مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، صفحه ۶۲-۵۵

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 مکاترونیک، گروه مکانیک ، دانشگاه اراک assadi.fatemeh1@gmail.com
[۲] استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک m-modabberifar@araku.ac.ir
[۳] استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، دانشگاه اراک b-mirzakhani@araku.ac.ir
[۴] استادیار، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا همدان a.pak@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۸ ویرایش: ۱۳۹۶/۹/۳ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۹

چکیده: کد کننده های پالسی (انکودرها) ازجمله 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 مورداندازه‌گیری به جابه‌جایی آن را قابل‌اندازه‌گیری می‌کنند. مهم‌ترین ویژگی انکودر تبدیل جابه‌جایی به پالس‌های قابل‌شمارش 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 الکترواستاتیک 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 تشکیل‌شده 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 ۰/۰۹± 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, increamental encoder

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

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 تشکیل‌شده است، توسط ساساکی به ثبت رسید. دیسک اول ثابت و دارای الکترودهای هشت فاز می‌باشد که سیگنال‌های تحریک هشت فاز با ۴۵ درجه اختلاف‌فاز 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 الکترود می‌باشد، هر الکترود دیسک متحرک مقابل چهار الکترود دیسک اول قرار می‌گیرد و مجموع سیگنال‌های چهار فاز مقابل آن بر روی الکترود متحرک القا می‌شود و این سیگنال القایی از طرف دیگر دیسک بر روی دیسک سوم القا می‌شود و با اندازه‌گیری اختلاف‌فاز ایجادشده براثر حرکت می‌توان به جابه‌جایی زاویه‌ای رسید[۱].

ژو و همکارانش یک حسگر جابه‌جایی ساده خازنی ارائه کردند. این حسگر از دو صفحه‌ی موازی تشکیل‌شده؛ یکی از صفحه‌ها با الکترودهای شانه‌ای بافاصله‌های یکنواخت تشکیل یک مقیاس را می‌دهد و دیگری از الکترودهای شانه‌ای با اندازه‌ای کوچک‌تر که حکم آشکارساز را دارد تشکیل‌شده است. با اسکن ظرفیت خازنی بین الکترودها و مقایسه فاز آن با سیگنال مرجع که به مقیاس داده‌شده است مقدار جابه‌جایی به دست می‌آید. آن‌ها با پهنای الکترودهای آشکارساز ۲۰۰ میکرومتر و فاصله‌ی بین دو الکترود 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 باکمان های 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 می باشد که از حاصل جمع شکل موج و عبور از صفر، فاز سیگنال را شناسایی می کند 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، تشکیل‌شده است. سیگنال‌های تحریک که دو موج سینوسی قرینه می‌باشند به الکترودهای القایی در قسمت ثابت متصل می‌شوند و سیگنالی از طریق القای الکترواستاتیک 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، هرکدام دارای سیگنالی می‌شود که نسبت به هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد و با حرکت قسمت متحرک فاز سیگنال‌ها تغییر می کند. 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 یک‌لایه 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 مشاهده‌شده 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 تشکیل‌شده است. این حسگر می‌تواند هم به‌عنوان یک موتور الکترواستاتیکی و هم به‌عنوان یک انکودر جابه‌جایی به‌طور مستقل عمل کند. انکودر ساخته‌شده خطای ۰/۰۹۶ رادیان در محدودی اندازه‌گیری ۰/۶۶ رادیان و قدرت تشخیص ۹۶۰ میکرومتر رادارا است[۶].

کیمورا و همکارانش یک انکودر خازنی خطی را ارائه کردند که لغزنده آن بی‌سیم است. اجزای اصلی از فیبر مدار چاپی انعطاف‌پذیر باضخامت ۰/۲ میلی‌متر ساخته‌شده‌اند. این حسگر شامل یک‌لایه طولانی گیرنده و یک لایه کوتاه واسطه است که به ترتیب شامل چهار فاز و دو فاز الکترود 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 درنتیجه 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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

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 الکترود حسگر می‌شود که باعث ایجاد کوپل خازنی بین الکترودها و جاروبک می‌شود. وجود یک جاروبک نزدیک یک الکترود حسگر، ظرفیت خازنی بین الکترود حسگر و الکترود تحریک که کنار یکدیگر هستند، تغییر ایجاد می‌کند. تغییر در این ظرفیت خازنی در میزان ذخیره انرژی توسط الکترودهای حسگر توسط یک یا چند الکترود تحریک تأثیر می‌گذارد. کنترلر میزان ذخیره شارژ توسط هر الکترود 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 منعکس‌کننده ۳) یک جفت الکترود گیرنده . عنصر سنجش انکودر از یک استاتور و روتور تشکیل‌شده است که هر دو با فنّاوری PCB ساخته‌شده‌اند. یک‌طرف استاتور در مقابل روتور که با الکترودهای رسانا تحت پوشش قرار دارد و روتور با یک جفت الکترود رسانا منعکس‌کننده پوشش داده‌شده است. در طرف دیگر مدار پردازش سیگنال نصب‌شده است. الکترودهای بخش انتقال به همراه چهار ولتاژ تحریک میدان الکتریکی تولید می‌کنند. الکترودهای منعکس‌کننده که دارای الگوی سینوسی هستند می‌توانند موقعیت زاویه‌ای را بر اساس فرکانس و دامنه سیگنال مدوله‌شده تشخیص دهد[۹].

بکز و همکارانش نوع جدیدی از انکودر خازنی دورانی را به ثبت رساندند. این انکور خازنی دورانی شامل یک استاتور و یک روتور است. الکترودهای استاتور به صورت منظم و بافاصله هوایی یکسان کنار یکدیگر طراحی‌شده‌اند. 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 باهم هم‌محور هستند که با یک ماده دی‌الکتریک از هم جداشده‌اند. این انکودر شامل ۱۸ الکترود استاتور و سه الکترود کوپلینگ می باشد که الکترودهای کوپلینگ با فواصل مختلف از یکدیگر در جهت محیطی واقع‌شده‌اند. در صورت تغییر موقعیت دورانی، انکودر سیگنالی به میکروکنترلر ارسال می‌کند که پس از تجزیه‌وتحلیل 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 ازجمله 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 الکترود 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. نهایتا در بخش ششم نتایج بدست آمده در این مقاله مرور می‌شود.

۲- اصول تئوری و روابط حاکم بر فرآیند

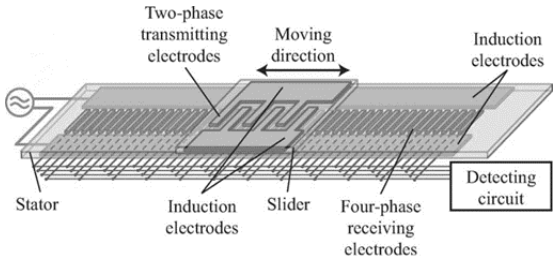
در این بخش از مقاله اصول عملکرد و ساختار انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید بیان شده و بر اساس مدل تحلیلی موجود، روش تبدیل جابه‌جایی لغزنده انکودر به اختلاف فاز و تحلیل سیگنالها توضیح داده می‌شود.

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] بیان‌شده 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 می‌کنند. لغزنده در مرکزش 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 ۱۸۰ درجه تحریک می‌شوند. این میدان پتانسیل الکتریکی به‌وسیله الکترودهای چهار فاز روی استاتور شناسایی و تشخیص داده می‌شود. استاتور و لغزنده طوری هم‌راستا قرارگرفته‌اند 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 طراحی‌شده‌اند که الکترودهای مربوط

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

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 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. ازآنجایی‌که الکترودهای القایی لغزنده به الکترودهای دو فاز متصل هستند می‌توان انرژی الکتریکی را بدون سیم به الکترودهای دو فاز منتقل می‌شود.



شکل ۱: ساختار شماتیک انکودر خطی با القای الکترواستاتیک 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 داده‌شده، 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 این‌گونه ظرفیت‌های خازنی را به شکل ریاضی نشان داد. با در نظر گرفتن قرینه‌های هندسی میان ترمینالها، ماتریس برای این انکودر را می توان به شرح زیر بیان کرد.

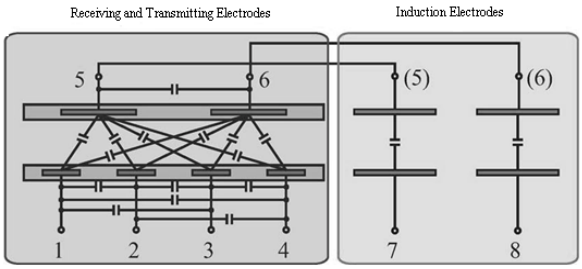
$$\begin{bmatrix} c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} \\ -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} & -c_{tb} \\ -c_{tb} & -c_{ta} & c_{st} & -c_{ta} \\ -c_{ta} & -c_{tb} & -c_{ta} & -c_{st} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x-\pi) & 0 & 0 \\ c_m(\theta_x-\frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x+\frac{\pi}{2})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

$$\begin{bmatrix} c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x-\frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x-\frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x+\frac{\pi}{2}) \\ c_m(\theta_x-\pi) & c_m(\theta_x+\frac{\pi}{2}) & c_m(\theta_x) & c_m(\theta_x-\frac{\pi}{2}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{sl}+c_l & -c_l & -c_l & 0 \\ -c_l & c_{sl}+c_l & 0 & -c_l \\ -c_l & 0 & c_l & 0 \\ 0 & -c_l & 0 & c_l \end{bmatrix} \quad (۱)$$

$$C_m(\theta_x) = -C_{mo} - C_{ml}\cos(\theta_x) \quad (۲)$$

$$\theta_x = \frac{\pi}{2p}x \quad (۳)$$

در این ماتریس C_{st}, C_{sl}, C_{ta}, C_{tb}, C_l, 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 نشان‌دهنده 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 به‌طور تقریبی تعیین می‌شود. 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 به‌صورت زیر بیان کرد.

$$q = cv \quad (۴)$$

در این رابطه q و v عبارت‌اند از بردارهای ۱×۸ که به ترتیب نمایانگر شارژها و ولتاژهای هشت ترمینال می‌باشد.

۲-۳ تحلیل سیگنال‌ها

برای راه اندازی انکودر، ولتاژهای تحریک به الکترودهای القایی استاتور که ترمینال‌های هفت و هشت هستند اعمال می‌شود. بنابراین ولتاژ بردار $\mathbf{V}$ عبارتست از:

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

در این رابطه V و ω به ترتیب دامنه ولتاژ و فرکانس زاویه‌ای ولتاژهای اعمال شده در الکترودهای القایی هستند. ولتاژهای V1 تا V6 نامعلوم هستند. اینک بردار شارژ q به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$q = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, q_7, q_8\} \quad (۶)$$

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 می آید.

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

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

که در این رابطه k_c عبارتند از:

$$K_c = \frac{2c_i c_{ml}}{-4c_{ml}^2 + (c_i + c_l + c_{sl})(c_{st} + c_{tb})} \quad (۸)$$

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

$$\begin{aligned} \mathrm{V_A} &= K_o(v_1 - v_3) = 2K_oK_c\cos(\theta_x)\sin(\omega t) \\ \mathrm{V_B} &= K_o(v_2 - v_4) = 2K_oK_c\sin(\theta_x)\sin(\omega t) \end{aligned} \quad (۹)$$

در این‌جا k_o ضریب تقویت، تقویت‌کننده 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 می دهد.

$$\begin{aligned} V_A &= A\cos(\theta_x) \\ V_B &= A\sin(\theta_x) \end{aligned} \quad (۱۰)$$

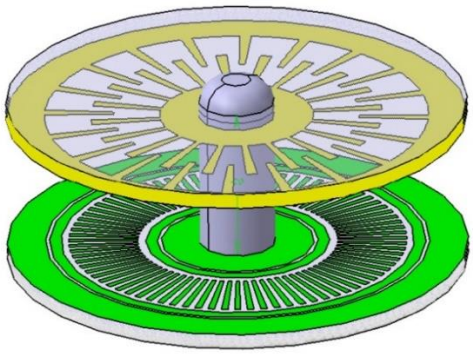
در این رابطه A تقویت نهایی پس از ضرب شدن در معادله ۹ و فیلتر شدن به وسیله دمدولاتور سنکرون می‌باشد. نهایتاً، موقعیت لغزنده θ_x از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$\theta_x = \tan^{-1}\frac{Asin(\theta_x)}{Acos(\theta_x)} \quad (۱۱)$$

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 فنّاوری 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 یک‌لایه استاتور و یک‌لایه روتور است که به ترتیب دارای الکترودهای چهار فاز و دو فاز هستند. استاتور به‌عنوان 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. ازاین‌رو هرگونه اتصال سیمی لغزنده حذف می‌شوند. شکل ۳ نمونه طراحی‌شده انکودر خازنی دورانی را نشان می‌دهد.

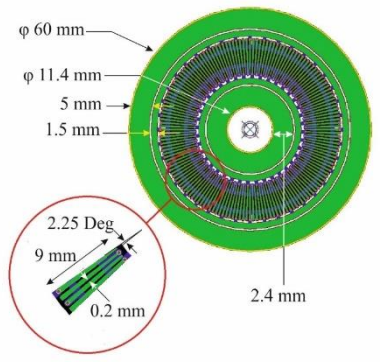
استاتور و روتور ساخته‌شده انکودر خازنی در شکل ۴ و ۵ نشان داده‌شده است. ضخامت آنها دو میلی‌متر می‌باشد که باعث می‌شود انکودر قابلیت نصب در فضاهای محدود و باریک را داشته باشد. قطر خارجی استاتور و روتور ۶۰ میلی‌متر انتخاب گردیده است، تا به‌اندازه تجاری آن نزدیک باشد. گام الکترودهای گیرنده به‌واسطه محدودیت فاصله بین الکترودها به۲/۲۵ درجه محدود می‌شود. علت این محدودیت این است که ضخامت و فاصله پایه الکترودها با فنّاوری 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 القایی بیرونی و درونی دارای عرض شعاعی پنج میلی‌متر استاتور و روتور می‌باشد. همه ترمینالهای ورودی وخروجی در قسمت استاتور قرار گرفته‌اند و هیچ سیمی به روتور متصل نمی‌باشد و به‌راحتی از استاتور جدا می گردد. فاصله بین استاتور و لغزنده تقریباً ۰/۱میلی‌متر بوده که توسط لایه اپوکسی و گپ هوایی ایجاد گردیده است.



شکل ۳: شکل شماتیک انکودر خازنی دورانی طراحی شده



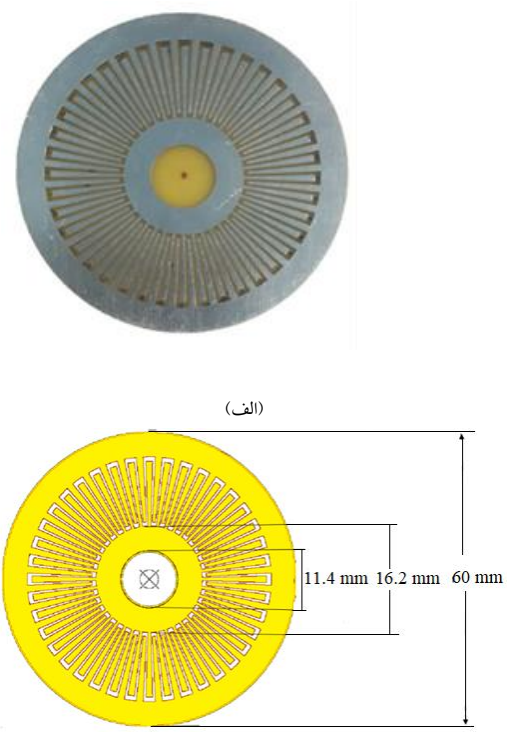
(الف)



(ب)

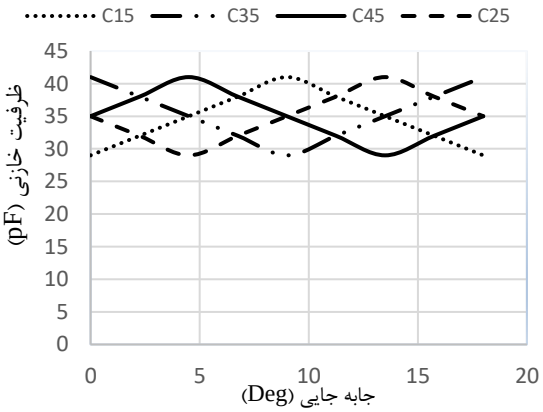
شکل۴: (الف) نمونه ساخته شده و (ب) مشخصات هندسی استاتور انکودر

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

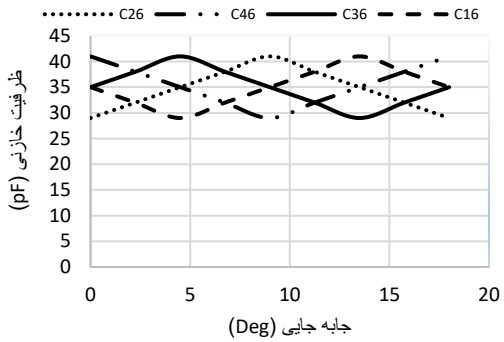


شکل۵: (الف) نمونه ساخته شده و (ب) مشخصات هندسی روتور انکودر

ضرایب ظرفیت‌های خازنی این نمونه انکودر با استفاده از دستگاه LCR متر HAMEG مدل HM-8118 اندازه‌گیری شده و نتایج آن در شکل۶ و۷ آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ظرفیت بین الکترودهای فرستنده و الکترودهای گیرنده موج سینوسی چهار فاز را نشان می‌دهد. شماره‌گذاری خازن‌ها بر اساس شکل مدل دو به‌گونه‌ای که c15 با توجه به مدل تحلیلی یعنی ظرفیت خازنی بین الکترود اولی در استاتور و پنجم در روتور است. مابقی الکترودها نسبت به هم‌ظرفیت خازنی ثابتی دارند.



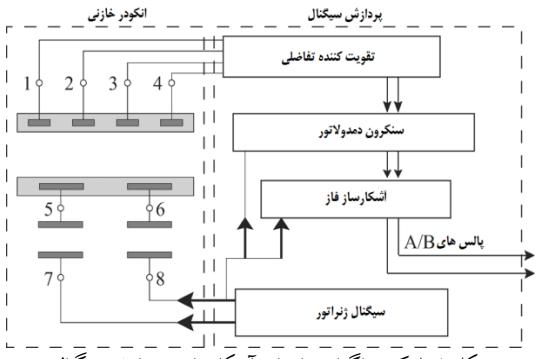
شکل ۶: نمودار ظرفیت خازنی الکترودهای چهار فاز استاتور نسبت به الکتروهای روتور



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

٤-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 اختلاف‌فاز هستند برای الکترودهای القایی تولید می‌شود و یکی از آن‌ها به‌عنوان سیگنال مرجع در جداکننده فاز و دمدولاتور سنکرون مورداستفاده 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 دمدلاتورهای 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 تقسیم‌بر ۱۰۲۴.



شکل ۸: بلوک دیاگرام مدارهای آشکارساز و پردازش سیگنال

در انکودر ساخته شده سیگنال‌های تحریک انکودر که دو سیگنال سینوسی با ۱۸۰ درجه اختلاف‌فاز 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

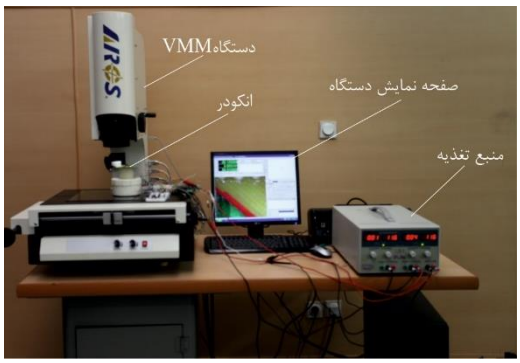
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

استفاده شده است. آی‌سی AD2S1210 یک اسیلاتور مرجع می باشد. که کاربردهایی نظیر کنترل موقعیت و سرعت و تبدیل اطلاعات آنالوگ زاویه‌ای به فرم دیجیتال را دارد. بدین منظور اسیلاتور داخلی، برای نوسان سازی با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز برنامه ریزی شده‌است. 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 تقریبا نسبت ۱ به ۳ 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. به‌این‌ترتیب چهار سیگنال با ۹۰ درجه اختلاف‌فاز 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 ۱۲۰ میلی ولت دارند که تقویت‌شده 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 استفاده‌شده 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 ۹۰ درجه اختلاف‌فاز به‌صورت معادله ۹ هستند. بعد از تفاضل سیگنال‌ها باید سیگنال تحریک از سیگنال‌های V_A و V_B حذف شود تا سیگنال‌های معادله ۱۰ که اطلاعات موقعیت لغزنده در آن‌ها قرار دارد به دست آید. برای این کار از یک دمدولاتور سنکرون استفاده می‌شود. مدار دمدولاتورهای 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 ۱۰ حاصل شود. بعد از دمدوله کردن و رسیدن به سیگنال‌های معادله ۱۰ و با توجه به اینکه هر سیکل از این سیگنال‌ها به ازای حرکت به‌اندازه چهار برابر گام شکل می‌گیرد؛ سیگنال‌ها به طبقه جداکننده فاز که داخل آی‌سی پردازشگر است فرستاده می‌شود؛ و به ازای هر حرکت به‌اندازه ۴ گام آی‌سی ۱۰۲۴ پالس تولید می‌کند. با توجه به این‌که گام برابر ۲/۲۵ درجه می‌باشد قدرت تشخیص انکودر برابر (۹/۱۰۲۴) درجه یعنی ۰/۰۰۸۷ درجه می‌باشد. خروجی آی‌سی استفاده شده دارای دو سری پالس با اختلاف‌فاز ۹۰ درجه می‌باشد که امکان تشخیص تغییر جهت حرکت را فراهم می‌آورد. نهایتاً این پالس‌ها به یک میکروکنترلر فرستاده‌شده تا شمارش‌شده و مقدار جابه‌جایی برحسب میکرومتر به دست آید.

۵- ارزیابی عملکرد انکودر و نتایج آزمایش‌ها

برای ارزیابی انکودر ساخته‌شده 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 ۰/۰۰۵ 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 ۳ و ۱۰ درجه در ۱۰ نقطه متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت و منحنی خطای آن استخراج گردید. بدین ترتیب که روتور انکودر بصورت دستی چرخانده شد و در ۱۰ نقطه متفاوت مقادیر اندازه گیری شده جابه‌جایی زاویه ای 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. نهایتا مقادیر اندازه گیری شده از انکودر و دستگاه VMM از یکدیگر کسر شده و مقدار خطا برای هر نقطه به‌دست می آید.

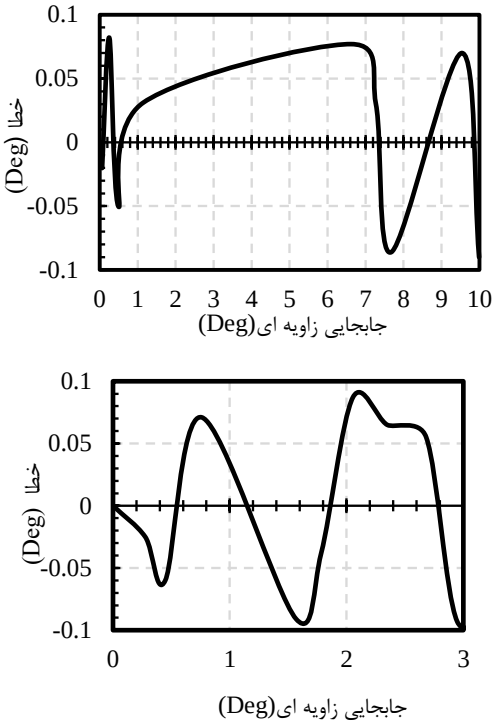


شکل ۹: چیدمان آزمایشگاهی ارزیابی عملکرد انکودر دورانی ساخته‌شده

شکل ۱۰ منحنی خطای انکودر در دو جابجایی زاویه‌ای ذکرشده را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارهای شکل ۱۰ انکودر دارای ماکزیمم خطای در حدود ۰/۰۹± 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 وطراحی‌ها، قدرت تشخیص انکودر ۰,۰۰۸۷ درجه می‌باشد. ولی با توجه به نمودارهای بالا انکودر دارای خطای در حدود ۰/۰۹± درجه می‌باشد. از دلایل خطای ایجاد شده می‌توان به دقیق نبودن مجموعه آزمایشگاهی برای آزمایش انکودر اشاره کرد. میز دستگاه

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]

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 استاور و هم‌ترازی الکترودها می‌شود. همچنین عدم هم مرکزی استاتور و رتور 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

٦- نتیجه‌گیری

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 درست‌شده‌اند. 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 می‌شود. انکودر توسط الکترودهای گیرنده سیگنال مدوله موقعیت را دریافت می‌کند. با پردازش سیگنال می‌توان موقعیت روتور را محاسبه کرد. نهایتاً با آزمایش‌ها انجام‌گرفته بر روی یک نمونه انکودر ساخته‌شده حداکثر خطای آن ۰/۰۹± درجه به دست آمد.

مراجع

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

[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 Postion 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.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-25]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1397.12.4.2.2]
[DOI: 10.29252/joc.12.4.55]