. 4.2 Měření vzájemných kapacit elementu 2

5 Závěr

Cílem této práce měl být návrh kalibrační procedury absolutního kapacitního senzoru, který snímá pohyb bez vedení. Požadované rozlišení senzoru bylo v řádech mikrometrů. V průběhu práce byly rozebrány jevy, které mají vliv na kalibraci senzoru a na jeho správnou funkčnost. Samotná podoba senzoru se během práce měnila, kvůli stále poznávaným požadavkům na jeho správnou funkčnost. Poslední podoba senzoru je navržena pro posuv na piezostolku a skládá se ze dvou elementů. Pro zjišťování velikosti jednotlivých parazitních jevů byly navrhovány různé měřicí stanice, které dovolovaly co nejvíce prostudovat konkrétní jevy. Po prostudování všech parazitních jevů byla navržena kalibrační procedura, pomocí níž je možné rozeznat od sebe jednotlivé okolní jevy, ovlivňující převodní charakteristiku senzoru. Při všech realizovaných měřeních byla pozorována velká citlivost senzoru na veškeré okolní jevy, jako blízkost osob, či zdrojů světelného záření. Je patrné, že pro správnou funkčnost senzoru budou kladeny velké nároky na přesnost jeho uchycení a dokonalé odstínění od všech okolních jevů.

Tato práce je součástí projektu GOLEM, proto pro budoucí využití senzoru bude zapotřebí některé části práce dodělat. Hlavním úkolem, který bude nutné dořešit, je matematický popis dvouelementového senzoru, který v této práci je popsán, ale není zcela funkční. Pomocí tohoto popisu se bude vyhodnocovat vzájemná poloha elektrod. Dále bude nutné dodělat převod změřených parazitních jevů na matematické konstanty, které budou nastavovány v kalibrační proceduře. Jelikož senzor bude v budoucnu snímat pohyb bez vedení vzniklý piezoelektrickými motorky, nastává zde další problém. Piezoelektrické motorky jsou poháněny vysokým napětím, které je silným rušivým zdrojem. Bude tedy nutné vymyslet způsob odrušení těchto motorků tak, aby neměly vliv na funkčnost samotného senzoru. Důvodem, proč jsou tyto části nedodělané, byla časová náročnost všech měření a také dlouhodobá pracovní neschopnost vedoucího práce.

6 Literatura:

[1] Ripka, P., Ďado, S.: *Senzory a převodníky.* Vydavatelství ČVUT, 2005.

[2] Baxter, L.: *Capacitive sensors design and applications.* IEEE PRESS, 1997.

[3] Anderle, M.: *Systém pro podporu řízení piezoelektrických motorů.* Diplomová práce, Katedra řídicí techniky, FEL ČVUT Praha, 2008.

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

[5] Datasheet optického senzoru D63: http://www.philtec.com/datasheetD63.pdf

[6] RLC most SR 720: http://www.thinksrs.com/products/SR715720.htm

[7] Desky s plošnými spoji a osazené desky, norma ČSN EN 61188-1-1.

6.1 Obsah přiloženého CD

/bp_Svoma_2008.pdf	Tento dokument ve formátu PDF.
/kresleni_senzoru.m	Skript pro vykreslení senzoru.
/overeni_vypoctu.m	Skript pro ověření odvozených vztahů.