



Research Article

Design, Manufacturing and Testing of a Cylindrical Vibrating Gyroscope

Seyed Mahmoud Ghalehbandi^{1*}, Saleh Fallah², Iman Halimi³ and Hamid Shafiee Alavije⁴

¹ Faculty of Industrial Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.

² Faculty of Aerospace Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

³ Faculty of Electronic Engineering, Shahed University, Tehran, Iran.

⁴ Faculty of Mechatronic Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author: (ghalehbandi@mazust.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 5 August 2024

Revised: 15 October 2024

Accepted: 27 October 2024

Keywords:

Gyroscope,
resonator,
phase shift,
frequency split,
coriolis effect.

Abstract

A resonating gyroscope with a cylindrical resonator is designed using finite element method with the aim of achieving the maximum oscillation amplitude. The gyroscope is manufactured with a resonator made of maraging steel and piezoelectric forcers and pick-offs. In order to investigate the effects of material and manufacturing method defects in the resonator frequency split and phase shift of the resonator are measured at the desired excitation frequency and mode shape. By measuring natural frequencies of two main axes in the desired mode shape, the frequency split of the resonator is measured and the factors affecting the accuracy of measurement have also been investigated experimentally. Also, the vibration pattern of the resonator has been recorded using an acoustic wave mechanism and the phase shift of the resonator has been measured. Measurement of frequency split showed that the resonator experiences a frequency split of about 1 Hz. In addition, the use of the acoustic wave mechanism showed a good efficiency in recording the position and shape of the vibration pattern. Measurement of the phase shift with the help of the acoustic mechanism has shown the presence of a 4-degrees phase shift. Finally, in order to prove the gyroscopic phenomenon, the effect of the resonator rotation rate on the vibration wave persistence was investigated and it has shown a suitable linear approximation.

Introduction

Cylindrical Vibrating Gyroscope (CVG) is an inertial sensor used to measure the rate of angular rotation. The operation of these gyroscopes is affected by the Coriolis effect and is based on the lag of a vibrating wave during rotation about a given axis. The effect of defects in the resonator can be classified in two general forms: a) frequency split: that is, the difference between the natural frequencies of the two axes of working mode, and b) phase shift: the difference in the spatial location of the main axes of the two mode shapes relative to the location of the forcers. Balancing with the aim of reducing each of these defects will eliminate or reduce the other.

In this research, a cylindrical resonator was designed using parametric design in finite element software with the aim of

achieving maximum oscillation amplitude. The frequency split was measured by measuring the natural frequencies of the two main axes in the desired natural mode. Also, the vibration pattern of the resonator was recorded using an acoustic mechanism and the phase shift of this resonator was measured. The use of acoustic mechanism and the easy measurement of frequency separation and phase shift facilitate the mechanical balance of the resonator.

Methodology

In order to achieve oscillations with appropriate amplitude and low damping as well as low-cost production, maraging steel was used to make the resonator, and a 0.5 mm thick piezoelectric sheet and PZT-5A ceramic were used to excite

To Cite this article:

Ghalehbandi, S.M., Fallah, S., Halimi, I. and Shafiee Alavije, H. 2025. Design, manufacturing and testing of a cylindrical vibrating gyroscope, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(1), 1-11. <https://doi.org/10.24200/j40.2024.64982.1716>

and receive the response. The resonator was excited using an electronic wave generator to generate a sine wave at the natural frequency of the case, and the response wave was detected using an oscilloscope. The rate test was performed using a single-axis rotary table. In the design stage of resonator, the finite element software ANSYS Workbench was used and two general goals were considered. First, in order to reduce the cost, a cylindrical resonator with a stepped thickness was made of maraging steel and piezoelectricity was used for excitation and response, and second, by parametric design, while achieving appropriate frequencies in the desired mode shape, the dimensions of the sample were selected in such a way that the amplitude of oscillations and, as a result, the quality factor of the vibrating body were maximized. In order to detect the position of the nodes and antinodes and to obtain the phase shift, an acoustic mechanism was used. In this step, the resonator was installed on a rotating table and the sound wave amplitude was recorded using a microphone with a frequency response of 44100 Hz and using MATLAB software.

Results and Discussion

• Vibration mode shape

The experimental natural frequency shows a good match with the natural frequency calculated in the simulation (Figure 3). The almost similar output received from piezos 3 and 7 (shown in Figure 2) and the much smaller output amplitude in piezos 2, 4, 6 and 8 indicate the formation of an elliptical vibration mode shape at this frequency.

• Frequency Split Measurement

Frequency split measurement of the two main axes was carried out. The effect of various parameters on the output of the piezoelectrics is experimentally investigated. These parameters include the number of piezos used as actuators, the natural frequency measurement criterion, and the presence or absence of a cover on the assembly.

• Phase shift measurement

To measure the phase shift, the exact midpoint between piezos 1 and 8 was marked on the resonator body. This point is on the axis that has an angle of -22.5 with respect to axis A in Figure 4. To calculate the phase shift, a curve with a 5-degree polynomial function was passed through the recorded points which showed that the maximum of the curve occurs at a point of about 4 degrees that considered as phase shift.

• Gyroscopic Phenomenon Test

The effect of the rotation rate of the resonator on the lag of the vibration wave was investigated. For this purpose, at different rotational speeds, the phase difference created in the vibration wave relative to the input wave was recorded using an oscilloscope. These results show that rotation caused a phase difference and also by increasing the rotation rate in degrees per second, the amount of this phase difference increased.

Conclusion

The parametric design of the resonator was carried. The natural frequency of the resonator in the ANSYS software (1232.2 Hz) and the frequency obtained in the experimental test results (1229 Hz) showed a good match. The results of the experimental tests showed that the parametric design of the resonator with a stepped thickness has achieved a good ratio for the response amplitude (less than one volt) to the excitation (5 volts). Also, the results showed that the desired resonator has a frequency split of approximately one hertz. In addition, the use of the acoustic mechanism showed good efficiency in recording the position of the vibration pattern, and the measurement of the phase shift showed the existence of a 4-degree phase shift. Finally, the effect of the resonator rotation rate on the lag of the vibration wave was investigated, and recording the changes in rotation rate yielded a suitable linear approximation.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



طراحی، ساخت و آزمون تجربی ژيروسکوپ ارتعاشی استوانه‌ای

سید محمود قلعه‌بندی^{۱*}، صالح فلاح^۲، ایمان حلیمی^۳ و حمید شفیعی علویجه^۴

^۱ دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران.

^۲ دانشکده مهندسی هوا و فضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۳ دانشکده الکترونیک، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

^۴ دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول (ghalehbandi@mazust.ac.ir)

چکیده

ژيروسکوپ ارتعاشی مدور با رزوناتور استوانه‌ای بر مبنای اثر کوریولیس طراحی و ساخته شده است. تحریک و دریافت پاسخ نوسان‌ها به کمک پیزوالکتریک‌ها انجام شده است. پس از راه‌اندازی رزوناتور، جدایش بسامدی اندازه‌گیری و همچنین الگوی ارتعاشی رزوناتور با بهره‌گیری از یک مکانیزم صوتی ثبت و به کمک آن شیفت فازی رزوناتور ثبت شده است. نتایج آزمون‌ها نشان داده است که طراحی رزوناتور با ضخامت پله‌ای، سبب دستیابی به نسبت مناسبی برای دامنه‌ی پاسخ به تحریک شده است. همچنین جدایش بسامدی رزوناتور تقریباً یک مرتبه‌ای است. به علاوه، استفاده از مکانیزم صوتی، کارایی مناسبی را در ثبت موقعیت الگوی ارتعاشی ارائه کرده و اندازه‌گیری شیفت فازی به کمک مکانیزم صوتی، وجود شیفت فازی ۴ درجه‌ای را نشان داده است. تأثیر نرخ دوران رزوناتور در جاماندگی موج ارتعاشی بررسی شده و ثبت تغییرات نرخ دوران در چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد در ژيروسکوپ، تقریب خطی مناسبی را به همراه داشته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۵

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶

واژگان کلیدی:

ژيروسکوپ،
استوانه‌ای مرتعش،
شیفت فازی،
جدایش بسامدی،
اثر کوریولیس.

۱. مقدمه

اخیر هفته است. به این نکته نیز باید توجه داشت که دقت حسگرهای مذکور توسط عیوب موجود در رزوناتور محدود می‌شود. به زبان ساده، اگرچه در حالت ایده‌آل، مطابق شکل ۱، شکل‌گیری موج‌های ارتعاشی در شکل مود مطلوب، امری بدیهی است؛ اما دور بودن هندسه‌ی رزوناتور از هندسه‌ی اسمی منجر به عدم تشکیل الگوی ارتعاشی متقارن و دشوار شدن شناسایی و تغییرات آن حین دوران رزوناتور خواهد شد. عیوب موجود در رزوناتور عمدتاً ناشی از ایده‌آل نبودن ماده‌ی اولیه و فرایند تولید است؛ که سبب توزیع نامتقارن جرم و ضریب فنریّت و در نتیجه، دوری رزوناتور از رفتار دینامیکی ایده‌آل می‌شود و به همین دلیل است که انجام فرایند بالانس به منظور ایجاد تقارن هندسی و نوسانی از اصلی-ترین مراحل تولید ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور است.^[۱] عمر طولانی، قابلیت اطمینان بالا، و دقت فوق‌العاده نیز سبب شده است تا در سال‌های اخیر، توجه به طراحی و تولید آن‌ها در دو مقیاس ماکرو و میکرو افزایش یابد. جیا^۲ و همکارانش (۲۰۲۱)،^[۳] کارایی، مکانیزم‌های تحریک و پاسخ، حلقه‌های کنترلی،

ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور، حسگرهای اینرسی هستند که برای اندازه‌گیری نرخ دوران زاویه‌ای کاربرد دارند و عملکرد آن‌ها، متأثر از اثر کوریولیس (CVG)^۱ و بر مبنای جاماندگی موج ارتعاشی حین دوران نسبت به یک محور معین است. به بیان ساده، به واسطه‌ی اثر کوریولیس، جرمی که در یک سیستم دوار حرکت (نوسان) می‌کند، نیرویی را تجربه می‌کند که عمود بر جهت نوسان و محور چرخش عمل می‌کند و سبب انحراف جرم از دید یک ناظر درون یک دستگاه مرجع چرخان خواهد شد. این اثر در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور، مبنای اندازه‌گیری نرخ دوران است. عدم وجود اجزاء حساس، زمان بسیار کوتاه برای راه‌اندازی، مصرف اندک انرژی، اندازه‌ی کوچک، وزن، و هزینه‌ی اندک را نیز می‌توان به عنوان مزایای اساسی و محرک در حرکت جدی به سوی تولید ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور بیان کرد.^[۱]

تجربه نشان داده است که علی‌رغم سادگی ظاهری در تئوری پدیده‌ی ژيروسکوپی، پیچیدگی‌های ذاتی فراوانی در راه‌اندازی عملکردی ژيروسکوپ‌های

² Jia

¹ Coriolis Vibrating Gyroscope

استناد به این مقاله:

قلعه‌بندی، سید محمود، فلاح، صالح، حلیمی، ایمان و شفیعی علویجه، حمید، ۱۴۰۴. طراحی، ساخت، و آزمون تجربی ژيروسکوپ ارتعاشی استوانه‌ای. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۱)، صص. ۱-۱۱.

<https://doi.org/10.24200/j40.2024.64982.1716>



که عیوب موجود در رزوناتور هم‌زمان سبب جدایش بسامدی و شیف‌ت فازی می‌شوند و از این رو جدایش بسامدی و شیف‌ت فازی، عامل ایجادکننده‌ی مشترکی دارند. لذا، انجام بالانس با هدف کاهش هر کدام از نقیصه‌های ذکر شده، حذف و یا کاهش مورد دیگر را به دنبال خواهد داشت.^[۱۰]

پس از تولید و آزمون اولیه‌ی رزوناتور، بالانس مکانیکی به‌منظور کاهش اثربخشی عیوب انجام می‌شود. فرایند بالانس که با برداشتن یا اضافه‌کردن جرم به‌صورت موضعی انجام می‌شود، این دو هدف کلی را به دنبال خواهد داشت: (۱) کاهش جدایش بسامد طبیعی مطلوب، و (۲) هم‌راستاسازی شکل مد ارتعاشی مطلوب با محورهای فورس و پیک‌آف.

باید توجه داشت که فرایند بالانس، فرایندی زمان‌بر است و در حالت ایده‌آل باید در دما و فشار ثابت انجام شود. از آنجا که فراهم‌ساختن شرایط برای بالانس در شرایط مذکور، دشوار است و از سویی، دینامیک سازه با گذر زمان و تغییرات دما تغییر می‌کند، طراحی مکانیکی و طراحی حلقه‌های کنترلی رزوناتور تا حد امکان باید با هدف کاهش حساسیت به عیوب تولیدی انجام شود.^[۱۱] از سویی دیگر، باید توجه داشت که اصلی‌ترین عامل دریافت در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور، عدم تقارن در رفتار مکانیکی رزوناتور است، که به خودی خود ناشی از عیوب تولیدی است. از این رو، به‌کارگیری رزوناتور بدون تلاش برای کاهش عیوب ساختاری آن، تولید ژيروسکوپ با خصوصیات عملکردی و مشخصات دقتی مناسب را به دنبال نخواهد داشت و لذا، تمام ویژگی‌های ارزشمند آن را تحت تأثیر قرار خواهد داد.

شاید اولین پژوهش در ارتباط با کاهش آثار نامتقارن بودن رفتار مکانیکی رزوناتورها توسط لوپر و لینچ^[۱۲] (۱۹۸۳)، انجام شده باشد. ایشان بیان کرده‌اند که ضریب میرایی نامتقارن رزوناتور می‌تواند سبب شود که دو محور اصلی موج ارتعاشی ضریب فنریت متفاوتی داشته باشند. حین ارتعاش، الگوی ارتعاشی تمایل به کشیده‌شدن^[۱۳] به سمت محور با ضریب فنریت کمتر دارد. در پژوهش دیگری در زمینه‌ی بالانس رزوناتورها، لین و همکارانش (۲۰۱۵)،^[۱۳] بالانس رزوناتور زنگوله‌ای شکل را بررسی کرده‌اند. دامنه‌ی نوسان در نقاط مختلف توسط دستگاه ویبرومتر لیزری اندازه‌گیری شده است. در نوشتار مذکور، تلاشی برای کاهش شیف‌ت فازی انجام نشده است، بلکه از نقاط مذکور برای اضافه‌کردن جرم به‌منظور تسریع فرایند کاهش جدایش بسامدی استفاده شده است. ما و سو^[۱۴] (۲۰۱۵)، تأثیر عیوب جرمی را در جدایش بسامدی و شیف‌ت فازی الگوی ارتعاشی رزوناتور زنگوله‌ای شکل بررسی کرده‌اند. براساس نتایج آن‌ها، روش معمول در بالانس رزوناتورها، برداشت جرم از دندانه‌های روی لبه است، که این کار در پژوهش‌های مختلف به کمک اشعه‌های لیزر، الکترونی، و یونی و یا اچ شیمیایی انجام شده است. ژنگ^[۱۵] و همکارانش (۲۰۱۷)، کاهش جدایش بسامدی در رزوناتور استوانه‌ای را بررسی کرده و دریافته‌اند که بالانس به دو صورت مکانیکی و الکتریکی انجام می‌شود، که البته بالانس الکتریکی یا

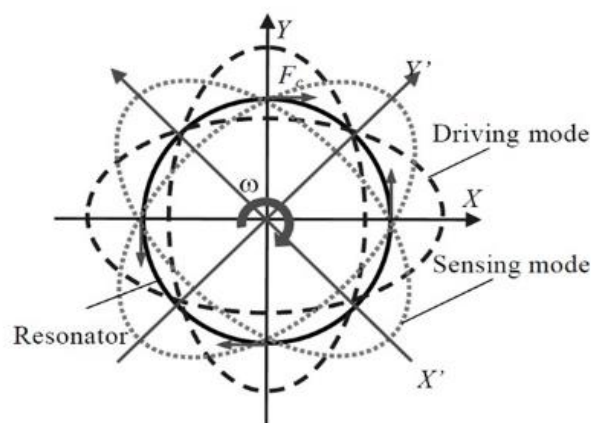


Figure 1. Theory of operation and oscillation axes of the resonator in the ideal state.

شکل ۱. تئوری عملکرد و محورهای نوسان رزوناتور در حالت ایده‌آل.

مواد استفاده‌شده، و عیوب و خطاهای ایجادشده در تولید و راه‌اندازی ژيروسکوپ ارتعاشی میکروحلقوی را مطالعه و مرور کرده‌اند. آمال و داویدسون^[۱] (۲۰۲۱)،^[۴] طراحی و توسعه‌ی مدارها و حلقه‌های کنترلی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور را بررسی و حلقه‌های کنترل دامنه و کنترل بسامد ارتعاش‌ها را برای رزوناتورهای مقیاس میکرو ارائه کرده‌اند. ژیانو^[۲] و همکاران (۲۰۲۰)،^[۵] اثر به‌کارگیری نیروهای الکترواستاتیکی را در مشخصات ارتعاشی رزوناتور استوانه‌ای تولیدشده از فیوزسیلیکا به دو صورت تئوری و تجربی بررسی کرده‌اند. نتایج تجربی آنان نیز نشان داد که به‌کارگیری نیروهای الکترواستاتیکی سبب کاهش جدایش بسامدی محورهای اصلی و افزایش ضریب کیفیت رزوناتور خواهد شد. هو^[۳] و همکارانش (۲۰۲۴)،^[۶] تولید رزوناتورهای اخیر را در مقیاس میکرو به کمک فن‌آوری پرینت سه‌بعدی بررسی کرده و دریافته‌اند که توسعه‌ی طراحی با هدف به‌کارگیری تکنولوژی اخیر در تولید ژيروسکوپ‌های ارتعاشی مدور در برخی کاربردها امکان‌پذیر است. آپوستولیوک^[۷] (۲۰۱۶)،^[۷] رفتار دینامیکی و خطاهای ناشی از عیوب در رزوناتور را به‌صورت تئوری بررسی کرده و روشی را برای طراحی بهینه‌ی حسگر توسعه داده است. دلاهای^[۵] و همکارانش (۲۰۱۷)،^[۸] مدل‌سازی پارامتری ژيروسکوپ ارتعاشی مدور را به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر و بهینه‌سازی طراحی بررسی کرده‌اند. سانگ^[۶] و همکارانش (۲۰۰۷)،^[۹] ژيروسکوپ ارتعاشی را با توسعه‌ی حلقه‌های کنترلی طراحی و آزمایش کرده‌اند و نتایج تجربی ایشان، بهبود در شاخص‌های حسگری را نشان داده است.

تأثیر عیوب در رزوناتور به دو شکل کلی مشاهده می‌شود: (الف) جدایش فرکانسی (F.S.)^[۷]: یعنی اختلاف بین بسامدهای طبیعی دومحور مودهای تحریک^[۸] و پاسخ^[۹]، و (ب) شیف‌ت فازی^[۱۰]: اختلاف در موقعیت مکانی محورهای اصلی دو شکل مود نسبت به موقعیت الکترودهای نصب‌شده. باید توجه داشت

⁸ Driving mode

⁹ Sensing mode

¹⁰ Phase shift

¹¹ Loper & Lynch

¹² Drift

¹³ Ma & Su

¹⁴ Zeng

¹ Amal & Davidson

² Xiao

³ Hou

⁴ Apostolyuk

⁵ Delahaye

⁶ Sung

⁷ Frequency split (F.S.)

۲. روش پژوهش

۱.۲. مواد و تجهیزات

به منظور دستیابی به نوسان‌ها با دامنه‌ی مناسب و میرایی اندک و همچنین تولید کم‌هزینه از فولاد مارچینگ^۲ برای ساخت رزوناتور و از ورق پیزوالکتریک با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و سرامیک ۵A-PZT به‌منظور تحریک و دریافت پاسخ استفاده شده است. تحریک رزوناتور با استفاده از دستگاه تولید موج الکترونیکی^۳ به‌منظور تولید موج سینوسی در بسامد طبیعی انجام و موج پاسخ با استفاده از دستگاه نوسان‌نگار^۴ آشکارسازی شد و کارت داده‌برداری آنالوگ به دیجیتال نیز استفاده شد. انجام آزمون نرخ دوران با استفاده از میز چرخان^۵ تک‌محور و ثبت دامنه‌ی موج صوتی توسط میکروفون با پاسخ بسامدی ۴۴۱۰۰ هرتز انجام شده است.

۲.۲. طراحی و تولید رزوناتور

در پژوهش حاضر، به‌منظور اثبات پدیده‌ی ژيروسکوپی و بررسی چالش‌های راه‌اندازی و کنترل رزوناتور، طراحی مکانیکی به‌منظور تولید رزوناتور انجام شده است. در مرحله‌ی طراحی، از نرم‌افزار المان محدود انسیس ورک‌بنچ^۶ استفاده و به دو هدف کلی توجه شده است: (۱) به‌منظور کاهش هزینه، رزوناتور استوانه‌ای با ضخامت پله‌ای از جنس فولاد مارچینگ ساخته و به‌منظور تحریک و پاسخ از پیزوالکتریک استفاده شده است. (۲) با طراحی پارامتری، ضمن دستیابی به بسامدهای مناسب در شکل مودهای مدنظر، ابعاد نمونه به گونه‌ای انتخاب شده است که دامنه‌ی نوسان‌ها و در نتیجه‌ی آن، ضریب کیفیت^۷ جسم مرتعش بیشینه شود. زیرا افزایش ضریب کیفیت، شرایط مناسب را برای آشکارسازی پدیده و بهبود عملکرد حلقه‌های کنترلی فراهم می‌کند. در مرحله‌ی طراحی

جدول ۱. پارامترهای طراحی و میزان تأثیرگذاری نسبی آن‌ها در کیفیت.

Table 1. Design parameters and their relative effectiveness on resonator quality.

Dimensional parameter	Relative effectiveness
Resonator diameter	Very high
Resonator Height	Moderate
Rode diameter	High
Rode height	Low
Wall thickness	Very high
Base thickness	Very high
Wall/base fillet radius	Low
Base contact area	Low
Rode/base fillet radius	Moderate
Hole diameter	Moderate

همان حلقه‌ی کنترل تقارن، فقط مقادیر بسیار کوچک جدایش بسامدی را می‌تواند برطرف کند. برای کاهش جدایش بسامدی، برداشت مکانیکی براده از روی رزوناتور با ایجاد سوراخ و دندان روی لبه‌ی بالایی انجام شده است.

ژی^۱ و همکارانش (۲۰۱۲)، اثر عیوب جرمی را در نابالانسی رزوناتور فلزی استوانه‌ای مطالعه کرده و دریافته‌اند که جدایش بسامدی و شیفت فازی ناشی از نابالانسی سبب ایجاد خطا می‌شود و لذا، علاوه بر کاهش جدایش بسامدی باید شیفت فازی نیز کاهش یابد، تا حتی‌الامکان محور تحریک بر نوسان منطبق باشد. نتایج شبیه‌سازی ایشان نشان داد که کاهش جدایش بسامدی به ۰/۳ هرتز سبب حذف شیفت فازی شده است. ایشان علاوه بر نابالانسی جرمی، از مقدار نیروی محرک (ولتاژ) و ضریب فنریت به‌عنوان عوامل احتمالی مؤثر در شیفت فازی نام برده‌اند. هر چند تأثیر ولتاژ تحریک در شیفت فازی بسیار ناچیز بوده است. شرایط اخیر برای ضریب فنریت نیز برقرار بوده و تأثیر آن در شیفت فازی ناچیز گزارش شده است. آن‌ها همچنین در ادامه به‌صورت تجربی، جدایش بسامدی و شیفت فازی را با بهره‌گیری از ویبرومتر لیزری بررسی کرده و با افزودن جرم روی محوری که بسامد بالاتری دارد، جدایش بسامدی را کاهش داده‌اند. همچنین ایشان مدعی شده‌اند که کاهش جدایش بسامدی سبب کاهش شیفت فازی شده است، اما برای این موضوع نتایج تجربی ارائه نکرده و نیز نشان داده‌اند که رسیدن به یک مقدار کمینه از جدایش بسامدی سبب حذف شیفت فازی خواهد شد.

با بررسی منابعی که در ارتباط با بالانس رزوناتورها منتشر شده است، توزیع نامتقارن جرم و ضریب فنریت- ناشی از ایده‌آل نبودن ماده‌ی اولیه و فرایند تولید قطعه- به‌عنوان عوامل اساسی مؤثر در نابالانسی رزوناتورها شناخته شده‌اند، که جدایش بسامدی و شیفت فازی را ایجاد می‌کنند. باید توجه داشت که اثر دو عامل ذکرشده را نمی‌توان از هم تفکیک کرد و تضعیف عملکرد رزوناتور، محصول مشترک آن‌هاست. نکته‌ی قابل توجه این است که انجام بالانس با هدف حذف عوامل ایجاد نابالانسی سبب حذف عدم تقارن در توزیع جرم و ضریب فنریت نمی‌شود؛ بلکه هدف از بالانس، کاهش جدایش بسامدی و شیفت فازی است. البته نتایج ارائه‌شده در منابع نشان داده‌اند که اگر جدایش بسامدی به‌عنوان پارامتر کنترلی اصلی در فرایند بالانس قرار گیرد؛ کاهش آن به یک مقدار کمینه، حذف شیفت فازی را نیز به همراه خواهد داشت.

در پژوهش حاضر، رزوناتور استوانه‌ای با استفاده از طراحی پارامتری در نرم‌افزار المان محدود با هدف دستیابی به بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسان طراحی و با هدف کاهش هزینه‌ی تولید از آلیاژ فلزی فولاد مارچینگ با ضریب میرایی پایین ساخته شده است. به‌منظور تحریک رزوناتور در مود ارتعاشی مطلوب و همچنین دریافت پاسخ نوسان‌ها از پیزوالکتریک‌ها استفاده شده است. پس از راه‌اندازی رزوناتور، با اندازه‌گیری بسامدهای طبیعی دو محور اصلی در مود طبیعی موردنظر، جدایش بسامدی اندازه‌گیری شده است. همچنین الگوی ارتعاشی رزوناتور، برای اولین بار، با استفاده از یک مکانیزم صوتی ثبت و به کمک آن شیفت فازی رزوناتور مذکور اندازه‌گیری شده است. استفاده از مکانیزم صوتی اخیر و اندازه‌گیری آسان جدایش بسامدی و شیفت فازی، زمینه را برای بالانس مکانیکی رزوناتور فراهم می‌سازد.

⁵ Rate table

⁶ Finite Element Simulations with ANSYS Workbench

⁷ Quality factor

¹ Xi

² Maraging steel

³ Arbitrary waveform generator

⁴ Oscilloscope

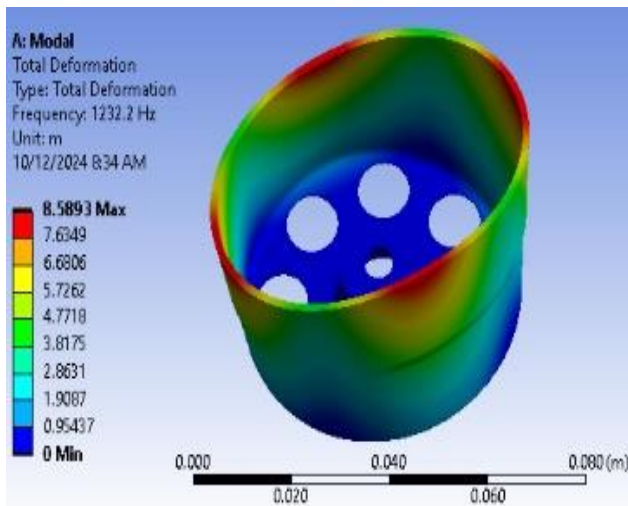


Figure 3. Vibration mode shape and natural frequency of the optimal resonator.

شکل ۳. شکل مود ارتعاشی و بسامد طبیعی رزوناتور بهینه.

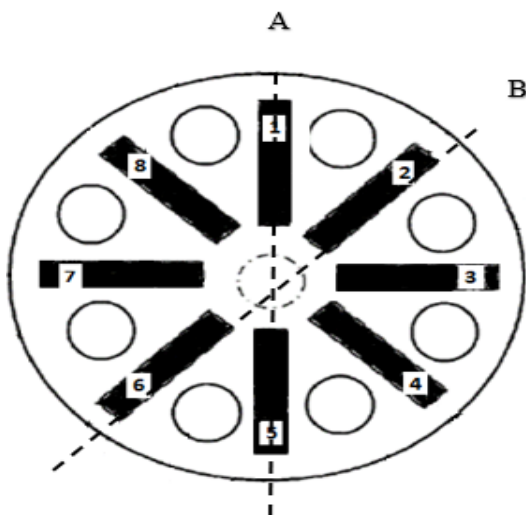


Figure 4. Arrangement and naming of piezos and axes.

شکل ۴. چینش و نامگذاری پیزوها و محورها.

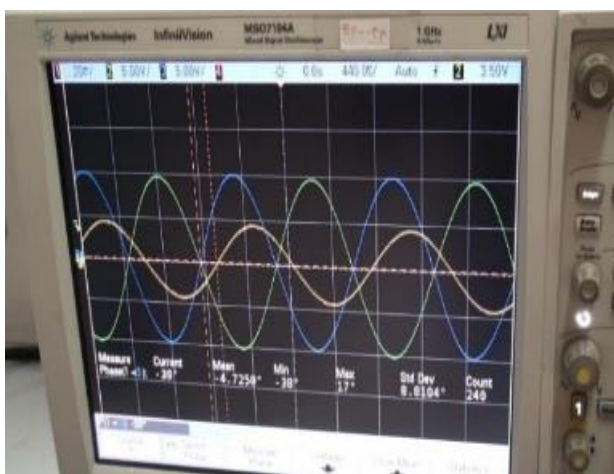


Figure 5. Vibration wave initiation and detection.

شکل ۵. راه‌اندازی و آشکارسازی موج ارتعاشی.

رزوناتور، ابتدا پارامترهایی که تأثیرگذاری در ضریب کیفیت رزوناتور برای آن‌ها محتمل است، مطابق جدول ۱ شناسایی شده و در ادامه، شبیه‌سازی پارامتری با هدف بهبود ضریب کیفیت رزوناتور صورت گرفته است.

به‌منظور بررسی میزان تأثیرگذاری پارامترهای هندسی، برای هر پارامتر یک بازه و در هر بازه دو مقدار در ابتدا و انتهای بازه تعیین شده‌اند. در ادامه، با استفاده از امکان شبیه‌سازی پارامتری در نرم‌افزار انسیس، شبیه‌سازی هارمونیک به روش فاکتوریل کامل انجام و با بررسی حساسیت دامنه‌ی نوسان‌ها به تغییر هر پارامتر، میزان تأثیرگذاری هر پارامتر سنجیده شده است. در ادامه، با حذف پارامترهای کم اثر، شبیه‌سازی هارمونیک با افزایش تعداد مقادیر در بازه به سه نقطه و نیز با هدف دستیابی به بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسان‌ها، شبیه‌سازی پارامتری صورت گرفته و درنهایت، هندسه‌ی رزوناتور انتخاب شده است.

شکل نهایی مجموعه در شکل ۲ و شکل مود ارتعاشی و بسامد طبیعی رزوناتور در شکل ۳ مشاهده می‌شوند. نتایج به‌دست‌آمده در تجزیه و تحلیل مودال، بسامد طبیعی رزوناتور در مود ارتعاشی موردنظر را برابر با 1232.2 نشان داده است. شایان ذکر است که بررسی حساسیت نتایج حل المان محدود به اندازه‌ی المان‌ها نیز انجام شده است.

۳.۲. نصب پیزوالکتریک‌ها و راه‌اندازی مجموعه

پس از تولید رزوناتور، ۸ پیزوالکتریک، که از این پس پیزوهای ۱ تا ۸ (مطابق شکل ۴) نامیده می‌شوند، نصب و مجموعه راه‌اندازی شده است.

به‌منظور راه‌اندازی یک ژيروسکوپ ارتعاشی، حلقه‌های کنترلی برای کنترل دامنه با هدف کنترل کمینه‌ی دامنه‌ی نوسان‌ها و همچنین کنترل بسامد با هدف کنترل بسامد نوسان‌ها در مود ارتعاشی موردنظر استفاده شده است. تحریک رزوناتور با تحریک پیزوالکتریک‌های ۱ و ۳ با اختلاف فاز 90° درجه انجام و همچنین موج پاسخ ایجادشده در پیزوالکتریک ۵ آشکارسازی شد، که در شکل ۵ مشاهده می‌شوند.

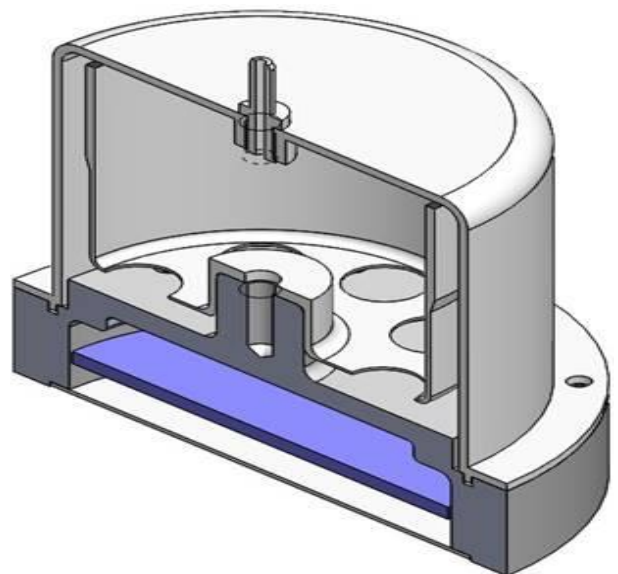


Figure 2. The final shape of the assembly and the resonator with stepped thickness.

شکل ۲. شکل نهایی مجموعه و رزوناتور با ضخامت پله‌ای.

۴.۲. آشکارسازی موقعیت گره‌ها و شکم‌ها روی رزوناتور

به‌منظور آشکارسازی موقعیت گره‌ها و شکم‌ها نسبت به محورهای تحریک و پاسخ و به‌دست‌آوردن شیفت فازی، مکانیزم صوتی استفاده شده است. در این مرحله، رزوناتور روی میز دوران نصب و ثبت دامنه‌ی موج صوتی با استفاده از میکروفونی با پاسخ بسامدی ۴۴۱۰۰ هرتز و استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ انجام شده است.

۳. نتایج و بحث

۱.۳. بررسی شکل مد ارتعاشی

ابتدا تحریک رزوناتور با استفاده از موج سینوسی با دامنه‌ی ۵ ولت در پیزو ۱ و دریافت پاسخ از پیزو ۵ آزموده شده است. در این شرایط با تغییر ممتد بسامد تحریک و نزدیک شدن به بسامد طبیعی موردانتظار براساس نتایج شبیه‌سازی مشاهده شده است که دامنه‌ی موج پاسخ در پیزو ۵ در بسامد ۱۲۲۹/۴۹ هرتز به مقدار بیشینه‌ی ۹۴۰ mV رسیده است. بسامد طبیعی تجربی، تطبیق مناسبی با بسامد طبیعی محاسبه‌شده در شبیه‌سازی (شکل ۳) داشته است. دریافت خروجی تقریباً مشابه از پیزوهای ۳ و ۷ و دامنه‌ی خروجی بسیار کوچک‌تر در پیزوهای ۲، ۴، ۶ و ۸ نشان‌دهنده‌ی ایجاد شکل مد ارتعاشی بیضی‌شکل در بسامد مذکور است. با وجود این، برابری نمودن دامنه‌ی خروجی‌های پیزوهای ۲، ۴، ۶ و ۸ و یا پیزوهای ۳ و ۷ و همچنین اختلاف فاز ۸۷ درجه‌ای بین پیزوهای ۱ و ۵، نشانگر وجود نابالانسی در رزوناتور بوده است.

شایان توجه است که اختلاف در دامنه‌ی موج‌های پاسخ در پیزوهای با شرایط مشابه را نمی‌توان فقط عوامل نابالانسی رزوناتور دانست، بلکه ایده‌آل نبودن ابعاد پیزوها و همچنین نحوه‌ی اتصال آن‌ها به رزوناتور نیز می‌توانند به‌منزله‌ی عوامل تأثیرگذار در این زمینه شناخته شوند. لذا، دامنه‌ی موج پاسخ در مرحله‌ی بالانس، به‌عنوان معیار ایده‌آلی برای قضاوت در مورد نابالانسی رزوناتور نخواهد بود. همچنین نتایج اخیر نشان می‌دهند به واسطه‌ی دقت مناسب در فرایند تولید رزوناتور، میزان نابالانسی‌ها در محدوده‌ای بوده است که مانع حصول شکل مد ارتعاشی مطلوب نشده است و امید می‌رود که کاهش نابالانسی در فرایند بالانس قابل حصول باشد. به‌علاوه، دامنه‌ی خروجی در پیزو ۵، حدود یک ولت و نسبت دامنه‌ی پاسخ به تحریک مقدار قابل توجهی بوده است. افزایش نسبت پاسخ به تحریک از این جهت مهم است که نشان می‌دهد امکان کاهش دامنه‌ی ولتاژ تحریک تا یک مقدار کمینه‌ی وجود دارد و این موضوع سبب کاهش

اختلال الکترونیکی ورودی و بهبود عملکرد رزوناتور خواهد شد. از دو عامل اساسی طراحی بهینه‌ی مکانیکی رزوناتور با ضخامت پله‌ای و انتخاب مناسب ماده‌ی استفاده‌شده در تولید رزوناتور با کیفیت ارتعاشی بالا می‌توان به‌عنوان عوامل اصلی در حصول نسبت مناسب ولتاژ پاسخ به تحریک نام برد.

۲.۳. اندازه‌گیری جدایش بسامدی

پس از بررسی اولیه‌ی عملکرد پیزوها و رزوناتور، اندازه‌گیری جدایش بسامدی دو محور اصلی انجام شده است. به‌منظور اطمینان از نتایج حاصل و دستیابی به داده‌های صحیح در ارتباط با جدایش بسامدی، اثر پارامترهای مختلف در خروجی پیزوالکتریک‌ها به‌صورت تجربی بررسی شده است؛ که شامل: تعداد پیزوهای استفاده‌شده به‌عنوان محرک، معیار اندازه‌گیری بسامد طبیعی، و وجود یا نبود درپوش روی مجموعه است، که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

۱.۲.۳. تأثیر تعداد پیزوهای محرک

رزوناتور در دو محور اصلی A و B (مطابق شکل ۴) به‌صورت مجزا انجام و براساس پاسخ دریافتی از هر محور، بسامد طبیعی آن اندازه‌گیری شده است. بسامد طبیعی (ω)، دامنه‌ی موج (A)، اختلاف فاز موج‌های تحریک و پاسخ ($\Delta\theta$)، و مقدار جدایش بسامدی (F.S.) در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که افزایش تعداد پیزوهای محرک سبب افزایش جزئی (کمتر از ۱٪) در جدایش بسامدی شده است، که البته چشمگیر نیست. باید توجه داشت که به‌دلیل تأثیرپذیری بسامد طبیعی از دما، بخشی از اختلاف بین بسامدهای طبیعی را می‌توان به تغییرات دمایی نسبت داد. همچنین نتایج ارائه‌شده نشان می‌دهند که افزایش تعداد پیزوهای محرک سبب افزایش دامنه‌ی موج پاسخ شده است، که در بهترین حالت، دامنه‌ی موج پاسخ، ۵۰٪ موج تحریک است. می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد پیزوهای محرک، تأثیر چندانی در جدایش بسامدی نداشته و مقدار جدایش بسامدی برای رزوناتور حاضر حدود یک هرتز بوده است.

۲.۲.۳. تأثیر معیار اندازه‌گیری بسامد طبیعی

برای اندازه‌گیری بسامد طبیعی رزوناتور به دو صورت می‌توان عمل کرد: الف) تغییر بسامد تحریک تا رسیدن به بیشینه‌ی دامنه‌ی موج پاسخ، و ب) تغییر بسامد تحریک تا رسیدن به اختلاف فاز ۹۰ درجه‌ای بین تحریک و پاسخ. برای بررسی تأثیر هر کدام از دو معیار اخیر در بسامد طبیعی ثبت‌شده، آزمون‌هایی

جدول ۲. تأثیر تعداد پیزوهای محرک در جدایش بسامدی.

Table 2. Effect of the number of piezo actuators on frequency split.

F.S (Hz)	$\Delta\theta$ (°)	A (mV)	ω (Hz)	Sensor	Actuator	Axes
1.01	87	940	1228.64	5	1	A
	87	1090	1229.65	6	2	B
1.06	88	1660	1228.48	7	1,5	A
	88	1730	1229.54	8	2,6	B
1.10	88	2390	1228.32	7	1,3,5	A
	88	2445	1229.42	8	2,4,6	B

¹ MATLAB

است. لین و همکاران (۲۰۱۵)^[۱۳] برای رزوناتور زنگوله‌ای فلزی، جدایش بسامدی ۱۶ هرتزی، ما و سو (۲۰۱۵)^[۱۴] نیز برای رزوناتور زنگوله‌ای فلزی جدایش بسامدی ۱۰ هرتزی را اندازه‌گیری کرده‌اند. ژی و همکاران (۲۰۱۲)^[۱۶] برای رزوناتور فلزی استوانه‌ای، جدایش بسامد ۵ هرتزی و برای رزوناتور استوانه‌ای از جنس فیوزسیلیکا، جدایش بسامدی ۰/۳۵ هرتزی را گزارش کرده‌اند. کوچک‌بودن میزان جدایش بسامدی، زمینه را برای انجام کم‌هزینه‌ی فرایند بالانس فراهم خواهد کرد.

۳.۳. ثبت موج ارتعاشی به کمک مکانیزم صوتی

پس از اندازه‌گیری جدایش بسامدی، تلاش شد تا روش مناسبی برای اندازه‌گیری مقدار شیف‌ت فازی انتخاب شود. در پژوهش‌های پیشین، عموماً اندازه‌گیری شیف‌ت فازی توسط دستگاه لیزری انجام شده است. با بررسی‌های به‌عمل‌آمده مقرر شد که در صورت امکان با استفاده از امکانات موجود، مکانیزمی کم‌هزینه و کارآمد طراحی شود. تلاش شد تا یک مکانیزم صوتی با استفاده از یک میکروفون ساده و نرم‌افزار متلب طراحی و استفاده شود. نتایج حاصل، نشان‌دهنده‌ی این حقیقت است که مکانیزم اخیر به خوبی و با کیفیت مناسب، امواج صوتی ناشی از ارتعاش را ثبت می‌کند. برای ثبت دقیق موقعیت نقاط از یک میز دوران استفاده شده است.

در شکل ۶، به‌عنوان نمونه‌ی امواج آکوستیکی ثبت‌شده در چرخش ۱۸۰ درجه‌ای رزوناتور مشاهده می‌شود. این نتایج مربوط به حالتی است که در آن رزوناتور در بسامد مطلوب یعنی نزدیک به ۱۲۳۰ هرتز در حال نوسان است. طبق انتظار، در چرخش ۱۸۰ درجه‌ای ثبت ۳ گره و ۲ شکم به‌خوبی نمایان شده است. شکل‌گیری این موج صوتی نشان از عملکرد مناسب مکانیزم طراحی‌شده برای ثبت تغییرات دامنه‌ی ارتعاش و همچنین ایجاد موج ارتعاشی به‌صورت مطلوب دارد.

برای بررسی دقیق‌تر ثبت موج ارتعاشی توسط مکانیزم صوتی، بدون چرخش رزوناتور لحظاتی کوتاه از نوسان یک نقطه‌ی دلخواه روی لبه‌ی رزوناتور ثبت شده است. در شکل ۷، شش سیکل نوسانی آن نقطه مشاهده می‌شود. بسامد نوسان‌های رزوناتور حدود ۱۲۳۰ هرتز و بسامد ثبت دامنه‌ی موج صوتی توسط میکروفون ۴۴۱۰۰ هرتز بوده و از این رو در هر سیکل نوسانی رزوناتور حدود ۳۶ نقطه ثبت شده است، که پاسخ مناسبی در ثبت نوسان‌ها را به‌دنبال داشته است. جالب توجه است که هر کدام از سیکل‌های نشان داده‌شده مربوط به زمانی کمتر از ۰/۰۱ ثانیه بوده است.

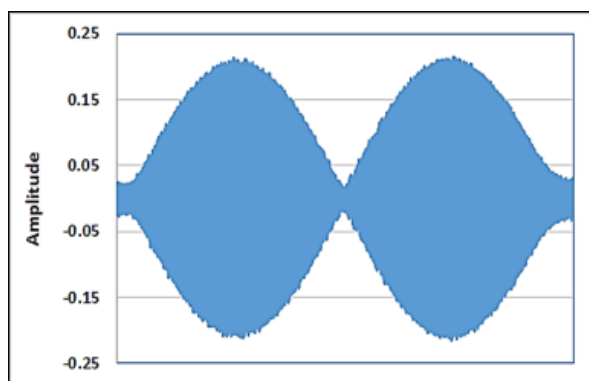


Figure 6. Acoustic waves recorded during a 180-degree rotation of the resonator.

شکل ۶. امواج آکوستیکی ثبت‌شده در چرخش ۱۸۰ درجه‌ای رزوناتور.

انجام شد و نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ نشانگر این حقیقت است که تأثیر معیار اندازه‌گیری بسامد طبیعی در مقدار بسامد طبیعی و مقدار جدایش بسامدی ناچیز است.

۳.۲.۳. تأثیر وجود درپوش در جدایش بسامدی

از آنجا که بالانس رزوناتور، برخلاف شرایط عملکردی، بدون وجود درپوش انجام می‌شود، نیاز است که اثر وجود یا نبود درپوش در جدایش بسامدی بررسی شود. نتایج ارائه‌شده در جدول ۴ نشان می‌دهند که اگرچه بسامد طبیعی هر محور به‌دلیل اثر سازه‌ای و همچنین اثر صوتی درپوش متفاوت است، اما تأثیر عوامل مذکور در جدایش بسامدی قابل توجه نیست.

همان‌گونه که نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۲ الی ۴ نشان می‌دهند، جدایش بسامدی رزوناتور تولیدشده حدود یک هرتز است و روش‌های مختلف آزمون، تأثیر چندانی در جدایش بسامدی محاسبه‌شده نداشته است. مقایسه‌ی میزان جدایش بسامدی با مقادیر ارائه‌شده در دیگر پژوهش‌ها برای رزوناتورهای فلزی نشان‌دهنده‌ی این حقیقت است که میزان جدایش بسامدی در رزوناتور تولیدی به‌دلیل توجه به ملاحظات لازم در انتخاب ماده و فرایند تولید مطلوب

جدول ۳. تأثیر معیار اندازه‌گیری بسامد طبیعی در جدایش بسامدی.

Table 3. Effect of natural frequency measurement criterion on frequency split.

Criteria	ω (Hz)	Actuator	F.S (Hz)
Maximum amplitude	(A)1228.64	1	1.01
	(B) 1229.65		
90° phase angle	(A)1228.36	1	1.06
	(B) 1229.42		
Maximum amplitude	(A)1228.48	2	1.06
	(B) 1229.54		
90° phase angle	(A)1228.31	2	1.06
	(B)1229.38		

جدول ۴. تأثیر وجود یا نبود درپوش در جدایش بسامدی.

Table 4. Effect of presence or absence of cap on frequency split.

condition	ω (Hz)	F.S. (Hz)
With cap	(A) 1228.64	1.01
	(B) 1229.65	
Without cap	(A) 1229.49	1.13
	(B) 1230.62	

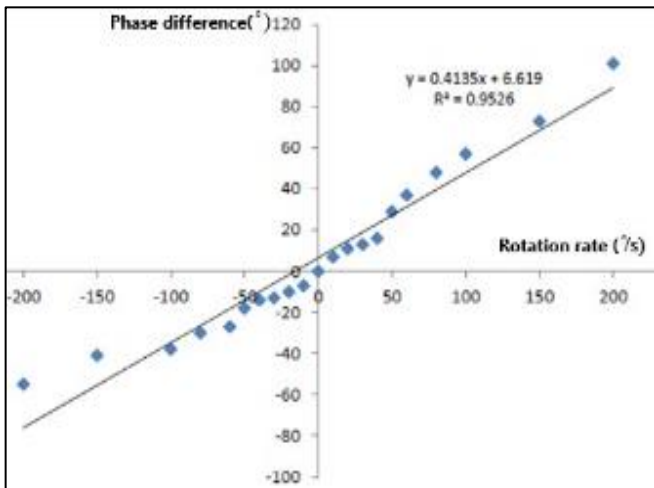


Figure 9. Rotation rate test of vibrating gyroscope.

شکل ۹. آزمون نرخ دوران ژيروسکوپ ارتعاشی مدور.

را گزارش کرده‌اند. اگرچه در دیگر پژوهش‌های اشاره‌شده در پژوهش حاضر، مقدار شیفت فازی به صورت کمی گزارش نشده است، اما تناسب موجود میان جدایش بسامدی و شیفت فازی، مؤید کمربودن میزان شیفت فازی در رزوناتور فلزی حاضر نسبت به دیگر پژوهش‌هاست.

۵.۳. آزمون پدیده‌ی ژيروسکوپ

پس از راه‌اندازی و بررسی شکل‌گیری شکل مد ارتعاشی مطلوب و اندازه‌گیری جدایش بسامدی و شیفت فازی، به‌منظور اثبات پدیده‌ی ژيروسکوپ، تأثیر نرخ دوران رزوناتور در جاماندگی موج ارتعاشی بررسی شده است. به این منظور ژيروسکوپ ارتعاشی ساخته‌شده روی میز آزمون سیستم اینرسی قرار گرفت و در سرعت‌های دورانی مختلف، میزان اختلاف فاز ایجادشده در موج ارتعاشی نسبت به موج ورودی با استفاده از دستگاه نوسان‌نگار ثبت شده است. این کار در چرخش‌های ساعتگرد و پادساعتگرد و در نرخ‌های دورانی متفاوت انجام و ثبت شده است. نتایج به‌دست آمده در شکل ۹ نشان می‌دهند که با ایجاد دوران، موج‌های ارتعاشی ورودی و خروجی اختلاف فاز پیدا کرده و همچنین با افزایش نرخ دوران بر حسب درجه بر ثانیه، میزان اختلاف فاز اخیر افزایش داشته است. تغییرات نرخ دوران در چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد در نمونه‌ی آزمایشگاهی، تقریب خطی مناسبی را به همراه داشته است. در رابطه‌ی رگرسیون ارائه‌شده در شکل مذکور، y اختلاف فاز، x نرخ دوران، و R رگرسیون برآوردشده در تقریب خطی است، که مقدار بیش از ۰/۹۵ را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن این حقیقت که ژيروسکوپ ساخته‌شده، یک نمونه‌ی آزمایشگاهی است، به وضوح عملکرد رزوناتور در انعکاس پدیده‌ی ژيروسکوپ مشاهده و تأیید شده است. توجه به این نکات حائز اهمیت است که رزوناتور استفاده‌شده از فلزی با ضریب کیفیت معمولی ساخته شده و حلقه‌های کنترل دامنه و تقارن، که تأثیر قابل توجهی در دقت خروجی مجموعه‌ی مذکور دارند، اجرا نشده‌اند. همچنین با وجود جدایش بسامدی و شیفت فازی، بالانس مکانیکی رزوناتور نیز به‌صورت محتمل تأثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد ژيروسکوپ مذکور خواهد داشت.

۴. نتیجه‌گیری

طراحی پارامتری رزوناتور با هدف رسیدن به بیشینه‌ی دامنه‌ی نوسان‌ها انجام شده است. بسامد طبیعی رزوناتور در نرم‌افزار انسیس (۱۲۳۲/۲ هرتز) و بسامد حاصل در نتایج آزمون تجربی (۱۲۲۹ هرتز) تطبیق مناسبی را نشان داده است.

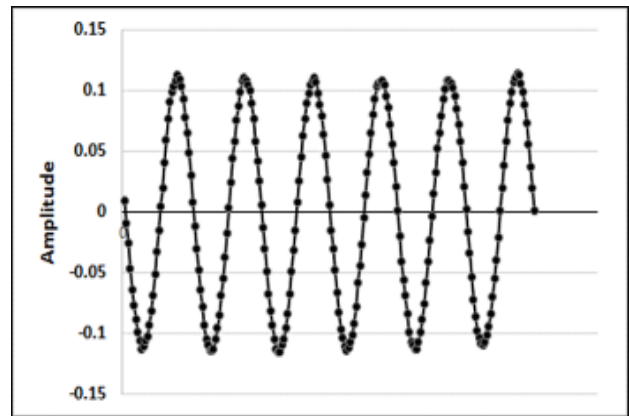


Figure 7. Oscillations of a fixed point on the resonator.

شکل ۷. نوسان‌های یک نقطه‌ی ثابت روی رزوناتور.

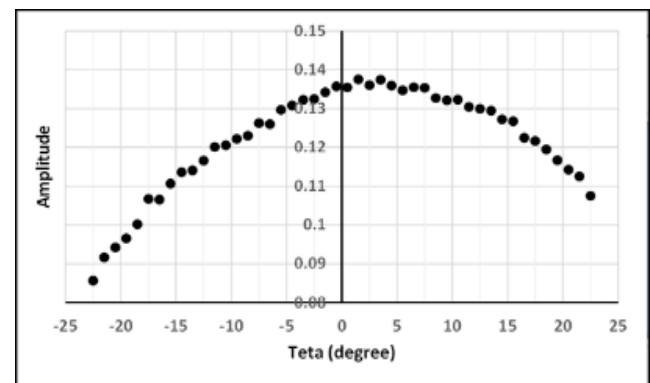


Figure 8. Data recorded for phase shift measurement.

شکل ۸. اطلاعات ثبت‌شده به‌منظور اندازه‌گیری شیفت فازی.

۴.۳. اندازه‌گیری شیفت فازی

با اثبات درستی عملکرد مکانیزم صوتی در ثبت دامنه‌ی موج ارتعاشی شکل‌گرفته روی لبه‌ی رزوناتور، گام بعدی اندازه‌گیری شیفت فازی است. برای اندازه‌گیری شیفت فازی، ابتدا نقطه‌ی میانی دقیق بین پیژوهای ۱ و ۸ روی بدنه‌ی رزوناتور نشان‌گذاری شده است. این نقطه روی محوری است که نسبت به محور A در شکل ۴ زاویه‌ی ۲۲/۵- دارد (جهت عقربه‌های ساعت مثبت در نظر گرفته شده است). سپس، میکروفون مقابل نقطه‌ی اخیر قرار گرفت تا دامنه‌ی موج صوتی آن نقطه را در طول ۵ ثانیه ثبت کند. برای حذف اثر نرخ دوران روی موج، بعد از هر یک درجه دوران، رزوناتور متوقف شده است، تا موج صوتی در طول ۵ ثانیه ثبت شود. این کار تا ۴۵ درجه ادامه پیدا کرد، تا در نهایت موج صوتی در نقطه‌ی میانی پیژوالکتریک‌های ۱ و ۲ با همان زاویه‌ی ۲۲/۵+ ثبت شود. در شرایط ایده‌آل باید در نیمه‌ی مسیر اخیر، بیشترین دامنه‌ی ارتعاشی ثبت شود. در شکل ۸، اطلاعات ثبت‌شده به‌منظور اندازه‌گیری شیفت فازی مشاهده می‌شود. پرواضح است که رزوناتور ایده‌آل نیست و مقدار بیشینه در زاویه‌ای غیر از صفر درجه رقم خورده است، که مقدار مذکور همان شیفت فازی است.

برای محاسبه‌ی شیفت فازی، یک منحنی با تابع چندجمله‌ای درجه پنجم از نقاط ثبت‌شده عبور داده شده است. محاسبات انجام‌شده نشان دادند که بیشینه‌ی منحنی در نقطه‌ای حدود ۴ درجه اتفاق افتاده است. لذا، نتیجه‌ای که قابل برداشت است، وجود شیفت فازی ۴ درجه‌ای است. به‌عنوان یک نمونه، لین و همکاران (۲۰۱۵)،^[۱۳] برای رزوناتور زنگوله‌ای فلزی، شیفت فازی ۹ درجه‌ای

قابل توجهی در مقدار جدایش بسامدی نداشته‌اند. به‌علاوه، استفاده از مکانیزم صوتی کارایی مناسبی در ثبت موقعیت الگوی ارتعاشی داشته و اندازه‌گیری شیف‌ت فازی به کمک مکانیزم صوتی، وجود شیف‌ت فازی ۴ درجه‌ای را نشان داده است. درنهایت، تأثیر نرخ دوران رزوناتور در جاماندگی موج ارتعاشی بررسی شده و ثبت تغییرات نرخ دوران در چرخش ساعتگرد و پادساعتگرد در ژيروسکوپ، تقریب خطی مناسبی را به همراه داشته است.

نتایج آزمون‌های تجربی نشان داده است که طراحی پارامتری رزوناتور با ضخامت پله‌ای با هدف رسیدن به دامنه‌ی بیشینه‌ی نوسان‌ها، سبب دستیابی به نسبت مناسبی برای دامنه‌ی پاسخ (کمتر از ۱ ولت) به تحریک (۵ ولت) شده است. همچنین نتایج اندازه‌گیری جدایش بسامدی نشان داد که رزوناتور موردنظر، جدایش بسامدی تقریباً یک هرتزی داشته و عواملی مانند تعداد پیوندهای محرک، معیار اندازه‌گیری بسامد طبیعی و نصب درپوش مجموعه، تأثیر

References - منابع

1. Mahmoudian, M., Filho, J., Melicio, R., Rodrigues, E., Ghanbari, M. and Gordo, P., 2023. Three-dimensional performance evaluation of hemispherical coriolis vibratory gyroscopes. *Micromachines*, 14(2), 254. <https://doi.org/10.3390/mi14020254>.
2. Remillieux, G. and Delhay, F., 2014, September. Sagem coriolis vibrating gyros: A vision realized. In 2014 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), pp. 1-13. IEEE. <https://doi.org/10.1109/InertialSensors.2014.7049409>.
3. Jia, J., Ding, X., Qin, Z., Ruan, Z., Li, W., Liu, X. and Li, H., 2021. Overview and analysis of MEMS Coriolis vibratory ring gyroscope. *Measurement*, 182, 109704. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109704>.
4. Amal, A. and Davidson, R.A., 2021, March. Design and development of control electronics for coriolis vibratory gyroscopes. In 2021 IEEE Aerospace Conference, pp.1-10. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AERO50100.2021.9438329>.
5. Xiao, P., Qiu, Z., Pan, Y., Li, S., Qu, T., Tan, Z., Liu, J., Yang, K., Zhao, W., Luo, H. and Qin, S., 2020. Influence of electrostatic forces on the vibrational characteristics of resonators for coriolis vibratory gyroscopes. *Sensors*, 20(1), 295. <https://doi.org/10.3390/s20010295>.
6. Hou, B., Zhu, Y., He, C., Wang, W., Ding, Z., He, W., He, Y. and Che, L., 2024. A 3D-printed microhemispherical shell resonator with electrostatic tuning for a Coriolis vibratory gyroscope. *Microsystems & Nanoengineering*, 10(1), 32. <https://doi.org/10.1038/s41378-024-00659-8>.
7. Apostolyuk, V., 2016. Coriolis vibratory gyroscopes. In *Theory and Design*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-22198-4>.
8. Delahaye, L., Guérard, J. and Parrain, F., 2017, May. Coriolis Vibrating Gyroscope Modelling for parametric identification and optimal design. In *Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)* pp. 1-5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/DTIP.2017.7984461>.
9. Sung, W.T., Sung, S., Lee, J.G. and Kang, T., 2007. Design and performance test of a MEMS vibratory gyroscope with a novel AGC force rebalance control. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 17(10), 1939. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/10/003>.
10. Vatanparvar, D. and Shkel, A.M., 2020, October. Instabilities due to electrostatic tuning of frequency-split in coriolis vibratory gyroscopes. In 2020 IEEE S (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SENSOR47125.2020.9278845>.
11. Liu, J.Y., 2024, March. Auxiliary Gyroscope Approach for Balanced Performance via Gyro Self-Calibration. In 2024 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/INERTIAL60399.2024.10502051>.
12. Loper, E.J. and Lynch, D.D., 1983. Projected system performance based on recent HRG test results (low noise inertial rotation sensor). In *Digital Avionics Systems Conference, 5 th, Seattle, WA*, p. 18.
13. Lin, Z., Fu, M., Deng, Z., Liu, N. and Liu, H., 2015. Frequency split elimination method for a solid-state vibratory angular rate gyro with an imperfect axisymmetric-shell resonator. *Sensors*, 15(2), pp. 3204-3223. <https://doi.org/10.3390/s150203204>.
14. Ma, X. and Su, Z., 2015. Analysis and compensation of mass imperfection effects on 3-D sensitive structure of bell-shaped vibratory gyro. *Sensors and Actuators A: Physical*, 224, pp. 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.013>.
15. Zeng, K., Hu, Y., Deng, G., Sun, X., Su, W., Lu, Y. and Duan, J.A., 2017. Investigation on eigenfrequency of a cylindrical shell resonator under resonator-top

- trimming methods. *Sensors*, 17(9), 2011. <https://doi.org/10.3390/s17092011>.
16. 1. Xi, X., Wu, Y., Wu, X., Tao, Y. and Wu, X., 2012. Investigation on standing wave vibration of the imperfect resonant shell for cylindrical gyro. *Sensors and Actuators A: Physical*, 179, pp.70-77. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2012.03.031>.
17. Ma, X. and Su, Z., 2015. Analysis and compensation of mass imperfection effects on 3-D sensitive structure of bell-shaped vibratory gyro. *Sensors and Actuators A: Physical*, 224, pp.14-23. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.01.013>.