

# FEM SIMULACE PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY KAPACITNÍHO SENZORU POLOHY

O. Holub<sup>1</sup>, Z. Hurák<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Katedra řídicí techniky, České vysoké učení technické v Praze, Česká republika,  
[holubo2@control.felk.cvut.cz](mailto:holubo2@control.felk.cvut.cz)

<sup>2</sup> Centrum aplikované kybernetiky, České vysoké učení technické v Praze, Česká republika,  
[z.hurak@c-a-k.cz](mailto:z.hurak@c-a-k.cz)

Článek podává zprávu o simulacích závislosti kapacity senzoru polohy na měřené výchylce. Očekávané využití pro polohování stolku elektronového mikroskopu klade na senzor značná omezení. Není proto možné využít standardních výsledků z oblasti návrhu kapacitních snímačů. Místo toho byly provedeny simulace pro získání představy o vlivu některých parametrů senzoru na jeho převodní charakteristiku. Na základě porovnaných výsledků byl navržen a je v současné době konstruován senzor odpovídajících parametrů.

## 1 Specifikace a volba senzoru

Pro měření polohy lze obecně využít velkého množství metod (vizte např. [1] a [2] pro základní přehled), nicméně pro potřeby velmi přesných měření na relativně malých rozsazích do jednotek mm se v posledních letech prosadily téměř bezvýhradně pouze senzory na principu optickém, kapacitním anebo magnetickém (vizte [2]).

V rámci projektu, jehož cílem je vyvinout systém pro polohování stolku elektronového mikroskopu, byl definován následující požadavek na měřicí systém. Je potřeba měřit změny polohy stolku ve 2 osách (ve vodorovné rovině x-y), a to v rozsahu 2 mm v každé ose s přesností lepší než 2 μm. Celkové rozměry senzoru nesmí překročit v rovině x-y čtverec o straně 10 mm a na výšku 5 mm. Senzor bude umístěn ve vakuu, nicméně v prostředí s rušivým elektromagnetickým vlněním impulzního charakteru. Konečně šířka pásma měřicího systému by měla přesahovat 100 kHz.

Mezi běžně dostupnými senzory nebyl nalezen žádný, který by současně splňoval všechny uvedené požadavky, zejména se navzájem vylučují přesnost, šířka pásma a celkové rozměry senzoru. Bylo proto přistoupeno ke konstrukci nového, vlastního senzoru polohy. Z uvedených typů senzorů pouze optické jsou zcela imunní vůči elektromagnetickému rušení. Nicméně jednak rozměrové omezení, jednak jednoduchost výroby (vyleptáním motivu na desku plošného spoje) nakonec rozhodly ve prospěch kapacitního senzoru.

## 2 Lineární model senzoru

Uvažovaný kapacitní senzor je rozdílového typu. Pro měření polohy v jedné ose je tvořen dvěma budicími elektrodami a jednou snímací elektrodou. Na budicí elektrody se přivádí periodické (sinusové nebo obdélníkové) napětí opačné fáze a měří se potenciál snímací elektrody. Pokud se senzor doplní o zpětnovazební měřicí obvod, potom pro výstup tohoto obvodu platí (vizte např. [3])

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{C_L - C_R}{C_L + C_R},$$

kde  $C_L$  a  $C_R$  jsou kapacity levé a pravé budicí elektrody (vizte obr.1) vzhledem ke snímací elektrodě a  $U_{in}$  je amplituda budicího napětí. Výchylka měřicí elektrody ve vodorovném směru způsobí změnu kapacit  $C_L$  a  $C_R$ . V prvním přiblížení lze považovat závislost  $C_L$  a  $C_R$  na změně polohy  $dx$  za lineární,

$$C_L = \varepsilon \cdot b \cdot \frac{x_0 - dx}{d},$$

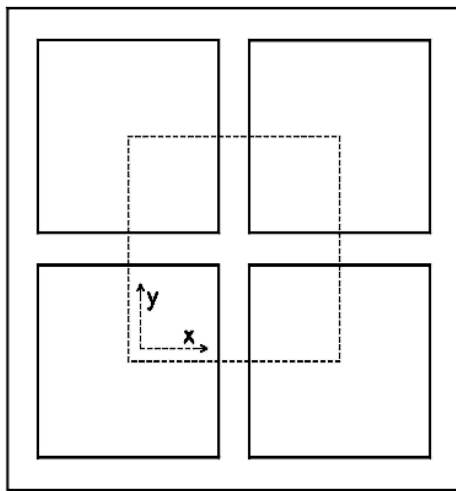
$$C_R = \varepsilon \cdot b \cdot \frac{x_0 + dx}{d},$$

kde  $\varepsilon$  je permitivita prostředí, do něhož jsou elektrody umístěny,  $d$  je kolmá vzdálenost od budících elektrod ke snímací a  $b$  je vodorovný rozměr elektrod, kolmý ke směru pohybu. Výrazy  $x_0 \pm dx$  označují tzv. “aktivní překryv” elektrod. Pro výstupní napětí měřicího obvodu potom platí vztah

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{dx}{x_0}.$$

Výhodou takového uspořádání je přímá úměra mezi měřeným posuvem  $dx$  a výstupním napětím  $U_{out}$  a nezávislost výstupu na změnách ovlivňujících obě kapacity  $C_L$  i  $C_R$  souhlasně (jde především o změny vzdálenosti  $d$ , hloubky elektrod  $b$ , případně odchylek od rovnoběžnosti).

Ve skutečnosti uvedené jednoduché vztahy doslova neplatí. Provedené simulace měly za cíl ukázat, které jevy ovlivňují vztah mezi kapacitou a výchylkou, do jaké míry jej ovlivňují a jak lze tyto problémy omezit.



Obr.1 Diferenční kapacitní senzor polohy – uspořádání pro měření polohy ve 2 osách

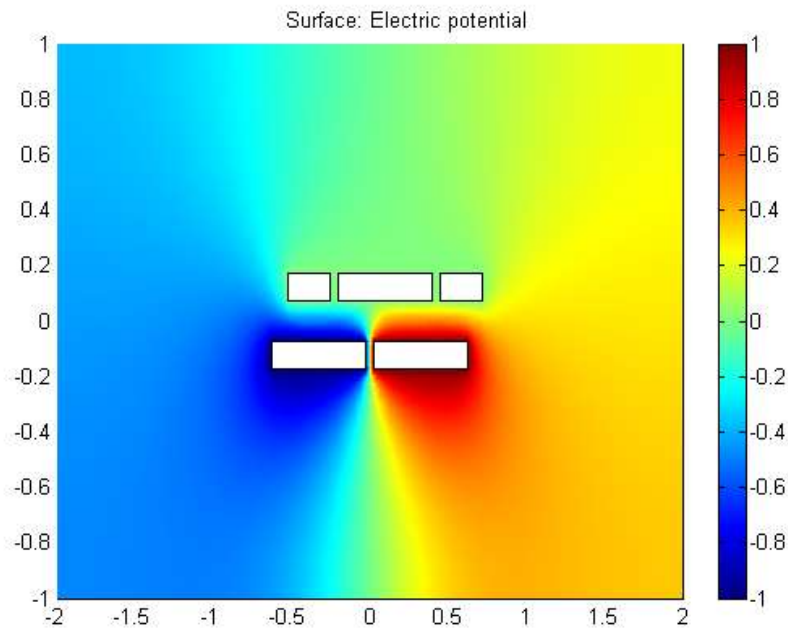
### 3 Simulace

Vzhledem k symetrii uvažovaného senzoru byly prováděny pouze 2D simulace v rovině určené směrem pohybu (osa  $x$ ) a svislou osou  $z$ , vizte obr. 2. Značně se tak snížila náročnost výpočtů a tím i doba nutná k provedení simulací. K výpočtu kapacity senzoru bylo využito prostředí FEMLAB (vizte [5]), samotné stanovení kapacit  $C_L$  a  $C_R$  pak vycházelo ze vztahů

$$C_L = \frac{\partial Q_S}{\partial U_L},$$

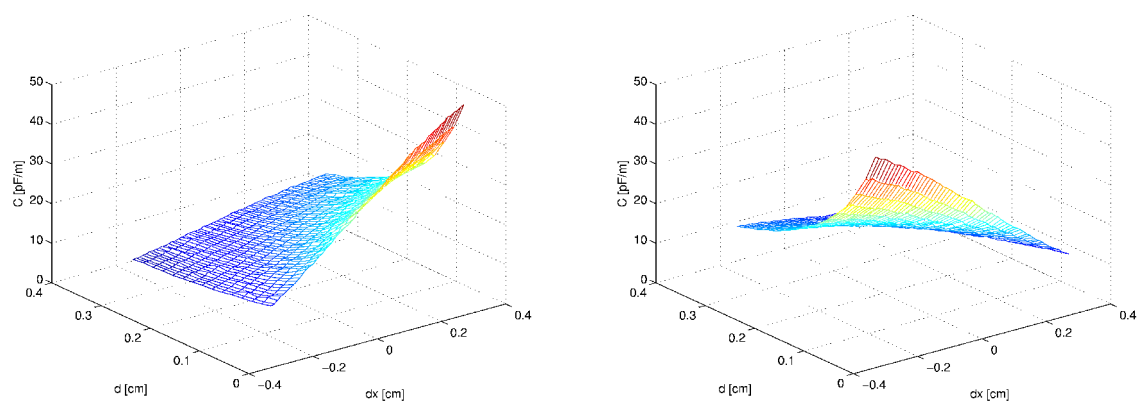
$$C_R = \frac{\partial Q_S}{\partial U_R},$$

kde  $\partial Q_S$  je změna volného náboje na povrchu snímací elektrody vyvolaná změnou napětí  $\partial U_L$ , resp.  $\partial U_R$  na levé, resp. pravé budící elektrodě.

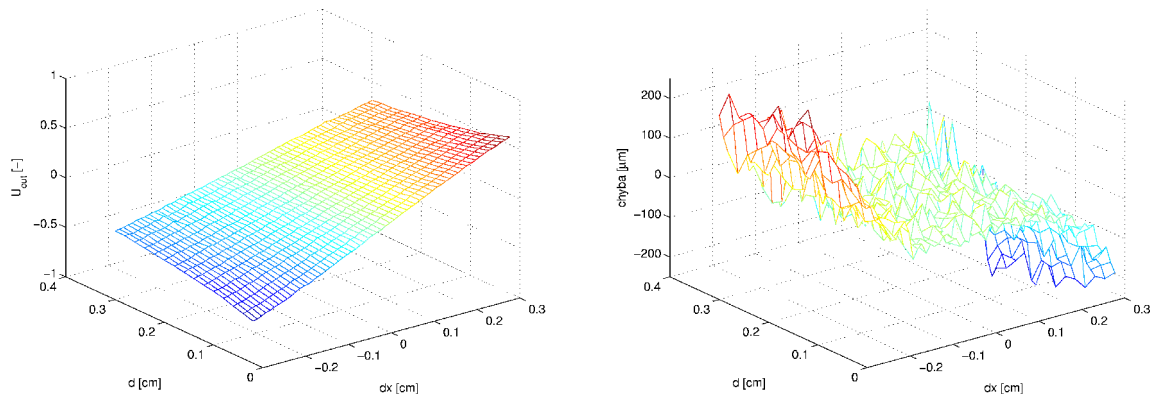


Obr.2 Řez senzorem při FEM simulaci – měřený pohyb je ve směru osy x

Jaké průběhy závislostí jednotlivých kapacit na výchylce můžeme očekávat, udávají výsledky simulací na obr. 3 a 4. Na obr. 4 je dále vynesena chyba výstupu měřicího obvodu. Výsledek byl normalizován tak, aby přímo vyjadřoval chybu přepočtenou na výchylku. Odchylka lineární aproximace od simulovaného průběhu je příliš velká – pro odchylky do  $\pm 2$  mm chyba dosahuje až  $100 \mu\text{m}$ . Ke zlepšení se obvykle používá stínění celého senzoru, případně jeho vybraných částí.



Obr.3 Závislost kapacit  $C_L$  (vlevo) a  $C_R$  (vpravo) na výchylce  $dx$  a vzdálenosti elektrod  $d$



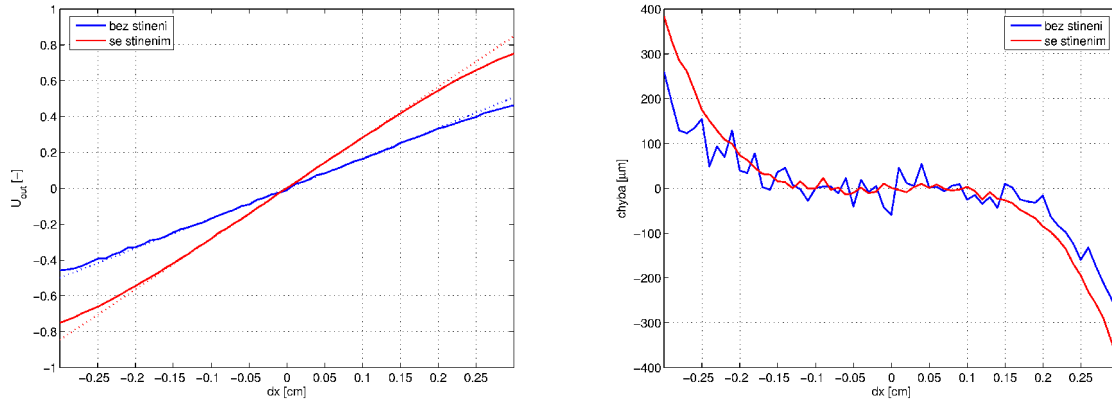
Obr.4 Závislost napětí  $U_{out}$  na výchylce  $dx$  a vzdálenosti elektrod  $d$  (vlevo) a odchylka napětí  $U_{out}$  od ideální (lineární) převodní charakteristiky (vpravo)

Doplněním senzoru o stínění okolo snímací elektrody dojde k “narovnání” elektrického pole mezi elektrodami. Tím se závislost  $U_{out}$  na  $dx$  přiblíží lineární funkci, vizte obr.5. Stínění současně brání siločarám el. pole uzavírat se po vnějších drahách. Tím se zmenší parazitní složka kapacit  $C_L$  a  $C_R$  nezávislá na  $dx$ , opět vizte obr.5.

Vzhledem k pozitivním vlastnostem stínění se hledaly možnosti, jak jeho účinnost dále zvýšit. Jednak se vyzkoušela myšlenka zvětšit plochu stínících elektrod tak, aby přesahovaly za okraje budících elektrod, jednak se simuloval účinek stínění budících elektrod.

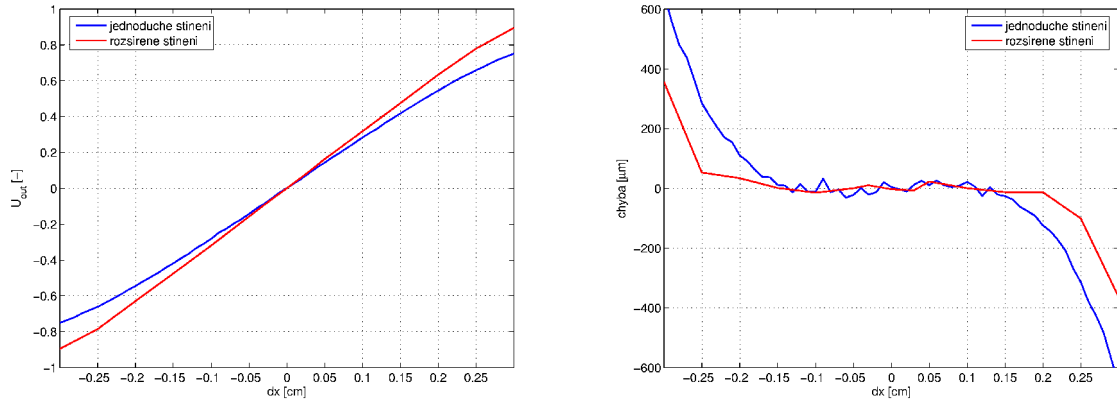
Přesah stínění za okraj budících elektrod výraznější zlepšení závislosti  $U_{out}$  na  $dx$  nepřinesl. Naopak se přesahem zvýšily parazitní kapacity elektrod vůči zemi. To v reálném vyhodnocovacím obvodu snižuje rozlišitelnost změn kapacit.

Oboustranné stínění dále omezilo vliv parazitních kapacit. Tím vzrostla strmost závislosti  $U_{out}$  na  $dx$  a také celkový rozkmit výstupního napětí – teď už činí přes 90% z maximální možné hodnoty  $\pm 1V$ . Současně se pro výchylky do  $\pm 2$  mm podstatně zlepšila linearita závislosti  $U_{out}$  na  $dx$ , vizte obr.6.

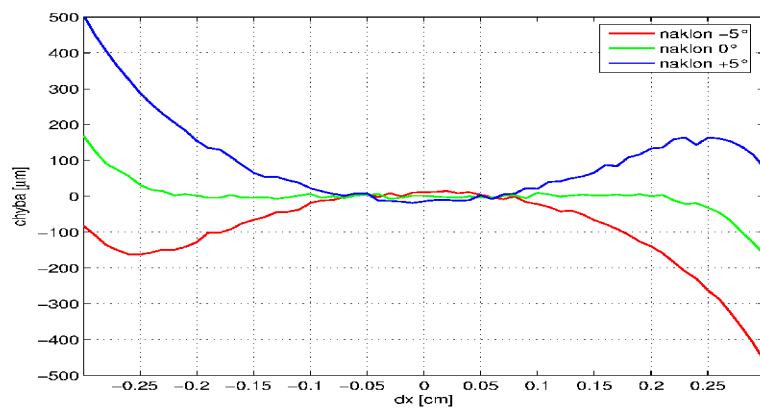


Obr.5 Závislost  $U_{out}$  na výchylce  $dx$  pro  $d = 0.5$  mm (vlevo) a odchylka  $U_{out}$  od lineárního modelu (vpravo), porovnání nestíněného (modře) a stíněného (červeně) senzoru

Největším problémem při konstrukci kapacitních senzorů jsou otázky mechanické přesnosti a stálosti. V našem uspořádání senzoru se jedná především o vzdálenost  $d$  mezi elektrodami a náklon elektrod. Vliv změn vzdálenosti  $d$  mezi budičímí a snímací elektrodou je eliminován poměrovým vyhodnocovacím obvodem. Vliv náklonu  $\theta$  snímací elektrody vůči rovině budičích elektrod zachycuje obr.7. Je potřeba udržet elektrody rovnoběžné s tolerancí cca  $\pm 3^\circ$ .



Obr.6 Závislost  $U_{out}$  na výchylce  $dx$  (vlevo) a odchylka  $U_{out}$  od lineárního modelu (vpravo) pro  $d = 0.5$  mm, porovnání jednoduchého (modře) a rozšířeného (červeně) stínění senzoru



Obr.7 Odchylka  $U_{out}$  od lineárního modelu, simulace vlivu různoběžnosti elektrod

## 4 Shrnutí

Pro potřeby řízení polohy stolku elektronového mikroskopu byl jako senzor polohy zvolen rozdílový kapacitní snímač. Vzhledem k omezením na jeho maximální rozměry, přesnost a citlivost na změnu polohy je nutné navrhnout specifický senzor. Byly provedeny simulace v prostředí FEMLAB, které poskytly náhled do problematiky návrhu kapacitních snímačů. Výše popsané simulace poskytly kvantitativní popis vlivu zkoumaných jevů na vztah mezi kapacitou a výchylkou, a to bez nutnosti testování na nadměrném množství prototypů. Tyto poznatky budou využity při návrhu nového kapacitního senzoru a v nejbližší době bude provedeno ověření na skutečném senzoru.

## Poděkování

Tato práce vznikla za podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci projektu 1M6840770004.

## Reference

- [1] Haasz, V. – Sedláček, Elektrická měření. Přístroje a metody. Vydavatelství ČVUT, Praha 2000.
- [2] Ďaďo, S. – Kreidl, M, Sensory a měřicí obvody. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.
- [3] Baxter, L. K. – Capacitive sensors. IEEE Press, New York, 1994.
- [4] Toth, F. N. – A design methodology for low-cost, high-performance capacitive sensors, PhD. Thesis, Delft Technical University, 1997.
- [5] FEMLAB User's Manual. Comsol, Inc. [Online]. Available: <http://www.comsol.com/>

---

Ondřej Holub  
Katedra řídicí techniky, FEL ČVUT  
Karlovo nám. 13/G, 121 35 Praha 2  
[holubo2@control.felk.cvut.cz](mailto:holubo2@control.felk.cvut.cz)

Zdeněk Hurák  
Centrum aplikované kybernetiky, FEL ČVUT  
Karlovo nám. 13/G, 121 35 Praha 2  
[z.hurak@c-a-k.cz](mailto:z.hurak@c-a-k.cz)