



موقعیت دهی با یک موتور التراسونیک موج روان از طریق کنترل دامنه‌ی پالس ورودی

سیده تینا آل آقا^۱، یوسف حجت^{۲*}، بهزاد قوامی نمین^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: yhojjat@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۶ اردیبهشت ۱۴۰۳

پذیرش: ۴ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژگان:

موتور التراسونیک

موج روان

استک پیزوالکتریک

موقعیت دهی

هدف این مقاله موقعیت دهی یک موتور التراسونیک موج روان با اعمال ورودی‌های پالسی کنترل شده است. به این منظور یک موتور التراسونیک ساخته شده که استاتور آن یک سیم مستقیم است. در موتورهای التراسونیک با موج روان حرکت توسط موج روان ایجاد می‌شود. برخلاف موتورهای التراسونیک کرمی شکل که به سادگی موقعیت دهی می‌شوند، موقعیت دهی با موتورهای موج روان مشکل بوده و در این زمینه پژوهشی نیز گزارش نشده است. در این مقاله به کمک یک پیزوالکتریک چند لایه، موج روان داخل استاتور خطی ایجاد شده سپس با پیدا کردن فرکانس مطلوب موج روان در استاتور ایجاد شده و باعث حرکت اسلایدر روی استاتور می‌شود. هدف این پژوهش به دست آوردن کوچکترین گام حرکت و موقعیت دهی با استفاده از موتور التراسونیک ساخته شده است. به این منظور با اعمال ولتاژهای پالسی موتور به حرکت درآمده و با کنترل دامنه، موقعیت دهی انجام می‌شود. در ادامه به منظور بررسی مودهای ارتعاشی استاتور طراحی شده و استخراج مودهای قابل استفاده برای راه اندازی موتور، فرکانس‌های طبیعی مجموع استک پیزوالکتریک و مفتول فولاد زنگ‌نزن با استفاده از روش اجزای محدود مورد تحلیل قرار گرفت و مطابقت فرکانس‌های طبیعی بدست آمده در آنالیز مودال و پاسخ فرکانسی نیز مشاهده گردید. در نهایت کوچکترین پالسی که باعث حرکت اسلایدر می‌شود به دست آمده و حداقل گام جابه‌جایی قابل دسترس تعیین می‌گردد. تاکنون کوچک‌ترین گام جابه‌جایی برابر با 0.2 میلی‌متر به دست آمده و در ادامه پژوهش امکان دستیابی به گام‌های کوچکتر بررسی خواهد شد.

Positioning by traveling wave ultrasonic motor via input pulse amplitude

Seyedeh Tina Alagha¹, Yousef Hojjat^{2*}, Behzad Ghavami Namin³

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Professor, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

3- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: yhojjat@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 15 May 2024

Accepted: 24 June 2024

Keywords:

Ultrasonic Motor

Traveling Wave

Piezoelectric Stack

Positioning

Abstract

The purpose of this article is to position a travelling wave ultrasonic motor by applying controlled pulse inputs. An ultrasonic motor with a straight wire stator has been constructed for this purpose. In travelling wave ultrasonic motors, movement is generated by travelling waves, unlike worm-shaped ultrasonic motors that are easily positioned. Positioning with travelling wave motors is challenging, and no research has been reported in this field. In this study, a travelling wave is created inside the linear stator using a multi-layer piezoelectric. By identifying the desired frequency, the travelling wave is generated in the stator, causing the slider to move along it. The research aims to achieve the smallest movement step and precise positioning using the ultrasonic motor. The motor is moved by applying pulse voltages, and positioning is controlled by managing the range. To examine the vibration modes of the designed stator and extract usable modes for motor initiation, the natural frequencies of the piezoelectric stack and steel wire were analyzed using the finite element method. Correspondence between the natural frequencies obtained in the modal analysis and frequency response was observed. Finally, the smallest pulse causing slider movement was identified, and the minimum achievable displacement step was determined. The smallest displacement step achieved so far is 0.2 mm. Further research will investigate the possibility of achieving smaller steps.

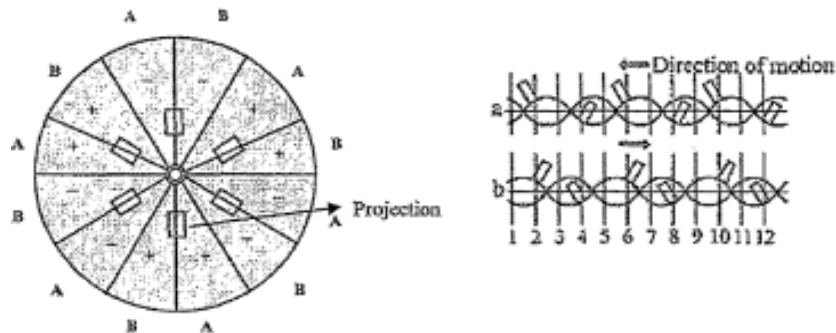
Please cite this article using:

Alagha ST, Hojjat Y, Ghavami Namin B. Positioning by traveling wave ultrasonic motor via input pulse amplitude. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Sep 22;11(7):1-9. doi: 10.22034/ijme.2024.457356.1958 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

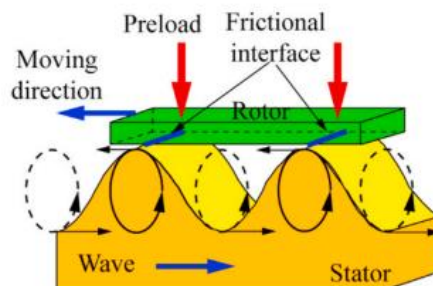
۱- مقدمه

موتورهای التراسونیک، انواع جدیدی از موتورها می‌باشند که قادر به ایجاد دانسیته‌ی انرژی و یا به عبارتی انرژی بر واحد وزن بالاتر نسبت به سایر موتورهای موجود می‌باشند. عملکرد موتورهای التراسونیک بر مبنای فرکانس بالا و دامنه‌ی کم ارتعاشات است. معمولاً در این نوع موتورها از پیزوالکتریک استفاده می‌شود. ویژگی مواد پیزوالکتریک این است که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی و بالعکس تبدیل می‌کنند [۱]. این ویژگی به خصوص در ابزارها و دستگاه‌هایی که نیاز به عملگر یا حسگر دقیق دارند، بسیار ارزشمند است. این موتورها به علت ویژگی‌هایی نظیر کارایی بالا و خاصیت ترمزی در زمان توقف، در صنایع مختلف از قبیل رباتیک و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند. موتورهای التراسونیک از حرکت موجی-ارتعاشی پیشرونده‌ی استاتور استفاده کرده و آن را تبدیل به یک حرکت دورانی و یا خطی می‌نمایند. موتورهای التراسونیک را براساس نوع موج می‌توان به دو دسته‌ی موتورهای التراسونیک با موج روان^۱ و موتورهای التراسونیک با موج ایستا طبقه‌بندی کرد [۲]. در موج ایستا گره و شکم ارتعاشی دائمی به صورت متوالی تشکیل می‌شود. در یک نوع از موتورهای التراسونیک با موج ایستا جهت حرکت، بستگی به مکان تماس اسلایدر و استاتور در طول موج دارد (شکل ۱).



شکل ۱ موتور التراسونیک با موج ساکن [۳]

در این موتور برای تغییر جهت دوران از دو گروه الکترود استفاده شده است. یک گروه برای دوران موتور در جهت ساعت‌گرد و گروه دیگر برای دوران موتور در جهت پاد ساعت‌گرد استفاده شده است. الکترودهای پیزوالکتریک به دوازده قسمت تقسیم بندی شده و زائده‌ها در میان این تقسیمات قرار گرفته است. زمانی که گروه A تحریک می‌شود و گروه B به صورت اتصال کوتاه در می‌آید، زائده‌ها به سمت چپ منحرف شده و موتور به سمت چپ حرکت می‌کند. مکان قله‌ها و دره‌ها در هر نیم‌پریود عوض می‌شود. با تحریک گروه B و اتصال کوتاه شدن گروه A اسلایدر به سمت راست حرکت می‌کند. در موتورهای التراسونیک با موج روان موتور التراسونیک شامل یک استاتور می‌باشد که سطح آن تحت تغییر شکل در جهت طولی و عرضی قرار دارد. این حرکت‌ها باعث می‌شوند که هر نقطه روی استاتور بر روی یک مکان هندسی بیضی شکل حرکت کند. جهت پیشروی موج پیشرونده جهت دوران موتور را مشخص می‌کند. اسلایدر که روی استاتور فشار داده می‌شود، توسط این موج پیشرونده و با نیروی اصطکاک حرکت می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲ ایجاد موج پیشرونده در استاتور موتور التراسونیک [۴]

^۱ Travelling Wave

در سال ۲۰۲۰ شنگلین مو و همکاران [۵] مقاله‌ای را با عنوان کنترل هوشمند موتور التراسونیک با استفاده از کنترل پی‌آی‌دی^۱ همراه با شبکه‌های عصبی به شکل کلونی زنبور منتشر کردند. در این تحقیق، برای به دست آوردن عملکرد کنترل رضایت بخش موتور التراسونیک برای موقعیت‌دهی، یک روش هوشمند ترکیبی مبتنی بر کنترل پی‌آی‌دی با استفاده از شبکه‌های عصبی همراه با الگوریتم کلونی زنبور پیشنهاد شده بود. با استفاده از روش کنترل هوشمند پیشنهادی، گیرنده‌های کنترل پی‌آی‌دی به طور خودکار تنظیم شده بودند تا در نهایت خطاها در کنترل موقعیت به حداقل برسد.

نینگ‌ژو و همکاران [۶] مقاله‌ای را با عنوان یک موتور التراسونیک با موج روان با شفت انعطاف‌پذیر با ویژگی موقعیت‌دهی با دقت بالا منتشر کردند. در این مقاله برای بهبود دقت موقعیت‌یابی موتور التراسونیک با موج روان از یک شفت انعطاف‌پذیر استفاده شده و ساختاری برای کاهش نوسانات زوایای گام و سرعت، طراحی شد. عملکرد پاسخ شروع و توقف موتور التراسونیک، به صورت تئوری تجزیه و تحلیل شد. در این مقاله فرایند موقعیت‌یابی شامل دو حالت پیوسته و حالت پله‌ای است که در حالت پیوسته، سرعت موتور با کنترل کننده‌ی پی‌آی‌دی بر اساس مشخصه‌های فرکانس و سرعت موتور کنترل می‌شود و در حالت پله‌ای، مشخصات پله‌ی موتور، تحت گشتاور بارهای مختلف آزمایش شد و مقادیر مختلف ولتاژ برای یافتن حداقل زاویه‌ی گام اعمال شد. در انتها از آزمایش‌ها به دست آمد که نوسانات زاویه‌ای موتور با شفت انعطاف‌پذیر بسیار کمتر از موتور با شفت معمولی است.

زنگ و همکاران [۷] مقاله‌ای را با عنوان موقعیت‌دهی سریع و دقیق یک موتور التراسونیک بر اساس تئوری کاهش اصطکاک التراسونیک منتشر کردند که از یک استراتژی جدید در جهت موقعیت‌دهی استفاده شده بود. این استراتژی به روش ابتدا خاموش کردن یک فاز و سپس خاموش کردن دو فاز انجام شد. در این موتور التراسونیک دایره‌ای شکل با کنترل فرکانس اسلایدر و مدت زمان خاموش شدن تک فاز، جابجایی لغزشی صفر بین اصطکاک استاتور و اسلایدر و در طول نوسان پیچشی شفت محقق شد که در نتیجه انحراف جابجایی را نیز کاهش داد.

لین یانگ و همکاران [۸] مقاله‌ای را تحت عنوان روش کنترل موقعیت برای موتورهای التراسونیک بر اساس تئوری امواج روان به شکل ضربانی منتشر کردند که در این موتور از استاتور دندان‌های شکل استفاده شده بود و بر اساس نظریه‌ی امواج روان ضربانی موتور التراسونیک می‌تواند به صورت متناوب و با تغییر در اختلاف فرکانس، به جلو و عقب حرکت کند. همچنین با افزایش و سپس با کاهش دامنه سرعت، سرعت حرکت کاهش داده می‌شود. از این مرحله‌ی «کنندسازی موتور التراسونیک» برای طرح موقعیت‌دهی موتور التراسونیک استفاده شده بود. برای اطمینان از کاهش قابل قبول خطای موقعیت و کوتاه کردن زمان موقعیت‌یابی، در حین عملکرد عادی، تفاوت فرکانس سیگنال‌های دوفاز نیز تغییر می‌کردند. این روش نسبت به روش‌های معمول کنترل موقعیت، ویژگی‌های جذابی از جمله زمان موقعیت‌یابی کوتاه، عملیات بی‌صدا و کنترل ساده را محقق می‌کرد.

لوئیس لونا و همکاران [۹] مقاله‌ای را با عنوان یک کنترل کننده‌ی غیرخطی مبتنی بر تاخیر برای موقعیت‌دهی موتور التراسونیک خطی با دقت نانومتر منتشر کردند و در این مقاله از یک کنترل‌گر غیرخطی با استفاده از تاخیر برای کنترل موقعیت موتورهای خطی التراسونیک استفاده شده است. این کنترل‌گر جدید دارای ساختاری با دو حلقه‌ی تو در تو است. حلقه داخلی سرعت، از طریق یک کنترل‌گر انتگرالی که دارای یک تاخیر زمانی در ساختار خود است، تنظیم می‌شود و حلقه‌ی موقعیت خارجی از یک کنترل‌گر نسیبی غیرخطی استفاده شده بود. نتایج آزمایشی روی این موتور خطی التراسونیک نشان داد که عملکرد کنترل‌گر پیشنهادی واکنش دقیق و سریعی را به رغم اثر اختلال‌های داخلی و پدیده‌های اصطکاک داشت و قابل اطمینان بوده است.

نوآوری این مقاله، این است که در پژوهش‌های پیشین که با هدف موقعیت‌دهی بوده است، از استاتورهای دندان‌های شکل یا کرمی شکل^۲ استفاده شده است و تاکنون در مورد موقعیت‌دهی موتور التراسونیک با استاتور سیمی و موج روان تحقیقی گزارش نشده است. در این پژوهش برای نخستین بار موقعیت‌دهی توسط موتور التراسونیک و با استفاده از استاتور سیمی و موج روان انجام شده است. در این مقاله ابتدا شبیه‌سازی مودال استاتور (مجموعه‌ی استک پیزوالکتریک و مفتول) به روش اجزای محدود انجام گرفت. به این ترتیب فرکانس‌های تشدید مجموعه و مدهای ارتعاشی قابل استفاده برای حرکت موج روان، استخراج شد؛ سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده از شبیه‌سازی مودال، شبیه‌سازی پاسخ فرکانسی مجموعه انجام گرفت. با جمع‌بندی نتایج شبیه‌سازی، فرکانس کاری برای آزمون تجربی موتور پیشنهادی انتخاب گردید. در نهایت مجموعه آزمایشی ساخته و آزمایش‌های لازم انجام شد.

¹ PID (Proportional-Integral-Derivative Controller)

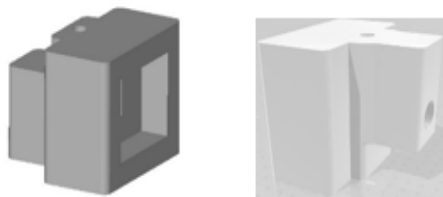
² Inchworm

۲- اصول حاکم و ساختار موتور

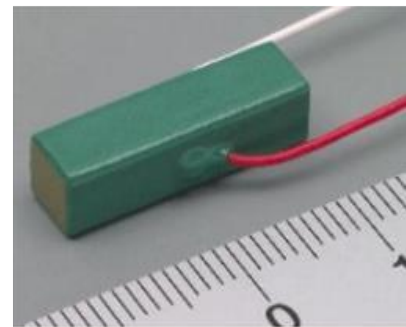
در این مقاله محرک اصلی موتور التراسونیک ساخته شده، پیزوالکتریک چند لایه^۱ می‌باشد. به کارگیری استک پیزوالکتریک به منظور ایجاد موج روان در مقایسه با استاتورهای چند فاز دارای مزایایی می‌باشد، که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش قابل توجه ولتاژ کاری و کوچک شدن ابعاد موتور و قابلیت به کارگیری مدهای ارتعاشی مختلف استک پیزوالکتریک اشاره کرد [۱۰]. مدل استک پیزوالکتریک استفاده شده در این پژوهش D0505AE16 می‌باشد، ابعاد آن $5 \times 5 \times 20$ میلی‌متر و بیشینه‌ی جابه‌جایی آن $5/17$ میکرومتر با فرکانس تحریک ۶۹ کیلوهرتز و ظرفیت خازنی $4/1$ میکروفاراد و سختی ۴۹ نیوتون بر میکرومتر می‌باشد (شکل ۳-الف). اولین قدم برای انتقال ارتعاشات استک پیزوالکتریک به استاتور، آماده سازی یک اتصال دهنده‌ی استاتور سیمی به استک پیزوالکتریک می‌باشد، بهترین اتصال به گونه‌ای است که استاتور سیمی به طور مستقیم به محرک استک پیزوالکتریک متصل شود و ارتعاش به صورت مستقیم به سیم منتقل شود. اگرچه این امر با استفاده از چسب‌های قوی امکان پذیر می‌باشد، اما به دلیل این‌که برای آزمایش‌های متعدد به دلایل مختلف، استاتور سیمی نیاز به تعویض دارد، استفاده از چسب مناسب نیست. به همین دلیل، اتصال دهنده‌ای که به خوبی ارتعاش را منتقل کند و همچنین قابلیت تعویض استاتور را داشته باشد به کمک پرینت سه بعدی از جنس پلی اکتیک اسید^۲ طراحی و ساخته شد. جنس PLA دارای خاصیت صلبیت بالایی است و انتقال ارتعاش را به خوبی انجام می‌دهد (شکل ۳-ب). استاتور سیمی و خطی استفاده شده در این پژوهش از جنس SUS304 می‌باشد که دارای صلبیت بالایی می‌باشد و همچنین خاصیت فنری خوبی دارد که باعث می‌شود انتقال ارتعاشات به خوبی انجام شود. به منظور ایجاد موج روان در استاتور و جلوگیری از ایجاد موج ایستا در اثر بازگشت موج از انتهای سیم، انتهای سیم به صورت حلقه‌ای، شکل داده شده و یک طرف آن نیز باز است. استاتور سیمی استفاده شده دارای قطر سیم $0/5$ میلی‌متر و قطر حلقه‌ی 30 میلی‌متر می‌باشد. اسلایدر مورد استفاده در این مقاله به شکل استوانه‌ای با قطر 9 میلی‌متر و ضخامت 8 میلی‌متر می‌باشد؛ همچنین جنس اسلایدر مورد استفاده پلی متیل متاکریلات^۳ است. علاوه بر این دارای وزن آن $0/68$ گرمی بوده و وسط آن یک سوراخ به قطر 2 میلی‌متر ایجاد شده است که استاتور سیمی از وسط این سوراخ عبور می‌کند. همچنین از یک شناساگر (تارگت) برای حسگر جابه‌جایی از جنس الومینیوم به طول $2/5$ سانتی‌متر و عرض 9 میلی‌متر استفاده شده و با چسب قطره‌ای به اسلایدر چسبانده شده است (شکل ۳-ج).



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۳ الف) استک پیزوالکتریک D0505AE16، ب) اتصال دهنده‌ی استاتور سیمی به استک پیزوالکتریک از جنس PLA، ج) اسلایدر استوانه‌ای شکل

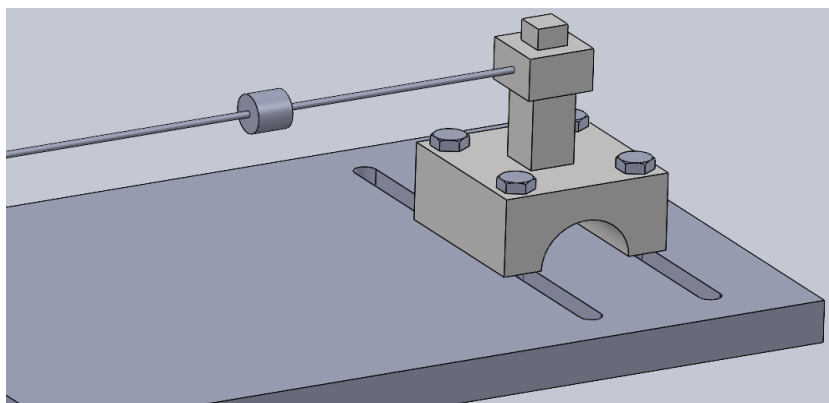
در نهایت یک پایه‌ی اصلی از جنس پلکسی طراحی و ساخته شد که روی این پایه دو شیار جهت سفت شدن و حرکت راحت برای پایه‌ی استک پیزوالکتریک ایجاد گردید و پایه‌ی استک پیزوالکتریک توسط پیچ به این پایه بسته شد. شکل کلی تجهیزات ابتدا در نرم‌افزار طراحی سه بعدی سالیدورکس^۴ مطابق شکل ۴ شبیه‌سازی و سپس مطابق شکل ۵ ساخته شد.

¹ Stack Piezoelectric

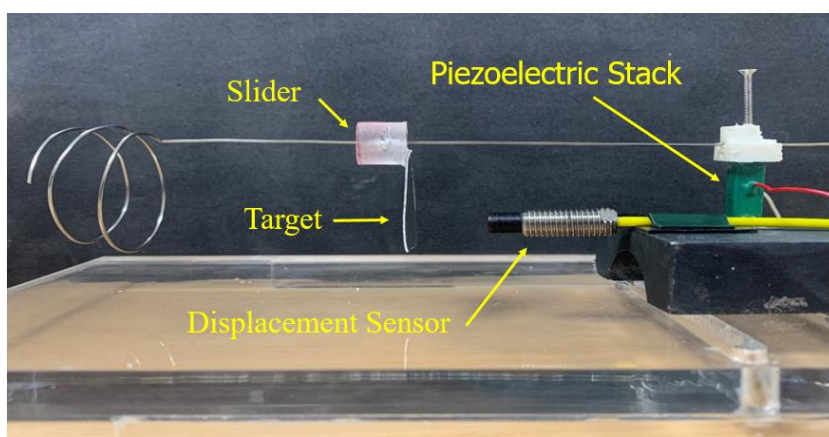
² PLA (Poly Lactic Acid)

³ PMMA ((Poly Methyl Methacrylate)

⁴ Solid Works



شکل ۴ شبیه‌سازی مجموعه‌ی آزمایشی در نرم‌افزار سالیدورکس

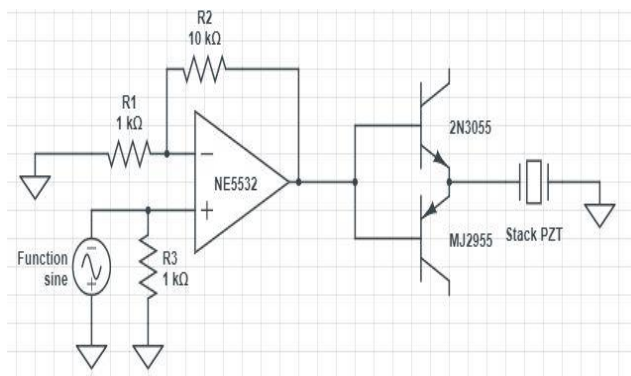


شکل ۵ مجموعه‌ی ساخته شده و شکل کلی موتور التراسونیک

باتوجه به اینکه استک پیزوالکتریک ظرفیت خازنی بالایی داشته و در فرکانس‌های بالا امپدانس آن افت می‌کند و نیاز به جریان دارند، درایورهای پیزوالکتریک قابلیت تامین این جریان را ندارند. به همین منظور نیاز به مداری است که بتواند این افت جریان را جبران کند. مدار کلاس B این نیاز را برطرف می‌کند. در تقویت‌کننده‌ی کلاس B از ترانزیستورهای مدل 2N3055 و MJ2955 استفاده شده است (شکل ۶).



(ب)



(الف)

شکل ۶ الف) شماتیک مدار کلاس B طراحی شده، ب) مدار ساخته شده

۳- روش تحقیق

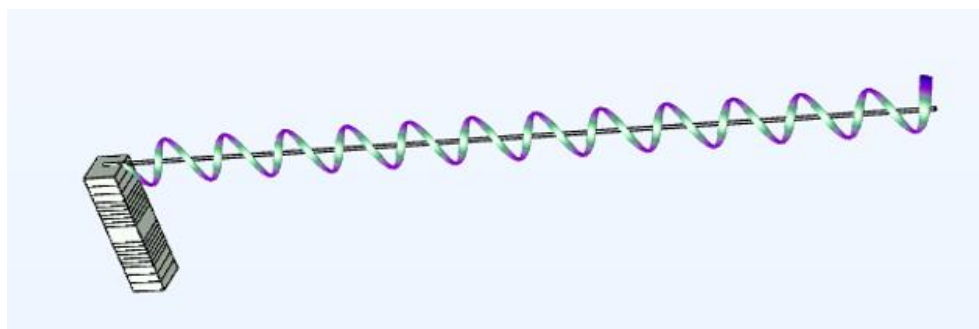
۳-۱- شبیه‌سازی

به منظور بررسی مودهای ارتعاشی استاتور طراحی شده و استخراج مودهای قابل استفاده برای راه اندازی موتور، فرکانس‌های طبیعی مجموع استک پیزوالکتریک و مفتول فولاد زنگ‌نزن با استفاده از روش اجزای محدود به صورت کوپل (شبیه‌سازی همزمان مکانیک جامدات و میدان‌های الکتریکی) مورد تحلیل قرار گرفت. شبیه‌سازی در نرم افزار کامسول^۱ انجام گرفته و خواص قطعات استاتور شبیه‌سازی شده در جدول ۱ آورده شده است. در مرحله دوم شبیه‌سازی، پاسخ فرکانسی ادمیتانس استاتور و مودهای ارتعاشی قابل تحریک استخراج گردید. در این شبیه‌سازی دامنه ولتاژ اعمالی به استک پیزو الکتریک ۱۰ ولت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱ خواص اجزای استاتور مورد استفاده در شبیه‌سازی

اجزای استاتور	جنس	چگالی	خواص الاستیک	گذردهی	میرایی	میرایی	میرایی کوپلینگ
				الکتریکی	مکانیکی	دی‌الکتریک	الکترومکانیکی
مفتول	SUS304	$7860 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$E = 199.844 \text{ GPa}$ $\nu = 0.29$	-	0.01	-	-
استک پیزوالکتریک	PZT-4	$7750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$c_{11}^E = 120.34 \text{ GPa}$ $c_{12}^E = 75.18 \text{ GPa}$ $c_{13}^E = c_{23}^E = 75.1 \text{ GPa}$ $c_{22}^E = 120.35 \text{ GPa}$ $c_{33}^E = 110.87 \text{ GPa}$ $c_{44}^E = c_{55}^E = 21.05 \text{ GPa}$ $c_{66}^E = 22.57 \text{ GPa}$	$\epsilon_{11} = 919.9$ $\epsilon_{22} = 919.1$ $\epsilon_{33} = 826.6$	0.008	0.01	0.07

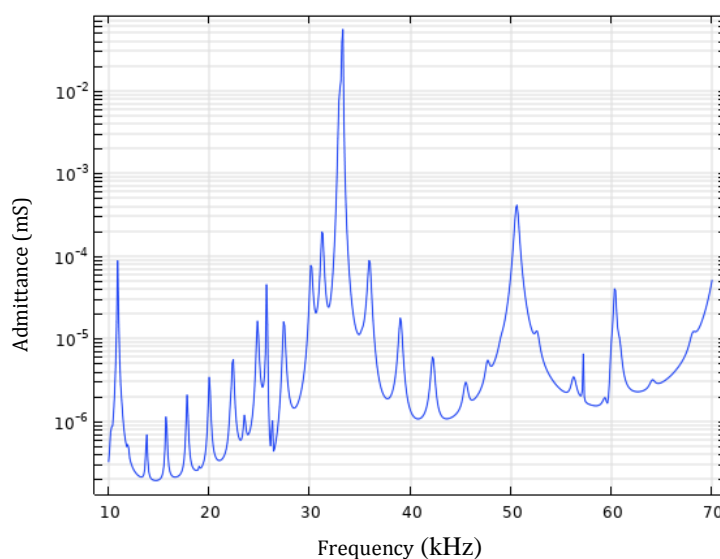
نتایج بدست آمده از آنالیز مودال در شکل ۷ آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مدهای طولی و خمشی استک پیزوالکتریک می‌توانند حرکت موج روان را در داخل استاتور سیمی ایجاد کرده و منجر به حرکت اسلایدر شوند.



شکل ۷ شکل موج روان در استاتور سیمی

در شکل ۸ پاسخ فرکانسی ادمیتانس مجموعه‌ی استک پیزوالکتریک و مفتول فولاد زنگ‌نزن نشان داده شده است. تمامی بیشینه‌های نسبی مشاهده شده در این نمودار فرکانس‌های تشدید مطلق و یا نسبی هستند که در اثر اعمال ولتاژ به پیزوالکتریک می‌توانند تحریک شوند.

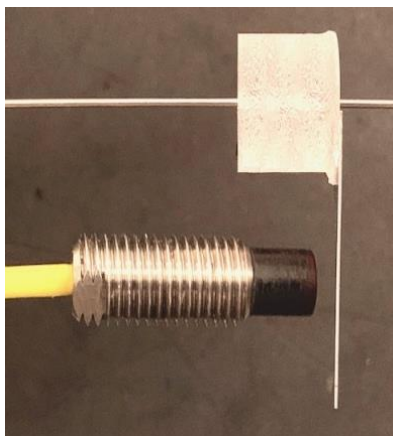
^۱ COMSOL Multiphysics 6.2



شکل ۸ پاسخ ادمیتانس مجموعه و فرکانس‌های تشدید

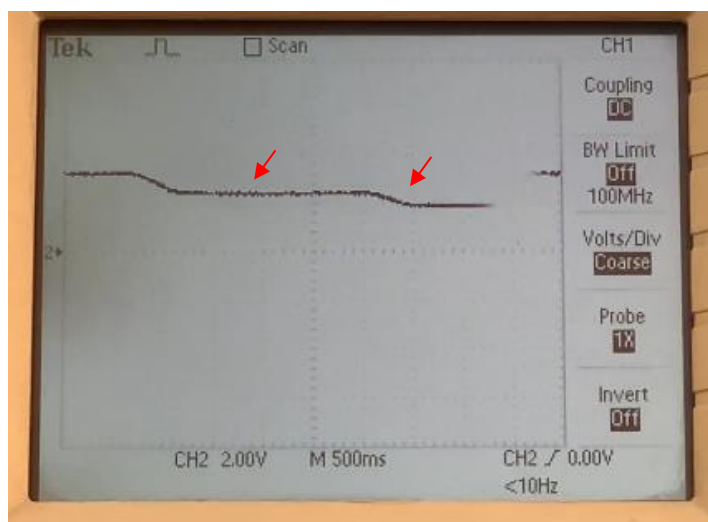
۳-۲- آزمایش تجربی

با اعمال ولتاژ به استک پیزوالکتریک و ایجاد موج روان در استاتور و همچنین پیدا کردن فرکانس مطلوب که ۴۱/۹۲ کیلوهرتز می‌باشد، اسلایدر شروع به حرکت روان و مطلوبی می‌کند. از یک سنسور القایی که توسط چسب به پایه‌ی استک پیزوالکتریک چسبانده شده، جهت اندازه‌گیری جابه‌جایی اسلایدر استفاده شده است (شکل ۹). با اعمال ولتاژ پالسی می‌توان حرکت اسلایدر را کنترل و آن را به حرکت در آورده یا متوقف کرد. خروجی سنسور القایی که میزان جابه‌جایی اسلایدر را نشان می‌دهد توسط اسیلوسکوپ بر حسب میلی‌ولت قابل مشاهده است.



شکل ۹ قرارگیری سنسور و اسلایدر

دامنه اندازه‌گیری سنسور القایی ۲ میلی‌متری است و در این فاصله می‌توان مقدار جابه‌جایی را در اسیلوسکوپ مشاهده کرد. اسلایدر با اعمال ولتاژ پالسی به صورت گامی حرکت قابل کنترلی دارد که بیشترین تعداد گام داده شده به اسلایدر شش گام می‌باشد. عرض هر پالس ۱ ثانیه و با توجه به فرکانس ۴۱/۹۲ کیلوهرتز تعداد موج روان در هر پالس ۴۱۹۲۰ می‌باشد. شکل ۱۰ نمونه‌ای از گام دوم و سوم می‌باشد که در نمایشگر اسیلوسکوپ قابل مشاهده است.



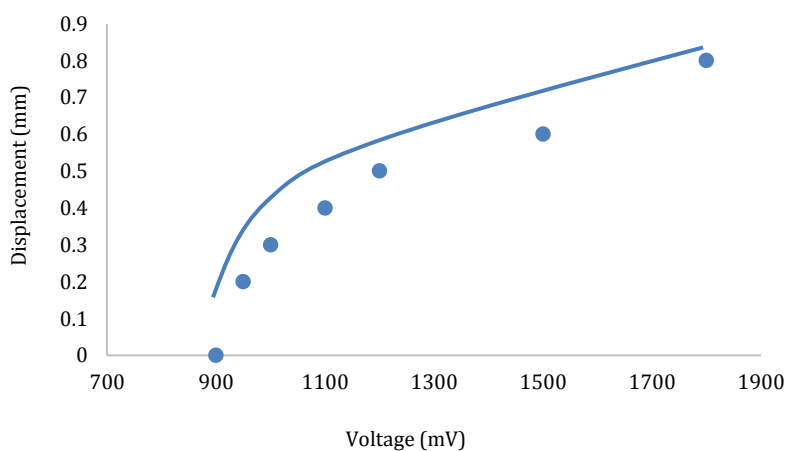
شکل ۱۰ نمایش گام دوم و سوم در اسیلوسکوپ

نتایج گام‌های داده شده و میزان جابه‌جایی اسلایدر بر حسب ولتاژ مطابق جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲ جابه‌جایی در ازای مقدار ولتاژ

گام	ولتاژ (mV)	جابه‌جایی (mm)
۱	۱۸۰۰	۰/۸
۲	۱۵۰۰	۰/۶
۳	۱۲۰۰	۰/۵
۴	۱۱۰۰	۰/۴
۵	۱۰۰۰	۰/۳
۶	۹۵۰	۰/۲
۷	۹۰۰	۰

نمودار بدست آمده از نتایج شکل ۱۱ نشان می‌دهد که یک رابطه تقریباً خطی بین ولتاژ اعمالی و جابه‌جایی حاصل شده وجود دارد.



شکل ۱۱ نمودار جابه‌جایی اسلایدر بر حسب ولتاژ

کمترین جابه‌جایی که در اثر اعمال کمترین ولتاژ (۹۵۰ ولت) ایجاد شد $0/2$ میلی‌متر بود که مربوط به گام ششم در جدول ۲ است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک موتور التراسونیک خطی ساخته شده که با اعمال ولتاژ پالسی و با موج روان موقعیت‌دهی شده است. در این پژوهش‌های قبلی انجام شده در موقعیت‌دهی موتور التراسونیک از استاتور خطی و موج روان استفاده نشده است. در این پژوهش برای نخستین بار برای موقعیت‌دهی موتور التراسونیک از استاتور خطی و موج روان استفاده شده است و با اعمال ولتاژ پالسی نتایج قابل قبولی در جهت موقعیت‌دهی موتور التراسونیک بدست آمد. با اعمال ولتاژ به استک پیزوالکتریک و پیدا کردن فرکانس مطلوب، حرکت روان اسلایدر مشاهده شد؛ در ادامه فرکانس‌های طبیعی مجموع استک پیزوالکتریک و مفتول فولاد زنگ‌نزن با استفاده از روش اجزای محدود به صورت کوپل مورد تحلیل قرار گرفت و نشان داده شد که مدهای طولی و خمشی استک پیزوالکتریک می‌توانند موج روان را در داخل استاتور سیمی ایجاد کرده و منجر به حرکت اسلایدر شوند؛ سپس با بدست آوردن پاسخ فرکانسی ادمیتانس مجموعه، مطابقت فرکانس‌های طبیعی بدست آمده در آنالیز مودال و پاسخ فرکانسی تجربی مشاهده گردید. در انتها با اعمال ولتاژ پالسی به استک پیزوالکتریک موقعیت‌دهی موتور التراسونیک انجام گرفت. کوچکترین دامنه ورودی که به منجر به جابه‌جایی گردید، اسلایدر را به اندازه $0/2$ میلی‌متر حرکت داد.

References

- [1] Hojjat Y, Ansari S, Karafi MR. Present a procedure and fabrication of linear phased array ultrasonic for focusing waves in low frequency. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2016;2(4):47-56. doi: 10.13140/RG.2.1.3943.8965 [In Persian]
- [2] Hojjat Y, Shirkosh M. Application of threadless screw to precise linear positioning. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2021 Feb;22:355-64. doi: 10.1007/s12541-020-00407-8
- [3] Hojjat Y, Karafi MR, Tehrani MD. A novel ultrasonic motor with roller interface (RUSM). In 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics 2009 Jul 14 (pp. 1406-1411). IEEE. doi: 10.1109/AIM.2009.5229886 [In Persian]
- [4] Shi M, Liu X, Feng K, Zhang K. Experimental and numerical investigation of a self-adapting non-contact ultrasonic motor. *Tribology International*. 2021 Jan 1;153:106624. doi: 10.1016/j.triboint.2020.106624
- [5] Mu S, Shibata S, Yamamoto T, Nakashima S, Tanaka K. Intelligent Control of Ultrasonic Motor Using PID Control Combined with Artificial Bee Colony Type Neural Networks. In 3rd EAI International Conference on Robotic Sensor Networks: ROSENET 2019 2021 (pp. 71-80). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-46032-7_7
- [6] Zhou N, Li J, Chen P, Qing T, Cui Y. A flexible shaft based travelling wave ultrasonic motor with high-precision positioning characteristics. *Precision Engineering*. 2021 Sep 1;71:200-8. doi: 10.1016/j.precisioneng.2021.03.011
- [7] Zeng W, Pan S, Chen L, Ren W, Huan Y, Liang Y. Research on Fast and Precise Positioning Strategy of an Ultrasonic Motor Based on the Ultrasonic Friction Reduction Theory. *Micromachines*. 2022 Sep 17;13(9):1542. doi: 10.3390/mi13091542
- [8] Yang L, Huan Y, Ren W, Ma C, Tang S, Hu X. Position control method for ultrasonic motors based on beat traveling wave theory. *Ultrasonics*. 2022 Sep 1;125:106793. doi: 10.1016/j.ultras.2022.106793
- [9] Luna L, López K, Garrido R, Mondié S, Cantera L. A Delay-based Nonlinear Controller for Nanopositioning of Linear Ultrasonic Motors. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2024 Jan;22(1):36-47. doi: 10.1007/s12555-021-0951-x
- [10] Jahantab SH, Hojjat Y, Ghavami Namin B, Shirkosh M. A novel spherical ultrasonic motor with wire stators and measuring torque and preload via a new method. *Scientific Reports*. 2023 Jul 24;13(1):11910. doi: 10.1038/s41598-023-39111-8 [In Persian]