



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Department of Electrical Engineering

M. Sc. Thesis

**Design of Interface Circuits for Open-Loop MEMS
Capacitive Accelerometers**

By

Reza Ghareoghiani

Supervisor

Dr. Mohammad Yavari

February 2024



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)
دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش مدارهای مجتمع الکترونیک

طراحی مدارهای واسط برای شتاب‌سنج‌های خازنی
میکروالکترومکانیکی حلقه‌باز

نگارش

رضا قره‌اوغلانی

استاد راهنما

دکتر محمد یآوری

بهمن ۱۴۰۲

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

به نام خدا

تعهدنامه اصالت اثر

تاریخ: بهمن ۱۴۰۲

اینجانب **رضا قره‌اوغلانی** متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم‌سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است.

در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می‌باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان‌نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

رضا قره‌اوغلانی

امضا

تقدیم به:

پدر و مادر عزیز و مهربانم که در سختی ها و دشواری های زندگی همواره یاری دلسوز، فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده اند.
میشکرم.

تقدیر و تشکر

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این درجه از علم رسیده و از هیچ رحمتی دریغ نکرد؛ در تمام مراحل زندگی توکل بر او و توسل به ائمه اطهار (ع) تا بدین لحظه مرا قوت قلب بود.

برخود لازم می‌دانم که از زحمات استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر محمد یآوری (دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر) کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم که در مسیر طی شده با بردباری مرا یاری کردند و تا پایان این دوره همواره پشتیبانی از خود گذشته و قابل احترام بوده‌اند. ضمن آنکه از اساتید ممتحن این پایان‌نامه جناب آقای دکتر محسن معزی (استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر) و جناب آقای دکتر مجید شالچیان (دانشیار دانشگاه امیرکبیر) کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم. با قدردانی از تمامی کمک‌ها و حمایت‌های شما عزیزان، این پایان‌نامه بدون شما ممکن نبود.

رضا قره‌اوغلانی

بهمن ۱۴۰۲

چکیده

این تحقیق، با بررسی مزایا، معایب و ضرورت پیشرفت در زمینه شتابسنج‌ها و ارائه‌ی توپولوژی‌های مدارات واسط قرائت‌گر^۱ سوئیچ‌زنی خازنی^۲ حلقه‌باز^۳ و حلقه‌بسته^۴ آغاز شده و به ارائه‌ی بلوک‌های سازنده‌ی مدار واسط حلقه‌باز پیشنهادی نظیر سنسور خازنی، تقویت‌کننده‌ی حساس به بار^۵، نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ^۶، مدار آشکارساز فاز^۷ و مدار پمپ‌بار^۸ می‌پردازد. تمرکز این پایان‌نامه بر طراحی مدار واسط قرائت‌گر کم‌نویز حلقه‌باز با استفاده از سنسور میکروالکترومکانیکی^۹ خازنی می‌باشد. عملکرد سیستم پیشنهادی، بسیار مستقل از ضریب کیفیت^{۱۰} سنسور است که عامل تعیین‌کننده‌ی زمان نشست^{۱۱} سیستم می‌باشد و ممکن است در نهایت به اشباع خود یا مدار واسط بیانجامد. برای بهبود بهره حلقه^{۱۲} و غیرخطی‌نگی^{۱۳} در ساختار مدار، با استفاده از خروجی CSA، فرکانس نوسان‌ساز کنترل می‌گردد که به این ترتیب حلقه‌ی قفل‌فاز^{۱۴}، توسط روشی نوآورانه، خروجی CSA را با غیرخطی‌نگی بسیار کم تقویت کرده و ضمن قرائت سنسور، باعث بهبود عملکرد کلی مدار واسط می‌شود.

طبق نتایج به دست آمده، سیستم پیشنهادی در حالی عملکرد بالاتری در مقایسه با مدارات مشابه از خود به نمایش گذاشت که طراحی آن، مستقل از کاربرد نهایی انجام گرفت و سیستمی عمومی محسوب می‌شود؛ با این حال، عملکرد پیشرفته‌ی سیستم، فراتر از پیش‌بینی نویسنده به تحقق پیوست. مدار واسط طراحی‌شده قابلیت آشکارسازی تغییرات خازنی در محدوده‌ی $0.68aF$ که معادل با $60/6$ دسیبل محدوده دینامیکی می‌باشد را دارد. مصرف توان کل سیستم نیز $9/18$ میلی‌وات با منبع تغذیه $1/8$ ولتی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

مدار واسط حلقه‌باز، سنسور MEMS خازنی، مدار سوئیچ‌زنی خازنی، حلقه قفل‌فاز، تقویت‌کننده‌ی حساس به بار، نوسان‌ساز کنترل‌شده با ولتاژ، آشکارساز فاز، پمپ‌بار، وضوح، نویز، مدارات CMOS.

¹Readout Interface/Integrated Circuits (ROIC)

²Switched-Cap (SC)

³Open-Loop

⁴Closed-Loop

⁵Charge Sensitive Amplifier (CSA)

⁶Voltage Controlled Oscillator (VCO)

⁷Phase Detector (PD)

⁸Charge Pump (CP)

⁹Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS)

¹⁰Quality Factor (Q)

¹¹Settling Time (t_s)

¹²Loop-gain

¹³Non-linearity

¹⁴Phase Lock Loop (PLL)

فهرست مطالب

صفحه

آ	چکیده	.....
۵	فهرست اشکال	.....
ح	فهرست جداول	.....
ط	واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی	.....
ک	اختصارنامه	.....
۱	فصل اول مقدمه	.....
۱	۱-۱ انگیزه	.....
۳	۲-۱ پیشینه و دستاوردهای پایان‌نامه	.....
۳	۳-۱ ساختار کلی پایان‌نامه	.....
۴	فصل دوم سنسورهای MEMS و توپولوژی‌های مدارات شتاب‌سنج	.....
۴	۱-۲ سنسورهای MEMS	.....
۴	۱-۱-۲ روش‌های تشخیص شتاب	.....
۴	۱-۱-۱-۲ روش پیزوالکتریک	.....
۵	۲-۱-۱-۲ روش پیزورزیستيو	.....
۷	۳-۱-۱-۲ روش خازنی	.....
۷	۲-۱-۲ تاریخچه تحقیقات	.....
۱۰	۳-۱-۲ روش‌های ساخت سیستم‌های MEMS	.....
۱۰	۱-۳-۱-۲ لیتوگرافی	.....
۱۱	۲-۳-۱-۲ لایه‌نشانی	.....
۱۱	۳-۳-۱-۲ لایه‌برداری	.....
۱۱	۴-۳-۱-۲ باندینگ	.....
۱۲	۲-۲ توپولوژی‌های مدارات شتاب‌سنج	.....
۱۲	۱-۲-۲ مقدمه	.....
۱۳	۲-۲-۲ مدارات واسط حلقه‌باز	.....
۱۳	۱-۲-۲-۲ سیستم SBB	.....
۱۵	۲-۲-۲-۲ سیستم انتگرال‌گیر ساده	.....
۱۶	۳-۲-۲-۲ سیستم انتگرال‌گیر با استفاده از CDS	.....
۱۸	۳-۲-۲ مدارات واسط حلقه‌بسته	.....
۱۸	۱-۳-۲-۲ سیستم بازخورد نیروی الکترواستاتیک	.....

۱۹	سیستم کنترل شده توسط PID
۱۹	سیستم مدولاتورهای $\Delta\Sigma$
۲۰	سیستم مدولاتورهای $\Delta\Sigma$ با فیدبک بهبود یافته
۲۱	سایر سیستم‌های قابل توجه
۲۱	خلاصه
۲۳	فصل سوم مروری بر کارهای انجام شده اخیر
۲۳	۱-۳ مدار CSA ساده
۲۵	۲-۳ مدار واسط با رویکرد بهبود حساسیت
۲۶	۳-۳ مدار واسط با رویکرد بهبود دیجیتالی خروجی
۲۷	۴-۳ مدار واسط با رویکرد بهبود عملکرد نویز
۳۰	فصل چهارم سیستم قرائت‌گر پیشنهادی MEMS
۳۰	۱-۴ شرح سیستم کلی
۳۲	۲-۴ تقویت کننده عملیاتی
۳۲	۳-۴ نوسان ساز
۳۴	۴-۴ آشکارساز فاز
۳۵	۵-۴ پمپ بار
۳۷	۶-۴ نوسان ساز کنترل شونده با ولتاژ
۳۸	۷-۴ قرائت‌گر سنسور سوئیچ-خازنی
۳۹	۸-۴ توابع تبدیل سیستم
۴۰	۹-۴ شماتیک سیستم کلی
۴۲	فصل پنجم نتایج شبیه سازی
۴۲	۱-۵ آشکارساز فاز
۴۸	۲-۵ پمپ بار
۵۲	۳-۵ نوسان ساز
۵۸	۴-۵ نوسان ساز کنترل شونده با ولتاژ
۶۱	۵-۵ تقویت کننده عملیاتی
۶۴	۶-۵ قرائت‌گر سنسور سوئیچ-خازنی
۶۸	۷-۵ سیستم کلی
۷۶	فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات
۷۶	۱-۶ نتیجه گیری و تحلیل داده ها
۷۶	۲-۶ بهبود عملکرد

فصل هفتم منابع و مراجع	۷۸
------------------------	----

منابع و مراجع

- [1] Gardner, Julian W., Varadan, Vijay K., and Awadelkarim, Osama O. *Microsensors*. John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [2] Analog Devices. ADXL50: $\pm 50\text{g}$ single axis accelerometer. <http://www.analog.com/en/obsolete/adxl50/products/>, 1991. [Online; Accessed 2024].
- [3] Murata Electronics. SCA3100 accelerometers. <http://www.murata-mems.fi/en/products/accelerometers/sca3100-accelerometers/>. [Online; Accessed 2024].
- [4] Analog Devices. ADXL343: 3-axis, $\pm 2\text{ g}/\pm 4\text{ g}/\pm 8\text{ g}/\pm 16\text{ g}$ digital accelerometer. <http://www.analog.com/en/memsensors/mems-accelerometers/adxl343/>. [Online; Accessed 2024].
- [5] Analog Devices. ADXL212: Low cost $\pm 2\text{g}$ dual axis accelerometer. <http://www.analog.com/en/mems-sensors/memsinertial-sensors/adxl212/products/product.html>. [Online; Accessed 2024].
- [6] Mailly, F., Giani, A., Martinez, A., Bonnot, R., Temple-Boyer, P., and Boyer, A. Micromachined thermal accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 103(3):359–363, 2003.
- [7] Ishak, M.Z., Aziz, J.A., Mohd, Shukri, and Miskam, Muhamad. Effect of working fluid, acceleration and heater power on temperature profile inside a thermal convective accelerometer. pp. 334–338, 01 2011.
- [8] Lemkin, Mark and Boser, Bernhard E. A three-axis micromachined accelerometer with a cmos position-sense interface and digital offset-trim electronics. *IEEE J. Solid State Circuits*, 34:456–468, 1999.
- [9] Paavola, Matti, Kamarainen, Mika, Järvinen, Jere, Saukoski, Mikko, Laiho, Mika, and Halonen, Kari. A micropower interface asic for a capacitive 3-axis micro-accelerometer. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 42:2651 – 2665, 01 2008.
- [10] Marek, Jiri. Mems for automotive and consumer electronics. vol. 53, pp. 9 – 17, 03 2010.

-
- [11] Gabrielson, Thomas B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40:903–909, 1993.
 - [12] DeVoe, D.L. and Pisano, A.P. A fully surface-micromachined piezoelectric accelerometer. in *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, vol. 2, pp. 1205–1208 vol.2, 1997.
 - [13] Nemirovsky, Y., Nemirovsky, A., Muralt, P., and Setter, N. Design of novel thin-film piezoelectric accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 56(3):239–249, 1996.
 - [14] Chen, Pau-Ling, Muller, R.S., Jolly, R.D., Halac, G.L., White, R.M., Andrews, A.P., Lim, T.C., and Motamedi, M.E. Integrated silicon microbeam pi-fet accelerometer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 29(1):27–33, 1982.
 - [15] Zou, Qiang, Tan, Wei, Kim, Eun Sok, and Loeb, Gerald E. Single- and triaxis piezoelectric-bimorph accelerometers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 17(1):45–57, 2008.
 - [16] Scheeper, Patrick, Gulløv, Jens Ole, and Kofoed, Lars Munch. A piezoelectric triaxial accelerometer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 6(1):131, 1996.
 - [17] Yu, Jyh-Cheng and Lan, Chin-Bing. System modeling of microaccelerometer using piezoelectric thin films. *Sensors and Actuators A: Physical*, 88(2):178–186, 2001.
 - [18] Harkey, J.A. and Kenny, T.W. 1/f noise considerations for the design and process optimization of piezoresistive cantilevers. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, 9:226 – 235, 07 2000.
 - [19] Roylance, L.M. and Angell, J.B. A batch-fabricated silicon accelerometer. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 26(12):1911–1917, 1979.
 - [20] Barth, Phillip W., Pourahmadi, Farzad, Mayer, R., Poydock, J., and Petersen, Kurt E. A monolithic silicon accelerometer with integral air damping and overrange protection. *IEEE Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 35–38, 1988.
 - [21] Pourahmadi, F., Christel, L., and Petersen, K. Silicon accelerometer with new thermal self-test mechanism. in *Technical Digest IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 122–125, 1992.
 - [22] Kim, Kyu Hyun, Ko, Jong Soo, Cho, Young-Ho, Lee, Kwyro, Kwak, Byung Man, and Park, Kwanhum. A skew-symmetric cantilever accelerometer for automotive airbag applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 50(1):121–126, 1995.

- [23] Pak, James J., Kabir, Abul E., Neudeck, Gerold W., and Logsdon, James H. A bridge-type piezoresistive accelerometer using merged epitaxial lateral overgrowth for thin silicon beam formation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 56(3):267–271, 1996.
- [24] Sim, Jun-Hwan, Cho, Chan-Seo, Kim, Jin-Sup, Lee, Jung-Hee, and Lee, Jong-Hyun. Eight-beam piezoresistive accelerometer fabricated by using a selective porous-silicon etching method. *Sensors and Actuators A: Physical*, 66(1):273–278, 1998.
- [25] Huang, Shusen, Li, Xinxin, Song, Zhaohui, Wang, Yuelin, Yang, Heng, Che, Lufeng, and Jiao, Jiwei. A high-performance micromachined piezoresistive accelerometer with axially stressed tiny beams. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15:993, 03 2005.
- [26] Seidel, H., Fritsch, U., Gottinger, Reinhard, Schalk, J., Walter, Jürgen, and Ambaum, K. A piezoresistive silicon accelerometer with monolithically integrated cmos-circuitry. *Proceedings of the International Solid-State Sensors and Actuators Conference - TRANSDUCERS '95*, 1:597–600, 1995.
- [27] Ning, Yuebin, Loke, Yan, and McKinnon, Graham. Fabrication and characterization of high g-force, silicon piezoresistive accelerometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 48(1):55–61, 1995.
- [28] Dong, Peitao, Li, Xinxin, Yang, Heng, Bao, Haifei, Zhou, Wei, Li, Shengyi, and Feng, Songlin. High-performance monolithic triaxial piezoresistive shock accelerometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 141(2):339–346, 2008.
- [29] Eklund, E Jesper and Shkel, Andrei M. Single-mask fabrication of high-g piezoresistive accelerometers with extended temperature range. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(4):730, mar 2007.
- [30] Chen, Hong, Bao, Minhang, Zhu, Haijun, and Shen, Shaoqun. A piezoresistive accelerometer with a novel vertical beam structure. *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, 2:1201–1204 vol.2, 1997.
- [31] Amarasinghe, Ranjith, Dao, Dzung Viet, Toriyama, Toshiyuki, and Sugiyama, Susumu. Development of miniaturized 6-axis accelerometer utilizing piezoresistive sensing elements. *Sensors and Actuators A: Physical*, 134(2):310–320, 2007.
- [32] Boser, B.E. and Howe, R.T. Surface micromachined accelerometers. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 31(3):366–375, 1996.

-
- [33] Chae, Junseok, Kulah, H., and Najafi, K. A monolithic three-axis micro-g micromachined silicon capacitive accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 14(2):235–242, 2005.
 - [34] van Driehenhuizen, B.P., Maluf, N.I., Opris, I.E., and Kovacs, G.T.A. Force-balanced accelerometer with mg resolution, fabricated using silicon fusion bonding and deep reactive ion etching. in *Proceedings of International Solid State Sensors and Actuators Conference (Transducers '97)*, vol. 2, pp. 1229–1230 vol.2, 1997.
 - [35] Yazdi, N. and Najafi, K. An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 9(4):544–550, 2000.
 - [36] Quenzer, H.J., Dell, C., and Wagner, B. Silicon-silicon anodic-bonding with intermediate glass layers using spin-on glasses. in *Proceedings of Ninth International Workshop on Micro Electromechanical Systems*, pp. 272–276, 1996.
 - [37] Sherman, Tsang, Core, Payne, Quinn, Chau, Farash, and Baum. A low cost monolithic accelerometer; product/technology update. in *1992 International Technical Digest on Electron Devices Meeting*, pp. 501–504, 1992.
 - [38] Chau, K.H.-L., Lewis, S.R., Zhao, Y., Howe, R.T., Bart, S.F., and Marcheselli, R.G. An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications. in *Proceedings of the International Solid-State Sensors and Actuators Conference - TRANSDUCERS '95*, vol. 1, pp. 593–596, 1995.
 - [39] Luo, Hao, Zhang, Gang, Carley, L.R., and Fedder, G.K. A post-cmos micromachined lateral accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(3):188–195, 2002.
 - [40] Han, Ki-Ho and Cho, Young-Ho. Self-balanced navigation-grade capacitive microaccelerometers using branched finger electrodes and their performance for varying sense voltage and pressure. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(1):11–20, 2003.
 - [41] Wu, Jiangfeng and Carley, Rick. Electromechanical $\Delta\Sigma$ modulation with high-q micromechanical accelerometers and pulse density modulated force feedback. *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, 53(2):274 – 287, 03 2006.
 - [42] Amini, B.V., Abdolvand, R., and Ayazi, F. A 4.5mw closed-loop $\Sigma\Delta$ micro-gravity cmos-soi accelerometer. in *2006 IEEE International Solid State Circuits Conference - Digest of Technical Papers*, pp. 1101–1110, 2006.

-
- [43] Henrion, W., DiSanza, L., Ip, M., Terry, S., and Jerman, H. Wide dynamic range direct accelerometer. in *IEEE 4th Technical Digest on Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, pp. 153–157, 1990.
 - [44] Smith, T., Nys, O., Chevroulet, M., DeCoulon, Y., and Degrauwe, M. A 15 b electromechanical sigma-delta converter for acceleration measurements. in *Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference - ISSCC '94*, pp. 160–161, 1994.
 - [45] Belloy, E., Sayah, A., and Gijs, M.A.M. Micromachining of glass inertial sensors. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(1):85–90, 2002.
 - [46] Yazdi, N., Najafi, K., and Salian, A.S. A high-sensitivity silicon accelerometer with a folded-electrode structure. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 12(4):479–486, 2003.
 - [47] Qu, Hongwei, Fang, Deyou, and Xie, Huikai. A monolithic cmos-mems 3-axis accelerometer with a low-noise, low-power dual-chopper amplifier. *IEEE Sensors Journal*, 8(9):1511–1518, 2008.
 - [48] Aaltonen, Lasse and Halonen, Kari. Continuous-time interface for a micromachined capacitive accelerometer with nea of 4 μ g and bandwidth of 300hz. *Sensors and Actuators A: Physical*, 154(1):46–56, 2009.
 - [49] Bustillo, J.M., Howe, R.T., and Muller, R.S. Surface micromachining for microelectromechanical systems. *Proceedings of the IEEE*, 86(8):1552–1574, 1998.
 - [50] Kovacs, G.T.A., Maluf, N.I., and Petersen, K.E. Bulk micromachining of silicon. *Proceedings of the IEEE*, 86(8):1536–1551, 1998.
 - [51] Baltes, Henry, Brand, Oliver, Fedder, Gary K., Hierold, Christofer, Korvink, Jan G., and Tabata, Osamu. *Enabling Technologies for MEMS and Nanodevices*. 2004.
 - [52] Baltes, Henry, Brand, Oliver, Fedder, Gary, Hierold, Christofer, Korvink, Jan, and Tabata, Osamu. Cmos-mems: Advanced micro and nanosystems, volume 2. 04 2005.
 - [53] Acar, Cenk and Shkel, Andrei. *MEMS Vibratory Gyroscopes: Structural Approaches to Improve Robustness (MEMS Reference Shelf)*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd ed. , 2008.
 - [54] Paavola, Matti, Kamarainen, Mika, Laulainen, Erkka, Saukoski, Mikko, Koskinen, Lauri, Kosunen, Marko, and Halonen, Kari AI. A micropower $\Delta\Sigma$ -based interface asic for a capacitive 3-axis micro-accelerometer. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 44(11):3193–3210, 2009.

- [55] Aaltonen, Lasse, Rahikkala, Pasi, Saukoski, Mikko, and Halonen, Kari. High-resolution continuous-time interface for micromachined capacitive accelerometer. *Int. J. Circuit Theory Appl.*, 37(2):333–349, mar 2009.
- [56] Leuthold, H. and Rudolf, F. An asic for high-resolution capacitive microaccelerometers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 21(1):278–281, 1990. Proceedings of the 5th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors III.
- [57] Amini, Babak Vakili, Pourkamali, Siavash, and Ayazi, Farrokh. A 2.5v 14-bit $\Sigma\Delta$ cmos-soi capacitive accelerometer. 2004.
- [58] Lemkin, M. and Boser, B.E. A micromachined fully differential lateral accelerometer. in *Proceedings of Custom Integrated Circuits Conference*, pp. 315–318, 1996.
- [59] Lang, C. and Tielert, R. A low noise accelerometer with digital pid-type controller and multibit force feedback. in *Proceedings of the 25th European Solid-State Circuits Conference*, pp. 250–253, 1999.
- [60] Sun, Hongzhi, Fang, Deyou, Jia, Kemiao, Maarouf, Fares, Qu, Hongwei, and Xie, Huikai. A low-power low-noise dual-chopper amplifier for capacitive cmos-mems accelerometers. *IEEE Sensors Journal*, 11(4):925–933, 2011.
- [61] Pastre, Marc, Kayal, Maher, Schmid, Hanspeter, Huber, Alexander, Zwahlen, Pascal, Nguyen, Anne-Marie, and Dong, Yufeng. A 300hz 19b dr capacitive accelerometer based on a versatile front end in a 5th-order $\Delta\Sigma$ loop. in *2009 Proceedings of ESSCIRC*, pp. 288–291, 2009.
- [62] Chau, K.H.-L, Lewis, S.R, Zhao, Y, Howe, R.T, Bart, S.F, and Marcheselli, R.G. An integrated force-balanced capacitive accelerometer for low-g applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 54(1):472–476, 1996.
- [63] Zhao, Dongning, Zaman, M. Faisal, and Ayazi, Farrokh. A chopper-stabilized lateral-bjt-input interface in 0.6 μ m cmos for capacitive accelerometers. in *2008 IEEE International Solid-State Circuits Conference - Digest of Technical Papers*, pp. 584–637, 2008.
- [64] Lei, S., Zorman, C.A., and Garverick, S.L. An oversampled capacitance-to-voltage converter ic with application to time-domain characterization of mems resonators. *IEEE Sensors Journal*, 5(6):1353–1361, 2005.

- [65] Gaggatur, Javed S, Dixena, Pradeep K, and Banerjee, Gaurab. A 3.2 mw 0.13 μm high sensitivity frequency-domain cmos capacitance interface. in *2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 1070–1073, 2016.
- [66] Michalik, Piotr, Madrenas, Jordi, and Fernández, Daniel. Sense/drive architecture for cmos-mems accelerometers with relaxation oscillator and tdc. in *2012 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS 2012)*, pp. 937–940, 2012.
- [۶۷] قلی‌پور پیچا، س. تحلیل و طراحی مدارهای واسط *CMOS* با توان و نویز پایین برای سنسورهای خازنی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، ۱۳۹۶.
- [68] Furubayashi, Yuki, Oshima, Takashi, Yamawaki, Taizo, Watanabe, Keiki, Mori, Keijiro, Mori, Naoki, Matsumoto, Akira, Kazama, Hideto, Kamada, Yudai, Isobe, Atsushi, and Sekiguchi, Tomonori. 10.2 a 22ng/ $\sqrt{\text{hz}}$ 17mw mems accelerometer with digital noise-reduction techniques. in *2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC)*, pp. 182–184, 2019.
- [69] Ebrahimi Seraji, Najme and Yavari, Mohammad. On the design and optimization of a switched-capacitor interface circuit for mems capacitive sensors. in *20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*, pp. 286–290, 2012.

Abstract

This research begins with an examination of the advantages, disadvantages, and the necessity for advancements in accelerometers, and it introduces the topologies of capacitive switching readout interface circuits, including both open-loop and closed-loop configurations. It then presents the building blocks of the proposed open-loop interface circuit, such as the capacitive sensor, charge-sensitive amplifier (CSA), voltage-controlled oscillator (VCO), phase detector, and charge pump circuits. The focus of this thesis is on designing a low-noise open-loop readout interface circuit using a capacitive microelectromechanical system (MEMS) sensor. The proposed system's performance is largely independent of the sensor's quality factor, which is a key determinant of the system's settling time and could potentially lead to saturation of either the sensor or the interface circuit. To enhance the loop gain and reduce nonlinearity in the circuit structure, the VCO frequency is controlled by the CSA output. This approach allows the phase-locked loop (PLL) to innovatively amplify the CSA output with very low nonlinearity, thereby improving the overall performance of the interface circuit while reading the sensor. According to the results, the proposed system outperformed similar circuits, despite being designed independently of the final application, making it a general-purpose system. However, the system's advanced performance exceeded the author's expectations. The designed interface circuit is capable of detecting capacitance changes in the range of 0.68 aF , equivalent to a 60.6 dB dynamic range. The total power consumption of the system is 9.18 mW with a 1.8 V power supply.

Key Words:

Interface circuits, MEMS capacitive sensor, PLL, Switched-cap circuits, VCO, PD, CP.



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Department of Electrical Engineering

M. Sc. Thesis

**Design of Interface Circuits for Open-Loop MEMS
Capacitive Accelerometers**

By

Reza Ghareoghiani

Supervisor

Dr. Mohammad Yavari

February 2024