FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2004. március 26-27.

A LÉGCSILLAPÍTÁS HATÁSA MIKROKAPCSOLÓ KAPCSOLÁSI IDEJÉRE

Kovács Ádám

Switch-off time of a micromachined capacitive microswitch is commonly estimated by the quarter of the period corresponding to the lowest eigenfrequency of the vibrating membrane. It has been calculated by a quasi-analytical method taken into account the damping effect of a squeeze-film between the two plates of the capacitor. Several damping models are known to define an equivalent damping parameter. These models, however, lead to very different responses. The comparison of the methods shows that most of them are appropriate only in a narrow dimension interval. Nevertheless, damping affects mainly on the amplitude decay, therefore, they hardly modify the estimated switch-off time.

Mikroforgácsolt kapacitív mikrokapcsoló kapcsolási idejét, általánosan elfogadott módon, a rezgő membrán legkisebb sajátfrekvenciájához tartozó lengésszám negyedével becsüljük. Ezt kvázi-analitikus módszerrel számítottuk a kondenzátor két lemeze közötti vékony légréteg csillapító hatásának figyelembevételével. Számos modell ismeretes a légszűrőt jellemező csillapítási paraméter meghatározására. Ezek a modellek azonban nagyon eltérő eredményre vezetnek. A módszerek összehasonlítása azt mutatja, hogy legtöbbjük csak egy szűk méret-tartományban alkalmazható. Ugyanakkor a csillapítás elsődlegesen az amplitúdót csökkenti s ezért alig van hatással a kapcsolási időre.

1. Bevezetés

Mikroforgácsolt kapcsolót főként rádiófrekvenciás alkalmazásokban, pl. mobil telefonokban, intelligens antennákban, stb. alkalmaznak. A szerkezet fő elemei legtöbbször [3,4] egy elektrosztatikusan gerjesztett vékony fém lemez, az ún. híd, melynek két vége rögzített. A híddal szemben helyezik el a kondenzátor másik, rögzített lemezét, a középső vezetőt. Egy ilyen kapcsoló vázlatos rajza látható az 1. ábrán.

A kondenzátorra feszültséget kapcsolva a két lemez közötti elektrosztatikus tér hatására a híd a középső vezető irányába elmozdul és az átfolyó áram bekapcsolja a készüléket. Kikapcsoláskor a vonzó erő megszűnik és a híd, rugalmassága következtében rezgőmozgásba kezd.

1. ábra Kapacitív mikrokapcsoló keresztmetszetének vázlata

A rezgést a két lemez közötti vékony légrézben mozgó levegő csillapító hatása befolyásolja. Az állandó, téglalap keresztmetszetű hidat gyakran koncentrált tömeggel [2] vagy hajlított rúdként [3,5,7] modellezzük. E viszonylag egyszerű testmodellekkel a rezgése kvázi, analitikusan vizsgálhatók.

2. Mechanikai vizsgálat

Rúdként modellezve az állandó szélességű, csak a végein befogott lemez mozgásegyenlete a következő:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \tilde{E} I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = -k \frac{\partial w}{\partial t}, \quad (1)$$

ahol $w=w(t,x,y)$ a lehajlás függvény, ρ a sűrűség, $A = bt$ a lemez keresztmetszetének területe, $\tilde{E} = E/(1-\nu^2)$, $I = bt^3/12$ és k a csillapítási tényező. Ezt az egyenletet a lehajlás függvény $w(t,x) = \chi(t)X(x)$ alakú felbontása után kapott

$$M\ddot{\chi} + K\dot{\chi} + S\chi = 0. \quad (2)$$

egyenlet megoldásával kapjuk. A (2) egyenletben:

$$M = \int_{-l/2}^{l/2} \rho A X^2(x) dx, \quad K = \int_{-l/2}^{l/2} k X^2(x) dx, \quad S = \int_{-l/2}^{l/2} \tilde{E} X^{(iv)}(x) X(x) dx,$$

$X(t)$ pedig a geometriai peremfeltételeket kielégítő függvény. A (2) egyenlet megoldása végül a következő összefüggésre vezet:

$$\chi(t) = \Phi \exp(-\beta t) \sin(\gamma t + \delta), \quad (3)$$

ahol $\beta = K/2M$, $\gamma = \sqrt{S/M - (K/2M)^2}$ és a Φ ill. δ konstansok a $\chi(0) = d$, $\dot{\chi}(0) = 0$ kezdeti feltételekből számíthatók. A kapcsolási időt $t_k \approx T/4 = \pi/2\gamma$ összefüggéssel közelítjük. Az (1) egyenletben szereplő k csillapítási tényező meghatározására számos [1,5,6,7,9] modellt készítettek. Ezek mindegyike megadható a következő összefüggéssel:

$$\hat{k} = \frac{c_1 \hat{b}^n - c_2 \hat{b}^{n+1}}{1 + c_3 \hat{b}^{n-1}}, \quad (4)$$

ahol $\hat{k} = kd^3/(\eta l^4)$ és $\hat{b} = b/l$ dimenziótlan mennyiségek, η a levegő dinamikus viszkozitása és c_1 , c_2 , c_3 , n értéke a következő:

Modell	c_1	c_2	c_3	n
[5]	$96/\pi^4$	0	0	3
[7]	0,085	0	0	1
[6]	$768/\pi^6$	0	1	3
[9]	$3/(2\pi)$	0	0	2
[1]	1	0,6	0	3

1. táblázat: Konstansok értékei a (4) egyenletben

A 2. ábrán látható, hogy reális, $\hat{b} < 0.3$ szélesség esetén az [1,5,6] modellek közel azonos eredményt adnak, a [7] modell csak a szűk, $0,275 \leq \hat{b} \leq 0,325$ intervallumban egyezik a többivel, míg a [9] modell a teljes szélességi spektrumban jelentősen eltér a többitől.

2. ábra: A $\hat{k}$ csillapítási tényező változása

3. Numerikus példa

A vizsgált kapcsoló esetén [7]: $l = 280 \mu\text{m}$, $b = 90 \mu\text{m}$, $t = 1,5 \mu\text{m}$, $d = 1,5 \mu\text{m}$, $E = 76520 \text{ MPa}$, $\nu = 0.41$, $\eta = 1.82 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$. Mivel most $\hat{b} = 0.321$, a különféle csillapítási modellek közel egyező eredményt adtak a csillapítási tényező értékre. A (3) válasz-függvényben szereplő konstansok értékeire a következők adódtak: $\beta = 14,43 \text{ 1/s}$, $\gamma = 269744 \text{ 1/s}$, $\Phi = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ és $\delta = \pi/2$. A 3. ábra mutatja a híd közepének mozgását kikapcsoláskor ill. a kikapcsolási időt. A légszillapítás elhanyagolható mértékben befolyásolja a kikapcsolási időt, azonban jól láthatóan csökkenti a rezgések amplitúdóját.

(a)

(b)

3. ábra: (a) A híd közepének mozgása (b) Kikapcsolási idő

4. Irodalom

- [1] Chu, P.B., Nelson, P.R., Tachiki, M.L., Pister, K.S.J.: Dynamics of polysilicon parallel-plate electrostatic actuators, *Sensors and Actuators A*, Vol.52, (1996), 216-220.
- [2] Chan, E.K., Kan, E.C., Pinsky, P.M., Dutton, R.W.: Nonlinear dynamic modeling of micromachined microwave switches, *MTT Conference*, June 1997, Denver, (1997).
- [3] De Flaviis, F., Coccioli, R.: Combined Mechanical and Electrical Analysis of Microelectromechanical Switch for RF Applications, *IEEE MTT-Symp. Dig.*, Munich, Germany (1999).
- [4] Pacheco, S.P., Katehi, L.P.B., Nguyen, C.T-C: Design of Low Actuation Voltage RF MEMS Switch, *Proc. of the IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* Vol.1, (2000), 165-168.
- [5] Senturia, S.D.: *Microsystem Design*, Kluwer Academic Publ. (2000).
- [6] Vemuri, S., Fedder, G.K., Mukherjee, T.: Low-order squeeze-film model for simulation of MEMS devices, *Proc. Int. Conf. Mod.Sim. of Microsystems*, March 27-29, San Diego. (2000),
- [7] Huang, J., Liew, K., Wong, C., Rajendran, S., Tan, M., Liu, A.: Mechanical Design and Optimization of Capacitive Micromachined Switch, *Sens. and Actuators A*, 93, (2001), 273-285.
- [8] Inman, D.J.: *Engineering vibration*, Upper Saddle River, New Jersey, (2001).
- [9] Zhao, Y.: Lateral tunnelling accelerometer,
www2.latech.edu/~yzh007/mems/design/mechanics/mechanics.htm. (2003),

Kovács Ádám PhD

BME Műszaki Mechanikai Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Tel. +36 1 463 1369, Fax. +36 1 463 3471 E-mail: adamo@mm.bme.hu