

طراحی یک شتاب سنج خازنی MEMS

محمد محبوب جهرمی

استادیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

علی ابوالقاسمی آزاد

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۷/۲۶، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۸/۲۳، تاریخ تصویب ۸۴/۹/۲۶)

چکیده

طراحی یک شتاب سنج خازنی بر مبنای فناوری میکروماشینکاری در این مقاله ارائه گردیده است. از میان انواع مبدلها در این مقیاس از نوع خازنی آن استفاده شده است. این طراحی شامل مدار رابط نمی باشد و به طراحی مکانیکی شتاب سنج محدود شده است. طراحی بر مبنای محدودیتهای ابعادی در روش ساخت MUMPS که یک روش ماشینکاری سطحی^۱ پلی سیلیکان است، صورت گرفته است. پارامترهای حسگر برای رسیدن به مشخصات شتاب سنج برای کاربرد در خودرو بدست آمده است. برای رسیدن به پهنای باند مورد نیاز و افزایش پایداری سیستم از مدار بازخورد (معادل ضریب فنر منفی) استفاده شده است. سختی فنر تعلیق جرم محک^۲ به روش تحلیلی بدست آمده و صحت این رابطه با شبیه سازی المان محدود ارزیابی شده است. پارامترهای عملکردی دیگر چون میزان تحمل شوک و حساسیت عرضی که روابط تحلیلی دقیق آنها پیچیده است با شبیه سازی المان محدود بدست آمده اند.

واژه های کلیدی: شتاب سنج، ماشینکاری سطحی، MEMS، حسگرها و مبدلها

مقدمه

سیلیکان است. خواص جالبی چون نداشتن حلقه هیستریزیس و برابر بودن تنش تسلیم و شکست از دلایل استفاده از سیلیکان می باشد.

در طراحی فعلی شتاب سنج از برداشت سیگنال خازنی استفاده شده است. برخی از مزایای این نوع مبدل عبارت است از دقت بالا حتی تا چند μg ، حساسیت بالا، پاسخ مناسب به ورودی ثابت، عملکرد مناسب در برابر نویز، تغییر کم پارامترهای این شتاب سنجها در طول زمان، کم بودن حساسیت نسبت به دما، افت توان پایین، و سادگی ساختار مکانیکی [۲]. بطور کلی سه نوع شتاب سنج خازنی: شانه جانبی^۳، شانه محوری^۴ و صفحه ای وجود دارد. نمای شماتیک یک شتاب سنج شانه محوری در شکل (۱) نشان داده شده است.

در این نوع سنسور تغییرات ناشی از شتاب و حرکت جرم محک و جابجایی صفحات خازن، در امتداد عمود بر صفحه و نتیجتاً تغییر فاصله بین الکترودها است. در صورتیکه در نوع شانه جانبی جابجایی جرم محک و نتیجتاً صفحات خازن در امتداد صفحات صورت گرفته، دندانهای شانه در هم فرورفته و ظرفیت متناسب با آن

در دهه اخیر فناوری ساخت ابزار دقیق در ابعاد بسیار ریز رشد فزایندهای پیدا کرده و استفاده از حسگرها و عملگرهای میکرو و نانومتری در حوزههای فراوانی گسترش یافته است [۱]. از جهت رشد و موفقیت در بازار، موفقترین سنسورها در این حوزه فشارسنج می باشد. پس از فشارسنج، شتابسنج های میکرو ماشینکاری رتبه بعدی را به خود اختصاص داده اند.

روشهای مختلفی برای ساخت میکرو شتاب سنجها وجود دارد. ماشینکاری حجمی^۴ و استفاده از تکنولوژی ساخت مدارهای مجتمع (CMOS) از جمله این روشهاست. ماشینکاری سطحی نیز از جمله روشهای معمول در ساخت میکروشتاب سنجها می باشد که طراحی موجود بر مبنای این تکنولوژی ساخت انجام شده است. در این فناوری روشهای مختلفی برای ساخت عرضه شده اند. یکی از این روشها که در دانشگاه برکلی توسعه یافت و توسط شرکت MCNC بصورت استاندارد در آمده و به بازار عرضه شد، روش MUMPS می باشد.

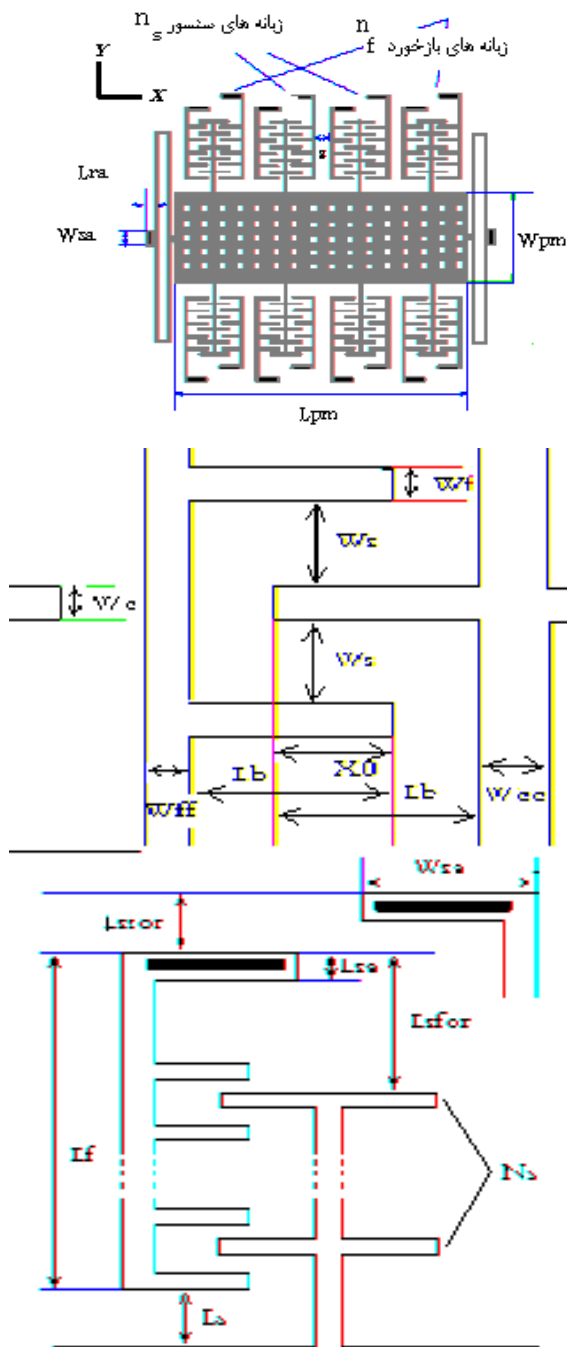
ماده ای که معمولاً در ماشینکاری سطحی برای ساخت شتاب سنجها مورد استفاده قرار می گیرد پلی

تغییر می کند. بخش متحرک سنسور (جرم محک) روی یک ویفر سیلیکون با نشاندن لایه پلی سیلیکان بر روی یک لایه اکسید ساخته می شود. لایه اکسید سپس حکاکی می شود که زیر جرم محک خالی شده و روی سطح ویفر بدون تماس قرار گیرد.

$$T_1 = \frac{m \ddot{x}_{sp} - kx_{st}}{k_1 k_2 x_{st}}$$

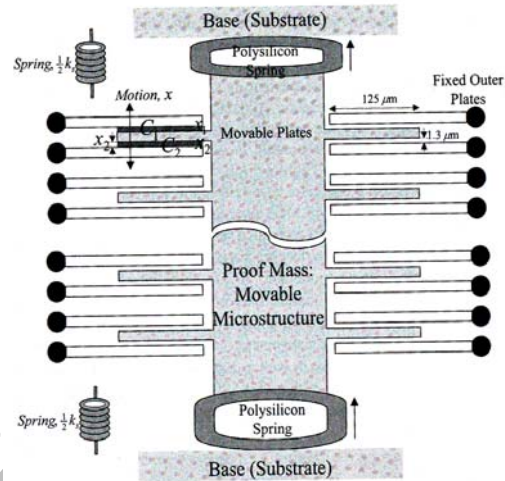
$$T_2 = \frac{2m \sqrt{\ddot{x}_{sp} / x_{st}} - B}{k_1 k_2}$$

(۱)



شکل ۲: نمایش هندسی شتاب سنج و پارامترهای آن.

شکل ۱: نمایش ساختاری یک شتابسنج میکروماشینکاری [۱].



شکل ۱: نمایش ساختاری یک شتابسنج میکروماشینکاری [۱].

در این تحقیق و طراحی از نوع شانه جانبی استفاده شده است. مزیت مهم این نوع، خطی بودن خروجی آن است. طراحی به قسمت فیزیکی شتاب سنج محدود شده و شامل مدار رابط نمی باشد. این طراحی برای استفاده شتاب سنج در کیسه هوای خودروها انجام شده است.

طراحی

نمایش شماتیک و پارامترهای هندسی شتاب سنج در شکل (۲) آمده است.

برای افزایش پهنای باند، بازه عملکرد، و جلوگیری از چسبیدن صفحات خازن‌ها، از زبانه های باز خورد^۷ که کنترل کننده حرکت جرم محک هستند استفاده شده است. شتاب در جهت X اندازه گیری می شود. مدار کنترلی حسگر در شکل (۳) آمده است. در این مدار T_2 باعث افزایش ضریب میرایی و T_1 باعث افزایش ضریب سختی سیستم می شود.

برای تعیین T_1 و T_2 بطوریکه سیستم را پایدار کند دو شرط در نظر گرفته می شود. اول اینکه جابجایی در حالت پایدار برای حداکثر ورودی نصف حداکثر امکان جابجایی $(x_{st} = (L_b - x_0)/2)$ باشد و دوم اینکه

$$m_{eff} \Big|_y = tw\rho[b2 + 0.2357.a] \quad (7)$$

که در این رابطه ρ چگالی پلیسیلیکان، t ضخامت ساختار متحرک و w پهنای بازوهای فنر است که مساوی در نظر گرفته شده است.

میرایی موجود در این طرح حسگر استهلاک کوئت است که بر اثر حرکت نسبی صفحه ای روی صفحه دیگر که بین آنها سیال وجود دارد، بوجود می آید. بنابراین

$$B_{couette} = \frac{\mu}{h}.A \quad (8)$$

که μ ، A و h به ترتیب ضریب لزجت، مساحت دو صفحه و فاصله دو صفحه می باشد.

حداقل و حداکثر شتاب قابل اندازه گیری

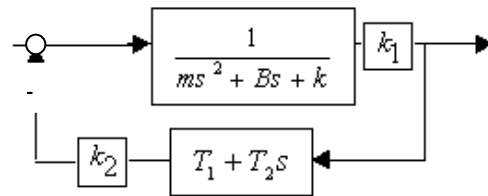
عامل اصلی در تعیین حداقل شتاب قابل اندازه گیری نویز (اغتشاش) ورودی می باشد. عمده اغتشاش ورودی ناشی از دو منبع است. یک منبع اغتشاش ترانزیستور است که در مدار الکترونیکی رابط بوجود می آید. در این خصوص اختلاف پتانسیل V_n را که اغتشاش حاصل از مدار الکتریکی است در نظر می گیرند. شتاب معادل این اختلاف پتانسیل از رابطه زیر بدست می آید [۳]:

$$a_{n-elc} = \frac{V_n - elc}{sensitivity} \quad (9)$$

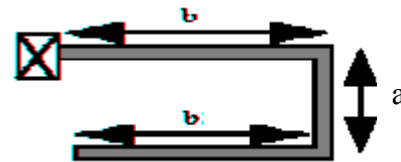
منبع دوم، اغتشاش برونی یا گرمایی است. دلیل این نویز که در بعد مکانیکی مسئله مطرح است، برخورد مولکولهای هوا با شتاب سنج است. میزان این نویز از رابطه زیر بدست می آید [۴]:

$$\sqrt{\frac{a_n^2}{\Delta f}} = \sqrt{\frac{4k_B.T.B}{m}} \quad (10)$$

در این رابطه B ضریب میرایی، T دمای کارکرد، m جرم محک، k_B ثابت بولتزمن و Δf پهنای باند سیستم می باشد.



شکل ۳: نمایش مدار کنترلی شتاب سنج.



شکل ۴: فنر U شکل، مدل بازوی جانبی تکیه گاه جرم محک.

دینامیک سازه سنسور با یک سیستم یک درجه آزادی جرم و فنر و دمپر معادل، مدل می شود. قسمت مرکزی که در حقیقت جرم متحرک است بطور معلق توسط دو بازوی جانبی نگهداشته شده است که نیمی از هر بازو بصورت یک فنر U شکل (شکل ۴) مدل می شود. سختی، جرم و میرایی مؤثر این سیستم به شرح ذیل بدست می آیند.

برای یافتن سختی فنر از قضیه دوم کاستیگلیانو استفاده شده و روابط زیر بدست آمده است:

$$K_x = 4 \frac{3EI_b}{b^2(2b+3a)} \quad (2)$$

$$K_y = 4 \frac{3EI_b}{a^2.(a+3b1)} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{3G.J}{3ab.(a+b) + \left(\frac{G.J}{EI_z}\right).(2.b^3 + a^3)} \quad (4)$$

$$k_{xy} = \frac{2E.I_b}{a.b.(a+b)} \quad (5)$$

که E مدول یانگ، I ممان اینرسی سطح مقطع تیر، و G ضریب سختی پیچشی می باشد. برای جرم مؤثر نیز روابط زیر حاصل می شود:

$$m_{eff} \Big|_x = tw\rho(0.3542.b + 0.5102.a) \quad (6)$$

بنابراین:

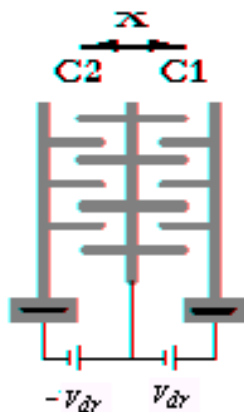
$$F_{elect} = \frac{2\varepsilon.t.nf}{g_f} \cdot V_{bias} \cdot V_{dr} \quad (16)$$

در رابطه فوق برای خطی سازی رابطه بین ولتاژ اعمالی به زبانه های بازخورد و نیروی حاصله یک ولتاژ ثابت V_{bias} را همواره به این زبانه ها اعمال می کنیم. V_{dr} نیز ولتاژ بازخورد می باشد که بصورت قرینه به زبانه های بازخورد اعمال می شود.

بین جرم محک و لایه زیرین (substrate) اختلاف ولتاژ وجود دارد. سختی فنر در جهت عمود بر صفحه شتاب سنچ (k_z) باید وزن جرم محک و نیروی الکترواستاتیکی بین جرم محک و لایه زیرین را که از رابطه زیر بدست می آید، تحمل کند:

$$F_{elec-pm} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon.A}{D^2} \cdot V_s^2 \quad (17)$$

که D فاصله بین جرم محک و لایه زیرین، A سطح جرم محک و V_s ولتاژ حاصله از شتاب است.



شکل ۵: زبانه های بازخورد.

پهنای باند

پهنای باند مکانیکی، عبارت است از فرکانسی که در آن برای بهره دامنه (M) خروجی به ازای ورودی سینوسی داشته باشیم:

$$20 \log |M| = -3(dB) \quad (18)$$

رابطه کلی پهنای باند برای سیستم دینامیکی رسته دو بصورت زیر می باشد:

حداقل شتاب قابل اندازه گیری مجموع این دو مؤلفه نویز می باشد. در این طراحی فقط نویز مکانیکی در نظر گرفته شده است.

حداکثر شتاب قابل اندازه گیری زمانی است که حداکثر جابجایی ($x_{max} = L_b - x_0$) اتفاق بیفتد. بدین ترتیب، این شتاب از رابطه زیر بدست می آید:

$$a_{max} = \frac{k \cdot x_{max} - k_2 \cdot V_{f_{max}}}{m} \quad (11)$$

در رابطه فوق $V_{f_{max}}$ بزرگترین مقدار بین حداکثر ولتاژ در دسترس و ولتاژی که از رابطه ذیل بدست می آید، می باشد:

$$V_{f_{max}} = a_{max} \cdot \frac{k_1}{\lambda} \cdot (T_1 - T_2) e^{-\lambda tp} - \lambda \cdot (T_1 - \lambda T_2) tp e^{-\lambda tp}$$

$$\lambda = (B + T_2 k_1 k_2) / 2m$$

$$tp = \frac{T_2}{\lambda T_2 - T_1} \quad (12)$$

جرم m نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$m = m_{pm} + 4m_{eff} \quad (13)$$

که m_{pm} میزان جرم محک می باشد.

حساسیت

حساسیت حسگر عبارت است از نسبت تغییرات خروجی (ولتاژ) به تغییرات متناظر ورودی (شتاب) [۵]. رابطه محاسبه این پارامتر بصورت زیر است:

$$S_c = \frac{m \cdot V_m}{(T_1 k_1 k_2 + k) \cdot x_0} \quad (14)$$

که V_m ولتاژ اعمالی به دو صفحه خازن حسگر می باشد.

نیرو در زبانه های بازخورد

نیروی الکترواستاتیکی در زبانه های بازخورد (شکل ۵) از رابطه زیر تبعیت می کند:

$$F_{elect} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{dx} \cdot V_t^2 \quad (15)$$

به خاطر محدودیت در برداشت لایه اکسید سیلیکان از زیر لایه پلی سیلیکان است. ضخامت ساختار مکانیکی را به دلیل استفاده از ۲۰ MUMPS میکرومتر در نظر گرفته ایم [۶]. طول جرم محک برای کاهش سطح شتاب سنج به ۷۰۰ میکرومتر و پهنای آن نیز برای کاهش جرم به ۴۰۰ میکرومتر محدود شده است [۳]. محدودیت در حداقل طول صفحات خازن (۴ و ۸ میکرومتر) را از مرجع [۶] که از تکنولوژی MUMPS استفاده کرده است، اخذ کرده ایم.

جدول ۲: اندازه پارامترهای بدون تاثیر بر عملکرد شتابسنج بر حسب میکرومتر.

متغیر	توضیحات	اندازه
W_{gg}	پهنای زبانه روتور	۲
L_3	فاصله استاتور از جرم محک	۲
g	فاصله زبانه‌ها از یکدیگر	۲
W_f	پهنای صفحه خازن استاتور	۲
W_{ff}	پهنای زبانه استاتور	۲
W_c	پهنای صفحه خازن روتور	۲

جدول ۳: پارامترهای طراحی بر حسب میکرومتر.

متغیر	توضیحات	حداقل	حداکثر
W	پهنای بازوهای فنر	۲	۲۰
W_s	فاصله بین صفحات خازن	۲	۲۰
x_0	روبهیم رفتگی صفحات خازن	۴	۴۰۰
L_b	طول صفحات خازن	۸	۴۰۰
V_s	ولتاژ اعمالی به زبانه‌های حسگر	۱	۵۰
V_{bias}	ولتاژ ثابت اعمالی به زبانه‌های بازخورد	۱	۵۰
N_s	تعداد صفحات خازن بر هر زبانه حسگر	۱	۱۰۰
b	طول بازوی عرضی فنر	۲	۴۰۰
a	طول بازوی محوری فنر	۲	۴۰۰
L_{pm}	طول جرم محک	۲	۷۰۰
W_{pm}	عرض جرم محک	۲	۴۰۰
n_f	نصف تعداد زبانه بازخورد	۱	۱۰۰
n_s	نصف تعداد زبانه حسگر	۱	۱۰۰
N_f	تعداد صفحات خازن بر هر زبانه بازخورد	۱	۱۰۰

$$\omega_{-3dB} = \omega_r \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2} + \frac{1}{2Q^2} \sqrt{1 - 4Q^2 + 8Q^4}} \quad (19)$$

ω_r فرکانس تشدید و Q ضریب کیفیت می باشد که با توجه به تابع تبدیل مدار کنترلی حسگر از روابط ذیل محاسبه می شوند:

$$\omega_r = \omega_{r,c} = \sqrt{\frac{T_1 k_1 k_2 + k}{m}}$$

$$Q = Q_c = \frac{\sqrt{(T_1 k_1 k_2 + k).m}}{B + T_2 k_1 k_2} \quad (20)$$

استخراج پارامترها

در این طراحی ۲۵ پارامتر وجود دارد که تعیین کننده ابعاد هندسی و ولتاژ در صفحات خازن است. تغییر در برخی از این پارامترها تأثیری در عملکرد شتاب سنج ندارد که این موارد به دو دسته تقسیم می شود:

پارامترهایی که اندازه آنها بر مبنای روش ساخت از پیش معین و ثابت است [۳] که لیست آنها را در جدول (۱) آورده ایم، و پارامترهایی که اندازه معینی نداشته و تأثیری نیز بر عملکرد شتاب سنج ندارند و ما بر مبنای فناوری MUMPS حداقل اندازه ممکن را برای آنها در نظر گرفته ایم تا سطح نهایی حداقل شود (جدول (۲)).

جدول ۱: اندازه پارامترهای ثابت بر حسب میکرومتر.

متغیر	توضیحات	اندازه
L_{ra}	طول تکیه‌گاه فنر	۱۵
W_{sa}	پهنای تکیه‌گاه	۱۱
L_{sfor}	فاصله جزء متحرک از جزء ثابت	۲۱
L_{ssor}	فاصله بین زبانه‌های ثابت	۱۶
L_{sa}	طول تکیه‌گاه جزء ثابت	۱۱

پارامترهایی که تغییرات آنها تعیین کننده عملکرد شتاب سنج است در جدول (۳) آورده شده اند. در این جدول حداکثر طول تیرها به ۴۰۰ میکرومتر محدود شده است تا از بوجود آمدن پیچش به دلیل تنش پسماند حاصل از پروسه، چسبیدگی احتمالی و شکستگی در خلال پاک کردن مانده های حکاکی، جلوگیری شود. پهنای تیرها نیز به ۲۰ میکرومتر محدود شده است و این

مقطع بازوهای تیر است.

قیود هندسی

یکی از قیود هندسی حداکثر طول ۴۰۰ میکرومتر است:

$$2 \leq N_s \cdot (W_c + 2W_s + W_f) - W_s + L_{sfor} - L_{sa} \leq 400$$

$$2 \leq N_f \cdot (W_c + 2W_s + W_f) - W_s + L_{sfor} - L_{sa} \leq 400$$

قید دیگر مربوط به طول جرم محک و تعداد زبانه

های حسگر و زبانه های بازخورد است:

$$(2(2L_b - x_0) + 2W_{ff} + W_{cc} + 2e^{-6}) \cdot (n_f + n_s) \leq L_{pm}$$

دو قید هندسی دیگر نیز عبارتند از:

$$2W < a$$

$$x_0 < L_b$$

قیود عملکردی

با ارضای این قیود خصوصیات عملکردی شتاب سنج مورد نیاز برای کاربرد خاص در خودرو برآورده می شود.

این قیود را با تغییراتی که متناسب با شکل شتاب سنج مورد نظری باشد از مرجع [۲] و [۳] اقتباس کرده و در جدول (۴) آورده ایم.

جدول ۴: قیود عملکردی.

قیود	عبارت قید	حداقل	حداکثر
حداقل شتاب قابل اندازه گیری	a_{\min}	0	10 mg
حداکثر شتاب قابل اندازه گیری	a_{\max}	2 g	10 g
حساسیت نسبت به محور عرضی	S_{cr}	0	5%
پهنای باند عملکرد	ω_{-3db}	400 HZ	10 Hz
پایداری الکترواستاتیکی	$\sqrt{(k_y W_s^2) / (2k_x x_0)}$	1	-
جدایش بین مودهای صفحه‌ای	f_x / f_y	0	0.33
کمانش تیر	b / L_{cr}	0	0.5

در این جدول طول بحرانی تیر (L_{cr}) از رابطه زیر بدست می آید:

$$L_{cr} = 2\pi \sqrt{EI / \sigma A}$$

که σ حداکثر تنش در بازوهای فنر، I ممان اینرسی مقطع آنها، E مدول یانگ پلی سیلیکان و A مساحت

الگوریتم طراحی

مسئله طراحی موجود در حقیقت حداقل کردن یک تابع هدف در ضمن برآورده کردن یک سری قیود است. این قیود به دو دسته هندسی و تابعی تقسیم می شود. تابع هدف ما حداقل کردن عکس حساسیت است. صورت کلی مسئله بهینه سازی به شکل ذیل است:

$$\min z = F(\bar{u})$$

$$h(\bar{u}) = 0$$

$$g(\bar{u}) \leq 0$$

$$\bar{u}_{low} \leq \bar{u} \leq \bar{u}_{up}$$

که $h(\bar{u})$ و $g(\bar{u})$ قیود تابعی و \bar{u}_{low} حد پایین، و

\bar{u}_{up} حد بالای بردار متغیرها می باشد. برای حل این مسئله روشهای صرفاً عددی و روشهای ترکیبی عددی-شبهه سازی وجود دارد. اشاره می شود که روش Box و نیز روش Exterior penalty هر دو در ارائه حل و جواب منطقی برای این مسأله بهینه سازی موفق نبودند. بهر حال روش Box برای یک فضای مقعر جواب را تضمین نمی کند و فضای پاسخ در اینجا نیز یک فضای مقعر بود. روش دوم نیز با افزایش penalty به جواب نینجامید. در اینجا برای حل این مسئله از جعبه ابزار بهینه سازی نرم افزار MATLAB استفاده کرده ایم. نتایج بدست آمده از این برنامه در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵: پارامترهای حاصل از الگوریتم طراحی (به میکرومتر).

متغیر	اندازه	متغیر	اندازه
b	۴۰۰	n_s	۱۱
a	۵۹	N_f	۴۲
L_{pm}	۶۹۵	N_s	۴۲
W_{pm}	۳۵	W_s	۲
n_f	۱۱	x_0	۶
V_{bias}	۵	L_b	۹
W	۲	L_s	۲۰

تولید لایه نازک بین 2 GPa تا 3 GPa تغییر می کند [۷]. لذا شوک اعمال شده باعث شکست نخواهد شد. اما فرکانس تشدید بدست آمده از تحلیل نرم افزاری در جهت محور اصلی ($1412/2\text{ Hz}$) می باشد که سختی فنر در این جهت را (0.9948 N/m) نشان می دهد. از فرکانس تشدید در جهت محور عرضی ($5636/6\text{ Hz}$) نیز سختی فنر در این جهت را ($1/2768\text{ N/m}$) بدست می آید.

نتایج شبیه سازی بصورت جداول و نمودارهای متنوع تر در مرجع [۸] آمده است. با توجه به نتایج شبیه سازی المان محدود انجام گرفته پارامترهای عملکردی شتاب سنج در جدول (۶) گزارش شده است. این مقادیر خواسته های کاربرد مورد نظر را ارضا می کنند.

جدول ۶: مشخصات شتاب سنج طراحی شده.

متغیر	اندازه متغیر
مساحت شتاب سنج	$800 \times 845 (\mu\text{m} \times \mu\text{m})$
جرم محک شتاب سنج	$1.018\ \mu\text{g}$
سختی فنر	0.09948 (N/m)
حساسیت فنر	$0.198\text{ (volt / (m/s}^2\text{))}$
حساسیت عرضی	0
فرکانس طبیعی	1412 (Hz)
نویز	4.2 (mg)
بازه اندازه گیری	41 (g)
پهنای باند	400 (Hz)

متذکر می شود که فنر مارپیچ نسبت به فنر U شکل برای این طرح با کاربرد ناوبری خودرو مناسبتر است چون بازه مورد نیاز 2 g می باشد در حالی که با این فنر U کل بازه 41 g بدست آمد.

نتیجه گیری

در این تحقیق پارامترهای طراحی یک شتاب سنج MEMS با مبدل خازنی با استفاده از روابط تحلیلی و نیز آنالیز اجزای محدود محاسبه گردید. مشخصات مورد نیاز سنسور بر اساس خواسته های یک کاربرد خاص در مجموعه کیسه هوای خودرو منظور گردید. طراحی بر اساس این تابع هدف انجام گردید که معکوس حساسیت

تحلیل نتایج با شبیه سازی المان محدود

برای بررسی صحت روابط تحلیلی بدست آمده برای سختی فنر در جهت های مختلف، بدست آوردن فرکانسهای سیستم حساسیت به محور عرضی، و تحمل شوک مکانیکی وارده به شتاب سنج از نرم افزار ANSYS و روش المانهای محدود استفاده کرده ایم. نتایج تحلیل المان محدود در مقایسه با رابطه تحلیلی سختی فنر U شکل در جهات مختلف بصورت در صد خطا در زیر آورده شده است:

- صفر درصد برای (k_x)

- ۱/۴ درصد برای (k_{xy})

- ۷/۴ درصد برای (k_y)

- ۱۰/۴ درصد برای (k_z)

برای محاسبه حساسیت عرضی بکمک نتایج تحلیل

المان محدود از رابطه زیر استفاده می شود:

$$S_{a_x}^{a_y} = \frac{\Delta a_x / a_x}{\Delta a_y / a_y} = \frac{\Delta y_{1g} \cdot (\Delta x_{2g} - \Delta x_{1g})}{\Delta x_{1g} \cdot (\Delta y_{2g} - \Delta y_{1g})}$$

در این رابطه محور x محور اصلی می باشد. برای تعیین حساسیت عرضی احتیاج به شبیه سازی در دو مرحله می باشد. در مرحله اول شتاب 1 g در هر دو جهت x و y به سیستم اعمال می شود. در مرحله بعد شتاب 2 g را در جهت محور y اعمال می کنیم در حالی که در جهت محور x همچنان شتاب 1 g اعمال می شود. در رابطه فوق میزان جابجایی در مرحله اول را با Δx_{1g} و Δy_{1g} و میزان جابجایی جرم محک در مرحله دوم را با Δx_{2g} و Δy_{2g} نشان داده ایم.

جایگذاری نتایج حاصل از نرم افزار ANSYS در رابطه فوق نشان دهنده حساسیت عرضی صفر برای حسگر می باشد. بنابراین تنها مسئله ای که ممکن است نهایتاً باعث حساسیت عرضی گردد تغییراتی است که بعضاً در فرآیند ساخت در ابعاد شتاب سنج ایجاد می شود.

شتاب سنج باید در برابر اعمال شوک مکانیکی 2000 g مقاومت کند. این شتاب را در سه جهت توسط نرم افزار تحلیل خود به شتاب سنج اعمال کرده ایم. حداکثر تنش حاصله در هر سه حالت کمتر از $1/4\text{ GP}$ می باشد. تنش شکست پلی سیلیکان وابسته به پروسه

پارامترهای عملکردی دیگر نظیر محدوده ورودی و عرض باند برای کاربرد مورد نظر نیز از طریق محاسبه اجزای محدود بدست آمده و جدول مشخصات شتاب سنج ارائه گردید.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران طی طرح شماره ۸۱۰۶۰۳۵/۱/۰۱ انجام پذیرفته است که مؤلفین مراتب قدردانی خود را بدینوسیله ابراز می‌دارند.

شتاب سنج با رعایت قیود و محدودیت‌های روش ساخت MUMPs حداقل گردد. طرح هندسی سنسور از نوع شانه جانبی انتخاب شد. برای این ساختار مدل سیستم معادل جرم-فنر-دمپر در نظر گرفته شده و در معادلات تحلیلی سنسور بر این اساس جرم، سختی و میرایی مؤثر محاسبه گردید. دقت و صحت این روابط برای سختی فنر با مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود سیستم ارزیابی و مقایسه گردید. مشخصات دیگر سنسور از قبیل میزان تحمل شوک مکانیکی، فرکانسهای طبیعی و حساسیت عرضی که متضمن روابط ریاضی پیچیده تری هستند بکمک شبیه سازی اجزای محدود بدست آمدند.

مراجع

- 1 - Lyshevsky, MEMS, S. E. and NEMS. (2002). *Systems, Devices and Structures*, CRC Press.
- 2 - Yazdi, N., Ayazi, F. and Najafi, K. (1998). "Micromachined inertial sensors." *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8.
- 3 - Zhou, Y. (1998). *Layout Synthesis of Accelerometer*, M.S. thesis, Carnegie Mellon University.
- 4 - Boser, B. E. and Howe, R. T. (1995). "Surface micromachined accelerometer." In *CICC Dig. Tech. Papers: IEEE Custom Integrated Circuits Conf.*, PP. 337-344.
- 5 - Zhang, G. (1998). *Design and Simulation of a CMOS-MEMS Accelerometer*, M.S thesis, Carnegie Mellon University.
- 6 - Liu, J., Wu, B., Liu, X. and Lee, E. A. (2001). "Interopration of heterogeneous CAD tools in ptolemy II." *Journal of Modeling and Simulation of Microsystems*, Vol. 2, No. 1, PP.1-10.
- 7 - Brian, Stark. (1999). *MEMS Reliability Assurance Guidelines for Space Applications*, JPL Publication 99-1.
- ۸ - ابولفاسمی آزاد، ع. "طراحی شتابسنج MEMS." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران، مهر ماه (۱۳۸۲).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Multi User MEMS Processing
- 2 - Surface micromachining
- 3 - Proof mass
- 4 - Bulk micromachining
- 5 - Transverse comb
- 6 - Lateral comb
- 7 - Feedback fingers/ teeth