

پیاده‌سازی و ارزیابی یک نمونه آزمایشگاهی کد کننده پالسی خازنی دورانی

فاطمه اسدی^۱، مهدی مدبری فر^۲، بهمن میرزاخانی^۳ و عباس پاک^۴

^۱ فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک، گروه مکانیک، دانشگاه اراک، assadi.fatemeh1@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، m-modabberifar@araku.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه اراک، b-mirzakhani@araku.ac.ir

^۴ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان، a.pak@basu.ac.ir

پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۹

ویرایش: ۱۳۹۶/۹/۳

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸

چکیده: کد کننده های پالسی (انکودرها) از جمله مهم‌ترین ابزارهای اندازه‌گیری دقیق در صنعت هستند و در اندازه‌گیری دقیق موقعیت در کنترل دستگاه‌های صنعتی استفاده می‌شوند. انکودرها همچنین در ابزارهای دقیق دیگری که جابه‌جایی را اندازه‌گیری نمی‌کنند با تبدیل کمیت مورد اندازه‌گیری به جابه‌جایی آن را قابل اندازه‌گیری می‌کنند. مهم‌ترین ویژگی انکودر تبدیل جابه‌جایی به پالس‌های قابل شمارش توسط انواع سیستم‌های دیجیتال است و در حلقه‌های کنترلی یکی از مهم‌ترین عناصر تولید بازخورد است. انکودرهای خازنی با ساختار ساده، قیمت پایین و نویز پذیری کمی که دارند نسبت به انکودرهای دیگر مزیت نسبی دارند. انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیکی و لغزند نامقید یکی از جدیدترین انکودرهای خازنی است که در سالهای اخیر معرفی شده است. در این مقاله انکودر خازنی دورانی القایی جدیدی با استفاده از ساختار نوع خطی آن معرفی می‌شود. عناصر اصلی این انکودر جدید از فیبرهای مدار چاپی تشکیل شده است، بنابراین می‌توان این انکودر را در فضاهای محدود نصب کرد. این انکودر شامل یک گیرنده (استاتور) و یک واسطه (روتور) است که به ترتیب دارای الکترودهای چهار فاز و دو فاز هستند. یک نمونه از این انکودر ساخته شده و عملکرد آن ارزیابی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که انکودر ساخته شده دارای بیشینه خطایی برابر با ± 0.09 درجه است.

کلمات کلیدی: انکودر خازنی، انکودر افزایشی، انکودر دورانی

Implementation and Evaluation of a Prototype Capacitive-Type Rotary Encoder

Fatemeh Asadi, Mehdi Modabberifar, Bahman Mirzakhani, Abbas Pak

Abstract: Angular displacement measuring encoder is one of the most important measuring tools in the automated systems, industries and machine tools. In many of manufacturing and production processes, rotary encoders are used as reliable tools for precise positioning. In this study, a new capacitive-type rotary encoder with un-tethered rotor is designed. The main components are made of printed circuit films. Hence, the encoder can be set up in thin inter spaces. The encoder consists of a receiving stator and a transmitter rotor, respectively containing four-phase and two-phase electrodes. In order to designs an un-tethered rotor; the encoder employs a unique approach. Electrical power is supplied to the transmitter rotor by electrostatic induction without any physical contact. This un-tethered rotor can facilitate sensitive applications that a mechanical disturbance caused by an electric wire can be a problem. In this study the encoder was built and its performance was evaluated. The result of experimental evaluation shows that the encoder has max ± 0.09 degree error.

Keywords: rotary encoder, capacitive-type encoder, incremental encoder

۱- مقدمه

امروزه از انکودرهای دورانی به‌طور گسترده‌ای در کنترل دستگاه‌های صنعتی و ماشین‌های ابزار با کنترل عددی استفاده می‌شود. در هر کاربردی که مستلزم اندازه‌گیری زاویه چرخشی است، مانند انواع سیستم‌های رباتیک، انکودر اولین اولویت است. تقاضا برای انکودرهای ارزان‌تر و دقیق‌تر روز به‌روز بیشتر می‌شود. انکودرهای نوری به دلیل داشتن قدرت تشخیص اندازه‌هایی در حد کمتر از میکرومتر یکی از مهم‌ترین ابزارهای موقعیت دهی هستند. اما قیمت این انکودرها با کوچک‌تر شدن قدرت تشخیص زیاد شده و فضای زیادی برای نصب و عملکرد نیاز دارند. همچنین این انکودرها به آلودگی‌های محیط حساس بوده و مراقبت‌های ویژه‌ای برای جلوگیری از ورود گردوغبار 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 دورانی، که از سه دیسک مقابل یکدیگر در داخل بدنه انکودر تشکیل شده است، توسط ساساکی به ثبت رسید. دیسک اول ثابت و دارای الکترودهای هشت فاز می‌باشد که سیگنال‌های تحریک هشت فاز با ۴۵ 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 می‌باشد، هر الکترودهای دیسک مقابل چهار الکترودهای دیسک اول قرار می‌گیرد و مجموع سیگنال‌های چهار فاز مقابل آن بر روی الکترودهای متحرک القا می‌شود و این سیگنال‌های القا می‌شود از طرف دیگر دیسک بر روی دیسک سوم القا می‌شود و با اندازه‌گیری اختلاف فاز ایجادشده بر اثر حرکت می‌توان به جابه‌جایی زاویه‌ای رسید [۱].

ژو و همکارانش یک حسگر جابه‌جایی ساده خازنی ارائه کردند. این حسگر از دو صفحه‌ی موازی تشکیل شده؛ یکی از صفحه‌ها با الکترودهای شانه‌ای بافاصله‌های یکنواخت تشکیل یک مقیاس را می‌دهد و دیگری از 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 به دست می‌آید. آن‌ها با پهنای الکترودهای آشکارساز ۲۰۰ میکرومتر و فاصله‌ی بین دو الکترودها ۵۰ میکرومتر و پهنای الکترودها در مقیاس برابر یک میلی‌متر به قدرت تشخیص یک میکرومتر رسیدند [۲].

نلسون و همکارانش یک نوع دیگر انکودر دورانی خازنی را ارائه دادند. این انکودر شامل یک برد دایره‌ای شکل با کمان‌های منظم از جنس هادی می‌باشد که هر یک از بخش‌های هادی دارای شکل موج دیجیتال در فازهای مختلف می‌باشند. دیسک این انکودر دارای یک الگوی رسانا

است که حاصل جمع و انتقال شکل موج از بخش‌های انتخاب‌شده می‌باشد که با توجه به موقعیت دیسک دوار نسبت به هادی موقعیت را می‌توان تشخیص داد. این انکودر شامل یک مدار آشکارساز سنکرون می‌باشد که از حاصل جمع شکل موج و عبور از صفر، فاز سیگنال را شناسایی می‌کند و یک شمارنده پیشرفته سیگنال‌های تولیدشده را می‌شمارد [۳].

گوندو یک انکودر الکترواستاتیکی را به ثبت رساند که از یک قسمت متحرک که دارای الکترودهای واسطه می‌باشد، و قسمت ثابت که الکترودهای القایی در کناره‌های آن و الکترودهای چهار فاز 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 فاز ایجاد می‌شود که با شناسایی این میدان توسط الکترودهای چهار فاز، هر کدام دارای سیگنالی می‌شود که نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد و با حرکت قسمت متحرک فاز سیگنال‌ها تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری تغییرات فاز می‌توان به جابه‌جایی رسید [۴].

کیم و همکارانش نیز یک حسگر جابه‌جایی خازنی ارائه کردند. این حسگر جابه‌جایی خازنی از دو صفحه که با الکترودهایی به شکل زیگزاگ با یک لایه نازک دی‌الکتریک پوشیده شده تشکیل می‌شود. ظرفیت خازنی در یک سیکل حرکتی با دقت بالا و در سیگنال‌های متوالی اندازه‌گیری می‌شود. از طریق آزمایش‌ها تجربی مشاهده شده که حسگر می‌تواند جابه‌جایی تا ۲۰ میلی‌متر را با قدرت تشخیص ۱۲۶ نانومتر اندازه‌گیری کند [۵].

نیشیجیما و همکارانش یک حسگر جابه‌جایی خازنی برای اندازه‌گیری‌های خطی بر روی سطوح صاف و منحنی ارائه کردند. اجزای اصلی این حسگر از فیبر مدار چاپی انعطاف‌پذیر تشکیل شده است. این حسگر می‌تواند هم به‌عنوان یک موتور الکترواستاتیکی و هم به‌عنوان یک انکودر جابه‌جایی به‌طور مستقل عمل کند. انکودر ساخته شده خطای ۰/۰۹۶ رادیان در محدودی اندازه‌گیری ۰/۶۶ رادیان و قدرت تشخیص ۹۶۰ میکرومتر رادار است [۶].

کیمورا و همکارانش یک انکودر خازنی خطی را ارائه کردند که لغزنده آن بی‌سیم است. اجزای اصلی از فیبر مدار چاپی انعطاف‌پذیر با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر ساخته شده‌اند. این حسگر شامل یک لایه طولانی گیرنده و یک لایه کوتاه واسطه است که به ترتیب شامل چهار فاز و دو فاز الکترودها می‌باشند. واسطه به‌عنوان لغزنده و گیرنده و فرستنده به‌عنوان استاتور استفاده می‌شود. برای نامحدود کردن لغزنده، توان الکتریکی منبع تغذیه توسط القای الکترواستاتیکی به الکترودهای واسطه انتقال داده می‌شوند و در نتیجه سیم‌های الکتریکی لغزنده حذف می‌شود. این لغزنده نامحدود را می‌توان برای کاربردهای حساس که در آن اختلال‌های مکانیکی ناشی از سیم‌های الکتریکی ایجاد می‌شود به کاربرد و این مشکل

را حل کرد. انکودر نمونه آزمایشی خطای ± 4 میکرومتر را نشان داده است [۷].

کارلی و همکارانش یک انکودر خازنی دورانی را که شامل دو قسمت حسگر و کنترلر است، طراحی کردند. تشخیص موقعیت در این نوع انکودر توسط جاروبکی که حول شفت می‌چرخد صورت می‌گیرد. در عمل، کنترلر یک یا چند سیگنال تحریک تولید و این سیگنال‌ها را حداقل به یکی از الکترودهای تحریک ارسال می‌کند. سپس سیگنال باعث ایجاد تغییرات در یک یا چند الکتروده حسگر می‌شود که باعث ایجاد کوپل خازنی بین الکترودها و جاروبک می‌شود. وجود یک جاروبک نزدیک یک الکتروده حسگر، ظرفیت خازنی بین الکتروده حسگر و الکتروده تحریک که کنار یکدیگر هستند، تغییر ایجاد می‌کند. تغییر در این ظرفیت خازنی در میزان ذخیره انرژی توسط الکترودهای حسگر توسط یک یا چند الکتروده تحریک تأثیر می‌گذارد. کنترلر میزان ذخیره شارژ توسط هر الکتروده حسگر را شناسایی می‌کند و با مقایسه میزان شارژ، کنترلر موقعیت جاروبک را تعیین می‌کند [۸].

ژنگ و همکارانش یک انکودر خازنی دورانی جدید را معرفی کردند. این انکودر دارای سه بخش اصلی است: (۱) بخش انتقال (۲) یک جفت الکترودهای منعکس کننده (۳) یک جفت الکتروده گیرنده. عنصر سنجش انکودر از یک استاتور و روتور تشکیل شده است که هر دو با فناوری PCB ساخته شده‌اند. یک طرف استاتور در مقابل روتور که با الکترودهای رسانا تحت پوشش قرار دارد و روتور با یک جفت الکتروده رسانا منعکس کننده پوشش داده شده است. در طرف دیگر مدار پردازش سیگنال نصب شده است. الکترودهای بخش انتقال به همراه چهار ولتاژ تحریک میدان الکتریکی تولید می‌کنند. الکترودهای منعکس کننده که دارای الگوی سینوسی هستند می‌توانند موقعیت زاویه‌ای را بر اساس فرکانس و دامنه سیگنال مدوله شده تشخیص دهد [۹].

بکر و همکارانش نوع جدیدی از انکودر خازنی دورانی را به ثبت رساندند. این انکودر خازنی دورانی شامل یک استاتور و یک روتور است. الکترودهای استاتور به صورت منظم و با فاصله هوایی یکسان کنار یکدیگر طراحی شده‌اند. همچنین الکترودهای استاتور دارای طول یکسان در جهت محیطی هستند. الکترودهای کوپلینگ که همان الکترودهای روتور می‌باشند در قسمت بالایی الکترودهای استاتور قرار دارند. طول این الکترودها دو برابر الکترودهای استاتور می‌باشد. روتور دارای یک بدنه استوانه‌ای شکل است که محور شفت را احاطه کرده است. استاتور و روتور با هم هم محور هستند که با یک ماده دی‌الکتریک از هم جدا شده‌اند. این انکودر شامل ۱۸ الکتروده استاتور و سه الکتروده کوپلینگ می‌باشد که الکترودهای کوپلینگ با فواصل مختلف از یکدیگر در جهت محیطی واقع شده‌اند. در صورت تغییر موقعیت دورانی، انکودر سیگنالی به میکروکنترلر ارسال می‌کند که پس از تجزیه و تحلیل مقدار دوران را مشخص می‌کند [۱۰].

در این مقاله با توجه به مزایا و سادگی ساختار انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید [۷] یک نمونه دورانی-افزایشی آن جهت اندازه گیری جابه‌جایی زاویه ای طراحی و ساخته می‌شود. اشغال فضای کم، تخت بودن و نویز پذیری کم این انکودر نسبت به میدانهای مغناطیسی از جمله مزایایی است که پژوهش در این زمینه را جذاب می‌کند. به دلیل دوار بودن صفحات انکودر (استاتور و روتور) و یکسان نبودن سطح الکترودهای القایی بر خلاف انکودر خازنی خطی، در انکودر دورانی الکترودهای القایی داخلی نسبت به الکتروده خارجی سطح خازنی کمتری دارد و نحوه برقراری تعادل الکتریکی بین الکترودهای فرستنده و گیرنده در انکودر دورانی نسبت به خطی متفاوت است. این انکودر قابلیت نصب در انواع ماشین‌های ابزار را داشته و همچنین می‌تواند در اتوماسیون صنایع استفاده شود.

در ادامه این مقاله و در بخش دوم اصول تئوری و روابط حاکم بر فرآیند با توجه به مدل موجود تشریح می‌شود. در ادامه و در بخش سوم مراحل و روش ساخت این انکودر توضیح داده می‌شود. در بخش چهارم این مقاله روش آشکار سازی سیگنال و تبدیل اختلاف فاز به پالس های قابل شمارش بیان می‌شود. در قسمت پنجم انکودر ساخته شده تست و ارزیابی شده و منحنی خطای آن استخراج می‌شود. نهایتاً در بخش ششم نتایج بدست آمده در این مقاله مرور می‌شود.

۲- اصول تئوری و روابط حاکم بر فرآیند

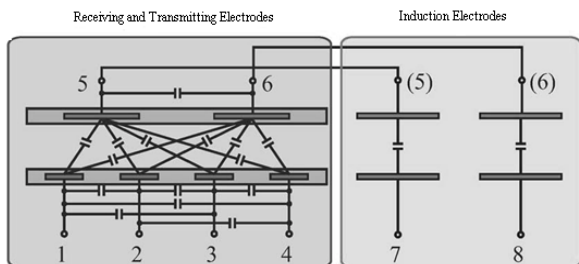
در این بخش از مقاله اصول عملکرد و ساختار انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید بیان شده و بر اساس مدل تحلیلی موجود، روش تبدیل جابه‌جایی لغزنده انکودر به اختلاف فاز و تحلیل سیگنالها توضیح داده می‌شود.

۲-۱ ساختار و اصول عملکرد انکودر خازنی خطی با

القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید

ساختار و اصول عملکرد انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید در [۷] بیان شده است. شکل ۱ شماتیک این انکودر را نشان می‌دهد. این انکودر، شامل دو قسمت می‌باشد؛ قسمت استاتور که به‌عنوان گیرنده و فرستنده و قسمت لغزنده که به‌عنوان واسطه کار می‌کند. لغزنده در مرکز دارای الکترودهای موازی دو فاز می‌باشد. این الکترودهای دو فاز به منظوره ایجاد یک میدان پتانسیل الکتریکی با استفاده از دو سیگنال سینوسی با اختلاف فاز 180° درجه تحریک می‌شوند. این میدان پتانسیل 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 روبه‌روی 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 به‌عنوان الکترودهای القایی استفاده می‌شوند. الکترودهای القایی طوری طراحی شده‌اند که الکترودهای مربوط

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 می‌شوند. این تقریب‌ها بر مبنای نتایج آزمایشی از اندازه‌گیری ضرایب متکی هستند.



شکل ۲: مدل الکتریکی معادل انکودر خازنی [۷]

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

$$q = cv \tag{۴}$$

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

۳-۲ تحلیل سیگنال‌ها

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

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_{\sin \omega t}, -v_{\sin \omega t}\} \tag{۵}$$

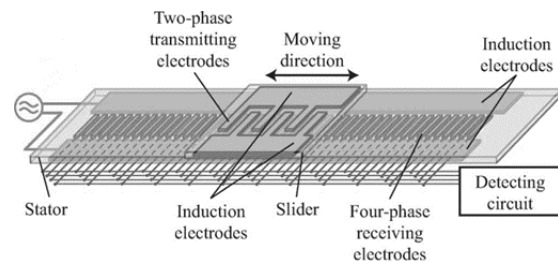
در این رابطه v و ω به ترتیب دامنه ولتاژ و فرکانس زاویه‌ای ولتاژهای اعمال شده در الکترودهای القایی هستند. ولتاژهای v_1 تا v_6 نامعلوم هستند. اینک بردار شارژ q به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$q = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, q_7, q_8\} \tag{۶}$$

در این رابطه q_7 و q_8 بارهای اعمال شده توسط منبع سیگنال به الکترودهای القایی می‌باشند. برای تعیین بارهای ترمینال‌های یک تا چهار این فرض در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از مدار با امپدانس ورودی بالا ولتاژهای الکترودهای چهار فاز اندازه‌گیری می‌شوند و به این ترتیب هیچ‌گونه بار الکتریکی به درون یا خارج از الکترود جریان نخواهد داشت. طبق این فرض بار ترمینال‌های یک تا چهار صفر خواهد بود. بار ترمینال‌های پنج و شش نیز صفر خواهد بود. زیرا به هیچ منبع الکتریکی متصل نمی‌باشند. با قرار دادن معادله ۱ و ۵ و ۶ در معادله ۴ ولتاژ القایی v_1, v_2, v_3 و v_4 بدین شرح بوجود می‌آید.

$$\begin{aligned} V_1 &= K_c v \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_2 &= K_c v \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_3 &= -K_c v \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_4 &= -K_c v \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{۷}$$

به لغزنده همیشه بر روی الکترودهای استاتور قرار دارد. الکترودهای القایی قسمت استاتور در طی عملیات با استفاده از دو موج سینوسی قرینه تحریک می‌شود. از آن‌جا که 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 آنجایی که الکترودهای القایی لغزنده به الکترودهای دو فاز متصل هستند می‌توان انرژی الکتریکی را بدون سیم به الکترودهای دو فاز منتقل می‌شود.



شکل ۳: ساختار شماتیک انکودر خطی با القای الکترودهای خازنی [۷]

۲-۲ مدل تحلیلی انکودر

شکل ۲ مدل الکتریکی معادل برای این انکودر را نشان می‌دهد. در این مدل ساختار انکودر توسط هشت ترمینال نمایش داده شده، ترمینال‌های یک تا چهار مربوط به چهار فاز روی استاتور است و ترمینال‌های پنج و شش مربوط به الکترودهای دو فاز که به الکترودهای القایی لغزنده متصل هستند. ترمینال‌های هفت و هشت 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 این گونه ظرفیت‌های خازنی را به شکل ریاضی نشان داد. با در نظر گرفتن قرینه‌های هندسی میان ترمینالها، ماتریس برای این انکودر را می‌توان به شرح زیر بیان کرد.

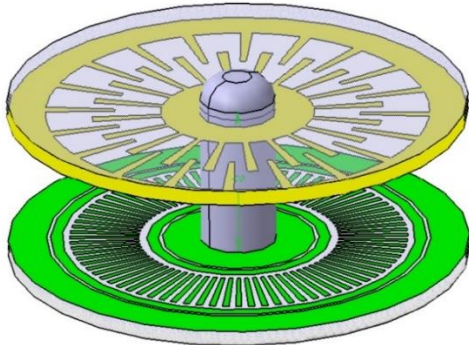
$$\begin{bmatrix} c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} & c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \pi) & 0 & 0 \\ -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ -c_{tb} & -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} & c_m(\theta_x - \pi) & c_m(\theta_x) & 0 & 0 \\ -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} & -c_{st} & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & -c_t + c_l & -c_l & -c_l & 0 \\ c_m(\theta_x - \pi) & c_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & -c_l & c_{st} + c_l & 0 & -c_l \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_l & 0 & c_l \end{bmatrix} \tag{۱}$$

$$C_m(\theta_x) = -C_{m0} - C_{m1} \cos(\theta_x) \tag{۲}$$

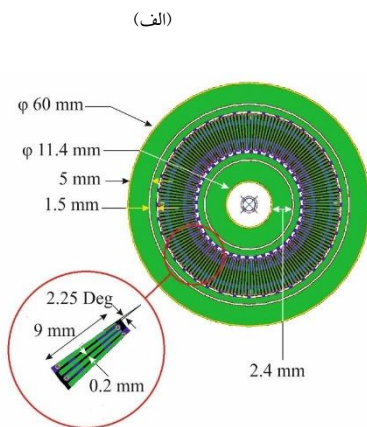
$$\theta_x = \frac{\pi}{2p} x \tag{۳}$$

در این ماتریس $C_{st}, C_{sl}, C_{ta}, C_{tb}, C_l, C_i, C_{m0}, C_{m1}$ همگی مقادیر ثابت مثبتی هستند که توسط روابط هندسی میان ترمینالها مشخص می‌شوند. متغیر x میزان جابه‌جایی لغزنده و θ_x نشان‌دهنده زاویه الکتریکی آن است

القایی بیرونی و درونی دارای عرض شعاعی پنج میلی‌متر استاتور و روتور می‌باشد. همه ترمینال‌های ورودی و خروجی در قسمت استاتور قرار گرفته‌اند و هیچ سیمی به روتور متصل نمی‌باشد و به راحتی از استاتور جدا می‌گردد. فاصله بین استاتور و لغزنده تقریباً ۰/۱ میلی‌متر بوده که توسط لایه اپوکسی و گپ هوایی ایجاد گردیده است.



شکل ۳: شکل شماتیک انکودر خازنی دورانی طراحی شده



شکل ۴: (الف) نمونه ساخته شده و (ب) مشخصات هندسی استاتور انکودر

که در این رابطه K_c عبارتند از:

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

سیگنال‌ها در معادله ۷ بعد از تقویت و تفاضل به صورت معادله ۹ می‌باشند.

$$\begin{aligned} V_A &= K_o(v_1 - v_3) = 2K_o K_c \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_B &= K_o(v_2 - v_4) = 2K_o K_c \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (9)$$

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 ۹ سیگنال‌های مدوله شده دامنه هستند. تفکیک این سیگنال‌ها روابط زیر را می‌دهد.

$$\begin{aligned} V_A &= A \cos(\theta_x) \\ V_B &= A \sin(\theta_x) \end{aligned} \quad (10)$$

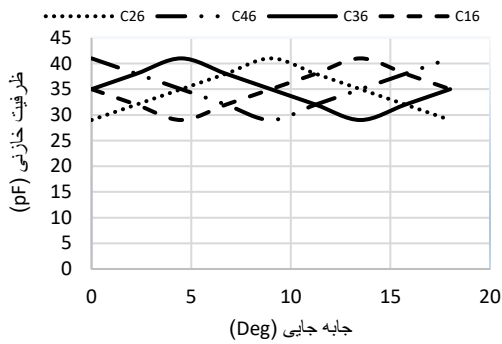
در این رابطه A تقویت نهایی پس از ضرب شدن در معادله ۹ و فیلتر شدن به وسیله دم‌ولتور سنکرون می‌باشد. نهایتاً، موقعیت لغزنده θ_x از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\theta_x = \tan^{-1} \frac{A \sin(\theta_x)}{A \cos(\theta_x)} \quad (11)$$

۳- ساخت انکودر خازنی

با توجه به شکل خطی این انکودر، یک نوع دورانی آن طراحی و ساخته شد. در این انکودر هر دو قسمت استاتور و روتور با استفاده از فناوری فیبر مدار چاپی (PCB) و بر روی فیبرهای معمولی ساخته می‌شوند و بنابراین به دلیل ضخامت کم می‌توان در فضاهای محدود نصب گردد. انکودر شامل یک لایه استاتور و یک لایه روتور است که به ترتیب دارای الکترودهای چهار فاز و دو فاز هستند. استاتور به عنوان فرستنده و گیرنده و روتور جهت واسطه استفاده می‌شود. برای ایجاد روتور نامقید، از روش القای الکترواستاتیک استفاده می‌شود و تغذیه الکتریکی لایه واسطه توسط القای الکترواستاتیکی تأمین می‌شود. از این رو هرگونه اتصال سیمی لغزنده حذف می‌شوند. شکل ۳ نمونه طراحی شده انکودر خازنی دورانی را نشان می‌دهد.

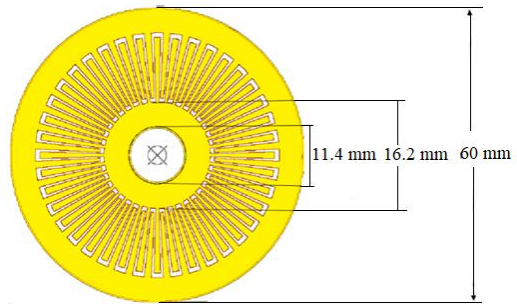
استاتور و روتور ساخته شده انکودر خازنی در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. ضخامت آنها دو میلی‌متر می‌باشد که باعث می‌شود انکودر قابلیت نصب در فضاهای محدود و باریک را داشته باشد. قطر خارجی استاتور و روتور ۶۰ میلی‌متر انتخاب گردیده است، تا به اندازه تجاری آن نزدیک باشد. گام الکترودهای گیرنده به واسطه محدودیت فاصله بین الکترودها به ۲/۲۵ درجه محدود می‌شود. علت این محدودیت این است که ضخامت و فاصله پایه الکترودها با فناوری ساخت موجود در کشور کمتر از ۰/۲ میلی‌متر نمی‌تواند باشد. الکترودهای گیرنده در بزرگ‌ترین طول محیطی ۳/۵۳ میلی‌متر الکترودهای واسطه در روتور دارای عرض شعاعی نه میلی‌متر بزرگ‌ترین طول محیطی ۷/۰۶ میلی‌متر می‌باشند. الکترودهای



شکل ۷: نمودار ظرفیت خازنی الکترودهای چهار فاز استاتور نسبت به الکترودهای روتور



(الف)

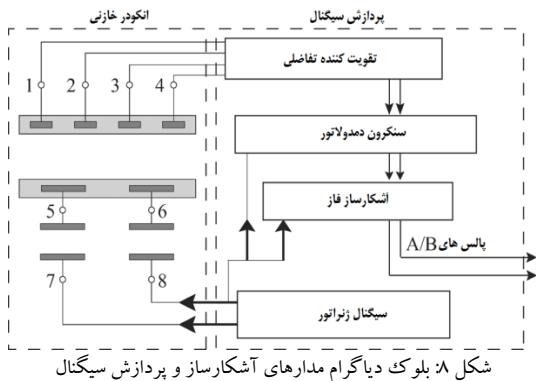


(ب)

شکل ۵: (الف) نمونه ساخته شده و (ب) مشخصات هندسی روتور انکودر

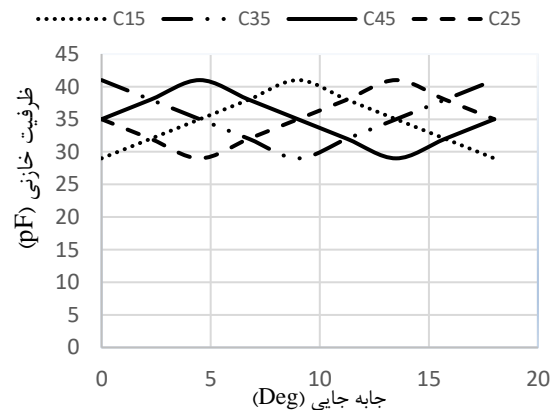
۴- آشکارسازی سیگنال

شکل ۸ نمودار بلوکی 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 ۱۸۰ درجه اختلاف فاز هستند برای الکترودهای القایی تولید می‌شود و یکی از آن‌ها به‌عنوان سیگنال مرجع در جداکننده فاز و دمدولاتور سنکرون مورد استفاده قرار می‌گیرد. الکترودهای ۴ فاز گیرنده موج‌های سینوسی مدوله شده مطابق معادله ۷ را شناسایی می‌کنند، آنگاه این سیگنال‌های اندازه‌گیری توسط تقویت‌کننده‌ی دیفرانسیلی طبق رابطه ۹ تقویت و از هم کم می‌شوند. خروجی تقویت‌کننده‌ی دیفرانسیلی توسط دمدولاتورهای سنکرون، دمدوله شده و نهایتاً جداکننده فاز را برای سیگنال‌ها محاسبه می‌کند. در اینجا خروجی به پالس‌های A/B تبدیل شدند. اگر آشکارساز در هر سیکل ۱۰۲۴ پالس تولید کند آنگاه قدرت تشخیص انکودر برابر است با p تقسیم بر ۱۰۲۴.



شکل ۸: بلوک دیاگرام مدارهای آشکارساز و پردازش سیگنال

در انکودر ساخته شده سیگنال‌های تحریک انکودر که دو سیگنال سینوسی با ۱۸۰ درجه اختلاف فاز و دامنه‌ی ۳/۵ و ۱ ولت و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز می‌باشد، به الکترودهای القایی در استاتور ارسال می‌گردد. برای ایجاد سیگنال تحریک از اسیلاتور داخلی یک آی‌سی AD2S1210

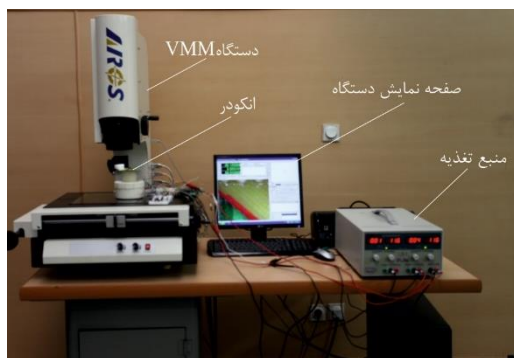


شکل ۶: نمودار ظرفیت خازنی الکترودهای چهار فاز استاتور نسبت به الکترودهای روتور

فراهم می‌آورد. نهایتاً این پالس‌ها به یک میکروکنترلر فرستاده شده تا شمارش شده و مقدار جابه‌جایی برحسب میکرومتر به دست آید.

۵- ارزیابی عملکرد انکودر و نتایج آزمایش‌ها

برای ارزیابی انکودر ساخته شده عملکرد آن با یک دستگاه اندازه‌گیری ویدیویی (VMM) مدل (ARCS - KIMC20) مورد آزمایش قرار گرفت. این دستگاه دارای قدرت تشخیص یک میکرومتر در اندازه‌گیری‌های خطی و 0.05° درجه در اندازه‌گیری زوایا است که از قدرت تشخیص انکودر ساخته شده در این مقاله کوچکتر بوده و میتواند به عنوان مرجعی برای ارزیابی انکودر استفاده باشد. شکل ۹ نحوه آزمایش و چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. در این آزمایشات انکودر ساخته شده بر روی میز دستگاه VMM قرار گرفته و روتور آن با کمک یک میله متصل به بدنه و قابلیت جابجایی محورهای میز دستگاه VMM میچرخد. در این آزمایش‌ها عملکرد انکودر در دو جابه‌جایی زاویه‌ای 3° و 10° درجه در 10 نقطه متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت و منحنی خطای آن استخراج گردید. بدین ترتیب که روتور انکودر بصورت دستی چرخانده شد و در 10 نقطه متفاوت مقادیر اندازه‌گیری شده جابه‌جایی زاویه‌ای از انکودر و دستگاه VMM خوانده شده و با هم مقایسه میشوند. توجه به اینکه در این دستگاه امکان چرخش زاویه‌ای با مقادیر مساوی و به‌صورت موتوری وجود نداشت چرخش روتور انکودر به‌صورت دستی انجام گرفت و به همین دلیل فاصله نقاط مورد ارزیابی در منحنی خطا یکسان نیست. نهایتاً مقادیر اندازه‌گیری شده از انکودر و دستگاه VMM از یکدیگر کسر شده و مقدار خطا برای هر نقطه به دست می‌آید.



شکل ۹: چیدمان آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد انکودر دورانی ساخته شده

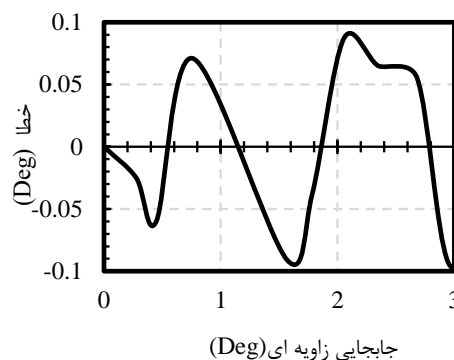
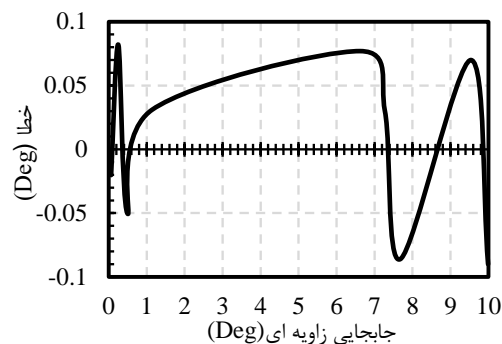
شکل ۱۰ منحنی خطای انکودر در دو جابجایی زاویه‌ای ذکر شده را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۱۰ انکودر دارای ماکزیمم خطای در حدود $\pm 0.09^\circ$ درجه می‌باشد. در نمودار خطای خروجی انکودر محور عمودی مقدار انحراف خروجی انکودر نسبت به خروجی دستگاه اندازه‌گیری VMM می‌باشد و محور افقی جابه‌جایی صورت گرفته است. طبق محاسبات و طراحی‌ها، قدرت تشخیص انکودر 0.087° درجه می‌باشد. ولی با توجه به نمودارهای بالا انکودر دارای خطای در حدود $\pm 0.09^\circ$ درجه می‌باشد. از دلایل خطای ایجاد شده می‌توان به دقیق نبودن مجموعه آزمایشگاهی برای آزمایش انکودر اشاره کرد. میز دستگاه

استفاده شده است. آی‌سی AD2S1210 یک اسپلاتور مرجع می‌باشد. که کاربردهایی نظیر کنترل موقعیت و سرعت و تبدیل اطلاعات آنالوگ زاویه‌ای به فرم دیجیتال را دارد. بدین منظور اسپلاتور داخلی، برای نوسان سازی با فرکانس 20 کیلو هرتز برنامه ریزی شده است. به دلیل کوچک تر بودن سطح خازنی الکترودهای القایی داخلی استاتور در مقایسه با الکترودهای القایی خارجی آن، نیاز به ولتاژ بیشتری نسبت به الکترودهای خارجی دارند. ولتاژ اعمالی الکترودهای خارجی نسبت به الکترودهای داخلی به نسبت مساحت های آن‌ها بوده و تقریباً نسبت 1 به 3 دارند. بنابراین نیاز به تغییر در دامنه‌های سیگنال‌های خروجی اعمالی به استاتور است. در این قسمت، جهت اعمال سیگنال مورد نظر نیاز از بافر تضعیف کننده استفاده می‌شود. از آنجایی که الکترودهای القایی در استاتور و روتور با یکدیگر همپوشانی دارند میدان الکتریکی بین آنها ایجاد می‌شود و از طریق القای الکترواستاتیک ولتاژی روی الکترودهای القایی روتور ایجاد می‌گردد.

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. 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 120 میلی ولت دارند که تقویت شده و به پایه‌های آی سی پردازشگر متصل می‌شوند. در این مرحله خروجی الکترودها چهار فاز گیرنده باید دوبه‌دو 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 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 ایجاد می‌شود V_A و V_B است که دو سیگنال سینوسی با 90° درجه اختلاف فاز به‌صورت معادله 9 هستند. 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 به دست آید. برای این کار از یک دمدمولاتور سنکرون استفاده می‌شود. مدار دمدمولاتورهای سنکرون شامل مدار ضرب کننده و یک فیلتر پایین گذر می‌باشد. ابتدا سیگنال تحریک در سیگنال‌های V_A و V_B ضرب شده و بعد از فیلتر پایین گذر عبور داده می‌شود تا سیگنال‌های معادله 10 حاصل شود. بعد از دمدموله کردن و رسیدن به سیگنال‌های معادله 10 و با توجه به اینکه هر سیکل از این سیگنال‌ها به ازای حرکت به اندازه چهار برابر گام شکل می‌گیرد؛ سیگنال‌ها به طبقه جداکننده 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 $2/25$ درجه می‌باشد قدرت تشخیص انکودر برابر $(9/1024)$ درجه یعنی 0.087° درجه می‌باشد. خروجی آی‌سی استفاده شده دارای دو سری پالس با اختلاف فاز 90° درجه می‌باشد که امکان تشخیص تغییر جهت حرکت را

- [2] F. Zhu et al, "A Simple Capacitive Displacement Sensor", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 26, no. 1, pp.265-269, 1991.
- [3] J. Nelson et al., "Capacitive Rotary Position Encoder", U.S. Patent No.5,736,865. 1998
- [4] M. Gondoh, "Electrostatic Encoder and Electrostatic Displacement Measuring Method", U.S. Patent No. 7,199,727. 2007.
- [5] M. Kim and W. Moon "A New Linear Encoder-Like Capacitive Displacement Sensor", *Measurement*, vol. 39, no. 6, pp. 481-489, 2006.
- [6] T. Nishijima et al, "A Flexible Sensor Measuring Displacement and Bending", *Measurement Science and Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 045205, 2009.
- [7] F. Kimura et al, "Capacitive-Type Flexible Linear Encoder with Untethered Slider Using Electrostatic Induction." *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no.5, pp. 972-978. 2010.
- [8] C. Carley et al, "Capacitive Position Encoder", U.S. Patent No.9,035,663 B2, 2015.
- [9] D. Zheng et al, "A Capacitive Rotary Encoder Based on Quadrature Modulation and Demodulation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.64, no.1, pp.143-153, 2015.
- [10] U. Bakes et al, "Capacitive Rotary Encoder", U.S. Patent No.9,250,058 B2.2, 2016.

انتخاب شده برای ارزیابی انکودر فاقد قابلیت چرخش موتوری بوده و روتور انکودر به صورت دستی حرکت داده شده که این باعث تغییرات گپ هوایی بین روتور و استاتور و هم ترازوی الکترودها می شود. همچنین عدم هم مرکزی استاتور و روتور دلیل محتمل دیگری است که باعث به وجود آمدن خطا در اندازه گیری شده است.



شکل ۱۰: نمودار خطا خروجی انکودر به ازای ۱۰ و ۳ درجه جابجایی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک انکودر خازنی دورانی جدید با استفاده از القای الکترواستاتیکی طراحی، آزمایش و تحلیل شد. در این انکودر فرستنده و گیرنده هر دو از فیبر مدار چاپی درست شده اند. این انکودر دارای الکترودهای چهار فاز گیرنده و دو فاز فرستنده است. گام الکترودهای واسطه ۹ درجه و گام الکترودهای گیرنده ۲/۲۵ درجه است. تغذیه الکتریکی الکترودهای فرستنده از طریق القای الکترواستاتیکی محقق می شود. انکودر توسط الکترودهای گیرنده سیگنال مدوله موقعیت را دریافت می کند. با پردازش سیگنال می توان موقعیت روتور را محاسبه کرد. نهایتاً با آزمایش ها انجام گرفته بر روی یک نمونه انکودر ساخته شده حداکثر خطای آن ± 0.09 درجه به دست آمد.

مراجع

- [1] K. Sasaki, "Electrostatic Capacity Type Encoder", U.S. Patent, No. 4,788,546. 29, 1988.