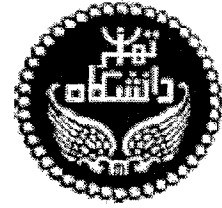
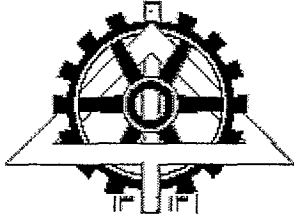


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۹۳۰۷۱



دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

عنوان:

طراحی شتاب‌سنج خازنی MEMS و بررسی روشهای نوین برای کنترل آن

نگارش:

فائزه عرب حسینی

استاد راهنما:

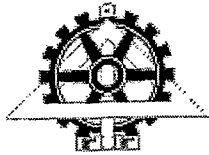
دکتر مرتضی فتحی پور

۱۳۸۶/۱۲/۱۱

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - الکترونیک

بهمن ۱۳۸۶

۹۳۵۶۱



به نام خدا
دانشگاه تهران

پردیس دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گواهی دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

هیأت داوران پایان نامه کارشناسی ارشد آقا/خانم **فائزه عرب حسنی** در رشته مهندسی برق و کامپیوتر، گرایش: الکترونیک

با عنوان: "طراحی شتاب سنج خازنی MEMS و بررسی روشهای نوین برای کنترل آن"

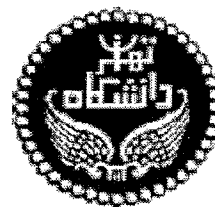
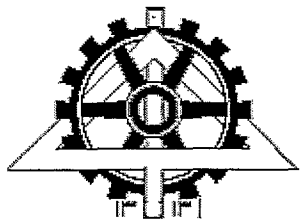


در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۰۲ نمره نهایی پایان نامه: **۲۰** به عدد **بیست** به حروف
و درجه ارزیابی نمود.

امضاء	دانشگاه یا موسسه	مرتبۀ دانشگاهی	نام و نام خانوادگی	مشخصات هیأت داوران
	تهران	دانشیار	دکتر مرتضی فتحی پور	۱-استاد راهنما استاد راهنمای دوم (حسب مورد)
	--	--	--	۲-استاد مشاور
	شریف	استاد	دکتر بیژن رشیدیان	۳-استاد مدعو خارجی (یا استاد مشاور دوم)
	تهران	دانشیار	دکتر سیدشمس الدین مهاجرزاده	۴-استاد مدعو داخلی
	تهران	دانشیار	دکتر محمد جواد یزدان پناه	۵-داور و نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی دانشکده

تذکره: این برگه پس از تکمیل توسط هیأت داوران در نخستین صفحه پایان نامه درج می گردد.





دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - الکترونیک

عنوان:

طراحی شتاب‌سنج خازنی MEMS و بررسی روشهای نوین برای کنترل آن

نگارش:

فائزه عرب حسنی



این پایان نامه در تاریخ ۱۳۸۶/۱۱/۲ در مقابل هیأت داوران دفاع گردید و مورد تصویب قرار گرفت.

دکتر جواد فیض

معاون آموزشی و تحصیلات تکمیلی پردیس دانشکده‌های فنی:

دکتر پرویز جبه دار مارالعی

رئیس دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر:

دکتر سعید نادر اصفهانی

معاون پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر:

دکتر مرتضی فتحی پور

استاد راهنما:

دکتر سید شمس الدین مهاجرزاده

عضو هیأت داوران:

دکتر محمد جواد یزدان پناه

عضو هیأت داوران:

دکتر بیژن رشیدیان

عضو هیأت داوران:

بهمن ۱۳۸۶

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب فائزه عرب حسنی تایید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتری ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشکده فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: فائزه عرب حسنی


عرب حسنی
۸۶، ۱۱، ۲۴

امضاء دانشجو:

تقدیم به پدر و مادر عزیزم
آنان که دعای خیرشان همواره بدرقه راهم است.

تشکر و قدردانی

در سخت ترین مراحل زندگی، حضور راهنما همچون چراغی است که رسیدن به هدف به ظاهر دست نیافتنی را هموار می سازد. هر چند که مقام گرانقدر استاد غیر قابل توصیف و انکارناکردنی است ولی امید است که آنچه را که از این راهنمای زندگی می آموزیم سر لوحه زندگی خود قرار دهیم. من نیز در اینجا بر خود لازم می دانم تا از زحمات و راهنماییهای بی شائبه و ارزشمند استاد ارجمندم جناب آقای دکتر مرتضی فتحی پور برای تدوین پایان نامه حاضر تشکر و قدردانی نمایم. بی شک بدون توجهات صمیمانه ایشان گردآوری این مجموعه میسر نمی گردید.

همچنین از جناب آقای مهندس امیر فرخ پیام به خاطر تلاش و همکاری بی دریغ ایشان در زمینه طراحی کنترل کننده های شتاب سنج خازنی مطرح شده، کمال تشکر را دارم و توفیق روزافزون را برایشان آرزومندم.

چکیده

شتاب‌سنج‌های خازنی MEMS کاربردهای متنوعی از قبیل آشکارسازی موقعیت و حرکت، مانیتور و کنترل کردن ارتعاش، اندازه‌گیری شوک و کج شدگی دارند. کارایی شتاب‌سنج بر اساس سه عامل شتاب بیشینه قابل اعمال به شتاب‌سنج، دقت و پهنای باند آن مشخص می‌گردد. در این پایان‌نامه روشی برای طراحی شتاب‌سنج خازنی برای رسیدن به شتاب بیشینه و چگالی نويز معینی ارائه گردید. از پارامترهای بدست آمده از طراحی نظیر جرم، ثابت فنر و ضریب میرایی، برای تحلیل عملکرد شتاب‌سنج در سطح سامانه توسط نرم‌افزار سیمولینک و از ابعاد بدست آمده، برای تحلیل و بررسی چگونگی توزیع تنش در ساختار شتاب‌سنج توسط نرم‌افزار انسیس استفاده شده‌است. شتاب‌سنج ممکن است در حین کار با عوامل ناخواسته‌ای مواجه شود که عملکرد آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بررسی این عوامل ناخواسته امکان پیش‌بینی طول عمر و آگاهی از قابلیت اطمینان شتاب‌سنج را فراهم می‌کند. برای بررسی این عوامل در این پایان‌نامه مسئله تشکیل ترک در فنر، تغییر ضریب میرایی بر اثر تغییرات دما و بروز پدیده چسبندگی بر اثر اعمال شتاب‌های ورودی بالا مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر تشکیل ترک بر توزیع تنش مطالعه گردید. با انجام تحلیل مودال به کمک نرم‌افزار انسیس، میزان تاثیر تشکیل ترک بر فرکانس طبیعی و ثابت فنر بررسی شد. تغییرات دما نیز با تغییر ضریب چسبناکی سبب ایجاد تغییرات در ضریب میرایی می‌شود و تغییر ضریب میرایی نیز می‌تواند عملکرد شتاب‌سنج را تحت تاثیر قرار دهد. سپس با استفاده از تئوری کنترل غیرخطی، تخمینگری برای پیش‌بینی تغییرات ایجاد شده در ثابت فنر و ضریب میرایی در نظر گرفته شده‌است که به مدار معادل سامانه حلقه بسته شتاب‌سنج افزوده می‌شود. استفاده از تخمینگر امکان آزمون خودکار سامانه را فراهم می‌آورد. علاوه بر آن بر اثر اعمال شتاب‌های بالاتر از شتاب مجاز، جابجایی

انگشتک‌ها ممکن است از حد مجاز بالاتر برود و پدیده چسبندگی انگشتک‌های شتاب‌سنج به یکدیگر رخ دهد. با استفاده از کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس تئوری کنترل غیرخطی از پدیده چسبندگی انگشتک‌ها جلوگیری شده است. استفاده از کنترل‌کننده سبب ساده‌تر کردن روند طراحی و کاهش چگالی نويز می‌گردد علاوه بر آن که مقاومت سامانه را در مقابل شتابهای بالا افزایش می‌دهد.

فصل اول - فناوری سامانه‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS)

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	انواع حسگرهای MEMS	۲
۳-۱	موارد کاربرد شتاب‌سنج‌های MEMS	۳
۴-۱	انواع شتاب‌سنج‌های MEMS	۳
۱-۴-۱	شتاب‌سنج خازنی	۳
۲-۴-۱	شتاب‌سنج پیزوالکتریک	۴
۳-۴-۱	شتاب‌سنج تونلی	۴
۴-۴-۱	شتاب‌سنج تشدیدي	۵
۵-۴-۱	شتاب‌سنج پیزومقاومتي	۶
۶-۴-۱	شتاب‌سنج حرارتي	۶
۷-۴-۱	شتاب‌سنج نوري	۷
۵-۱	مقایسه انواع شتاب‌سنج‌ها	۷
۶-۱	روش‌های ساخت میکروسامانه‌ها و مقایسه آنها از دیدگاه ساخت شتاب‌سنج خازنی	۹
۱-۶-۱	میکروماشینکاری توده‌ای	۹
۲-۶-۱	میکروماشینکاری سطحی	۹
۱-۲-۶-۱	میکروماشینکاری سطحی پلی‌سیلیکن	۱۱
۳-۶-۱	میکروماشینکاری LIGA	۱۲
۷-۱	ساخت میکرو سامانه‌ها با فناوری منطق بر CMOS	۱۲
۸-۱	نمونه‌های ساخته شده شتاب‌سنج خازنی MEMS	۱۴
۱-۸-۱	برخی از نمونه‌های ساخته شده توسط ADI	۱۴
۱-۱-۸-۱	نمونه‌های ساخته شده با روش میکروماشینکاری پلی‌سیلیکن	۱۴
۱-۱-۸-۱	XL۵۰۱	۱۴
۲-۱-۸-۱	XL۰۵	۱۵
۳-۱-۸-۱	خانواده XL۷۶	۱۵
۴-۱-۸-۱	نمونه‌های دیگر	۱۵

- ۱۶-۱-۸-۲ نمونه ساخته شده با فرآیند SOI ۱۶
- ۱۶-۱-۸-۳ شتابسنج اپی- پلی سیلیکن رابرت بوش ۱۶
- ۱۷-۱-۸-۲ نمونه ساخته شده در آزمایشگاه ملی سندیا ۱۷
- ۱۷-۱-۸-۳ نمونه ساخته شده در دانشگاه برکلی ۱۷
- ۱۷-۱-۸-۴ نمونه ساخته شده در دانشگاه کارنگی ملون ۱۷
- ۱۸-۱-۹ خلاصه ۱۸

فصل دوم - اصول عملکرد شتابسنج خازنی MEMS و مدل سازی آن

- ۱۹-۲-۱ مقدمه ۱۹
- ۱۹-۲-۲ ساختار فیزیکی شتابسنج خازنی ۱۹
- ۲۰-۲-۱ عضو الاستیک یا فنر ۲۰
- ۲۱-۲-۱-۱ ثابت مکانیکی فنر ۲۱
- ۲۱-۲-۱-۲ ثابت الکتریکی فنر ۲۱
- ۲۲-۲-۱-۳ ثابت کل فنر ۲۲
- ۲۴-۲-۳ اصول عملکرد شتابسنج خازنی ۲۴
- ۲۵-۲-۴ مدل مکانیکی شتابسنج خازنی ۲۵
- ۲۶-۴-۱ ضریب میرایی ۲۶
- ۲۶-۴-۱-۱ جریان چسبناکی گاز یا میرایی گاز ۲۶
- ۲۶-۴-۱-۱-۱-۱ میرایی جریان کوئت ۲۶
- ۲۶-۴-۱-۱-۲ میرایی ناشی از فشردگی سیال ۲۶
- ۲۷-۲-۵ رفتار شتابسنج خازنی در حوزه فرکانس ۲۷
- ۲۹-۲-۶ پاسخ پله شتابسنج خازنی ۲۹
- ۳۰-۲-۷ مدار واسط خازنی ۳۰
- ۳۱-۲-۷-۱ انواع مدارهای واسط خازنی ۳۱
- ۳۲-۲-۸-۱ مبدل C/V ۳۲
- ۳۳-۲-۸-۱ شیوه‌های تبدیل C/V ۳۳
- ۳۳-۲-۸-۱-۱ تثبیت برشگر ۳۳
- ۳۴-۲-۸-۱-۲ شیوه زوج نمونه برداری همبسته (CDS) ۳۴

۳۵	۹-۲ انواع ساختارهای شتاب‌سنج خازنی
۳۵	۱-۹-۲ ساختار شانه عرضی
۳۶	۲-۹-۲ ساختار صفحه- موازی
۳۷	۱۰-۲ انواع سامانه‌های کنترلی برای شتاب‌سنج‌ها
۳۷	۱-۱۰-۲ سامانه‌های کنترلی حلقه باز
۳۷	۲-۱۰-۲ سامانه‌های کنترلی حلقه بسته
۳۸	۱۱-۲ تبدیل سیگنال خروجی آنالوگ در شتاب‌سنج به سیگنال دیجیتال
۳۸	۱-۱۱-۲ نمونه برداری
۴۰	۱-۱۱-۲-۱ تاشدگی نویز (آلازینگ)
۴۱	۲-۱۱-۲ کوانتیزه کردن
۴۲	۱۲-۲ مدولاتور سیگما دلتا ($\Sigma\Delta$)
۴۳	۱۳-۲ نویز در شتاب‌سنج خازنی
۴۳	۱-۱۳-۲ نویز مکانیکی (نویز براونی)
۴۴	۲-۱۳-۲ نویز الکترونیکی
۴۴	۱۴-۲ آنالیز نویز
۴۶	۱۵-۲ خلاصه

فصل سوم - طراحی و تحلیل شتاب‌سنج خازنی MEMS

۴۷	۱-۳ مقدمه
۴۷	۲-۳ طراحی بخش مکانیکی شتاب‌سنج خازنی
۵۳	۳-۳ تحلیل بخش مکانیکی شتاب‌سنج خازنی با استفاده از نرم افزار آنسیس
۵۶	۴-۳ تحلیل شتاب‌سنج خازنی طراحی شده با استفاده از نرم افزار سیمولینک مطلب
۵۹	۵-۳ خلاصه

فصل چهارم - پیشگیری و پیش‌بینی عوامل ناخواسته در عملکرد شتاب‌سنج خازنی

۶۰	۱-۴ مقدمه
۶۰	۲-۴ بررسی عوامل ناخواسته در عملکرد شتاب‌سنج خازنی
۶۰	۱-۲-۴ بررسی تاثیر تشکیل ترک بر ثابت فنر

۶۴	۲-۲-۴ بررسی تاثیر تغییر دما بر ضریب میرایی
۶۵	۳-۲-۴ پدیده چسبندگی انگشتک‌ها
۶۶	۳-۴ تئوری کنترل غیرخطی
۶۷	۱-۳-۴ روش اول لیپانوف
۶۷	۱-۱-۳-۴ پایداری لیپانوفی
۶۸	۲-۱-۳-۴ پایداری مجانبی
۶۸	۲-۳-۴ روش دوم لیپانوف
۶۹	۴-۴ کنترل گام به گام به عقب انتگرالگیر
۷۲	۱-۴-۴ طراحی کنترل کننده گام به گام به عقب انتگرالگیر برای شتاب سنج خازنی
۷۴	۵-۴ کنترل لغزشی
۷۵	۱-۵-۴ طراحی کنترل کننده مود لغزشی برای شتاب سنج خازنی
۷۶	۶-۴ نتایج شبیه سازی پس از افزودن کنترل کننده‌های طراحی شده برای شتاب سنج خازنی
۸۰	۷-۴ روند طراحی شتاب سنج دارای چگالی نویز کمتر و حساسیت بالاتر
۸۱	۸-۴ مشاهده گر حالت
۸۲	۱-۸-۴ طراحی مشاهده گر گام به گام به عقب تطبیقی کامل - مرتبه برای شتاب سنج
۸۴	۹-۴ نتایج شبیه سازی پس از افزودن مشاهده گر طراحی شده برای شتاب سنج خازنی
۸۶	۱۰-۴ مزیت استفاده از شیوه‌های کنترل غیرخطی برای شتاب سنج خازنی
۸۷	۱۱-۴ خلاصه

فصل پنجم - نتیجه گیری و پیشنهاد کارهای آتی

۸۸	۱-۵ نتیجه گیری
۸۹	۲-۵ پیشنهاد کارهای آتی
۸۹	۳-۵ فهرست مقالات تهیه شده از پایان نامه
۹۱	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۹۷	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ الف) پیش بینی سرمایه در گردش جهانی فناوری MEMS ب) درصد سهم افزاره‌های مختلف فناوری MEMS از بازار جهانی در سالهای ۲۰۰۲ و ۲۰۰۷ [۱]..... ۱
- شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از حسگرهای MEMS الف) حسگر نیرو ب) حسگر فشار ج) حسگر شارش د) شتاب‌سنج [۲]..... ۲
- شکل ۱-۳ شتاب‌سنج خازنی [۲]..... ۴
- شکل ۱-۴ شتاب‌سنج پیزوالکتریک [۲]..... ۴
- شکل ۱-۵ شتاب‌سنج تونلی [۲]..... ۵
- شکل ۱-۶ شتاب‌سنج تشدیدی [۴]..... ۵
- شکل ۱-۷ شتاب‌سنج پیزومقاومتی [۲]..... ۶
- شکل ۱-۸ شتاب‌سنج حرارتی از نوع ترموپایلی [۵]..... ۷
- شکل ۱-۹ شتاب‌سنج نوری [۳۳]..... ۷
- شکل ۱-۱۰ کاربردهایی از میکروماشینکاری سیلیکن..... ۱۰
- شکل ۱-۱۱ نمونه‌هایی از ساختارهای BMM [۱]..... ۱۰
- شکل ۱-۱۲ مراحل میکروماشینکاری سطحی [۶]..... ۱۰
- شکل ۱-۱۳ نمونه‌هایی از ساختارهای SMM..... ۱۱
- شکل ۱-۱۴ مراحل ساخت افزاره MEMS با روش میکروماشینکاری سطحی پلی‌سیلیکن [۷]..... ۱۲
- شکل ۱-۱۵ مراحل میکروماشینکاری LIGA [۳۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۶ نمونه‌هایی از ساختارهای منطبق بر فرآیند CMOS [۸]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۷ مقایسه نويز در روش‌های مختلف ساخت شتاب‌سنج خازنی [۳۳]..... ۱۳
- شکل ۱-۱۸ سیر تکاملی انواع حسگرها از جمله شتاب‌سنج خازنی [۱]..... ۱۴
- شکل ۱-۱۹ نمونه‌ای از شتاب‌سنج XL۵۰ [۳]..... ۱۴
- شکل ۱-۲۰ بلوک دیاگرام سامانه کنترلی شتاب‌سنج XL۵۰ [۳]..... ۱۵
- شکل ۱-۲۱ بلوک دیاگرام شتاب‌سنج XL۷۶ [۳]..... ۱۵
- شکل ۱-۲۲ نشاندهنده یک شتاب‌سنج XL۲۰۲ [۹]..... ۱۶
- شکل ۱-۲۳ شتاب‌سنج SOI [۹]..... ۱۶
- شکل ۱-۲۴ مراحل ساخت شتاب‌سنج CMOS-MEMS [۱۰]..... ۱۸

- شکل ۱-۲۵ نمونه‌ای از شتاب‌سنج CMOS-MEMS [۱۱]..... ۱۸
- شکل ۲-۱ ساختار فیزیکی و اجزای تشکیل دهنده شتاب‌سنج خازنی [۹]..... ۱۹
- شکل ۲-۲ الف) چگونگی ایجاد مشکل خم شدن انگشتک‌ها ب) استفاده از روش تطبیق خمیدگی [۱۰]..... ۲۰
- شکل ۲-۳ شتاب‌سنج ساخته شده با روش تطبیق خمیدگی [۱۴]..... ۲۰
- شکل ۲-۴ فنر دو طرف ثابت [۱۲]..... ۲۱
- شکل ۲-۵ فنر نوع تیرک تا شده انتها باز [۱۲]..... ۲۱
- شکل ۲-۶ نیروی الکترواستاتیک ناشی از جابجایی [۳۳]..... ۲۲
- شکل ۲-۷ پدیده نرم شدگی الکتریکی فنر [۱۰]..... ۲۳
- شکل ۲-۸ بررسی ولتاژ چسبندگی برای دو صفحه موازی [۱۵]..... ۲۴
- شکل ۲-۹ به دست آوردن نقاط y_p و تعادل [۱۵]..... ۲۴
- شکل ۲-۱۰ شتاب‌سنج پس از اعمال شتاب [۶]..... ۲۴
- شکل ۲-۱۱ خازنهای حسگر تشکیل شده بین انگشتک‌ها و تغییرات آنها با تغییر فاصله [۶]..... ۲۵
- شکل ۲-۱۲ مدل مکانیکی شتاب‌سنج [۱۲]..... ۲۵
- شکل ۲-۱۳ میرایی ناشی از فشردگی سیال [۱۲]..... ۲۷
- شکل ۲-۱۴ دامنه بر حسب فرکانس [۳۳]..... ۲۹
- شکل ۲-۱۵ نمودار فاز بر حسب فرکانس [۳۳]..... ۲۹
- شکل ۲-۱۶ پاسخ پله [۳۴]..... ۳۰
- شکل ۲-۱۷ الف) ساختار مکانیکی دیفرانسیلی ب) مدار معادل الکتریکی [۱]..... ۳۰
- شکل ۲-۱۸ انواع مدارهای واسط خازنی [۱۰]..... ۳۱
- شکل ۲-۱۹ الف) ساختار متقارن ب) ساختار مرکز ثقل - مشترک و چگونگی اعمال ولتاژ [۱۰]..... ۳۲
- شکل ۲-۲۰ مبدل C/V تفاضلی [۱]..... ۳۲
- شکل ۲-۲۱ چگونگی پیاده سازی شیوه تثبیت برشگر [۱]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۲ مراحل عملکرد شیوه تثبیت برشگر [۱]..... ۳۳
- شکل ۲-۲۳ فازهای عملکرد شیوه CDS [۱]..... ۳۴
- شکل ۲-۲۴ ساختار شانه-عرضی [۳۳]..... ۳۵
- شکل ۲-۲۵ تغییرات خازن بر حسب x [۳۳]..... ۳۶
- شکل ۲-۲۶ ساختار صفحه-موازی [۳۳]..... ۳۶

- شکل ۲-۲۷ تغییرات خازن بر حسب X [۳۳] ۳۶
- شکل ۲-۲۸ بلوک دیاگرام یک سامانه کنترلی حلقه باز [۱۲] ۳۷
- شکل ۲-۲۹ بلوک دیاگرام یک سامانه کنترلی حلقه بسته [۱] ۳۸
- شکل ۲-۳۰ مدل ساده مبدل A/D [۳۵] ۳۸
- شکل ۲-۳۱ مدل ساده‌ای برای عمل نمونه برداری [۳۵] ۳۹
- شکل ۲-۳۲ الف) سیگنال ضرب شونده برای نمونه برداری، طیف سیگنال ب) قبل و ج) بعد از نمونه برداری [۳۵] ۳۹
- شکل ۲-۳۳ اثر آلازینگ و انتقال $f_1 > W$ به $f_s - f_1 > W$ [۳۵] ۴۰
- شکل ۲-۳۴ اثر تاشدگی نویز در تقویت کننده [۱] ۴۰
- شکل ۲-۳۵ مدل ساده برای مبدل A/D با در نظر گرفتن فیلتر ضد آلازینگ [۳۵] ۴۱
- شکل ۲-۳۶ کوانتیزه کننده ۳ بیتی [۳۳] ۴۱
- شکل ۲-۳۷ بلوک دیاگرام یک مدولاتور سیگما دلتای مرتبه اول [۱۲] ۴۲
- شکل ۲-۳۸ بلوک دیاگرام یک مدولاتور مرتبه دوم [۱۲] ۴۲
- شکل ۲-۳۹ مدل خطی یک مدولاتور سیگما دلتای مرتبه اول [۱۱] ۴۳
- شکل ۲-۴۰ خطای کوانتیزه کردن قبل و بعد از استفاده از مدولاتور سیگما دلتا [۱] ۴۳
- شکل ۲-۴۱ مدار معادل مدل نویز برای یک مبدل C/V [۱] ۴۴
- شکل ۳-۱ روند طراحی بخش مکانیکی شتاب‌سنج خازنی ۴۸
- شکل ۳-۲ قسمت متحرک شتاب‌سنج خازنی ۴۸
- شکل ۳-۳ نمای بزرگتری از بخش مشخص شده در شکل ۲-۳ ۴۹
- شکل ۳-۴ حساسیت بر حسب الف) فاصله بین انگشتک‌ها ب) طول انگشتک ج) طول فنر د) عرض فنر ۵۲
- شکل ۳-۵ پنج مود غالب شتاب‌سنج ۵۴
- شکل ۳-۶ شتاب‌سنج پس از اعمال شتاب در راستای محور Y ۵۵
- شکل ۳-۷ توزیع تنش ون میزز موجود در بخشی از ساختار شتاب‌سنج ۵۵
- شکل ۳-۸ توزیع تنش ون میزز موجود در بخشی از فنر ۵۶
- شکل ۳-۹ مدل مکانیکی شتاب‌سنج ۵۷
- شکل ۳-۱۰ جابجایی شتاب‌سنج بر اثر شتاب اعمالی با دامنه g ۴۸۰ و فرکانس Hz ۳۰ ۵۸

- شکل ۳-۱۱ الف) جابجائی و ب) ولتاژ خروجی شتاب‌سنج بر اثر شتاب اعمالی با دامنه g ۴۰۰ و فرکانس 30 Hz ۵۸
- شکل ۳-۱۲ جابجائی شتاب‌سنج بر اثر اعمال شتاب پالسی با عرض 50 ms و دامنه g ۶۰۰..... ۵۹
- شکل ۴-۱ انواع ترک [۱۶]..... ۶۱
- شکل ۴-۲ الف) ابعاد ترک ب) مکانهای مختلف قرار گرفتن ترک..... ۶۲
- شکل ۴-۳ تاثیر ترک بر توزیع تنش..... ۶۲
- شکل ۴-۴ فرکانس طبیعی بر حسب قرار گرفتن ترک در مکانهای مختلف فنر..... ۶۳
- شکل ۴-۵ بیشینه تنش بر حسب قرار گرفتن ترک در مکانهای مختلف فنر..... ۶۳
- شکل ۴-۶ تاثیر تغییر طول ترک بر تنش..... ۶۳
- شکل ۴-۷ حساسیت بر حسب تغییرات دما..... ۶۴
- شکل ۴-۸ ضریب میرایی بر حسب تغییرات دما..... ۶۴
- شکل ۴-۹ الف) جابجایی و ب) ولتاژ خروجی شتاب‌سنج بر اثر شتاب اعمالی سینوسی با فرکانس 30 Hz و دامنه g ۱۲۰۰..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰ جابجایی شتاب‌سنج بر اثر شتاب پالسی با عرض 50 ms و دامنه g ۱۲۰۰..... ۶۶
- شکل ۴-۱۱ پایداری حالت تعادل X_e و یک مسیر نوعی [۳۴]..... ۶۸
- شکل ۴-۱۲ پایداری مجانبی حالت تعادل X_e و یک مسیر نوعی [۳۴]..... ۶۸
- شکل ۴-۱۳ سامانه کنترل مدل- مرجع [۳۴]..... ۶۹
- شکل ۴-۱۴ مدل سطح سامانه شتاب‌سنج پس از افزودن کنترل‌کننده غیرخطی..... ۷۷
- شکل ۴-۱۵ الف) جابجایی و ب) ولتاژ خروجی شتاب‌سنج برای شتاب سینوسی با فرکانس 30 Hz و دامنه g ۴۰۰ و ج) جابجایی و د) ولتاژ خروجی آن بر اثر اعمال همان شتاب با دامنه g ۱۲۰۰ برای کنترل‌کننده گام به گام به عقب..... ۷۹
- شکل ۴-۱۶ جابجایی و ولتاژ خروجی شتاب‌سنج بر اثر شتاب اعمالی پالسی با عرض پالس 50 ms و دامنه g ۱۲۰۰ برای کنترل‌کننده الف) گام به گام به عقب ب) مود لغزشی..... ۸۰
- شکل ۴-۱۷ روند طراحی پس از افزودن کنترل‌کننده غیرخطی برای جلوگیری از پدیده چسبندگی انگشتک‌ها..... ۸۱
- شکل ۴-۱۸ مدار معادل سطح سامانه شتاب‌سنج پس از افزودن تخمینگر..... ۸۵
- شکل ۴-۱۹ الف) Δk و ب) Δb تخمین زده شده با استفاده از تخمینگر..... ۸۶
- شکل ۴-۲۰ مدار معادل سطح سامانه شتاب‌سنج پس از افزودن کنترل‌کننده و تخمینگر..... ۸۷

فهرست جداول

جدول ۱-۱ مواردی از کاربردهای شتاب‌سنج‌های MEMS [۲] ۳

جدول ۲-۱ فهرست پارامترهای اصلی شتاب‌سنج [۳۳] ۸

جدول ۱-۳ پارامترهای فرض شده در طراحی شتاب‌سنج ۵۱

جدول ۲-۳ پارامترهای بدست آمده در طراحی شتاب‌سنج ۵۱

فهرست علائم

A	مساحت صفحه خازن
A_c	سطح موثر خازنها
$A(s)$	تبدیل لاپلاس شتاب خروجی
a	شتاب خارجی
a_{max}	بیشینه شتاب
a_{min}	کمینه شتاب
a_{snap}	شتاب چسبندگی
$a/\sqrt{\Delta f}$	چگالی نویز
BW	پهنای باند
b	ضریب میرایی
b_a	ضریب میرایی واقعی
Δb	تغییرات ضریب میرایی
C_s	ظرفیت خازن
C_{s0}	ظرفیت خازن اولیه
C_{PA}	خازن تقویت کننده
C_{PS}	خازن ساختار مکانیکی
C_T	خازن معادل
c	ثابت ساترلند
ΔC	تغییرات ظرفیت خازن
$d(n)$	خطای کوانتیزیشن
E	مدول یانگ
e	بردار خطا
F	نیروی معادل
F_b	نیروی میرایی
F_e	نیروی الکترواستاتیک
F_{in}	نیروی اینرسی

F_k	نیروی بازگرداننده فنر
F_S	نیروی مکانیکی
F_{net}	نیروی برآیند
f_m	فرکانس مدولاسیون
f_N	فرکانس نایکوئیست
f_s	فرکانس نمونه برداری
g_0	فاصله بین انگشتک‌ها
H	ضخامت ساختار
h	ضخامت فنر
h_b	ارتفاع زیر ساختار
h_t	ارتفاع بالای ساختار
I_0	جریان مقیاس بندی
i_{nb}^2	جریان نویز مقاومت بایاس
k	ثابت کل فنر
k_a	ثابت فنر واقعی
k_B	ثابت بولتزمن
k_e	ثابت فنر الکتریکی
k_m	ثابت فنر مکانیکی
k_y	ثابت مکانیکی فنر در جهت محور y
k_z	ثابت مکانیکی فنر در جهت محور z
Δk	تغییرات ثابت فنر
L_P	طول جرم حساس
l	طول صفحه
l_b	طول تیرک
l_f	طول انگشتک ثابت و متحرک
m	جرم
m_{min}	حداقل جرم
N	تعداد دور فنر