



طراحی، ساخت و توسعه یک انکودر خازنی خطی با استفاده از القای الکترواستاتیک

حسین بنی اسدی¹، مهدی مدبری فر^{2*}، عباس پاک³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مکترونیک، دانشگاه اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* اراک، 38156-8-8349، m-modaberifar@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 آبان 1394

پذیرش: 12 بهمن 1394

ارائه در سایت: 12 اسفند 1394

کلید واژگان:

انکودر خازنی

انکودر افزایشی

انکودر خطی

لغزنده بی سیم

چکیده

مهم‌ترین ابزار اندازه‌گیری جابجایی خطی و زاویه‌ای در صنعت انکودرها هستند. انکودرهای خطی بطور وسیعی در انواع کاربردهای موقعیت‌دهی دقیق مانند ماشین‌ابزارهای با کنترل عددی و اتوماسیون صنایع استفاده می‌شوند. انکودرهایی با قیمت پایین و قدرت تشخیص بالا در اولویت صنایع قرار دارد. در این مقاله یک انکودر خطی خازنی با ویژگی اشل متحرک (لغزنده) نامقید معرفی می‌شود. عناصر اصلی این انکودر جدید از فیبرهای مدار چاپی تشکیل شده است. بنابراین می‌توان این انکودر را در فضاهای خیلی محدود و حتی بر روی سطوح منحنی نصب کرد. این انکودر شامل یک گیرنده نازک بلند و یک واسطه نازک کوتاه است که به ترتیب دارای الکترودهای چهار فاز و دو فاز هستند. واسطه به عنوان اشل متحرک و فرستنده و گیرنده به‌عنوان استاتور عمل می‌کنند. برای ایجاد اشل متحرک نامقید، انکودر از روش منحصر به فردی استفاده می‌کند. به این ترتیب که تغذیه الکتریکی واسطه توسط القای الکترواستاتیکی تامین می‌شود. در این پژوهش یک مدار پردازش سیگنال جدید برای این انکودر طراحی و ساخته شد که دارای حجم کمی بوده بطوریکه امکان استفاده تجاری از این انکودر را فراهم می‌آورد. این انکودر ساخته شده و عملکرد آن ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که انکودر ساخته شده دارای حداکثر خطایی برابر با ± 20 میکرومتر است.

Design, fabrication and development of a capacitive-type linear encoder using electrostatic induction

Hosein Bani Asadi¹, Mahdi Modaberifar^{1*}, Abbas Pak²

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University, Arak, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-8-8349 Arak, Iran, m-modaberifar@araku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 12 November 2015
Accepted 01 February 2016
Available Online 02 March 2016

Keywords:

Capacitive encoder
Incremental encoder
Linear encoder
Wireless slider

ABSTRACT

Linear and angular displacement measuring encoders are the most important measuring tools in the industry. Linear encoders are widely used in various positioning applications, such as numerical controlled (NC) machine tools and factory automation, since they are essential for precision positioning systems. In this study, a capacitive-type linear encoder with un-tethered slider is designed. The main components are made of printed circuit films. Hence, the encoder can be set up in thin inter spaces or on curved surfaces. The encoder consists of a long receiver film and a short transmitter film, respectively containing four-phase and two-phase electrodes. The transmitter is used as a slider and the receiver as a stator. In order to design an unconstrained slider; the encoder employs a unique approach. Electrical power is supplied to the transmitter film by electrostatic induction which removes electric wires from the slider. In this study the encoder was built using a new signal processing circuit and its performance was evaluated. The new signal processing circuit is more compact and facilitates using this encoder for trade purposes. The result of experimental evaluation shows that the encoder has ± 20 micrometers error.

1- مقدمه

آلودگی‌های محیط حساس بوده و مراقبت‌های ویژه‌ای برای جلوگیری از ورود گرد و غبار به داخل فضای انکودر باید در نظر گرفت. از طرف دیگر انکودرهای مغناطیسی دارای قابلیت اطمینان بیشتری در محیط‌های آلوده هستند ولی دقت و قدرت تشخیص کمتری نسبت به انکودرهای نوری دارند. انکودرهای خازنی به دلیل ساختار ساده و کوچکی که دارند در ابزارهایی مانند کولیس‌های دیجیتال استفاده میشوند و مقاومت آنها نسبت به تغییرات دمای محیط و نویزهای مغناطیسی بالاست.

یک نوع انکودر خازنی، که از سه دیسک مقابل یکدیگر در داخل بدنه انکودر تشکیل شده است، توسط ساساکی ساخته شد. دیسک اول ثابت و

امروزه از انکودرهای خطی بطور گسترده‌ای در کاربری‌های موقعیت‌دهی در اتوماسیون سیستم‌ها و ماشین‌های ابزار با کنترل عددی استفاده می‌شود. هم‌زمان با افزایش تقاضا برای انکودر، تقاضا برای انکودرهای ارزانتر و دقیق‌تر نیز افزایش یافته است. انکودرهای خطی معمولی به سه دسته تقسیم میشوند: انکودرهای نوری، انکودرهای مغناطیسی و انکودرهای خازنی. انکودرهای نوری به دلیل داشتن قدرت تشخیص اندازه‌هایی در حد نانومتر یکی از مهم‌ترین ابزارهای موقعیت‌دهی است. اما قیمت این انکودرها با افزایش دقت زیاد شده و فضای زیادی برای نصب و عملکرد نیاز دارد. همچنین این انکودرها به

Please cite this article using:

H. Bani Asadi, M. Modaberifar, A. Pak, Design, fabrication and development of a capacitive-type linear encoder using electrostatic induction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 153-160, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بین روتور و استاتور را بدست آوردند [6].

نیشیجیما و همکارانش یک حسگر جابه‌جایی خازنی برای اندازه‌گیری‌های خطی بر روی سطوح صاف و منحنی ارائه کردند. این حسگر می‌تواند هم به‌عنوان یک موتور الکترواستاتیکی و هم به‌عنوان یک انکودر جابه‌جایی به‌طور مستقل عمل کند. این حسگر در قسمت استاتور و لغزنده‌اش از الکترودهای سه فاز بهره می‌گیرد که با اعمال سیگنال تحریک سه فاز به این الکترودها و تغییر ظرفیت خازنی بین الکترودهای لغزنده و استاتور جابه‌جایی صورت می‌گیرد. انکودر ساخته شده خطی 0.096 رادیان در محدودی اندازه‌گیری 0.66 رادیان و قدرت تشخیص 960 میکرومتر را داراست [7].

کنگ و همکارانش برای افزایش محدوده‌ی اندازه‌گیری حسگرهای خازنی و کاهش رانش خازنی و افزایش سیگنال به نویز از الکترودهای شانه‌ای استفاده کردند. آنها از دو الکترودهای شانه‌ای در قسمت ثابت (گیرنده و یا خروجی) استفاده کردند و در آخر خروجی الکترودها را از هم کم کردند با این کار توانستند نویز مشترک و رانش خازنی را به پایین‌ترین حد رساندن و به ضریب سیگنال به نویز بالایی رسیدند [8].

در این مقاله یک انکودر خازنی بر اساس ساختار ارائه شده در [5] و [6] ساخته می‌شود که به قسمت لغزنده آن سیم وصل نمی‌شود. در این انکودر اطلاعات سیگنال لغزنده بوسیله القای الکترواستاتیکی به الکترودهای استاتور انکودر ارسال می‌شود و بنابراین نیازی به اتصال لغزنده به سیم نیست. در این پژوهش یک برد الکترونیک پردازش سیگنال جدید برای این انکودر طراحی شده است که دارای حجم کوچکی بوده و قابلیت نصب و مونتاژ در انواع قابهای انکودری را دارد. خروجی‌های این برد الکترونیک پالس‌های استاندارد هستند که قابلیت خواندن توسط انواع سیستم‌های دیجیتال را داشته و امکان تشخیص جهت حرکت را نیز فراهم می‌آورد. با اتصال این برد به انکودر خازنی معرفی شده در این مقاله امکان استفاده تجاری از این انکودر جدید در انواع ماشین‌های ابزار و سیستم‌های اتومات فراهم می‌شود. در ادامه این مقاله مراحل مختلف مدلسازی، ساخت، توسعه و ارزیابی این انکودر شرح داده می‌شود.

2- ساختار و اصول عملکرد انکودر

شکل 1 دیگرام شماتیک انکودر خازنی پیشنهادی را نشان می‌دهد. این ساختار مشابه موتور الکترواستاتیکی معرفی شده در [5] می‌باشد. این انکودر، شامل دو قسمت می‌باشد؛ قسمت استاتور که به عنوان گیرنده و فرستنده و قسمت لغزنده که به عنوان واسطه کار می‌کنند. لغزنده در مرکزش دارای الکترودهای موازی دو فاز می‌باشد. این الکترودهای دو فاز به منظوره ایجاد یک میدان الکتریکی با استفاده از دو سیگنال سینوسی با اختلاف فاز 180 درجه تحریک می‌شوند. این میدان الکتریکی به‌وسیله الکترودهای چهار فاز روی استاتور شناسایی و تشخیص داده می‌شود. استاتور و لغزنده طوری هم‌راستا قرار گرفته‌اند که الکترودهای دو فاز لغزنده دقیقاً به‌روی الکترودهای چهار فاز استاتور می‌لغزد. گام الکترودهای در لغزنده $2p$ و در استاتور p هستند.

علاوه بر این الکترودهای قسمت استاتور و قسمت لغزنده در راستای طول‌شان دارای الکترودهای اضافی می‌باشند که به عنوان الکترودهای القایی استفاده می‌شوند. الکترودهای القایی طوری طراحی شده‌اند که الکترودهای مربوط به لغزنده همیشه بر روی الکترودهای استاتور قرار دارد. الکترودهای

دارای الکترودهای 8 فاز می‌باشد که سیگنال‌های تحریک 8 فاز با 45 درجه اختلاف فاز به الکترودهای آن متصل می‌شود. دیسک دوم که دیسک متحرک می‌باشد دارای الکترودهایی می‌باشد که گام آن‌ها چهار برابر گام الکترودهای دیسک اول می‌باشد. دیسک دوم در هر دو طرف دارای الکترودهای متحرک است. هر الکترودهای دیسک متحرک مقابل چهار الکترودهای دیسک اول قرار می‌گیرد و مجموع سیگنال‌های چهار فاز مقابل آن بر روی الکترودهای متحرک القا می‌شود و این سیگنال‌های القایی از طرف دیگر دیسک بر روی دیسک سوم القا می‌شود و با اندازه‌گیری اختلاف فاز ایجاد شده بر اثر حرکت می‌توان به جابه‌جایی رسید [1].

ژو و همکارانش یک حسگر جابه‌جایی ساده خازنی ارائه کردند. این حسگر از دو صفحه‌ی موازی تشکیل شده؛ یکی از صفحه‌ها با الکترودهای شانه‌ای با فاصله‌های یکنواخت، تشکیل یک مقیاس را می‌دهد و دیگری با الکترودهای شانه‌ای با اندازه‌های کوچک‌تر که حکم آشکارساز را دارد تشکیل شده است. با اسکن ظرفیت خازنی بین الکترودها و مقایسه فاز آن با سیگنال مرجع که به مقیاس داده شده است مقدار جابه‌جایی بدست می‌آید. آنها با پهنای الکترودهای آشکارساز 200 میکرومتر و فاصله‌ی بین دو الکترودهای 50 میکرومتر و پهنای الکترودها در مقیاس برابر 1 میلی‌متر به قدرت تشخیص 1 میکرومتر رسیدند [2].

گوندو یک انکودر الکترواستاتیکی را به ثبت رساند که شامل یک قسمت متحرک که دارای الکترودهای واسطه می‌باشد و قسمت ثابت که دارای الکترودهای القایی در کناره‌های آن و چهار فاز الکترودها که در مرکز آن قرار دارد تشکیل شده است. سیگنال‌های تحریک که دو موج سینوسی قرینه می‌باشند به الکترودهای القایی در قسمت ثابت متصل می‌شوند و سیگنالی از طریق القای الکترواستاتیکی بر روی الکترودهای واسطه که مقابل الکترودهای القایی قرار دارند القا می‌شود؛ به همین دلیل میدان الکتریکی توسط الکترودهای واسطه بر روی الکترودهای چهار فازی ایجاد می‌شود که با شناسایی این میدان توسط الکترودها هر کدام دارای سیگنالی می‌شود که نسبت به هم 90 درجه اختلاف فاز دارد و با حرکت قسمت متحرک فاز سیگنال‌ها تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری تغییرات فاز می‌توان به جابه‌جایی رسید [3].

کیم و همکارانش نیز یک حسگر جابه‌جایی خازنی ارائه کردند. این حسگر جابه‌جایی خازنی شامل دو صفحه است که با الکترودهایی به شکل زیگزاگ که با یک لایه نازک دی‌الکتریک پوشیده شده تشکیل می‌شود. ظرفیت خازنی در یک دوره با دقت بالا و در سیگنال‌های متوالی اندازه‌گیری می‌شود. از طریق آزمایشات تجربی مشاهده شده که حسگر می‌تواند جابه‌جایی تا 20 میلی‌متر را با وضوح 126 نانومتر اندازه‌گیری کند [4].

یاماشیتا و همکارانش یک موتور خازنی الکترواستاتیکی با ساختاری مشابه با انکودرهای خازنی و بر اساس اصول القایی ارائه کردند که در این موتور الکترواستاتیکی، سیم‌ها تنها به استاتور متصل هستند، بنابراین حرکت لغزنده دچار خلل نمی‌شود. نیروی لغزنده با القای الکترواستاتیکی بین الکترودهای القایی در استاتور و لغزنده منتقل می‌شود. موتور مورد نظر تنظیمات الکترودها دو تا چهار فازی را دارد که شامل دو فاز الکترودها در لغزنده و چهار فاز الکترودها در استاتور است. نویسندگان در این مقاله متذکر شدند که ساختار این موتور برای یک انکودر خازنی هم مناسب است [5] و کیمورا و همکارانش بر اساس ساختار این موتور یک انکودر خازنی انعطاف پذیر ساختند و با شبیه‌سازی عددی مقادیر بهینه نسبت‌های عرض الکترودها و گپ

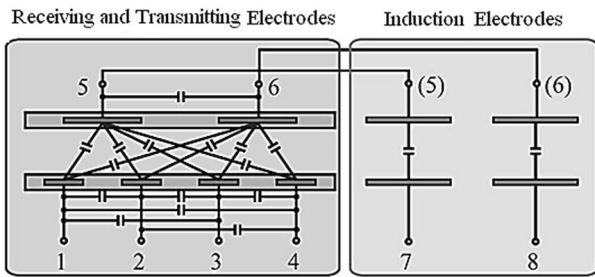


Fig. 2 Equivalent circuit model for the encoder [10]
 شکل 2 مدل الکتریکی معادل انکودر خازنی [10]

در این ماتریس $C_{st}, C_{sb}, C_{ta}, C_{tb}, C_b, C_i, C_{mo}, C_{ml}$ همگی مقادیر ثابت مثبتی هستند که توسط روابط هندسی میان ترمینال‌ها مشخص می‌شوند. متغیر x میزان جابه‌جایی لغزنده و θ_x نشان دهنده زاویه الکتریکی آن است و $4p$ از x سیکل تکرار این ساختار می‌باشد که معادل 2π از θ_x می‌باشد. در میان این ضرایب فقط $C_m(\theta_x)$ تابع موقعیت لغزنده می‌باشد که توسط تابع سینوسی به طور تقریبی تعیین می‌شود، سایر ضرایب توسط مقادیر ثابت به طور تقریبی تعیین می‌شود. این تقریب‌ها بر مبنای نتایج آزمایشی از اندازه‌گیری ضرایب متکی هستند.

با استفاده از ماتریس ضرایب خازنی، رابطه بین شارژها یا (جریان‌ها) ولتاژ ترمینال‌ها را می‌توان به صورت رابطه (4) بیان کرد.

$$q = cv \quad (4)$$

در این رابطه q و v عبارتند از بردارهای 8×1 که به ترتیب نمایانگر شارژها و ولتاژهای هشت ترمینال می‌باشد.

4- تحلیل سیگنال‌ها

برای راه اندازی انکودر، ولتاژهای تحریک به الکترودهای القایی استاتور که ترمینال‌های 7 و 8 هستند اعمال می‌شود. بنابراین ولتاژ بردار V عبارتست از:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v \sin \omega t, -v \sin \omega t\} \quad (5)$$

در این رابطه v و ω به ترتیب دامنه ولتاژ و فرکانس زاویه‌ای ولتاژهای اعمال شده در الکترودهای القایی هستند. ولتاژهای v_1 تا v_6 نامعلوم هستند. اینک بردار شارژ q به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$q = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, q_7, q_8\} \quad (6)$$

در این رابطه q_7 و q_8 بارهای اعمال شده توسط منبع سیگنال به الکترودهای القایی می‌باشند. برای تعیین بارهای ترمینال‌ها 1 تا 4 این فرض در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از مدار با امیدانس ورودی بالا ولتاژهای الکترودهای 4 فاز اندازه‌گیری می‌شوند و به این ترتیب هیچ‌گونه بار الکتریکی به درون یا خارج از الکترود جریان نخواهد داشت. طبق این فرض بار ترمینال‌های 1 تا 4 صفر خواهد بود. بار ترمینال‌های 5 و 6 نیز صفر خواهد بود. زیرا به هیچ منبع الکتریکی متصل نمی‌باشند.

با قرار دادن معادله (1) و (5) و (6) در معادله (4) ولتاژ القایی v_1, v_2, v_3 و v_4 روابط (7) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} V_1 &= K_c v \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_2 &= K_c v \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_3 &= -K_c v \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_4 &= -K_c v \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (7)$$

که در این رابطه k_c از رابطه (8) بدست می‌آید:

$$K_c = \frac{2c_i c_{ml}}{-4c_{ml}^2 + (c_i + c_l + c_{st})(c_{st} + c_{tb})} \quad (8)$$

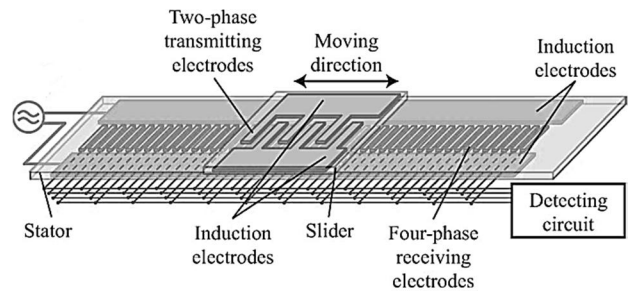


Fig. 1 Schematic diagram of electrostatic capacitive encoder [6]
 شکل 1 ساختار شماتیک انکودر الکترواستاتیک خازنی [6]

القایی قسمت استاتور در طی عملیات با استفاده از دو موج سینوسی قرینه تحریک می‌شود. از آنجاکه الکترودهای القایی استاتور و لغزنده تشکیل خازن می‌دهند، با اعمال کردن ولتاژهای AC روی الکترودهای القایی استاتور می‌توان در الکترودهای القایی لغزنده پتانسیل الکتریکی AC القا کرد. از آن جایی‌که الکترودهای القایی لغزنده به الکترودهای دو فاز متصل هستند می‌توان انرژی الکتریکی را بدون سیم به الکترودهای دو فاز منتقل کرد.

3- مدل تحلیلی انکودر

اگرچه مدبری فر [9] مدل دقیق این نوع محرکه‌ها (نوع سه فاز) و حسگرهای الکترواستاتیک را ترکیبی از مقاومت، سلف و خازن معرفی کرد. ولیکن در فرکانس‌های پایین مدل خازنی شده توسط یاماموتو [10] و یاماشیتا [5] به دلیل سادگی و کاربردی بودن با خطای کمی قابل استفاده است. شکل 2 مدل الکتریکی معادل برای این انکودر را نشان می‌دهد. در این مدل ساختار انکودر توسط هشت پایانه نمایش داده شده، پایانه‌های 1 تا 4 مربوط به 4 فاز روی استاتور است و پایانه‌های 5 و 6 مربوط به الکترودهای 2 فاز که به الکترودهای القایی لغزنده متصل هستند. پایانه‌های 7 و 8 به الکترودهای القایی استاتور مربوط می‌شوند. در میان ترمینال‌های الکتریکی، بین هر زوج ترمینال ظرفیت خازنی ایجاد می‌شود. با استفاده از ماتریس ضرایب خازنی می‌توان این‌گونه ظرفیت‌های خازنی را به شکل ریاضی نشان داد. با در نظر گرفتن قرینه‌های هندسی میان ترمینال‌ها، ماتریس برای این انکودر را می‌توان به شرح (1) بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} \\ -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} \\ -c_{tb} & -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} \\ -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} & -c_{st} \\ c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) \\ c_m(\theta_x - \pi) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \pi) & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x - \pi) & c_m(\theta_x) & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ c_{st} + c_i & -c_i & -c_i & 0 \\ -c_i & c_{st} + c_i & 0 & -c_i \\ -c_i & 0 & c_i & 0 \\ 0 & -c_i & 0 & c_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_m(\theta_x) = -C_{mo} - C_{ml} \cos(\theta_x) \quad (2)$$

$$\theta_x = \frac{\pi}{2p} x \quad (3)$$

30 میلی‌متر در لغزنده می‌باشند. همه ترمینال‌ها در قسمت استاتور قرار گرفته‌اند. بنابراین هیچ ترمینالی روی لغزنده قرار نگرفته و هیچ سیمی به لغزنده متصل نمی‌باشد و به راحتی از استاتور جدا می‌گردد. فاصله بین استاتور و لغزنده 0.1 میلی‌متر بوده که توسط چاپ سبزی که روی الکترودها کشیده شده، ایجاد گردیده است.

ضرایب ظرفیت‌های خازنی این نمونه با استفاده از دستگاه ال سی ار متر و بر اساس شکل مدل ارائه شده در شکل 2 اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل 4 آمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، ظرفیت بین الکترودهای فرستنده و الکترودهای گیرنده موج سینوسی چهار فاز را نشان می‌دهد. به گونه‌ای که C_{15} با توجه به مدل تحلیلی یعنی ظرفیت خازنی بین الکترودهای اولی در استاتور و پنجم در لغزنده است. مابقی الکترودها نسبت به هم ظرفیت خازنی ثابتی دارند.

6- آشکارسازی سیگنال

شکل 5 بلوک دیاگرام مدارهای آشکارساز و پردازش سیگنال و رابط‌های بین آنها را برای این انکودر نشان می‌دهد. ابتدا توسط سیگنال ژنراتور سیگنال تحریک که دو ولتاژ سینوسی با 180 درجه اختلاف فاز هستند برای الکترودهای القایی تولید می‌شود و یکی از آنها به عنوان سیگنال مرجع در جدا کننده فاز و دمولاتور سنکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترودهای 4 فاز گیرنده موجهای سینوسی مدوله شده مطابق معادله (7) را شناسایی می‌کنند، آنگاه این سیگنال‌های اندازه‌گیری توسط تقویت کننده‌ی دیفرانسیلی طبق معادله (9) تقویت و از هم کم می‌شوند. خروجی تقویت

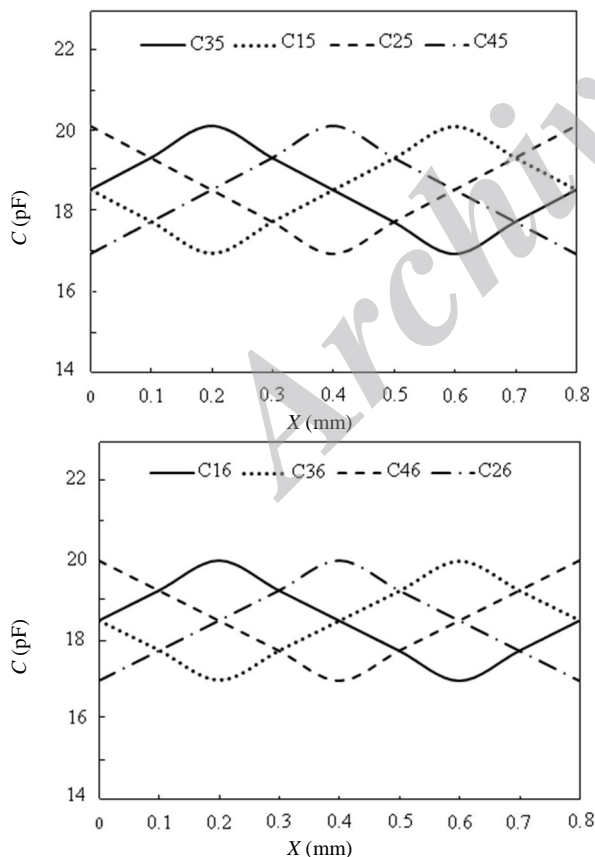


Fig. 4 Measurement results of capacitance coefficients

شکل 4 نمودار ظرفیت خازنی اندازه‌گیری شده الکترودهای چهار فاز استاتور نسبت به الکترودهای لغزنده

سیگنال‌ها در معادله 7 بعد از تقویت و تفاضل به صورت معادله (9) می‌باشند.

$$V_A = K_o(v_1 - v_3) = 2K_oK_c \cos(\theta_x) \sin(\omega t)$$

$$V_B = K_o(v_2 - v_4) = 2K_oK_c \sin(\theta_x) \sin(\omega t)$$

در این جا k_o ضریب تقویت، تقویت کننده تفاضلی است. تقویت کننده تفاضلی می‌تواند نویز حالت مشترک سیگنال‌های دریافتی را حذف کند و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز انکودر بهبود می‌یابد. سیگنال‌های معادله (9) سیگنال‌های مدوله شده دامنه هستند. از تفکیک این سیگنال‌ها روابط (10) بدست می‌آید.

$$V_A = A \cos(\theta_x)$$

$$V_B = A \sin(\theta_x)$$

در این رابطه A تقویت نهایی پس از ضرب شدن در معادله (9) و فیلتر شدن به وسیله دمولاتور سنکرون می‌باشد. نهایتاً، موقعیت لغزنده θ_x از معادله (11) محاسبه می‌شود.

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{A \sin(\theta_x)}{A \cos(\theta_x)}$$

5- ساخت یک نمونه انکودر

قسمت‌های استاتور و لغزنده انکودر نمونه آزمایشگاهی در شکل 3 نشان داده شده است. هر دو آنها با بهره‌گیری از تکنولوژی مدار چاپی ساخته شده‌اند. ضخامت آنها 2 میلی‌متر می‌باشد که باعث می‌شود تا انکودر قابلیت نصب در فضاهای محدود و باریک را داشته باشد. اگر آنها روی فیبر مدار چاپی با ضخامت 0.2 میلی‌متر که انعطاف‌پذیر می‌باشند پیاده‌سازی شوند قابلیت نصب بر روی هر سطح انحناداری را پیدا می‌کند. با توجه به تکنولوژی ساخت موجود، گام الکترودهای گیرنده 400 میکرومتر و گام الکترودهای واسطه 800 میکرومتر می‌باشد. گام الکترودهای گیرنده کوچکترین گام قابل ساخت با تکنولوژی موجود در کشور می‌باشد. لازم به ذکر است که هر چه گام الکترودها کوچک باشد قدرت تشخیص بالاتر می‌رود. نسبت پهنای الکترودها به گام الکترودها بر اساس نتایج بدست آمده از [6] معادل 0.5 می‌باشد. الکترودهای گیرنده در استاتور دارای عرض 8 میلی‌متر و طول 100 میلی‌متر و الکترودهای واسطه در لغزنده دارای عرض 8 و طول 30 میلی‌متر می‌باشند. کلیه الکترودهای القایی دارای عرض 6 و طول 100 میلی‌متر در استاتور و طول

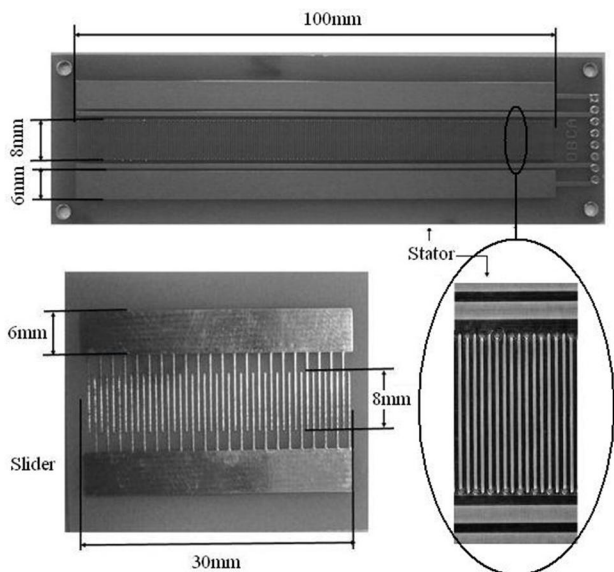


Fig. 3 Fabricated stator and slider

شکل 3 نمای استاتور و لغزنده انکودر خازنی ساخته شده

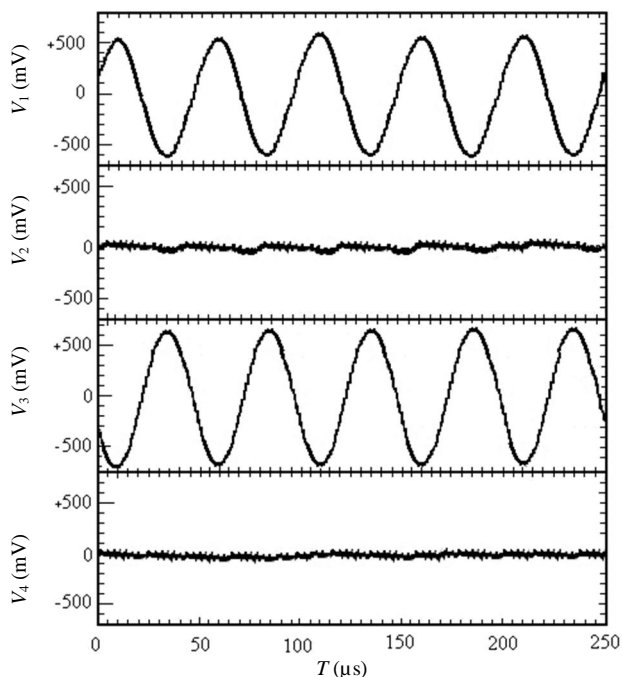


Fig. 6 Output signals of the four phase stator when its electrodes is in fully overlap with the slider electrodes

شکل 6 شکل موج اندازه‌گیری شده الکترودهای چهار فاز استاتور در حالت همپوشانی کامل با الکترودهای لغزنده

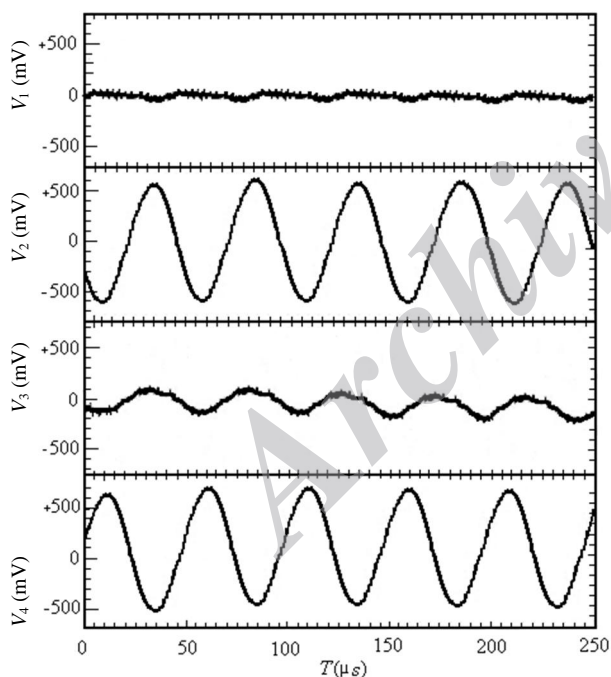


Fig. 7 Output signals of the four phase stator after one pitch movement of the slider over the stator

شکل 7 شکل موج اندازه‌گیری شده الکترودهای چهار فاز استاتور بعد از یک گام

حرکت نسبت به حالت همپوشانی کامل با الکترودهای لغزنده

استفاده شده در این پروژه دارای ورودی تفاضلی می‌باشد. بنابراین، داخل آی‌سی فاز سوم از اول و فاز چهارم از دوم کم می‌شود. سیگنالی که بعد از تفاضلی داریم V_A و V_B است که دو سیگنال سینوسی با 90 درجه اختلاف فاز به صورت معادله (9) هستند. تصویر سیگنال‌های V_A و V_B به ازای حرکت

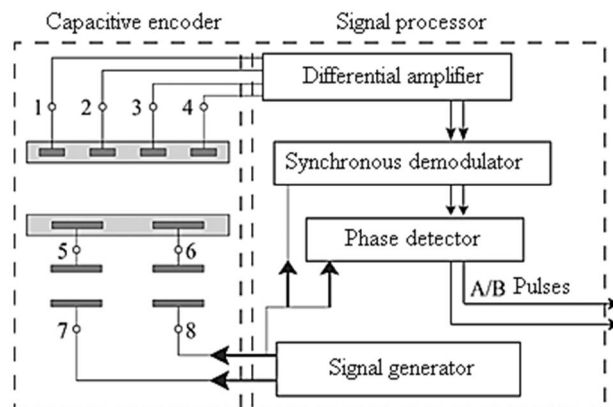


Fig. 5 Block diagram of signal processing for the capacitive encoder.

شکل 5 بلوک دیاگرام مدارهای آشکارساز و پردازش سیگنال انکودر خازنی

کننده‌ی دیفرانسیلی توسط دمدل‌تورهای سنکرون، دمدوله شده و نهایتاً جدا کننده فاز را برای سیگنال‌ها محاسبه می‌کند. در اینجا خروجی به پالس‌های A/B تبدیل شدند. اگر آشکارساز در هر سیکل 1024 پالس تولید کند آنگاه قدرت تشخیص انکودر برابر است با p تقسیم بر 1024.

در این پژوهش یک مدار پردازشگر سیگنال جدید برای این انکودر طراحی شده که دارای حجم بسیار کم بوده و قابلیت تولید خروجی‌های استاندارد برای اتصال به سایر تجهیزات دیجیتال را دارد. هسته مرکزی این مدار پردازشگر آی‌سی AD2S1200 می‌باشد. این آی‌سی برای کاربردهای کنترلی موقعیت و سرعت، و تبدیل اطلاعات آنالوگ زاویه‌ای به فرم دیجیتال استفاده شده و دارای یک اسیلاتور داخلی قابل برنامه‌ریزی 2 تا 20 کیلوهرتز می‌باشد. در آزمایش‌های انجام شده، سیگنال‌های تحریک انکودر که دو سیگنال سینوسی با 180 درجه اختلاف فاز و دامنه‌ی 7 ولت و فرکانس 20 کیلوهرتز می‌باشد از اسیلاتور این آی‌سی به الکترودهای القایی در استاتور ارسال می‌گردد. از آنجا که سیگنال خروجی اسیلاتور داخلی آی‌سی AD2S1200 ضعیف است و از دامنه پایینی برخوردار است برای تقویت و رسیدن به سیگنال با دامنه مورد نظر که هفت ولت می‌باشد، سیگنال تحریک قبل از اعمال به الکترودهای القایی وارد مدار بافر می‌شود. بعد از اعمال سیگنال‌های تحریک، بر روی الکترودهای چهار فاز استاتور ولتاژی القا می‌شود که با حرکت لغزنده تغییر می‌کند. به این ترتیب چهار سیگنال با 90 درجه اختلاف فاز پدید می‌آید. شکل 6 تصاویر سیگنال‌های اندازه‌گیری شده چهار فاز استاتور زمانی که الکترودهای لغزنده با الکترودهای فاز اول و سوم در استاتور کاملاً همپوشانی دارد را نشان می‌دهد. شکل 7 تصویر خروجی‌های اندازه‌گیری شده استاتور زمانی که به اندازه یک گام حرکت می‌کند را نشان می‌دهد.

در نهایت اگر سیگنال‌ها به ازای یک بازه حرکتی رسم شوند به صورت شکل 8 در می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود سیگنال‌ها با هم به ترتیب 90 درجه اختلاف فاز دارند. سیگنال‌های الکترودهای گیرنده (الکترودهای چهار فاز) توسط کانکتوری که در استاتور قرار دارد و سیم‌های رابط به مدار آشکارساز متصل می‌شوند. سیگنال القایی بر روی الکترودهای گیرنده ضعیف هستند و دامنه‌ای در حدود 150 میلی‌ولت دارند که تقویت شده و به پایه‌های آی‌سی پردازشگر متصل می‌شوند. در این مرحله خروجی الکترودها چهار فاز گیرنده باید دو به دو از هم کم می‌شوند به صورتی که فاز سوم از اول و فاز چهارم از دوم می‌شود. دلیل این کار حذف نویز مشترک می‌باشد. آی‌سی

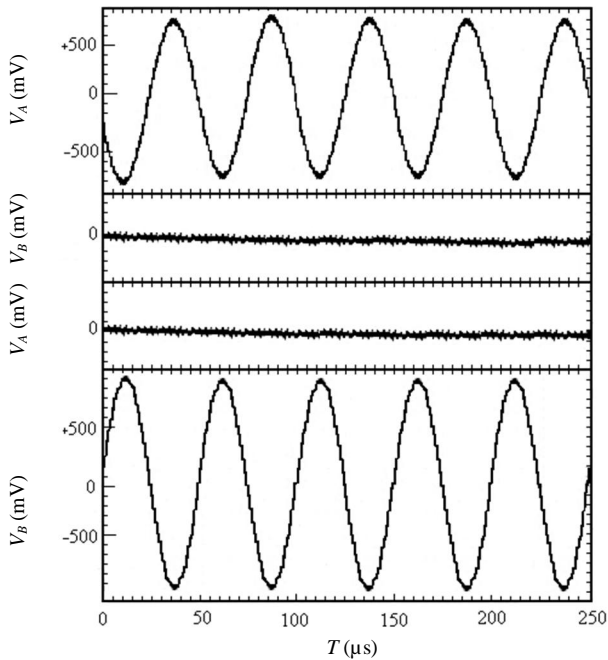


Fig. 9 Output signals of V_A and V_B for 4p slider movement

شکل 9 تصویر سیگنال‌های اندازه‌گیری شده V_B و V_A به ازای حرکت لغزنده به اندازه 4 گام

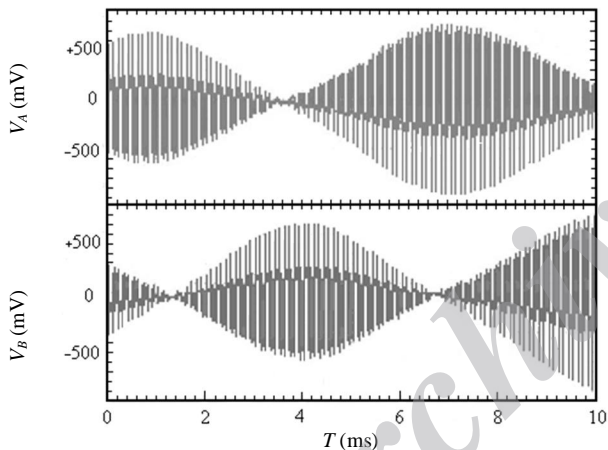


Fig. 10 Output signals of differential amplifier (V_A and V_B)

شکل 10 سیگنال‌های خروجی اندازه‌گیری شده تقویت کننده‌های تفاضلی

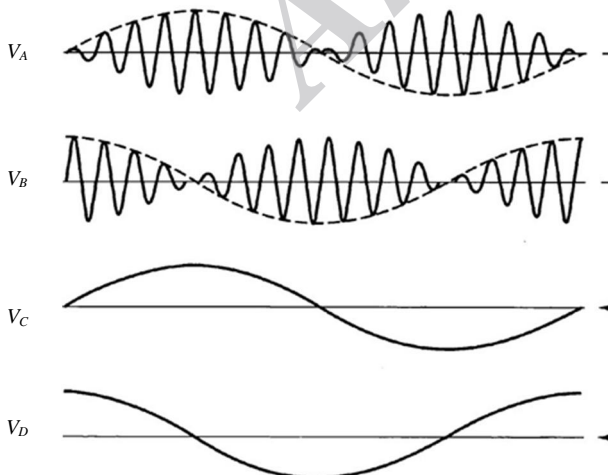


Fig. 11 Output signals before and after demodulation

شکل 11 شکل سیگنال‌ها قبل و بعد دمدولاتور

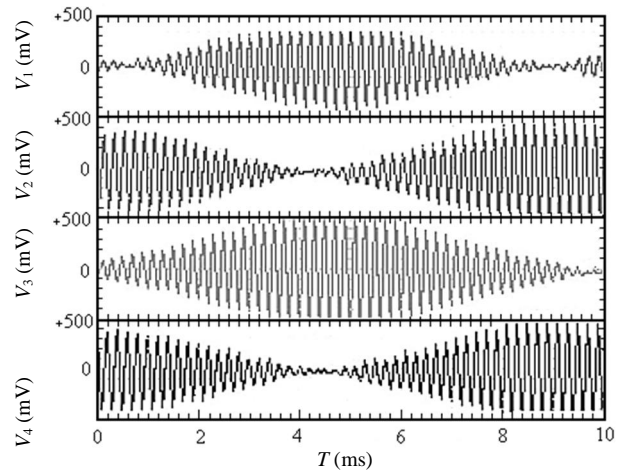


Fig. 8 Output signals of the four phase stator for a range of movement

شکل 8 شکل موج اندازه‌گیری شده الکترودهای چهار فاز استاتور به ازای یک بازه حرکت

لغزنده به اندازه 4 گام در شکل 9 آمده است. شکل 10 تصویر سیگنال‌های V_A و V_B به ازای یک بازه حرکتی را نشان می‌دهد.

بعد از تفاضل سیگنال‌ها باید سیگنال تحریک از سیگنال‌های V_A و V_B حذف شود تا سیگنال‌های معادله (10) که اطلاعات موقعیت لغزنده در آنها قرار دارد، بدست آیند. برای این کار از یک دمدولاتور سنکرون استفاده می‌شود. مدار دمدولاتورهای سنکرون شامل مدار ضرب کننده و یک فیلتر پایین‌گذر می‌باشد. ابتدا سیگنال تحریک را در سیگنال‌های V_A و V_B ضرب کرده و بعد آن را از فیلتر پایین‌گذر عبور داده تا سیگنال‌های معادله (10) بدست آیند. تصویر سیگنال‌ها قبل و بعد از دمدولاتور سنکرون به صورت شکل 11 می‌باشند. بعد از دمدوله کردن و رسیدن به سیگنال‌های معادله (10) و با توجه به اینکه هر سیکل از این سیگنال‌ها به ازای حرکت به اندازه 4 برابر گام شکل می‌گیرد؛ سیگنال‌ها به طبقه جدا کننده فاز که داخل آی‌سی پردازشگر است فرستاده می‌شود؛ و به ازای هر حرکت به اندازه 4 گام آی‌سی 1024 پالس تولید می‌کند. با توجه به این که گام برابر 400 میکرومتر می‌باشد، قدرت تشخیص انکودر برابر 1.6 میکرومتر است.

نحوه تبدیل اختلاف فاز بین سیگنال‌های خروجی انکودر با سیگنال تحریک به پالس‌های استاندارد قابل شمارش در شکل‌های 12 و 13 نشان داده شده است. در اینجا سیگنال تحریک به دو شکل مربعی و موجی است که شکل موجی آن برای تحریک انکودر استفاده می‌شود. زمانی که لغزنده انکودر حرکت میکند یک اختلاف فاز DT بین سیگنال تحریک و سیگنال‌های V_A و V_B بوجود می‌آید که مقدار آن بستگی به مقدار جابجایی انکودر دارد (شکل 12). شکل 13 زمان بندی اندازه‌گیری را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود زمانی که سیگنال تحریک به یک لبه بالا رونده میرسد یک شمارنده شروع به شمردن پالس‌های یک سیگنال ساعت میکند و زمانی که دامنه سیگنال V_B (در اینجا) به صفر رسید شمارش را متوقف میکند. مقدار اختلاف فاز هر دو سیگنال V_A و V_B با سیگنال تحریک یکسان است و بنابراین شمارش یکی از آنها برای اندازه‌گیری کفایت میکند، ولی باید به این نکته توجه داشت که پالس‌های شمارنده منتجه از هر دو سیگنال نیز با یکدیگر 90 درجه اختلاف فاز دارند. همان‌طور که گفته شد در این آی‌سی به ازای 360 درجه اختلاف فاز 1024 پالس تولید می‌شود. شکل 14 خروجی‌های

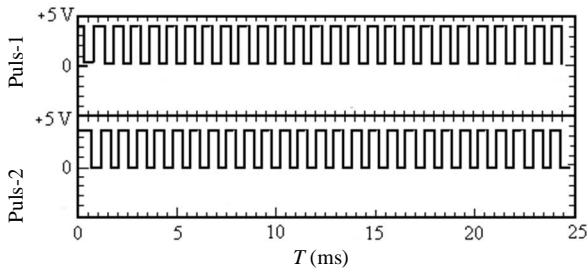


Fig. 14 Final Output pulses of the encoder per slider displacement

شکل 14 پالس‌های خروجی مدار به ازای جابه‌جایی لغزنده

ای‌سی استفاده شده در یک اندازه‌گیری نمونه را نشان می‌دهد که دارای دو سری پالس با اختلاف فاز 90 درجه می‌باشد. این دو سری پالس امکان تشخیص تغییر جهت حرکت را نیز بوجود می‌آورند. نهایتاً این پالس‌ها به یک میکروکنترلر فرستاده شده تا شمارش شده و مقدار جابجایی بر حسب میکرومتر بدست آید. شکل 15 انکودر ساخته شده و مونتاژ شده را نشان می‌دهد.

7- ارزیابی عملکرد انکودر و نتایج آزمایش‌ها

برای ارزیابی انکودر ساخته شده عملکرد آن با یک دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی مورد آزمایش قرار گرفت. این دستگاه دارای قدرت تشخیص یک میکرومتر می‌باشد. شکل 16 نحوه آزمایش و چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. در این آزمایشات عملکرد انکودر در دو طول کورس 4 و 10 میلی‌متری مورد ارزیابی قرار گرفت و منحنی خطای آن استخراج گردید.

شکل 17 منحنی خطای انکودر در دو طول کورس ذکر شده را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل 17 انکودر دارای ماکزیمم خطای تناوبی در حدود ± 20 میکرومتر می‌باشد. از دلایل خطای بدست آمده می‌توان به دقیق نبودن دستگاه اندازه‌گیری برای آزمایش انکودر اشاره کرد. در این آزمایشات لغزنده انکودر به بدنه دستگاه وصل و ثابت شده و استاتور بر روی میز دستگاه قرار داشته و همراه با آن حرکت می‌کند که این باعث تغییرات شکاف و هم‌ترازی الکترودها می‌شود. این دو عامل بعلاوه ثابت نبودن گپ بین لغزنده و استاتور در این نمونه اولیه باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری میشوند. دلیل تقریباً تناوبی بودن خطاها را میتوان به اصول عملکرد این انکودر نسبت داد که در آن ظرفیت خازنی بین الکترودهای لغزنده و استاتور بطور تناوبی کم و زیاد می‌شود.

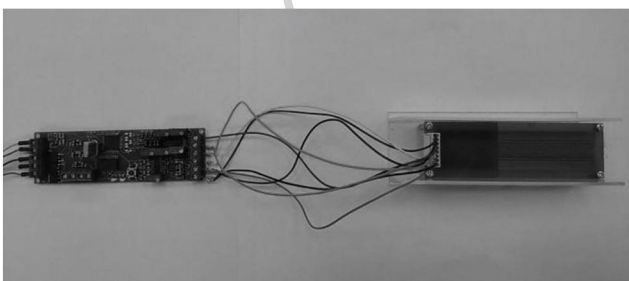


Fig. 15 Photograph of the fabricated encoder (right) and signal processing circuit (left)

شکل 15 عکس انکودر ساخته شده (راست) و برد الکترونیکی پردازش سیگنال (چپ)

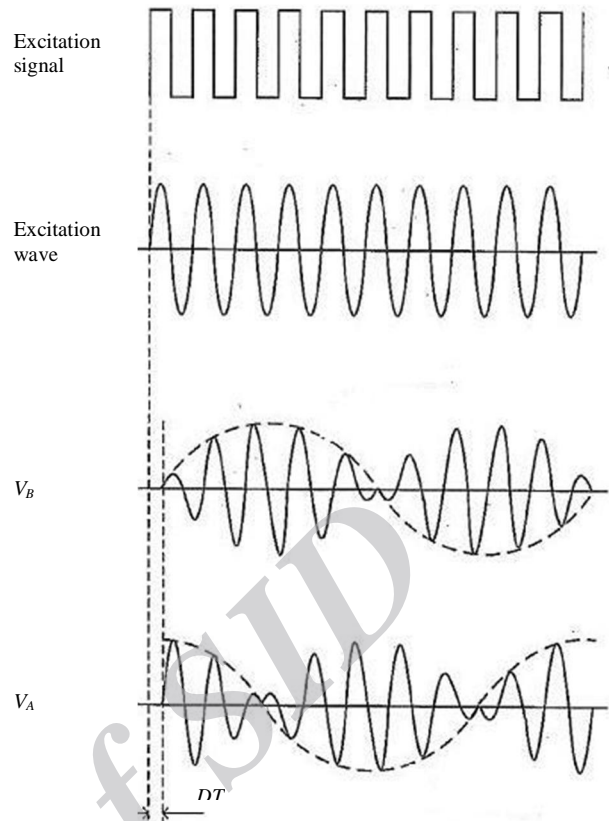


Fig. 12 Relationship between excitation signal and output signals after slider movement

شکل 12 اختلاف فاز بوجود آمده بین سیگنال‌های خروجی و تحریک به ازای حرکت لغزنده

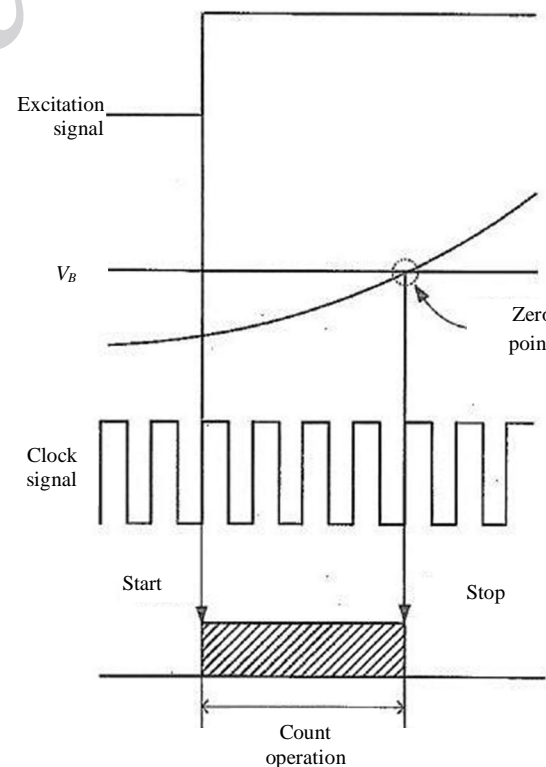


Fig. 13 Operation timing of converting phase delay to pulses

شکل 13 نحوه زمان‌بندی شروع و خاتمه شمارش پالس برای تبدیل فاز به سیگنال

8- نتیجه گیری

در این مقاله یک انکودر خازنی با استفاده از القای الکترواستاتیکی طراحی، آزمایش و تحلیل شد. در این انکودر فرستنده و گیرنده هر دو از فیبر مدار چاپی درست شده‌اند. این انکودر دارای الکترودهای چهار فاز گیرنده و دو فاز فرستنده است. گام الکترودهای واسطه 800 میکرومتر و گام الکترودهای گیرنده 400 میکرومتر است. تغذیه الکتریکی الکترودهای فرستنده از طریق القای الکترواستاتیکی محقق می‌شود. بنابراین نیازی به وجود سیم‌کشی در قسمت لغزنده نیست. در این پژوهش یک مدار پردازشگر سیگنال جدید برای این انکودر طراحی و ساخته شد که دارای حجم کمی بوده و انواع خروجی‌های استاندارد را برای اتصال به سایر تجهیزات دیجیتال سیستم‌های اتومات فراهم می‌آورد. نهایتاً با آزمایش‌های انجام شده بر روی یک نمونه انکودر، حداکثر خطای آن ± 20 میکرومتر بدست آمد.

9- تقدیر و تشکر

از معاونت پژوهشی دانشگاه اراک برای حمایت از این پژوهش طی قرارداد 92/11672 مورخ 1392/11/7 تشکر و قدردانی می‌شود.

10- مراجع

- [1] K. Sasaki, *Electrostatic capacity type encoder*, US Patent No. 4788546, 1988.
- [2] F. Zhu, J. W. Spronck, W. C. Heerens, A simple capacitive displacement sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 26, No.1, pp. 265-269, 1991.
- [3] M. Gondoh, *Electrostatic encoder and electrostatic displacement measuring method*. US Patent No. 7199727, 2007.
- [4] M. Kim, W. Moon, A new linear encoder-like capacitive displacement sensor, *Measurement*, Vol. 39, No. 6, pp. 481-489, 2006.
- [5] N. Yamashita, Z. G. Zhang, A. Yamamoto, M. Gondo, T. Higuchi, Voltage-induction type electrostatic film motor driven by two-to four-phase ac voltage and electrostatic induction, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 140, No. 2, pp. 239-250, 2007.
- [6] F. Kimura, M. Gondo, N. Yamashita, A. Yamamoto, T. Higuchi. Capacitive-type flexible linear encoder with untethered slider using electrostatic induction. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 10, No.5, pp. 972-978, 2010.
- [7] T. Nishijima, A. Yamamoto, T. Higuchi, A flexible sensor measuring displacement and bending, *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, No. 4, pp. 045205, 2009.
- [8] D. Kong, W. Lee, W. Moon, A technique for drift compensation of an area-varying capacitive displacement sensor for nano-metrology, *Procedia Engineering*, Vol. 5, pp. 412-415, 2010.
- [9] M. Modabberifar, Positioning dielectric sheets on an electrostatic induction sheet conveyor using a built-in displacement sensor, *Review of Scientific Instruments*, Vol. 84, No. 6, pp. 065001, 2013.
- [10] A. Yamamoto, T. Niino, T. Higuchi, Modeling and identification of an electrostatic motor, *Precision Engineering*, Vol. 30, pp. 104-113, 2006.

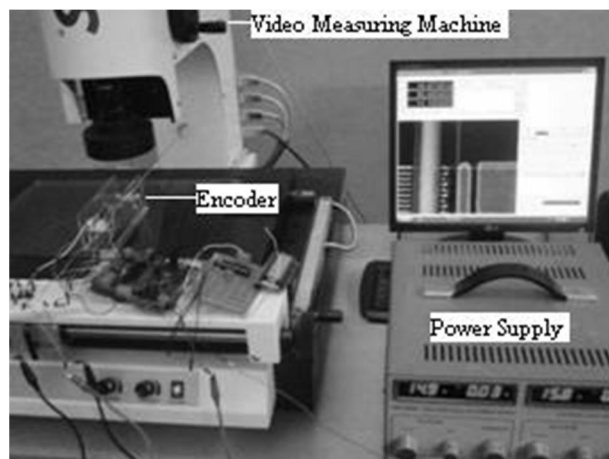


Fig. 16 Photograph of the experimental setup for evaluating function of the encoder

شکل 16 چیدمان آزمایش ارزیابی عملکرد انکودر

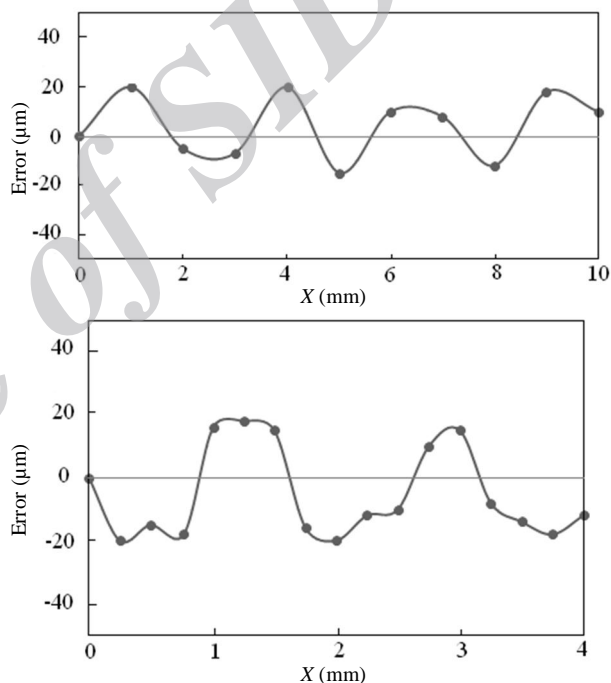


Fig. 17 Measured error based on the video measuring machine as a reference for 10 and 4 mm displacement

شکل 17 نمودار خطا خروجی انکودر به ازای 4 و 10 میلی‌متر جابه‌جایی