

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بسمه تعالی



دانشگاه ارومیه
دانشکده فنی مهندسی
گروه مهندسی برق

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته برق و الکترونیک

موضوع:

طراحی و شبیه سازی شتاب سنج خازنی با تکنولوژی MEMS

استاد راهنما:

دکتر ابراهیم عباسپورثانی

اساتید داور:

دکتر محمد نقی آذرمنش

دکتر بهبود مشعوفی

تنظیم و نگارش:

جواد شهاوند

شهریور ۱۳۹۳

حق طبع و نشر این رساله متعلق به دانشگاه ارومیه است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

آنان که برایم بهترین هستند و همواره بهترین ها را برایم خواستند،

وجودشان همه برایم مهربوده است،

آنچه دارم از آن هاست و تا ابد بیون تلاش ما، حمایت ما و محبت های

خالصانه ایشانم.

تقدیر و شکر

پاس خدای را که سخوران، در ستودن او بماند و شمارندگان، شمردن نعمتهای او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قردادانی از زحمات بی‌شائبه او، با زبان قاصد دست ناتوان چیزی بکارم. اما از آنجایی که تجلیل از جایگاه معلم، پاس از انسان است که هدف و غایت آفرینش را تائین و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین می‌کند. بر حسب وظیفه و از باب "من الم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل":

از استاد فرزانه و دلسوز و اخلاق‌مدار، جناب مطاب آقای دکتر ابراهیم عباسپور ثانی که در دنیایی که در روز از اخلاقیات دور ترمی شود بدون شک نمونه‌ی متعالی از صفات و سجایه اخلاقیست، با کمال صبر و وسع صدر، و حسن خلق و فروتنی، از بیچ‌گلی در این عرصه بر من دریغ ننمود و زحمت را بهمانی این رساله را بر عهده گرفتند،

و از اساتید محترم جناب آقایان دکتر مشونی و دکتر آذینش که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، کمال شکر و قردادانی را دارم.

بر خود واجب می‌دانم هر چند با زبان قاصد از کلمه اعضای خانواده ام با مخصوص برادر عزیز و کریم جناب آقای سردق رحید شهاوند که بدون شک مجاهدت‌های ایشان و زحمات بدون‌نتیجه که برایم تحمل فرمودند و عامل اصلی پیشرفت این حقیر تا به اکنون بوده پاس قردادانی و شکر را داشته باشم. همچنین از زحمات برادر مهربانم جناب آقای احمد شهاوند که همواره یاورم بودن پاسگزارم.

در نهایت از کلمه دوستانم با مخصوص جناب مهندس علی رضا فرامرزی، مهندس فرشاد فرای، جناب سروش کیانی، مهندس رسول سلیمی، آقای شرام آقایی، مهندس علی خدادادی، آقای محمد حسن جمالی و جناب آقای سینا کوهستانی که در این مدت تحصیل با سگیابی تام همراه من بودند کمال قردادانی را دارم.

چکیده :

در این پایان نامه یک شتاب سنج خازنی سه محوره با استفاده از تکنولوژی میکروماشین و تنها با یک جرم متحرک طراحی و شبیه سازی شده است. این شتاب سنج با استفاده از تکنولوژی میکروماشین کاری سطحی طراحی شده است. شتاب سنج پیشنهادی از پنج گروه خازنی تشکیل یافته است، دو گروه که در ربع اول و سوم مثلثاتی قرار دارند شتاب در جهت X را اندازه گیری می کنند و دو گروه دیگر که در ربع دوم و چهارم مثلثاتی قرار دارند برای اندازه گیری شتاب در جهت Y استفاده شده است. همچنین از گروه خازنی پنجم برای اندازه گیری شتاب در جهت Z استفاده می کنیم. که این تقسیم بندی باعث می شود شتاب اعمالی در یک جهت بر جهت دیگر تأثیر نگذارد. این طراحی به گونه ای می باشد که در جهات X و Y از حالت دیفرانسیلی برای الکترودها و در جهت Z از حالت غیر دیفرانسیلی استفاده کرده ایم. برای اندازه گیری شتاب در جهات X و Y و Z از الکترودهای خازنی با تغییر فاصله هوایی استفاده شده است. این شتاب سنج قابلیت تشخیص و اندازه گیری هم زمان شتاب اعمالی به سه محور را دارد و توسط یک مدار پردازشگر ساده نتایج خروجی شتاب سنج قابل تفکیک هستند. رنج اندازه گیری شتاب در هر سه جهت $\pm 50 \text{ g}$ می باشد که میزان حساسیت (غیرخطی) در جهت X و Y برابر 12 fF/g ($0.2/8$) و در جهت Z برابر 20 fF/g (0.17) بدست آمده است. سایز این شتاب سنج $1/2 \times 1/2 \text{ mm}^2$ می باشد.

واژه های کلیدی: شتاب سنج خازنی MEMS - تکنولوژی میکرو ماشین - شتاب سنج سه محوره

عنوان..... شماره صفحه

۱ فصل اول: مقدمه

۱-۱	انگیزه	۲
۲-۱	اهداف تحقیق	۲
۳-۱	ساختار پایان نامه	۳

۲ فصل دوم: شتاب سنج MEMS

۱-۲	مقدمه	۵
۲-۲	بازار فروش قطعات MEMS	۵
۳-۲	کاربرد شتاب سنج ها	۶
۴-۲	تئوری حاکم بر شتاب سنج مکانیکی	۷
۱-۴-۲	پدیده Squeeze film damping	۸
۵-۲	انواع شتاب سنج های MEMS	۹
۱-۵-۲	شتاب سنج های پیزو رزیستیو	۱۰
۲-۵-۲	شتاب سنج پیزو الکتریک	۱۰
۳-۵-۲	شتاب سنج تونلی	۱۱
۴-۵-۲	شتاب سنج رزونانس	۱۱
۵-۵-۲	شتاب سنج خازنی	۱۱
۶-۵-۲	انواع دیگر شتاب سنج ها	۱۱
۷-۵-۲	مقایسه بین انواع شتاب سنج ها	۱۲

۳ فصل سوم: انواع شتاب سنج های خازنی

۱-۳	مقدمه	۱۴
۲-۳	طراحی الکتریکی شتاب سنج های میکروالکترومکانیکی	۱۴

۱۴.....	شتاب سنج های فاصله متغییر	۱-۲-۳
۱۷.....	شتاب سنج های مساحت هم پوشانی متغییر	۲-۲-۳
۱۹.....	نمونه های از کارهای دیگران	۳-۳
۱۹.....	شتاب سنج خازنی سه محوره دانشگاه میشیگان	۱-۳-۳
۱۹.....	شتاب سنج خازنی سه محوره دانشگاه تایوان	۲-۳-۳
۲۰.....	شتاب سنج خازنی سه محوره دانشگاه ترکیه	۳-۳-۳
۲۱.....	شتاب سنج خازنی سه محوره دانشگاه زاگرب	۴-۳-۳
۲۲.....	شتاب سنج خازنی سه محوره دانشگاه چین	۵-۳-۳
۲۳.....	شتاب سنج خازنی سه محوره طراحی شده در کشور تایوان	۶-۳-۳
۲۳.....	شتاب سنج خازنی دو محوره	۷-۳-۳

۴ فصل چهارم: بررسی شتاب سنج خازنی پیشنهادی

۲۶.....	مقدمه :	۱-۴
۲۶.....	ساختار شتاب سنج خازنی پیشنهادی	۲-۴
۲۸.....	الکترودهای ثابت	۱-۲-۴
۲۸.....	الکترودهای متحرک	۲-۲-۴
۲۹.....	تئوری حاکم بر شتاب سنج	۳-۲-۴
۳۵.....	نتایج شبیه سازی	۳-۴
۳۶.....	شتاب در جهت X اعمال شود	۱-۳-۴
۴۱.....	شتاب در جهت Y اعمال شود	۲-۳-۴
۴۶.....	شتاب در جهت Z اعمال شود	۳-۳-۴
۵۱.....	پروسه پیشنهادی ساخت	۴-۴

۵ فصل پنجم: نتیجه گیری و مقایسه

۵۸.....	مقدمه:	۱-۵
۵۸.....	مشخصات مهم شتاب سنج طراحی شده	۱-۱-۵
۵۹.....	مقایسه شتاب سنج پیشنهادی با شتاب سنج های دیگران	۲-۱-۵

۶۰.....	پیشنهاد پروژه های جدید	۳-۱-۵
۶۱.....	منابع	
۶۶.....	پیوست	

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: کاربردهای شتاب سنج ها و مشخصه مربوط به آنها ۶
- جدول ۲-۲: مقایسه بین انواع شتاب سنج ۱۲
- جدول ۱-۳: مقایسه انواع شتاب سنج خازنی ۱۸
- جدول ۲-۳: راهکارهای بهبود خصوصیات شتاب سنج های خازنی ۱۸
- جدول ۱-۴: مشخصات کامل شتاب سنج ۵۶
- جدول ۱-۵: مقایسه شتاب سنج پیشنهادی با شتاب سنج های دیگر ۵۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ پیش بینی درآمد بازار در فروش قطعه ای MEMS ۵
- شکل ۲-۲ ساختار مکانیکی جرم فنر ۷
- شکل ۳-۲ مدل دمپینگ لغزش ۹
- شکل ۴-۲ مدل دمپینگ فشاری ۹
- شکل ۱-۳ خازن صفحه ای فاصله متغییر (a تصویر از بالا b تصویر کنار ۱۵
- شکل ۲-۳ ساختار دیفرانسیلی خازن های شانه ای فاصله متغییر ۱۶
- شکل ۳-۳ توپولوژی خازن های که با تغییر مساحت هم پوشانی کار می کنند ۱۷
- شکل ۴-۳: شتاب سنج خازنی سه محوره ۱۹
- شکل ۵-۳: ساختار شتاب سنج سه محوره ۲۰
- شکل ۶-۳: ساختار شتاب سنج سه محوره ۲۱
- شکل ۷-۳: شتاب سنج خازنی سه محوره ۲۲
- شکل ۸-۳: شتاب سنج خازنی سه محوره ۲۲
- شکل ۹-۳: شتاب سنج سه محوره ۲۳
- شکل ۱۰-۳: شتاب سنج خازنی دو محوره ۲۴
- شکل ۱-۴: ساختار شتاب سنج پیشنهادی (الف) ساختار اصلی ب) ساختار شبیه سازی شده ۲۷
- شکل ۲-۴: نحوه چیدمان الکترودها در چهار گروه خازنی در چهار ربع مثلثاتی ۲۷
- شکل ۳-۴: نحوه چیدمان جرم متحرک و الکترودها در گروه خازنی پنجم ۲۷
- شکل ۴-۴: نحوه جابه جایی الکترودها در ربع اول و سوم برای شتاب های اعمالی در جهت X ۳۰
- شکل ۵-۴: نحوه جابه جایی الکترودها در ربع اول و سوم برای شتاب های اعمالی در جهت Y ۳۱
- شکل ۶-۴: نحوه جابه جایی الکترودها در اثر اعمال شتاب در جهت Z ۳۱
- شکل ۷-۴: جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب $50g$ در جهت X ۳۶
- شکل ۸-۴: نمودار جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب $50g$ در جهت X ۳۶
- شکل ۹-۴: جابه جایی جرم متحرک در جهت Y در اثر اعمال شتاب در جهت X ۳۸
- شکل ۱۰-۴: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت Y در اثر اعمال شتاب در جهت X ۳۸
- شکل ۱۱-۴: جابه جایی جرم متحرک در جهت Z در اثر اعمال شتاب در جهت X ۳۹
- شکل ۱۲-۴: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت Z در اثر اعمال شتاب در جهت X ۳۹
- شکل ۱۳-۴: تنش اعمالی به فنرهای شتاب سنج در اثر اعمال شتاب $250g$ در جهت محور X ۴۰
- شکل ۱۴-۴: تغییرات خازنی C1 و C2 در اثر جابه جایی در جهت X ۴۰
- شکل ۱۵-۴: نمودار بررسی میزان غیر خطی بودن تغییرات خازنی در جهت X ۴۱

- شکل ۴-۱۶: جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب 50g در جهت Y ۴۲
- شکل ۴-۱۷: نمودار جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب 50g در جهت Y ۴۲
- شکل ۴-۱۸: جابه جایی جرم متحرک در جهت X در اثر اعمال شتاب در جهت Y ۴۳
- شکل ۴-۱۹: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت X در اثر اعمال شتاب در جهت Y ۴۳
- شکل ۴-۲۰: جابه جایی جرم متحرک در جهت Z در اثر اعمال شتاب در جهت Y ۴۴
- شکل ۴-۲۱: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت Z در اثر اعمال شتاب در جهت Y ۴۴
- شکل ۴-۲۲: تنش اعمالی به فنرهای شتاب سنج در اثر اعمال شتاب 250g در جهت محور Y ۴۵
- شکل ۴-۲۳: تغییرات خازنی $C3$ و $C4$ در اثر جابه جایی در جهت Y ۴۵
- شکل ۴-۲۴: نمودار بررسی میزان غیر خطی بودن تغییرات خازنی در جهت Y ۴۶
- شکل ۴-۲۵: جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب 50g در جهت Z ۴۶
- شکل ۴-۲۶: نمودار جابه جایی جرم متحرک در اثر اعمال شتاب 50g در جهت Z ۴۷
- شکل ۴-۲۷: جابه جایی جرم متحرک در جهت X در اثر اعمال شتاب در جهت Z ۴۸
- شکل ۴-۲۸: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت X در اثر اعمال شتاب در جهت Z ۴۸
- شکل ۴-۲۹: جابه جایی جرم متحرک در جهت Y در اثر اعمال شتاب در جهت Z ۴۸
- شکل ۴-۳۰: نمودار جابه جایی جرم متحرک در جهت Y در اثر اعمال شتاب در جهت Z ۴۹
- شکل ۴-۳۱: تنش اعمالی به بازوهای شتاب سنج در اثر اعمال شتاب 250g در جهت محور Z ۴۹
- شکل ۴-۳۲: تغییرات خازنی $C5$ در اثر جابه جایی در جهت Z ۵۰
- شکل ۴-۳۳: نمودار بررسی میزان غیر خطی بودن تغییرات خازنی در جهت Z ۵۰

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انگیزه

طی سال های اخیر با ادغام سیستم های مکانیکی و الکتریکی در مقیاس میکرومتر، سیستم های میکرو الکترومکانیکی^۱ (MEMS)، تحولات زیادی در کارایی سنسورهای اینرسی از جمله شتاب سنج ها ایجاد شد. از آنجا که سنسورهای شتاب سنج با کارایی بالا^۲ اغلب بسیار گران و بزرگ می باشند، شتاب سنج های میکروالکترومکانیکی جایگزین مناسبی برای سنسورهای متداول خواهند بود. زیرا می توان این دسته از شتاب سنج ها را در کنار مدارات الکترونیکی جهت کنترل و آشکار سازی بر روی یک تراشه ساخت و بدین ترتیب سبک و هزینه آن ها بسیار کاهش می یابد. شتاب سنج های میکروالکترونیکی به علت کارایی بالا در زمینه های مختلف همچون نظامی، صنعت اتومبیل، بازار الکترونیک و محصولات الکترونیک و محصولات گرانی همچون ریز ماهواره ها و ریز ربات ها کاربرد یافته اند [۱،۲]. سنسور های شتاب سنج^۳ از لحاظ تقسیم بندی سنسورها جزء سنسورهای اینرسی^۴ می باشند. طبق اصل ماند هرچیزی که در حال سکون باشد می خواهد ساکن باقی بماند و هر چیزی که در حال حرکت باشد می خواهد به حرکت خود ادامه دهد، و اگر بخواهیم وضعیتش را تغییر دهیم باید به آن نیرو وارد کنیم. سنسور های اینرسی از اصل ماند پیروی می کنند. شتاب سنج های خازنی از لحاظ وسعت استفاده در دنیای امروز بعد از فشار سنج ها قرار دارند. انگیزه اصلی ما در طراحی شتاب سنج های خازنی MEMS وجود نیاز شدید و روز افزون در صنایع اتومبیل سازی و ارائه ایده ای نوین در این عرصه است.

هر سنسور شتاب بسته به نوع طراحی می تواند تک محوره تا سه محوره طراحی شود. هرچقدر تعداد محورها در شتاب سنج بیشتر باشند از تعداد محورهای ناخواسته که شتاب در آن محورها نباید در نتیجه نهایی تأثیر گذار باشد کاسته می شود. از طرفی نحوه چیدمان الکترودها و ساختار مکانیکی شتاب سنج می تواند در نتیجه مطلوب بسیار مفید باشد.

۲-۱ اهداف تحقیق

در این پایان نامه، هدف طراحی یک شتاب سنج خازنی سه محوره با استفاده از تکنولوژی MEMS می باشد که قابلیت اندازه گیری شتاب در محدوده $\pm 50g$ و با دقت mg را دارا می باشد.

¹ - Micro Electro Mechanical Systems

² - High performance

³ - Accelerometer sensor

⁴ - Inertial

۳-۱ ساختار پایان نامه

در این پایان نامه در فصل دوم به طور خلاصه شتاب سنج های MEMS از نظر کاربرد، تئوری حاکم بر آنها، انواع ساختار شتاب سنج MEMS و در نهایت مقایسه ای بین آنها بررسی می شوند. در فصل سوم شتاب سنج های خازنی را از لحاظ سیستم حسگر و انواع آن بررسی می کنیم. در فصل چهارم به شتاب سنج خازنی پیشنهادی پرداخته شده و جزئیات آن همراه با نمودار و پروسه ساخت آورده می شود. در فصل پنجم نتیجه گیری و مقایسه ای بین شتاب سنج طراحی شده در این پایان نامه با دیگر شتاب سنج ها خازنی انجام می گیرد.

فصل دوم

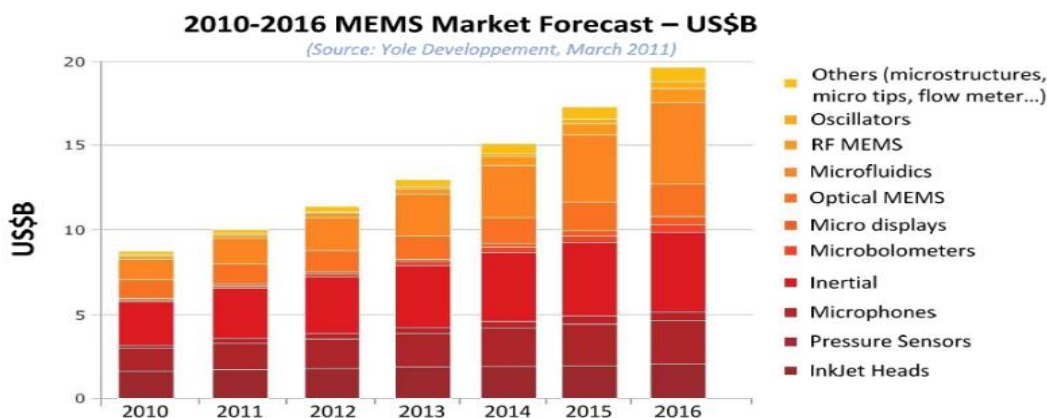
MEMS شتاب سنج

۱-۲ مقدمه

تکنولوژی ساخت وسایل در ابعاد میکرونی که بر اساس ساخت مدار مجتمع بنا شده است، کاربردهای گسترده ای در جهان یافته است. ایالات متحده امریکا، آلمان و ژاپن از کشورهای پیشرو در زمینه تحقیقات در این صنعت می باشند. در این فصل ابتدا به بازار فروش قطعه های MEMS می پردازیم، سپس کاربرد شتاب سنج ها و تئوری حاکم بر آنها را توضیح می دهیم و در نهایت انواع شتاب سنج و مقایسه بین آنها آورده می شود.

۲-۲ بازار فروش قطعات MEMS

شکل ۱-۲ [۳] پیش بینی درآمد بازار در فروش قطعه ای MEMS را نشان می دهد.



شکل ۱-۲ پیش بینی درآمد بازار در فروش قطعه ای MEMS [۳]

پیش بینی جهانی درآمد بازار در سال ۲۰۱۱ نرخ رشد سالیانه (CAGR)^۱ ۱۰/۲٪ را نشان می دهد که این نرخ برای سال ۲۰۱۶ به نزدیک ۲ برابر می رسد. پیش بینی های اخیر CAGR این نرخ رشد را برای سال های ۲۰۱۱-۲۰۱۵ بزرگتر از قبل و به میزان ۱۲/۴٪ برآورد می کند [۴]. همان طور که مشخص شد سنسورهای MEMS بخش قابل توجه ای از بازار را به خود اختصاص می دهد. علت رشد بالا پیش بینی شده، استفاده گسترده از سنسورها در طیف گسترده ای از وسایل الکترونیکی مصرفی و برنامه های کاربردی صنعت است. به طور خاص تر، نقش کلیدی شتاب سنج در مراقبت های بهداشتی، ایمنی خودرو، برنامه های کاربردی صنعتی، و اخیراً در لوازم الکترونیکی مصرفی و لوازم خانگی باعث افزایش این نرخ شده است. شتاب سنج ها در حال حاضر یکی از سریعترین رشد ها را در بین سنسور ها دار هستند. که میزان رشد سالیانه آن برای سالهای ۲۰۱۱-۲۰۱۵ برابر ۱۷/۵٪ پیش بینی شده است [۵].

¹ - Compounded annual growth rate

۲-۳ کاربرد شتاب سنج ها

بعد از گذشت سال ها از ساخت اولین شتاب سنج میکرو ماشین شده امروزه با پیشرفت این تکنولوژی سرعت طراحی و ساخت قطعات میکرو ماشینی شده شتاب بیشتری گرفته است. شتاب سنج ها در صنعت اتومبیل سازی مانند استقرار کیسه هوا، ضد قفل سیستم های ترمز، در صنعت مانند مانیتورینگ^۱ شیب خودرو، برنامه های کاربردی راه آهن (آموزش حرکت و توقف قطار)، حفاری نفت، در لوازم الکترونیک مانند ناوبری / GPS، گوشی موبایل / تبلت / لب تاب، کنسول^۲ بازی های ویدیویی، دوربین های دیجیتال، حفاظت از هاردیسک، در پزشکی مانند ارزیابی اختلالات، تشعشع های انکولوژی^۳، در علوم نظامی مانند سلاح های هوشمند، تست پرواز کاربرد دارند. هر یک از برنامه های کاربردی که بیان شد دارای یک مشخصه مربوط به خود می باشد. به عبارتی نمی توانیم از یک سنسور در چند محدوده و مشخص استفاده کنیم و این یکی از دلایل گسترده شده سنسورها می باشد. برای مثال، در صنعت خودرو سازی، سیستم ضد قفل ترمز و سیستم کنترل کشش دارای یک رنج $\pm 1g$ می باشند. در حالی که سنسوری که برای اندازه گیری حرکت عمودی بدنه خودرو استفاده می شود دارای رنج $\pm 2g$ می باشد.

در جدول ۱-۲ برخی از کاربردهای شتاب سنج های میکروماشینی و مشخصه مربوط به هر کدام ذکر شده است.

جدول ۱-۲: کاربردهای شتاب سنج ها و مشخصه مربوط به آنها [۶]

Typical Applications for Micromachined Accelerometers

<i>Application</i>	<i>Bandwidth</i>	<i>Resolution</i>	<i>Dynamic Range</i>
Automotive			
Airbag release	0–0.5 kHz	<500 mG	$\pm 100G$
Stability and active control systems	0–0.5 kHz dc–1 kHz	<10 mG <10 mG	$\pm 2G$ 100G
Active suspension			
Inertial navigation	0–100 Hz	<5 μG	$\pm 1G$
Seismic activity			
Shipping of fragile goods	0–1 kHz	<100 mG	$\pm 1 kG$
Space microgravity measurements	0–10 Hz	<1 μG	$\pm 1 G$
Medical applications (patient monitoring)	0–100 Hz	<10 mG	$\pm 100G$
Vibration monitoring	1–100 kHz	<100 mG	$\pm 10 kG$
Virtual reality (head-mounted displays and data gloves)	0–100 Hz	<1 mG	$\pm 10G$
Smart ammunition	10 Hz to 100 kHz	1 G	$\pm 100 kG$

¹ - Monitoring

² - Consoles

³ - Oncology

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3-2)$$

S : حساسیت سیستم می باشد که از رابطه زیر حال می شود:

$$s = \frac{m}{k} \quad , \quad s = \frac{\partial c}{\partial x} \quad (4-2)$$

Q: ضریب کیفیت سیستم می باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q = \frac{\omega_r m}{b} \quad (5-2)$$

با توجه به رابطه (۳-۲) برای افزایش فرکانس رزونانس، k را باید افزایش و m را کاهش داد. از طرفی برای افزایش حساسیت با توجه به رابطه (۴-۲) باید m را افزایش و k را کاهش دهیم. هرچند در شتاب سنج فرکانس کمتر از فرکانس طبیعی می باشد ولی برای طراحی ما می توانیم یک بهینه سازی انجام دهیم.

۲-۴-۱ پدیده Squeeze film damping

اتلاف انرژی در یک سیستم نوسانی را دمپینگ می نامند. در سیستم های نوسانی مانند شتاب سنج مکانیسم های تلفاتی بسیاری در دمپینگ مشارکت دارند که به دو دسته کلی دمپینگ ویسکوز^۱ و دمپینگ ساختاری^۲ تقسیم می شوند. در صورت وجود هوا یا هر گاز دیگری در سیستم دمپینگ ویسکوز مهم تر خواهد بود، اثر دمپینگ ساختاری وقتی قابل توجه خواهد بود که بسته بندی^۳ تحت شرایط خلأ صورت گیرد.

از اصطکاک گاز بین جرم و زیرلایه، بین بازوهای^۴ الکترودهای شانه ای^۵ و بین سطوح الکترودهای سطح موازی^۶ دمپینگ ویسکوز ایجاد می شود. و در دو مدل بررسی می شود: مدل دمپینگ لغزشی^۷ و مدل دمپینگ فشاری^۸.

شکل ۳-۲ مدل دمپینگ لغزشی را نشان می دهد. با در نظر گرفتن μ_{eff} به عنوان ویسکوزیته مؤثر

¹ - Viscous damping

² - Structural damping

³ - Packaging

⁴ - Finger

⁵ - Comb drive electrodes

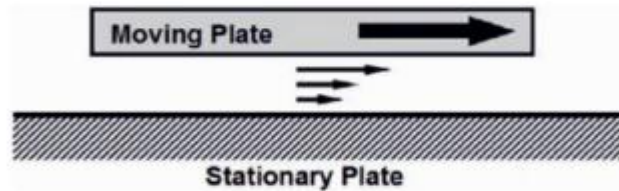
⁶ - Parallel plate electrodes

⁷ - Slide film damping

⁸ - Squeeze film damping

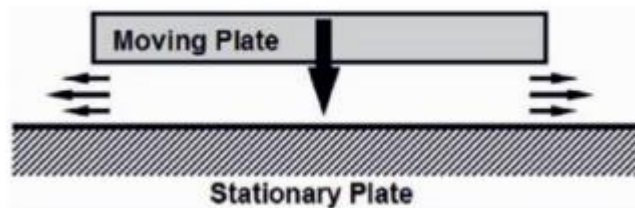
گاز داریم:

$$C_{slide} = \mu_{eff} \frac{A}{d} \quad (۶-۲)$$



شکل ۳-۲ مدل دمپینگ لغزش

شکل ۴-۲ مدل دمپینگ ویسکوز از نوع فشاری را نشان می دهد. رابطه (۶-۲) برای دمپینگ فشاری نیز صادق است البته لازم به ذکر است که مقدار ویسکوزیته مؤثر گاز برای هر یک از این مدل ها وابسته به فشار محیط اما دارای مقدار متفاوتی می باشد.



شکل ۴-۲ مدل دمپینگ فشاری

۲-۵ انواع شتاب سنج های MEMS

شتاب سنج ها را در یک نوع تقسیم بندی به دو نوع شتاب سنج حلقه باز^۱ و شتاب سنج های حلقه بسته^۲ تقسیم بندی می کنند. مشکلی که در شتاب سنج حلقه باز وجود داری این است که اگر جرم متحرک زیاد جابه جا شود باعث ایجاد اثر غیر خطی می شود. همچنین اثر Squeeze film damping در جابجایی زیاد افزایش می یابد. به علت سادگی و ارزان بودن این سیستم، بیشتر شتاب سنج ها از این نوع می باشند. در شتاب سنج حلقه بسته از خروجی به ورودی یک فیدبک خواهیم داشت. بیشتر کاربرد آن در شتاب سنج های خازنی و خازنی دیفرانسیلی می باشد مزایایی این روش عبارتند از : ۱- جابه جایی جسم

^۱ - Open loop accelerometer