



بهبود قدرت تشخیص یک انکودر خازنی خطی با لغزنده نامقید مریم طالب شمس آبادی¹، مهدی مدبری فر^{2*}، محمدرضا شیخ الاسلامی²

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

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

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

چکیده

در این مقاله، یک نمونه بهبود یافته از یک نوع انکودر خازنی خطی با القای الکترواستاتیک و لغزنده نامقید با قدرت تشخیص بالاتر و خطای کمتر نسبت به نمونه موجود ارائه شده است. انکودر ارائه شده از دو بخش اصلی استاتور و لغزنده تشکیل شده است. هر دو بخش از فیبر مدار چاپی سخت، ساخته شده‌اند. استاتور دارای الکترودهای چهار فاز گیرنده است و لغزنده شامل الکترودهای دو فاز فرستنده می‌باشد. در این انکودر تغذیه الکتریکی لغزنده از طریق القای الکترواستاتیکی تأمین می‌شود؛ از این رو، نیازی به اتصال سیم به لغزنده وجود ندارد و لذا این انکودر مناسب برای استفاده در سیستم‌های کنترلی با فضای محدود است. با بهبود قدرت تشخیص و کاهش خطای این انکودر می‌توان به حرکت نرم و دقیق موتورهای کنترل حلقه بسته دست یافت. به همین منظور انکودر بهبود یافته به الکتروود زمین، بین الکترودهای گیرنده و الکترودهای القایی مجهز شده است تا سبب کاهش تداخل الکترواستاتیک میان این الکترودها و در نتیجه کاهش خطای خروجی شود. به علاوه گام الکترودهای گیرنده و فرستنده انکودر کم شده تا قدرت تشخیص بالا رود. یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از انکودر بهبود یافته ساخته شده و عملکرد آن ارزیابی شده است. نتایج آزمایشات نشان دهنده بیشینه خطای 15 میکرومتر و قدرت تشخیص 1 میکرومتر می‌باشد که حاکی از کاهش خطا و بهبود قدرت تشخیص نسبت به نمونه مشابه است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 خرداد 1397
پذیرش: 25 مرداد 1397
ارائه در سایت: دی 1397

کلیدواژگان:

انکودر خازنی
انکودر خطی
بهبود قدرت تشخیص
لغزنده نامقید

Resolution Improvement of a Capacitive-type linear Encoder with Untethered Slider

Maryam Taleb Shamsabadi, Mehdi Modabberifar* and Mohammad Reza Sheykhosslami

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

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

Article Information

Original Research Paper
Received 02 June 2018
Accepted 16 August 2018
Available Online January 2019

Keywords:

Capacitive encoder
Linear encoder
Resolution improvement
Untethered slider

Abstract

In this paper, an improved sample of capacitive-type linear encoder with untethered slider is presented that has higher resolution and lower error. This encoder has a simple structure consisting of two main parts, stator and slider. Both parts are made of hard PCB. The stator has a sequence of four-phase receiver electrodes and the slider contains two-phase transmitter electrodes. The electrical energy is supplied to transmitter electrodes by the electrostatic induction. Therefore, there is no need to connect any wire to the slider. These features make the encoder to use in limited spaces. By improving resolution, smooth and precise movement of motors is facilitated in the closed loop systems. Thus, the improved encoder is equipped with two ground electrodes between the receiver electrodes and induction electrodes on the stator board to reduce electrostatic interface between these electrodes. As, output error goes down. In addition, the step of electrodes are reduced to increase resolution. Making an experimental sample of improved encoder and testing it, showed 15 μ m error in 1 μ m resolution. This indicates, the error and resolution are improved than the previous one.

1- مقدمه

صنایع مختلف، نیازمند توسعه انکودرهای با قیمت پایین و قدرت تشخیص مناسب است. انکودرهای خازنی در میان دیگر انواع انکودرها شامل انکودرهای نوری و مغناطیسی، دارای ساختار و ساختمانی ساده، قیمت پایین و قدرت تشخیص نسبتاً بالا هستند [۵،۶]. با داشتن انکودری با قدرت تشخیص بالاتر، حرکت نرم و با موجک¹ کمتر موتورهای کنترل می‌شود.

انکودرهای خطی به منظور تعیین مکان دقیق، کنترل یا بررسی موقعیت در علوم و صنایع مختلف از جمله اتوماسیون خطوط تولید [1]، ماشین‌های کنترل عددی [2] و مهندسی پزشکی [۳،۴] به طور گسترده استفاده می‌شوند. به دلیل فضای محدود برخی از این سیستم‌ها، انکودر با ساختاری ساده و تخت، انتخاب مناسب‌تری است. از طرفی نیاز روز افزون به اتوماسیون در

¹ Ripple

Please cite this article using:

M. Taleb Shamsabadi, M. Modabberifar and M. R. Sheykhosslami, Resolution Improvement of a Capacitive-type linear Encoder with Untethered Slider, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 1-12, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

محدوده‌ی جابه‌جایی قابل تشخیص آنها کم است. حسگرهای خازنی بر اساس تغییر ظرفیت خازنی کار می‌کنند ولی انکودرها بر اساس تغییر فاز ناشی از تغییر ظرفیت خازنی عمل می‌کنند. ژو⁴ در سال 1991 یک حسگر جابه‌جایی خازنی ساده ارائه کرده که شامل دو صفحه‌ی موازی است. استاتور آن شامل الکترودهای شانه‌ای در نقش مقیاس و لغزنده این حسگر شامل الکترودهای آشکارساز است. این حسگر با پهنای الکترودهای استاتور برابر 1 میلی‌متر و پهنای الکترودهای آشکارساز برابر 200 میکرومتر، دارای قدرت تشخیص 1 میکرومتر است [10].

ترکیب حسگر و انکودر منجر به ایجاد یک شبه‌انکودر می‌شود. شبه‌انکودر در فاصله‌ی یک گام، به صورت حسگر عمل می‌کند و تعداد گام‌ها را مشابه انکودرها تشخیص می‌دهد. بر این اساس، شبه‌انکودرها دارای قدرت تشخیصی در حد حسگرها، با محدوده‌ی جابه‌جایی قابل اندازه‌گیری قابل توجه مشابه انکودرها، هستند [11].

روش الکترونیکی برای بهبود قدرت تشخیص انکودر، بر پایه‌ی خطی بودن تغییرات فاز ظرفیت‌های خازنی در فاصله‌ی یک گام استوار است. در چنین شرایطی، با تقسیمات بین گامی ایجاد شده توسط مدار پردازش‌گر سیگنال می‌توان به تغییر در خروجی در اثر جابه‌جایی‌های بسیار کوچکتر از گام، دست یافت [12].

با مورب یا V شکل کردن الکترودهای انکودر، خاصیت خطی بودن بین گام بهبود می‌یابد. یاماموتو⁵ یک موتور الکترواستاتیکی با الکترودهای مورب به ثبت رسانده که دارای مشخصه‌ی خروجی خطی‌تر و ریبیل حرکتی کمتر نسبت به موتورهای الکترواستاتیکی معمول است [13، 14]. موتورهای الکترواستاتیکی دارای ساختار و معادلات تحلیلی مشابه انکودرها هستند و تنها تفاوت در میزان تغذیه و خروجی مطلوب آنها است [15].

همچنین، طراحی انکودر به صورت تک تغذیه سبب کاهش خطای ناشی از تداخل الکترواستاتیک، به نسبت موجود در انکودرهای چند تغذیه‌ای، می‌شود [16، 17].

مطالعه‌ی انکودرهای خازنی رایج نشان می‌دهد که غالب انکودرها دارای کابل متصل به لغزنده هستند. از این رو، متحمل محدودیت‌های مکانیکی ناشی از مقید بودن لغزنده می‌باشند. کیمورا⁶ و همکارانش در سال 2010 یک نمونه انکودر خازنی با

محقق می‌شود. قدرت تشخیص این نوع انکودرها را می‌توان با تغییر ساختار مکانیکی یا الکترونیکی بهبود بخشید.

انکودرهای خازنی بر حسب نوع سیگنال خروجی به دو دسته‌ی انکودرهای موج مربعی و انکودرهای سینوسی تقسیم می‌شوند. عامل ایجاد کننده نوع سیگنال خروجی، ساختار مکانیکی انکودر است. انکودرهای سینوسی دارای خروجی پیوسته هستند و قدرت تشخیص آنها بالاتر از انکودرهای موج مربعی است [7]. از سوی دیگر، انکودرهای موج مربعی به دلیل داشتن خروجی دیجیتال و قابلیت اتصال مستقیم به کامپیوتر بیشتر مورد توجه هستند. یک نمونه انکودر خازنی سینوسی توسط فورسکو¹ و همکارانش در سال 1994 ارائه شده است. این انکودر دارای یک صفحه‌ی ثابت به نام استاتور² و یک صفحه‌ی لغزنده بر روی استاتور است. استاتور دارای توالی از الکترودهای گیرنده و لغزنده دارای دو سطح رسانا به عنوان الکترودهای فرستنده است که با یک فاصله به شکل موج سینوسی از هم جدا شده‌اند. سیگنال‌های خروجی از الکترودهای گیرنده متناسب با فاصله مکانی تغییر می‌کنند [8].

ساساکی³ در سال 1998 یک انکودر خازنی موج مربعی، شامل سه صفحه‌ی موازی ارائه کرد. صفحه‌ی اول ثابت و دارای الکترودهای هشت فاز است. صفحه‌ی دوم، متحرک و حاوی الکترودهایی با گامی چهار برابر گام الکترودهای استاتور است. مجموع سیگنال‌های چهار فاز به الکترودهای موجود بر صفحه‌ی سوم القا می‌شود. الکترودهای صفحه سوم برای جلوگیری از تداخل الکترواستاتیکی بین الکترودها، در صفحه‌ای مجزا قرار گرفته‌است. لازم به ذکر است که علت ابتکار ایجاد صفحه‌ی سوم، جایگزینی با الکترودهای زمین است که از تحمیل خطای ناشی از تداخل الکترواستاتیک بین الکترودهای خروجی و سایر الکترودها با سیگنال خروجی انکودر جلوگیری می‌کند. در نهایت، میزان جابه‌جایی از اندازه‌گیری تغییر فاز سیگنال خروجی حاصل می‌شود [6].

قدرت تشخیص انکودرهای موج مربعی از نظر مکانیکی محدود به گام الکترودهای استاتور است [9]. در این نوع انکودرها، گام الکترودهای استاتور در نقش مقیاس است. از این رو هر چه گام کوتاه‌تر باشد، انکودر توانایی اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های کوچک‌تری را دارد. حسگرهای خازنی در مقایسه با انکودرهای خازنی دارای قدرت تشخیص و دقت بالاتری هستند ولی

⁴ Zhu

⁵ Yamamoto

⁶ Kimura

¹ Fortescue

² Stator

³ Sasaki

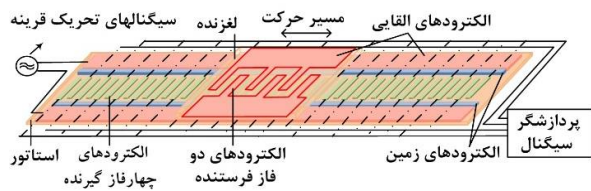


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed capacitive encoder
شکل 1 شماتیک انکودر خازنی با لغزنده نامقید

گام الکترودهای فرستنده $2p$ ، دو برابر گام الکترودهای آشکارساز p است. بار القا شده در الکترودهای آشکارساز به ازای دو موقعیت مکانی لغزنده که به اندازه‌ی یک گام استاتور p اختلاف دارند، در شکل‌های 2- الف و ب نشان داده شده‌است. بنا بر شرح تصویری نحوه‌ی توزیع بار، در الکترودهای آشکارساز، 4 سیگنال با اختلاف فاز دو به دوی 90° درجای پدید می‌آید. با حرکت لغزنده، دامنه‌ی سیگنال‌ها نسبت به هم تغییر می‌کند. استاتور و لغزنده، علاوه بر الکترودهای دو فاز فرستنده و چهار فاز گیرنده، دارای الکترودهایی طولی در کناره‌های طولی خود هستند که الکترودهای القایی نامیده می‌شوند. الکترودهای القایی استاتور به دو ولتاژ سینوسی قرینه متصل می‌شوند و در تمام طول مسیر حرکت لغزنده در مقابل الکترودهای القایی قرار دارند. ولتاژ اعمالی سبب ایجاد میدان پتانسیل الکتریکی در حوزه‌ی الکترودهای القایی لغزنده می‌شود و آنها را باردار می‌کند. از این رو، انرژی الکتریکی از طریق القای الکترواستاتیکی از استاتور به لغزنده انتقال می‌یابد.

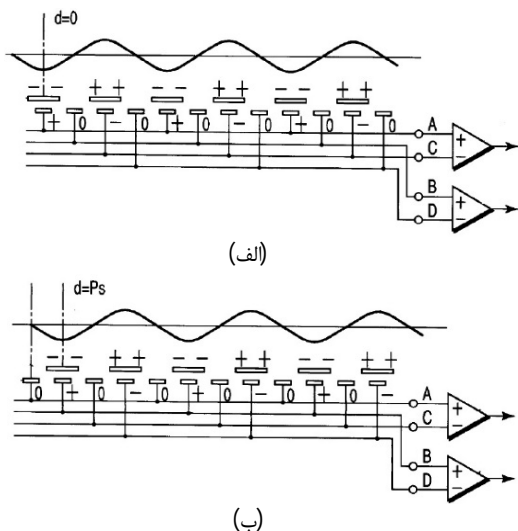


Fig. 2 Charges induction on the four-phase electrodes
شکل 2 نحوه‌ی القای بار در الکترودهای چهار فاز [19]

از آنجا که الکترودهای القایی لغزنده به الکترودهای فرستنده

لغزنده‌ی نامقید ارائه کرده که دارای الکترودهای دو فاز در لغزنده و چهار فاز در استاتور است. تغذیه‌ی آن تنها به استاتور و به شکل دو ولتاژ سینوسی قرینه اعمال می‌شود [5]. بنی‌اسدی و همکارانش در سال 2016 این انکودر را بهبود بخشیده و نمونه‌ای دیگر از انکودر خازنی با لغزنده نامقید ساختند که دارای گام 800 میکرومتر در لغزنده و 400 میکرومتر در استاتور است. با تقسیم بین گامی 1024، قدرت تشخیص تا $1/6$ میکرومتر بهبود داده شده است. خطای این انکودر برابر ± 20 میکرومتر است [18].

کاهش خطای انکودر کمک شایانی به اندازه‌گیری‌های دقیق و حرکت نرم و دقیق موتورها در سیستم‌های کنترلی، می‌کند. از این رو در این مقاله با هدف بهبود قدرت تشخیص، تاثیر پارامترهای موثر بر ظرفیت‌های خازنی انکودر با لغزنده نامقید، مورد بررسی قرار گرفته‌است و انکودر جدیدی پیشنهاد شده است. در انکودر جدید، عرض و گام الکترودها کاهش داده شده و به این ترتیب، قدرت تشخیص بهبود یافته‌است. به علاوه با قرار دادن الکترودهای زمین در انکودر، خطای انکودر کاهش یافته است. در بخش 2، ساختار انکودر پیشنهادی و مدل تحلیلی آن شرح داده شده‌است. در بخش 3، پارامترهای موثر بر قدرت تشخیص و عوامل ایجاد خطای انکودر مورد بحث قرار گرفته‌اند. پس از آن، مشخصات انکودر و مدار الکترونیکی پردازشگر سیگنال در بخش 4 ارائه شده است. به نتایج حاصل از تغییرات ایجاد شده در بخش 5 پرداخته می‌شود.

2- اصول عملکرد

1-1- ساختار

شکل 1، شماتیک انکودر خازنی با لغزنده نامقید را نشان می‌دهد. این انکودر متشکل از دو بخش استاتور و لغزنده است. لغزنده و استاتور، دارای توالی از الکترودهای موازی هستند. هر جفت از الکترودهای لغزنده توسط دو موج سینوسی با 180° درجه اختلاف فاز و به اصطلاح قرینه، باردار می‌شوند. از این رو این الکترودها، دو فاز نامیده می‌شوند. میدان الکتریکی ناشی از این بارها، بارهایی در الکترودهای استاتور که در مقابل الکترودهای دو فاز قرار دارند، ایجاد می‌کند. این القا، به دلیل وجود ظرفیت خازنی بین الکترودهای دو فاز فرستنده و الکترودهای گیرنده در استاتور است. مقدار و علامت بار القا شده در الکترودهای گیرنده به موقعیت لغزنده نسبت به استاتور بستگی دارد. به این ترتیب موقعیت لغزنده توسط الکترودهای گیرنده آشکار می‌شود.

که به الکترودهای القایی در لغزنده متصل هستند. پایانه‌های 7 و 8 مطابق با الکترودهای القایی در استاتور هستند. در نهایت، پایانه‌ی 9 بیان‌گر الکترودهای زمین می‌باشد. میان هر جفت از این پایانه‌ها، خازنی شکل می‌گیرد. این خازن‌ها را می‌توان به زبان ریاضی به صورت ماتریس ضرایب خازنی نمایش داد. با در نظر گرفتن تقارن هندسی پایانه‌ها، ماتریس ضرایب خازنی انکودر در رابطه (1) ارائه شده است [5].

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

$$c_m(\theta_x) = -c_{mo}(\theta_x) - c_{ml} \cos(\theta_x) \quad (2)$$

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

در این ماتریس C_{st} و C_{sl} , C_{ta} , C_{tb} , C_l , C_i , C_{ml} , C_{mo} مقادیری ثابت هستند. ثابت بودن این مقادیر حتی با تجسم هندسه و حرکت لغزنده بر استاتور قابل درک است و با آزمایشات تجربی که در بخش بعد شرح آن خواهد آمد، اثبات می‌شود. مقادیر این ثابت‌ها از روابط هندسی میان پایانه‌ها قابل تعیین هستند.

لازم به توضیح است که خازن‌های C_{55} , C_{44} , C_{33} , C_{22} , C_{11} و C_{77} , C_{66} , C_{88} که با ضرایب C_{st} و C_{sl} , C_i مشخص می‌شوند، خازن‌های میان هر پایانه با زمین هستند.

متصل هستند، انرژی الکتریکی بدون نیاز به هیچ سیمی به الکترودهای فرستنده می‌رسد. نحوه‌ی باردار شدن الکترودهای القایی و فرستنده، در شکل 3 نشان داده شده‌است. این شکل، بیان‌گر تفکیک بار در الکترودهای لغزنده، در اثر میدان پتانسیل الکتریکی الکترودهای القایی استاتور است که سبب ایجاد بارهایی با 180 درجه اختلاف فاز در الکترودهای دو فاز می‌شود. در انکودرهای خازنی الکترواستاتیکی، مجاورت الکترودهای القایی و الکترودهای آشکارساز، موجب تداخل الکترواستاتیکی در خازن‌های بین الکترودها می‌شود. این مسئله، باعث تحمیل نویز به سیگنال خروجی است. برای حل این مشکل در انکودر پیشنهادی، دو الکترودها طویل موازی با الکترودهای القایی قرار گرفته‌اند که نقش زمین الکتریکی را ایفا می‌کنند. این الکترودها سبب ایجاد خازن‌های نویزگیر متصل به زمین می‌شوند.

2-2- مدل تحلیلی

شکل 4، یک مدل تحلیلی انکودر خازنی با لغزنده نامقید را نشان می‌دهد. در این مدل، انکودر با 9 پایه نمایش داده شده‌است.

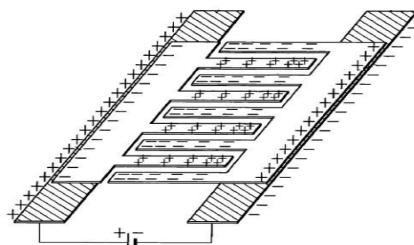


Fig. 3 Charge distribution on induction electrodes [19]

شکل 3 توزیع بار در الکترودهای القایی [19]

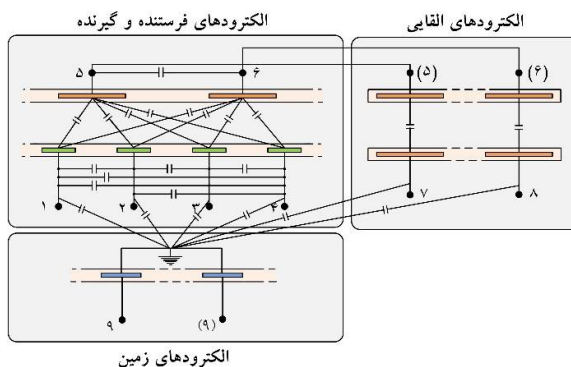


Fig. 4 Equivalent circuit model for analysis

شکل 4 مدل تحلیلی انکودر

پایانه‌های 1 تا 4، مطابق با الکترودهای چهار فاز گیرنده هستند. پایانه‌های 5 و 6 با الکترودهای دو فاز فرستنده مطابقت می‌کنند.

اتخاذ مقدار صفر برای برخی از ضرایب خازنی در ماتریس، بر اساس نتایج آزمایشگاهی از اندازه‌گیری ضرایب خازنی صورت گرفته‌است که در بخش 5 شرح آن خواهد آمد. در بخش تحلیل سیگنال‌ها خواهیم دید که این موضوع سبب سادگی تحلیل و محاسبات می‌شود.

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

ثابت k_c در روابط بالا، جایگزین جمله‌ی آمده در رابطه‌ی (8) است.

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

حال برای استخراج θ_x از چهار ولتاژ خروجی، ابتدا V_1 و V_3 و نیز V_2 و V_4 از یک تقویت‌کننده‌ی تفاضلی عبور می‌کنند. این کار سبب بر طرف شدن نویز مشترک از سیگنال‌های خروجی می‌شود. به این ترتیب، دو ولتاژ V_A و V_B مطابق روابط (9) و (10) حاصل می‌شوند.

$$V_A = k_o (V_1 - V_3) = 2k_o k_c \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$V_B = k_o (V_2 - V_4) = 2k_o k_c \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \quad (10)$$

در این روابط، K_o ضریب تقویت در تقویت‌کننده‌های تفاضلی است.

همان‌طور که در شکل 5 هم دیده می‌شود، دو سیگنال V_B و V_A ، سیگنال‌هایی سینوسی با مدولاسیون دامنه هستند. این دو سیگنال با فرکانسی برابر فرکانس تحریک انکودر، تحت مقدار جابه‌جایی لغزنده مدوله شده‌اند که پس از عبور از یک دمولاتور سنکرون به صورت روابط (11) و (12) تبدیل می‌شوند.

$$V_C = A \cos(\theta_x) \quad (11)$$

$$V_D = A \sin(\theta_x) \quad (12)$$

در این روابط، A تقویت نهایی پس از فیلتر شدن توسط دمولاتور سنکرون می‌باشد. در شکل 5، V_A و V_B و نیز V_C و V_D ترسیم شده‌اند.

غالب نویزهای محیطی بر دامنه‌ی سیگنال‌ها تأثیرگذار هستند ولی اختلال کمتری در فاز آنها ایجاد می‌کنند. به این دلیل، استخراج اطلاعات از فاز سیگنال‌های خروجی، دقت سیستم را بالا می‌برد. بر این اساس و در نهایت، مکان لغزنده θ_x از فاز میان دو سیگنال V_C و V_D و مطابق رابطه‌ی (13) حاصل

در میان ضرایب خازنی، تنها $c_m(\theta_x)$ تابعی از مکان لغزنده نسبت به استاتور است. این ضریب بیان‌گر خازن میان الکترودهای چهار فاز گیرنده و دو فاز فرستنده است. نتایج آزمایشگاهی از اندازه‌گیری ضرایب خازنی، بیان‌گر تغییرات تقریباً سینوسی این ضرایب نسبت به مکان لغزنده هستند. از این رو، رابطه‌ی (2) تقریب خوبی از $c_m(\theta_x)$ ارائه می‌کند. متغیر x بیان‌گر جابه‌جایی لغزنده نسبت به استاتور است و θ_x ، زاویه‌ی الکتریکی آن محسوب می‌شود. به نحوی که $4p$ از x معادل $\pi 2$ از θ_x است. توصیف ریاضی θ_x در رابطه‌ی (3) دیده می‌شود.

با استفاده از ماتریس ضرایب خازنی، رابطه‌ی بارها و ولتاژهای پایانه‌ها به صورت رابطه‌ی (4) مشخص می‌شود. در این رابطه q و V بردارهایی 8×1 هستند که درایه‌های آنها، بارها و ولتاژهای روی پایانه‌ها می‌باشند.

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

3-2- تحلیل سیگنال‌ها

در این بخش، نحوه‌ی استخراج میزان جابه‌جایی از سیگنال‌های چهار فاز خروجی بیان می‌شود. دو ولتاژ سینوسی قرینه به عنوان ولتاژهای تحریک به الکترودهای القایی استاتور که پایانه‌های 7 و 8 هستند، اعمال می‌شوند. در نتیجه‌ی این تحریک، ولتاژهایی در 6 پایانه‌ی دیگر انکودر ایجاد می‌شود. بر این اساس، بردار ولتاژ V به صورت آمده در رابطه‌ی (5) می‌باشد.

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V \sin \omega t, -V \sin \omega t\} \quad (5)$$

در این رابطه، V و ω به ترتیب، دامنه‌ی ولتاژ و فرکانس زاویه‌ای ولتاژ تحریک هستند. مقادیر ولتاژهای V_1 تا V_6 نامشخص هستند. ولتاژهای تحریک توسط منبع سیگنال سبب تولید بار روی الکترودهای القایی استاتور می‌شوند. ولی مجموع بار روی هر کدام از پایانه‌های 5 و 6 به دلیل عدم اتصال این پایانه‌ها به منبع انرژی صفر خواهد بود. همچنین، به دلیل اندازه‌گیری ولتاژ الکترودهای چهار فاز توسط مدار امپدانس بالا، هیچ باری به پایانه‌های 1 تا 4 وارد و خارج نمی‌شود. از این رو، مجموع بار روی این چهار پایانه نیز صفر خواهد بود. با توجه به مطالب ذکر شده، بردار بار q به صورت رابطه (6) خواهد بود.

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

در مدل تحلیلی انکودر، خازن میان الکترودهای خروجی و الکترودهای القایی استاتور، صفر تقریب زده شد. در حالیکه تداخل الکترواستاتیکی میان این الکترودها وجود دارد. قرار دادن دو الکترو زمین بین الکترودهای خروجی و الکترودهای القایی استاتور به منظور کاهش این خطا صورت گرفته است. این الکترودها به زمین منبع تغذیه و زمین مدار الکترونیکی متصل می شوند.

4- ساخت نمونهی بهبود یافته

4-1- ساخت الکترودها

استاتور و لغزندهی انکودر ساخته شده، در شکل 6 دیده می شوند. هر دوی آنها با تکنولوژی مدار چاپی ساخته شده اند. الکترودهای هر دو برد با لیتوگرافی روی فیبر مدار چاپی سخت به ضخامت 1/6 میلی متر چاپ شده اند. گام الکترودهای گیرنده 250 میکرومتر و گام الکترودهای فرستنده 500 میکرومتر است. کاهش گام در نمونهی بهبود یافته نسبت به نمونهی قبلی ساخته شده در مرجع [18]، با هدف بهبود قدرت تشخیص و بررسی تأثیر آن بر میزان خطای بین گامی صورت گرفته است. نسبت پهنای الکترودها به گام برابر 0/5 اتخاذ شده است [5]. پس پهنای الکترودهای گیرنده 125 میکرومتر و پهنای الکترودهای فرستنده 250 میکرومتر است. الکترودهای گیرنده با عرض 8 میلی متر، در طول 100 میلی متر تکرار شده اند. الکترودهای فرستنده نیز با عرض 8 میلی متر، در طول 30 میلی متر تکرار شده اند. تمام الکترودهای القایی دارای عرض 6 میلی متر و طول 100 میلی متر در استاتور و طول 30 میلی متر در لغزنده هستند. الکترودهای زمین دارای عرض 1 میلی متر و طول 100 میلی متر می باشند.

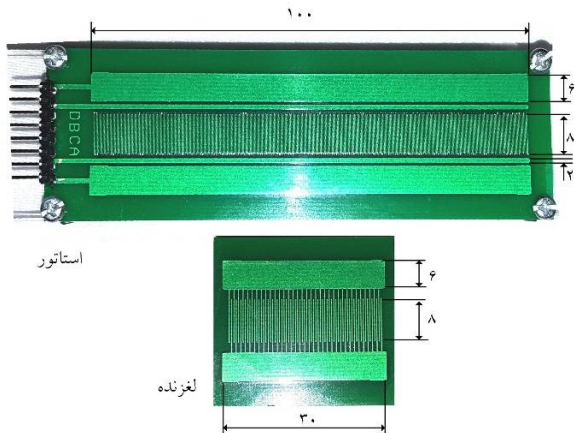


Fig. 6 Stator and slider. Sizes are written in millimeters

شکل 6 استاتور و لغزنده. اندازه ها بر حسب میلی متر بیان شده اند.

می شود.

$$\theta_x = \arctan \frac{A \sin(\theta_x)}{A \cos(\theta_x)} \quad (13)$$

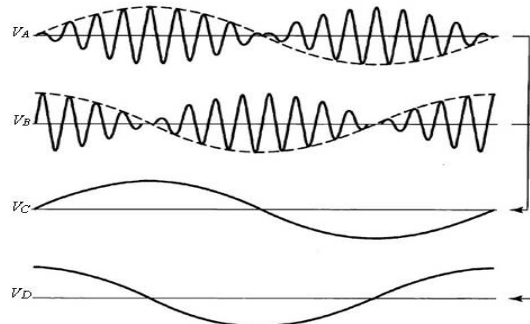


Fig. 5 Encoder output signals before and after the demodulation

شکل 5 سیگنال های خروجی انکودر، قبل و بعد از دمدولاسیون [19]

3- بهبود قدرت تشخیص و خطا

در این بخش به برخی عوامل ایجاد خطای خروجی اشاره می شود و راه حلی برای کاهش آن و بهبود قدرت تشخیص ارائه می شود.

قدرت تشخیص انکودر از تقسیم یک گام دوره ی تناوب انکودر $4p$ بر تعداد تقسیمات بین گامی حاصل شده توسط مدار الکترونیکی پردازش گر سیگنال به دست می آید. توصیف ریاضی قدرت تشخیص در رابطه ی (14) آمده است.

$$R = \frac{4p}{I} \quad (14)$$

در این رابطه، R قدرت تشخیص و I میزان تقسیمات بین گامی است.

بر این اساس، با کاهش p یا افزایش I ، قدرت تشخیص بهبود می یابد. به علاوه، کاهش p بر میزان خطای خروجی نیز می تواند مؤثر باشد. این مسئله به دلیل ایجاد تغییر در هندسه ی خازن ها در اثر کاهش گام اتفاق می افتد. نحوه ی این تأثیر به این شرح است که تغییرات خازنی تقریب زده شده به شکل سینوس، در عمل موج های سینوسی خالص نیستند. این شکل موج ها به راحتی با تغییر هندسه ی خازن ها و تغییر فاصله ی هوایی میان استاتور و لغزنده تغییر می کنند [20]. از این رو، دو عامل هندسه ی خازن ها و میزان فاصله ی هوایی بر مقدار خطا تأثیر گذار هستند. از طرفی وجود اندکی فاصله ی هوایی میان استاتور و لغزنده جهت جلوگیری از سایش این دو برد در حین حرکت، لازم است.

4-2- مدار الکترونیکی و پردازش سیگنال

شکل 9، دیاگرام بلوکی تبادل الکترونیکی میان انکودر و سیستم الکترونیکی را نشان می‌دهد. سیستم الکترونیکی متشکل از سیگنال ژنراتور، تقویت‌کننده‌ها و تقویت‌کننده‌های تفاضلی، دمولاتور سنکرون، جداکننده‌ی فاز و شمارنده‌ی پالس است.

همانطور که در دیاگرام دیده می‌شود، ابتدا، سیگنال‌های تحریک که دو ولتاژ سینوسی قرینه هستند، توسط سیگنال ژنراتور تولید و به الکترودهای القایی اعمال می‌شوند. به علاوه، یکی از این ولتاژها به عنوان سیگنال مرجع به دمولاتور سنکرون داده می‌شود. در اثر این تحریک، سیگنال‌های سینوسی مدوله شده و چهار فاز در الکترودهای گیرنده‌ی انکودر ظاهر می‌شوند. این چهار سیگنال پس از تقویت و تفاضل‌گیری دو به دو، از یک دمولاتور سنکرون عبور می‌کنند. سپس فاز θ_x توسط یک جداکننده‌ی فاز محاسبه می‌شود. خروجی جداکننده‌ی فاز، به صورت پالس‌های مربعی است که تعداد آنها متناسب با میزان جابه‌جایی است. در نهایت، پالس‌ها پس از تقویت، توسط یک شمارنده شماره شده می‌شوند و میزان جابه‌جایی x در خروجی شمارنده ظاهر می‌شود.

در این پژوهش برای تولید ولتاژهای تحریک و تشخیص فاز از یک تراشه‌ی اینترپولیتور¹ به نام AD2S1210 استفاده شده‌است. این تراشه قابلیت تنظیم تعداد پالس تولیدی در هر دوره‌ی تکرار سیگنال به یکی از اعداد 256، 1024، 4096، 16384 را دارا است. سیگنال θ_x در هر $4p$ ، که برای انکودر بهبود یافته 1000 میکرومتر است، تکرار می‌شود. از این رو، با انتخاب تقسیمات بین گامی 1024 قدرت تشخیص 0/976 میکرومتر و با تقسیمات بین گامی 4096 قدرت تشخیص 0/24 میکرومتر برای انکودر حاصل می‌شود.

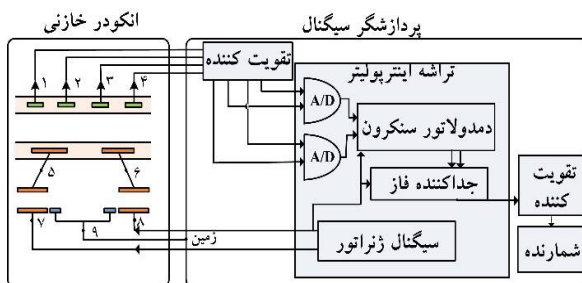


Fig. 9 Block diagram of signal processing for the encoder

شکل 9 بلوک دیاگرام انکودر و سیستم الکترونیکی

مقادیر عددی که بدون ذکر دلیل اتخاذ شده‌اند، مطابق با مقادیری هستند که در مرجع [5] به دست آمده‌اند. همه‌ی اتصالات ورودی و خروجی در قسمت استاتور قرار گرفته‌اند و هیچ سیمی به لغزنده متصل نمی‌باشد.

لازم به ذکر است که با لیتوگرافی معمولی، کاهش پهنای الکترودها تا 100 میکرومتر نیز امکان‌پذیر است ولی وجود اتصال الکتریکی به پشت برد در انتهای هر کدام از الکترودهای گیرنده مانع از این کار می‌شود. پشت برد استاتور در شکل 7 دیده می‌شود. کوچکترین قطر ممکن برای این اتصالات که امکان ایجاد از طریق لیتوگرافی را داشته‌باشد، 300 میکرومتر است. این موضوع کاهش پهنای الکترودها را محدود می‌کند. بنابراین لبه‌ی الکترودها به حالت زیگزاگ در آمده‌است تا کمترین پهنای الکترودها حاصل شود. توصیف حالت زیگزاگ و اتصالات الکتریکی در شکل 8 دیده می‌شود.

الکترودهای استاتور و لغزنده با چاپ سبز به ضخامت تقریبی 15 میکرومتر پوشانده شده‌اند، تا از هدایت الکتریکی بین الکترودها جلوگیری شود. بنابراین با قرارگیری استاتور و لغزنده روی هم، فاصله‌ی 30 میکرومتری بین الکترودها ایجاد می‌گردد.

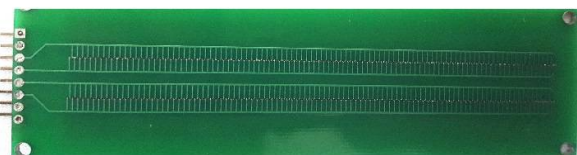


Fig. 7 The stator board back

شکل 7 پشت برد استاتور



Fig. 8 Close up of for-phase electrodes. Sizes are written in micrometers

شکل 8 نمای نزدیک الکترودهای چهارفاز. اندازه‌ها برحسب میکرومتر بیان شده‌اند

¹ Interpolator

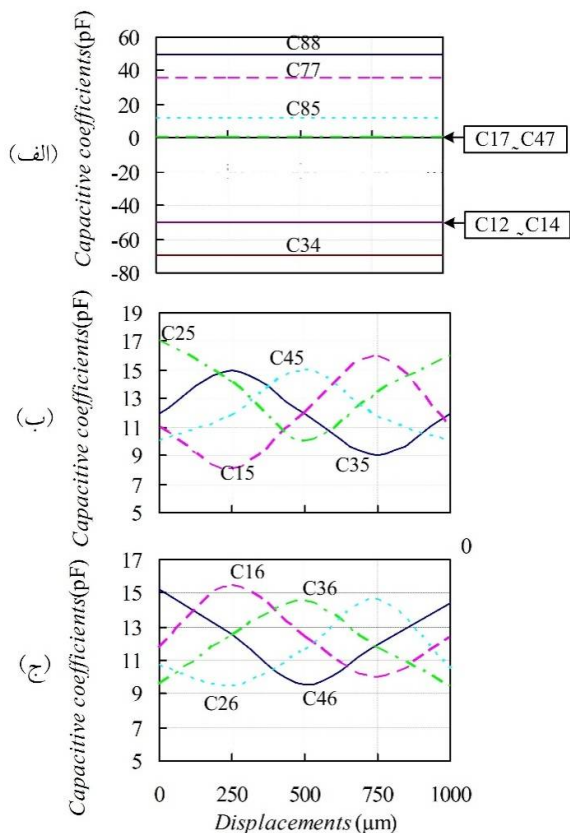


Fig. 11 Measurement results of capacitive coefficients
 شکل 11 نتایج اندازه‌گیری ضرایب خازنی

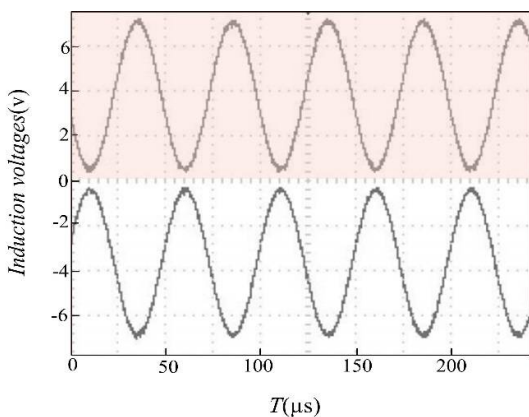


Fig. 12. Two-phase excitation signals
 شکل 12 سیگنال‌های تحریک دو فاز

این دو سیگنال با استفاده از اسیلاتور داخلی تراشه‌ی AD2S1210 ایجاد شده و دارای فرکانس 20 کیلوهرتز و دامنه‌ی 3/5 ولت هستند. سیگنال‌های چهار فاز خروجی از انکودر، به ازای دو موقعیت مکانی در شکل‌های 13- الف و ب نشان داده شده‌اند. تصویر 13- الف برای موقعیتی است که الکتروهای فرستنده با

5- آزمایش‌ها

برای انجام آزمایش‌های روی انکودر، ابتدا نیاز به تجهیزاتی است تا حرکت نرم لغزنده در طول استاتور با کمترین میزان حرکت عرضی ناخواسته برآورده شود. برای رسیدن به این هدف از ریل و واگن استفاده شده است. شکل 10، انکودر تجهیز شده را نشان می‌دهد. لغزنده روی واگن چسبیده و استاتور با یک قاب از جنس پلاکسی‌گلاس¹ به دو انتهای ریل محکم شده است.

5-1- خازن‌ها

ضرایب خازنی انکودر با استفاده از دستگاه سنجش LCR، HAMEG مدل HM-8118 اندازه‌گیری شده‌اند. ویژگی برجسته‌ی این دستگاه قابلیت تغییر فرکانس اندازه‌گیری در بازه‌ی 20 هرتز تا 200 کیلوهرتز است. برای اندازه‌گیری ضرایب خازنی، فرکانس دستگاه روی 20 کیلوهرتز تنظیم شده است. دلیل انتخاب این فرکانس، 20 کیلوهرتز بودن فرکانس تحریک انکودر است.

ضرایب خازنی میان 9 پایانه‌ی مدل تحلیلی، دو به دو اندازه‌گیری شده‌اند. برخی ضرایب خازنی که در ماتریس با مقدار ثابت یا صفر تقریب زده شده‌اند، در شکل 11- الف دیده می‌شوند. منحنی‌های شکل 11- ب و ج، ضرایب خازنی با تغییرات سینوسی نسبت به جابه‌جایی را نشان می‌دهند. این ضرایب مربوط به خازن‌های میان الکتروهای گیرنده و فرستنده هستند. همانطور که دیده می‌شود، تغییرات سیگنال این خازن‌ها به شکل چهار موج سینوسی است که میان هر دو تا از آنها اختلاف فاز 90 درجه وجود دارد.

5-2- سیگنال‌ها

سیگنال‌های تحریک دو فاز در شکل 12 نشان داده شده‌اند.

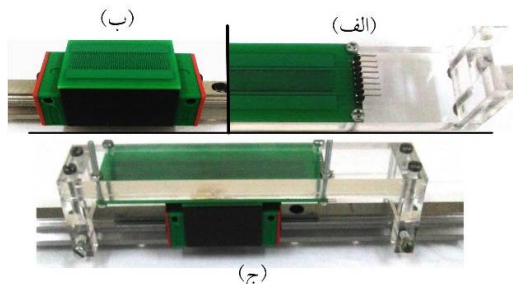


Fig. 10 (a) Stator and frame. (b) Guideway and slider. (c) Encoder and equipment.
 شکل 10 (الف) استاتور و قاب. (ب) ریل واگن و لغزنده. (ج) انکودر تجهیز شده.

¹ Plexiglass

استاتیکی انکودر را نشان می دهد.

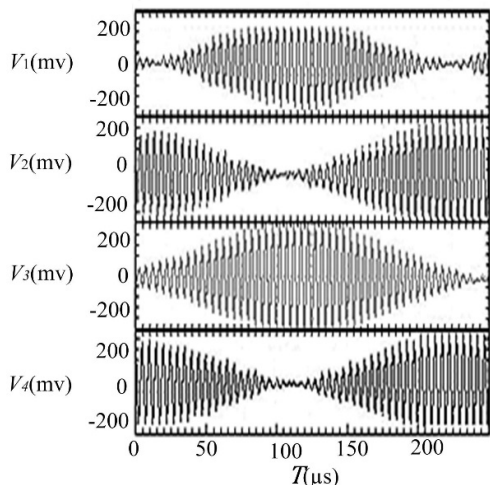


Fig. 14 Output signals of the four phase stator for a range of movement
شکل 14 سیگنال های چهار فاز خروجی به ازای یک بازه حرکتی

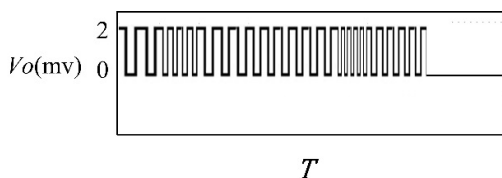


Fig. 15 Output pulses

شکل 15 پالس های خروجی

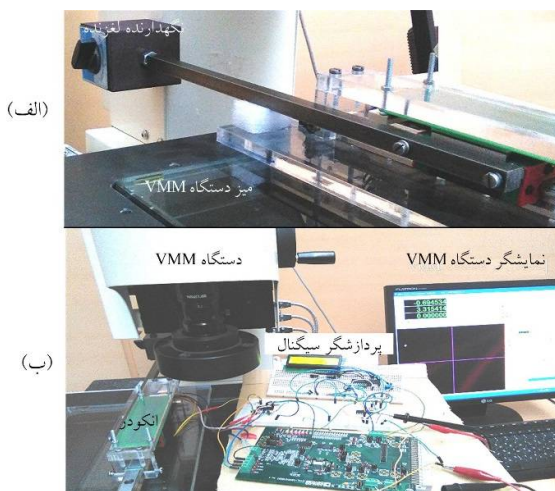


Fig. 16 (a) Encoder and fixed slider. (b) Experimental setup
شکل 16 (الف) انکودر و نگهدارنده لغزنده. (ب) تجهیزات کامل آزمایشگاهی شامل انکودر، پردازشگر سیگنال و دستگاه VMM.

دستگاه به کار رفته برای حرکت انکودر، یک دستگاه اندازه گیری

الکترودهای فاز اول و سوم در استاتور همپوشانی دارند و تصویر 13- ب زمانی است که لغزنده به اندازه ی یک گام p جابه جایی شده است. این دو تصویر، تغییر فاز سیگنال ها در اثر جابه جایی لغزنده را مشخص می کنند. تغییر سیگنال ها به ازای یک بازه حرکتی نیز در شکل 14 آمده است. تغییرات سینوسی سیگنال ها در نتیجه ی جابه جایی لغزنده کاملاً مشهود است. سیگنال ها دارای حداکثر دامنه ی 200 میلی ولت هستند که پس از تقویت وارد تراشه می شوند.

به ازای یک جابه جایی مشخص، تعدادی پالس مربعی در خروجی تراشه ایجاد می شود. یک نمونه از این پالس ها در شکل 15 ارائه شده است. همانطور که در شکل 15 دیده می شود، دامنه ی پالس ها 2 ولت است. از این رو، پس از تقویت آماده ی ورود به شمارنده می شوند.

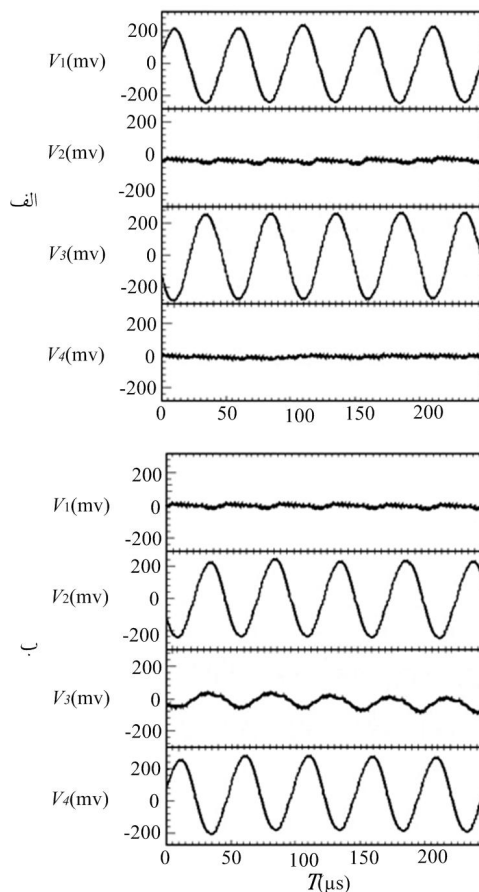


Fig. 13 Output signals of the four phase stator after one pitch movement of the slider over the stator

شکل 13 سیگنال های چهار فاز خروجی به ازای دو موقعیت

3-5- رفتار استاتیکی

شکل 16، تجهیزات آزمایشگاهی به کار رفته برای بررسی رفتار

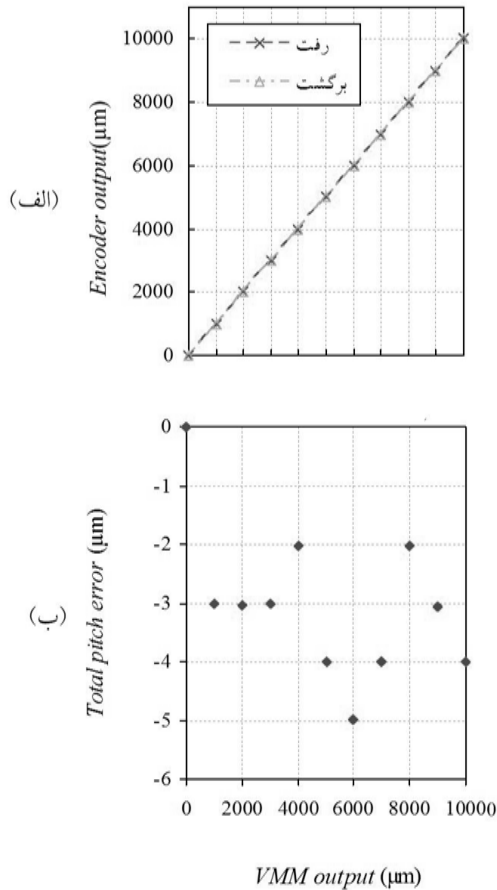


Fig. 17 (a) Calibration curve of encoder. (b) total pitch error for 30 µm gap

شکل 17 (الف) منحنی کالیبراسیون انکودر. (ب) خطا در هر حرکت به اندازه‌ی یک گام دوره برای فاصله‌ی 30 میکرومتر میان الکترودهای فرستنده و گیرنده

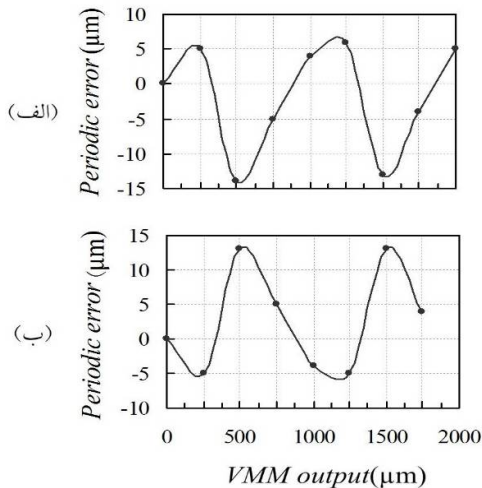


Fig. 18 Periodic error for 30µm gap. (a)forward. (b)backward

شکل 18 خطای بین گامی برای فاصله‌ی 30 میکرومتر میان الکترودهای فرستنده و گیرنده. (الف) حرکت رفت. (ب) حرکت برگشت.

به روش تصویربرداری¹ است که امکان حرکت خطی با دقت 1 میکرومتر را فراهم می‌کند. همانطور که در شکل دیده می‌شود، واگن و به تبع آن لغزنده، به پایه‌ی دستگاه محکم شده‌اند. به علاوه، ریل و به تبع آن استاتور به میز دستگاه متصل شده‌اند. به این ترتیب با حرکت میکرومتری میز دستگاه، استاتور روی لغزنده، جابه‌جا می‌شود.

سپس منحنی کالیبراسیون و خطای انکودر برای دو فاصله‌ی هوایی متفاوت میان الکترودهای فرستنده و گیرنده، مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای ثبت نتایج، ابتدا، قدرت تشخیص الکترونیکی انکودر در وضعیت تقسیم بین گامی 4096 قرار داده شده است. در این حالت به دلیل بالا رفتن حساسیت سیستم، نویزهای محیطی سبب ناپایدار شدن گاه به گاه سیستم می‌شدند. از این رو، برای ثبت نتایج، قدرت تشخیص الکترونیکی در وضعیت تقسیم بین گامی 1024 قرار گرفته‌است.

(الف) ارزیابی فاصله‌ی 30 میکرومتر

در این حالت استاتور و لغزنده با هم برخورد دارند. شکل 17- الف، خروجی انکودر را بر حسب خروجی دستگاه VMM، در حرکت رفت و برگشت نشان می‌دهد که بر هم منطبق هستند. برای رسم این منحنی، لغزنده نسبت به استاتور تا 10 میلی‌متر و با گام 1 میلی‌متر حرکت داده شده‌است. شکل 17- الف، بیان‌گر خطی بودن منحنی کالیبراسیون انکودر است. در شکل 17- ب، خطا در هر حرکت به اندازه‌ی یک گام دوره 4p آمده‌است. این منحنی بیان‌گر خطایی رندومی با حداکثر مقدار ± 5 میکرومتر است. در شکل‌های 18- الف و ب، خطای بین گامی را در حرکت رفت و برگشت نشان می‌دهد که خطایی تناوبی با دامنه‌ی 10 میکرومتر است. این مطلب بیان‌گر کاهش خطا در انکودر بهبود یافته نسبت به نمونه‌ی اولیه‌ی ساخته شده در مرجع [18] است. البته مقداری اختلاف در منحنی شکل 18 در حرکت رفت و برگشت وجود دارد که دامنه‌ی خطا را به 15 میکرومتر افزایش داده است. منشأ این اختلاف، شاید تجهیزات مکانیکی به کار رفته برای آزمایش باشند.

(ب) ارزیابی فاصله‌ی 130 میکرومتر

در این حالت، برد استاتور و لغزنده به اندازه‌ی ضخامت یک ورق کاغذ که 100 میکرومتر است، فاصله دارند. شکل 19- الف، منحنی کالیبراسیون انکودر را نشان می‌دهد و در شکل 19- ب، خطا در هر حرکت به میزان یک دوره تناوب انکودر آمده‌است که خطایی رندومی با حداکثر مقدار 10 میکرومتر است.

¹ Video Measuring Machine (VMM)

از عوامل تولید این خطاها، می‌توان به خطای دستگاه VMM، تغییر هر چند ناچیز فاصله‌ی هوایی و هم‌ترازی الکترودها، خطای ناگزیر در ساخت قاب و وجود خطا در لیتوگرافی الکترودها اشاره کرد.

6- نتیجه‌گیری

این تحقیق به تحلیل و آزمایش یک نمونه‌ی بهبود یافته از انکودر خازنی الکترواستاتیکی پرداخته است. انکودر دارای الکترودهای دو فاز فرستنده و چهار فاز گیرنده است و تغذیه‌ی الکترودهای فرستنده از طریق القای الکترواستاتیکی تأمین می‌شود. در نمونه‌ی بهبود یافته دو الکتروود زمین بین الکترودهای گیرنده و الکترودهای القایی در استاتور تعبیه شده‌اند که سبب کاهش تداخل الکترواستاتیک میان الکترودها و کاهش خطای خروجی می‌شوند. به علاوه با کم کردن گام دوره‌ی انکودر به 1000 میکرومتر، قدرت تشخیص آن بهبود یافته است. اصول عملکرد نمونه با به‌کار بردن مدل شبکه‌ی خازنی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. بر آن اساس، میزان جابه‌جایی توسط یک تراشه‌ی اینترپولیتور که مجهز به تقویت‌کننده‌ی تفاضلی، دمدولاتور سنکرون و جدا کننده‌ی فاز است از سیگنال‌های چهار فاز خروجی استخراج می‌شود.

در انتها، یک نمونه‌ی آزمایشگاهی از انکودر بهبود یافته ساخته شد. نمونه با قدرت تشخیص حدود 1 میکرومتر و با دو فاصله‌ی هوایی متفاوت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج آزمایشات حاکی از بهبود خطا تا حداکثر مقدار 15 میکرومتر است که مقدار آن با زیاد شدن فاصله‌ی هوایی افزایش می‌یابد.

7- مراجع

- [1] I. Alexandre, and M. Artes, Method for the evaluation of optical encoders performance under vibration. *Precision engineering*, Vol.31. pp.114-121, 2007.
- [2] R.J.E Merry, M.J.G Molengraft, and M. Steinbuch, Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders. *Mechatronics*, Vol.20. pp.20-26, 2010.
- [3] N. Hata, and J. Tokuda., Sh. Hurwitz, and Sh. Morikawa, MRI-Compatible manipulator With Remote-Center-of-motion control. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, Vol.27. pp.1130-1138, 2008.
- [4] R. Secoli, M. Robinson, M. Brugnoli., and F. Baena, A low-cost, high-field-strength magnetic resonance imaging-compatible actuator. *Journal of Engineering in Medicine*, Vol.229(3). pp.215-224,

در شکل‌های 20- الف و ب، خطای بین گامی در حرکت رفت و برگشت ترسیم شده‌است. مقادیر این خطاها بیان‌گر ایجاد خطای مضاعف در اثر ازدیاد فاصله میان استاتور و لغزنده است.

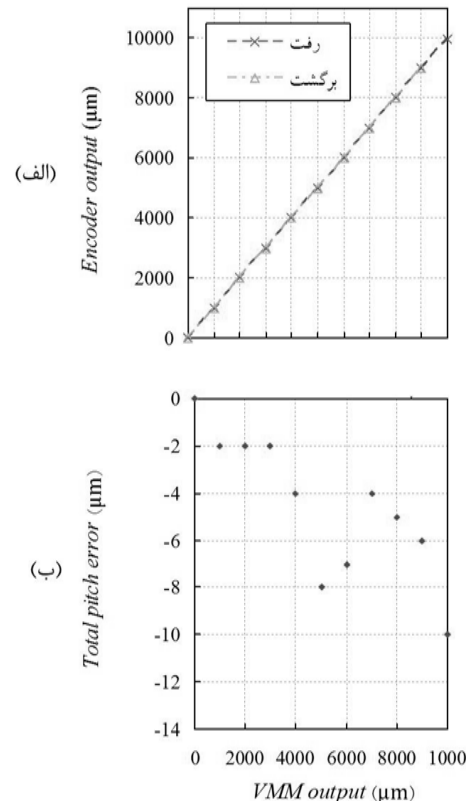


Fig. 19 (a) Calibration error of encoder. (b) total pitch error for 130µm gap

شکل 19 (الف) منحنی کالیبراسیون انکودر. (ب) خطا در هر حرکت به اندازه‌ی یک گام دوره برای فاصله‌ی 130 میکرومتر میان الکترودهای فرستنده و گیرنده

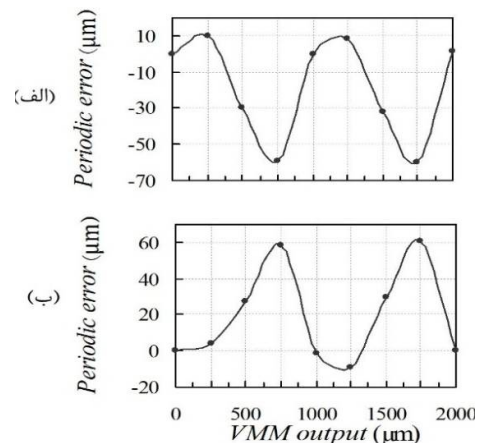


Fig. 20 Periodic error for 130µm gap. (a)forward. (b)backward

شکل 20 خطای بین گامی برای فاصله‌ی 130 میکرومتر میان الکترودهای فرستنده و گیرنده. (الف) حرکت رفت. (ب) حرکت برگشت.

- Measurement Science and Technology*, Vol.20, 11pp, 2009.
- [13] A. Yamamoto, T. Niino, and T. Higuchi, High precision electrostatic actuator with novel electrode design. *IEEE*, 1998.
- [14] T. Nishijima, A. Yamamoto, H. Yasui, and T. Higuchi, A built-in displacement sensor for an electrostatic film motor. *Measurement Science and Technology*, Vol.17, pp.2676–2682, 2006.
- [15] A. Yamamoto, T. Niino, and T. Higuchi, Modeling and identification of an electrostatic motor. *Precision Engineering*, Vol.30, pp.104-113, 2006.
- [16] B. Hou, B. Zhou, M. Song, Zh. Lin and R. Zhang, A Novel Single-Excitation Capacitive Angular Position Sensor Design. *Sensors*, Vol.16, No.18, pp.1196, 2016.
- [17] B. Hou, Z. Tian, C. Li, Q. Wei, B. Zhou and R. Zhang, A capacitive rotary encoder with a novel sensitive electrode. *IEEE SENSORS*, pp. 1-3, 2017.
- [18] 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)
- [19] G. Masahiko, Electrostatic encoder and electrostatic displacement measuring method, *U.S. Patent*, No. 7,199,727, 2007.
- [20] P.D.A.T.R. Hicks, *The Nano-Positioning Book: moving and Measuring to Better Than a Nanometre*, London, U.K.:ISTE, 1997.
- 2015.
- [5] F. Kimura, and et al., Capacitive-Type Flexible Linear Encoder With Untethered Slider Using Electrostatic Induction. *IEEE Sensors Journal*, Vol.10, No.5, pp.972-928, 2010.
- [6] K. Sasaki, Electrostatic capacity type encoder. *U.S. Patent*, No. 4,788,546, 1998.
- [7] C.F. Lepple, Implementation of a High-speed Sinusoidal Encoder Interpolation System. *Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering*, 2004.
- [8] S. M. Fortescue, C.Park, Capacitive transducer with continuous sinusoidal output. *United States Patents*, No.4,429,307, 1994.
- [9] N. Yamashita, and et al. Voltage-induction type electrostatic film motor driven by two-to four-phase ac voltage and electrostatic induction. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.140, pp.239-250, 2007.
- [10] F. Zhu, J. W. Spronck, and W. C. Heerens, A simple capacitive displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.26, pp.265-269, 1991.
- [11] M. Kim, and W. Moon, A new linear encoder-like capacitive displacement sensor. *Measurement*, Vol.39, pp.481-489, 2006.
- [12] T. Nishijima, A. Yamamoto, and T. Higuchi, A flexible sensor measuring displacement and bending.