

## درونیابی بلادرنگ خروجی انکودرهای آنالوگ افزایشی

جعفر رضایی و غلامرضا وثوقی

**چکیده:** برای افزایش تفکیک پذیری یک انکودر افزایشی از مدارهای درونیابی استفاده می‌گردد. روشهای درونیابی مرسوم باعث کاهش پهنای باند سیگنال‌های خروجی انکودر و افزایش زمان پاسخ‌دهی آن می‌شود که اجازه ارسال بلادرنگ اطلاعات موقعیت به کنترلر را نخواهد داد. بعضی از این روشها نیاز به سیگنالهایی با کیفیت بالا دارند، زیرا قادر نیستند تا خطاهای موجود در سیگنالهای ورودی را تصحیح نمایند. در این مقاله روش درونیابی پیشنهاد شده است که با حفظ پهنای باند خروجی انکودر و زمان پاسخ‌دهی پایین قادر است تفکیک پذیری و درستی این نوع انکودرها را افزایش دهد. این روش به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت؛ و نتایج نشان می‌دهد که در روش درونیابی پیشنهادی تنها عوامل محدود کننده پهنای باند خروجی، ماکزیمم سرعت مکانیکی شفت انکودر و ماکزیمم فرکانس آشکارسازی هد می‌باشد. زمان پاسخ‌دهی مدار درونیابی پیشنهاد شده حدود چند نانو ثانیه است که برای بیشتر کاربردهای کنترلی به اندازه کافی کوچک می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انکودرهای افزایشی، درونیابی الکترونیکی، خطا، تفکیک پذیری

### ۱. مقدمه

برای اندازه‌گیری دقیق جابجایی و زاویه چرخش می‌توان از یک انکودر افزایشی استفاده نمود. اما در بعضی از کاربردها نظیر اندازه‌گیری زاویه چرخش یا کنترل موقعیت در ماشین‌های ابزار تفکیک‌پذیری بیشتری از آنچه یک انکودر افزایشی مهیا می‌کند، لازم می‌باشد [۱]. امروزه برای افزایش بهره‌وری، سرعت ماشینهای CNC را افزایش می‌دهند و بنابراین انکودرهایی با سرعت و تفکیک-پذیری بالا مورد درخواست می‌باشد. اما ماکزیمم سرعت انکودرهای با تفکیک‌پذیری بالا بسیار پایین می‌باشد [۲]. به عنوان مثال، برای تست عملکرد یک ربات صنعتی، ابزار دقیقی نیاز می‌باشد که بتواند مختصات یک هدف منعکس‌کننده نور را که از فن‌آوری Laser-Tracing Triangulation استفاده می‌کند، به صورت دینامیکی اندازه‌گیری کند. این ابزار تفکیک‌پذیری بالا، پاسخ‌دهی پایین و درستی بالایی در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی نیاز

دارد [۳]. برای افزایش تفکیک‌پذیری انکودرهای افزایشی از روشهای درونیابی استفاده می‌گردد. درونیابی فرآیندی است که به وسیله آن موج اصلی (عموماً به شکل سینوسی) انکودر، توسط یک سیستم الکترونیکی به قسمتهای کوچکتری تقسیم می‌گردد، چنانکه سیستم کنترل علاوه بر پیک‌های مثبت و منفی، قادر است هر یک از قطعات منحصر به فرد موج سینوسی را نیز تشخیص دهد [۴]. به دو دلیل از درونیابی جهت افزایش تفکیک‌پذیری استفاده می‌گردد:

۱- تولید مقیاسهایی با خطوط خیلی نزدیک بهم (فاصله بین خطوط کمتر از چند میکرون) واقعاً عملی نمی‌باشند و لذا تفکیک‌پذیری قابل حصول برای بعضی کاربردها به اندازه کافی دقیق نیست.

۲- مقیاسهایی که خطوط آنها خیلی بهم نزدیک باشند، به گرد و غبار و دیگر آلودگی‌ها خیلی حساس می‌باشند. کمترین فاصله بین خطوط مقیاس برای استفاده عملی در ماشین‌های ابزار و کاربردهای مشابه ۸ میکرومتر می‌باشد [۵].

### ۲. روشهای موجود درونیابی

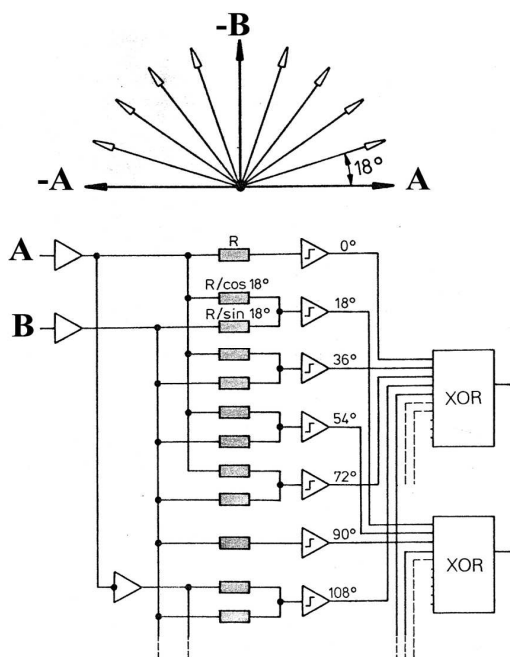
روشهای زیادی برای افزایش تفکیک‌پذیری انکودرهایی که خروجی آنها به فرمهای  $\sin(\theta)$  و  $\cos(\theta)$  می‌باشد گزارش شده است که مهمترین آنها در زیر بررسی می‌گردد.

این مقاله در تاریخ ۸۳/۲/۱۵ دریافت و در تاریخ ۸۵/۷/۱ به تصویب رسیده است.

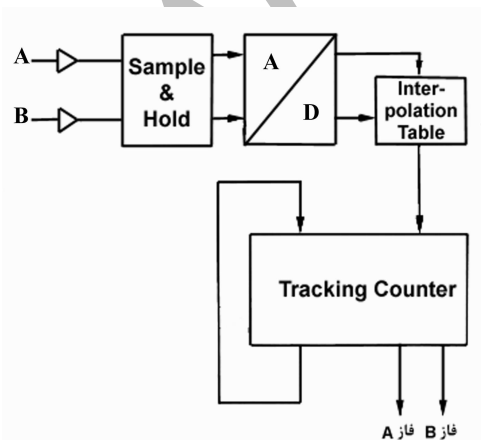
دکتر جعفر رضایی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید رجایی،  
J\_rezaei@alum.sharif.edu

دکتر غلامرضا وثوقی، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف،  
vossough@sharif.edu

مقادیر موقعیت لحظه‌ای در هر دوره سیگنال از آدرس فوق بدست می‌آید. یک مدار تعقیب‌کننده، مقدار موقعیت لحظه‌ای را با مقدار معین شده در سیکل قبلی مقایسه می‌کند، و سیگنالهای A و B با اختلاف فاز ۹۰ درجه را تولید می‌نماید. در این روش مقادیر جدول می‌توانند براساس مقادیر واقعی زاویه ذخیره گردند. بنابراین خطاهای مربوط به یک دوره سیگنال قابل جبران می‌باشند. تعداد مرتبه افزایش تفکیک‌پذیری به طور مجازی به تعداد بیت‌های ADC بستگی دارد. ماکزیمم فرکانس خروجی به زمان عملیات ADC وابسته می‌باشد. در این روش پاسخ‌دهی ADCها و مدارهای دیگر زیاد می‌باشد و لذا از این روش در کاربردهای با سرعت بالا نمی‌توان استفاده کرد. از طرفی خطاهای مربوط به یک دور چرخش انکودر قابل تصحیح نمی‌باشد. [۸-۶]



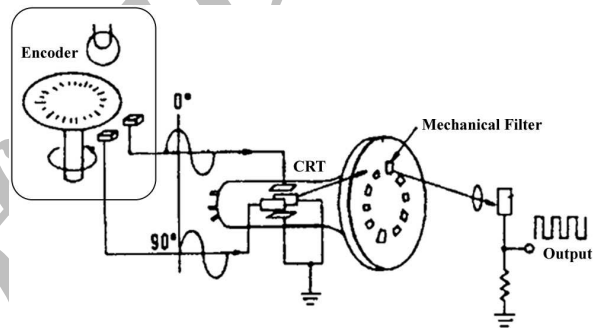
شکل ۲. کاربرد شبکه مقاومتی برای افزایش تفکیک‌پذیری انکودرهای افزایشی [۹]



شکل ۳. کاربرد جدول جستجو برای افزایش تفکیک‌پذیری انکودرهای افزایشی [۹]

## ۲-۱. کاربرد CRT [۶]

در این روش سیگنالهای خوانده شده از دیسک انکودر به پلنت‌های انحراف افقی و عمودی CRT اعمال می‌گردد. اثر سیگنالها باعث می‌شوند تا نقطه نورانی CRT برای هر سیکل سیگنالهای انکودر یک مسیر دایروی را روی پرده کامل نماید. مطابق شکل ۱ یک فیلتر مکانیکی مابین پرده CRT و آشکارساز نوری قرار داده می‌شود به طوری که نقطه نورانی CRT بتواند به صورت پیرویدیک به آشکارساز نوری روشنایی دهد. این عمل سیگنالی را تولید می‌کند که تعداد سیکل آن در دور برابر تفکیک‌پذیری فیلتر مکانیکی ضربدر تعداد سیکل خروجی انکودر می‌باشد. بنابراین تفکیک‌پذیری بالایی به این روش می‌توان به دست آورد، اما این روش برای کاربردهای اقتصادی مناسب نمی‌باشد. زیرا CRT گران، شکننده و حجیم بوده و نیاز به ولتاژ بالا دارد.



شکل ۱. کاربرد CRT برای افزایش تفکیک‌پذیری انکودرهای افزایشی [۶]

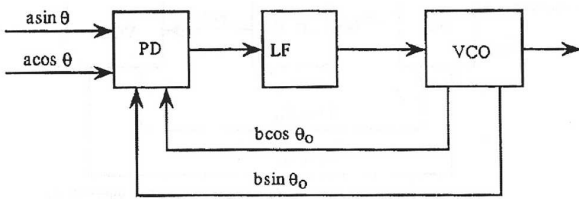
## ۲-۲. کاربرد شبکه مقاومتی

با ترکیب وزنهای معینی از سیگنالهای آنالوگ A و B انکودر توسط یک شبکه مقاومتی مطابق شکل ۲ می‌توان سیگنالهای جدیدی را با زاویه فاز منحصر به فرد بدست آورد. این سیگنالهای سینوسی تولید شده به همراه سیگنالهای اولیه با استفاده از میدلهای TTL به امواج مربعی تبدیل شده و با یک منطق ترکیبی به دو سیگنال با اختلاف فاز ۹۰ درجه تبدیل می‌گردند که تفکیک‌پذیری آنها افزایش یافته است. در این روش تفرانس مقاومتها و تغییرات مقدار آنها با درجه حرارت مانع از حصول تفکیک‌پذیری خیلی بالا می‌گردد. دیگر محدودیت این روش نیاز آن به سیگنالهای با کیفیت فوق‌العاده بالا می‌باشد. [۹-۷ و ۳]

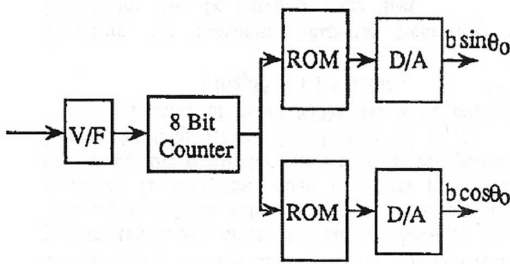
## ۲-۳. کاربرد جدول جستجو

با توجه به شکل ۳ دو سیگنال جریان بدست آمده از سلولهای فتولیتیک ابتدا تقویت شده و سپس به ولتاژ آنالوگ تبدیل می‌گردند. توسط مدارهای SHA از ولتاژهای آنالوگ نمونه‌برداری می‌شود و نمونه‌ها در فاصله زمانی منظمی به وسیله ADCها به مقادیر عددی تبدیل می‌گردند. مقادیر عددی دو ولتاژ برای آدرس‌دهی به سطر و ستون یک جدول جستجو بکار برده می‌شود.

شمارنده دو جهتی و قابل برگشت شمرده می‌شود و خروجی شمارنده برای آدرس‌دهی به جدول سینوسی و کسینوسی که درون حافظه‌های ROM ذخیره شده‌اند استفاده می‌گردد. سپس اطلاعات بدست آمده از حافظه‌ها توسط DACها به سیگنالهای سینوسی و کسینوسی تبدیل می‌گردند. خروجی شمارنده مقادیر درونیابی شده در یک سیکل سیگنال خروجی انکودر می‌باشد. در این روش با انتخاب مناسب عناصر می‌توان پاسخ‌دهی مدار درونیابی را بسیار کاهش داد، اما نیاز به سیگنالهایی با کیفیت بالا می‌باشد. و خطاهای سیگنال قابل تصحیح نیستند. [۶ و ۲]



شکل ۵. روش PLL دو فازی [۲]



شکل ۶. اجزاء درون بلوک VCO [۲]

### ۳. روش پیشنهادی درونیابی

#### ۳-۱. مدار درونیابی

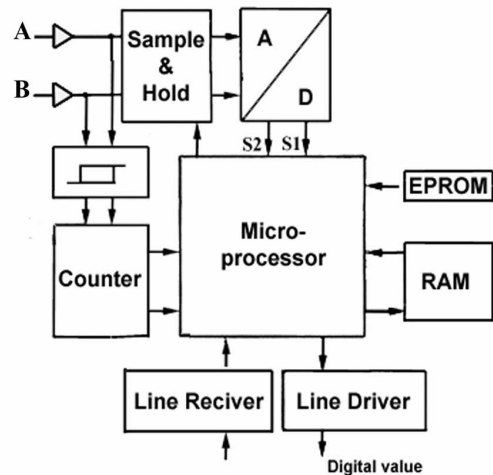
شکل ۷ به طور شماتیک روش درونیابی پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این شکل فازهای A و B به ترتیب سیگنال سینوسی و کسینوسی خروجی انکودر می‌باشد.

ولتاژهای  $+V_{ref}$  و  $-V_{ref}$  به ترتیب برابر مقدار ماکزیمم مثبت و منفی سیگنال فاز A می‌باشند. اختلاف این دو ولتاژ توسط یک شبکه مقاومتی به ولتاژهایی مطابق با زاویه فاز معینی تقسیم می‌گردد. سپس سیگنال فاز A توسط یکسری مقایسه‌کننده با این سطح ولتاژها مقایسه می‌گردد و در هر زاویه فاز معین، خروجی یکی از مقایسه‌کننده‌ها تغییر می‌یابد (شکل ۸).

سیگنال فاز B نیز توسط یک مقایسه‌کننده سطح صفر به سیگنال مربع تبدیل می‌شود. سپس سیگنالهای مربع بدست آمده از مقایسه‌کننده‌ها توسط یک منطق ترکیبی به دو سیگنال مربع  $A'$  و  $B'$  با اختلاف فاز ۹۰ درجه مطابق با خروجی استاندارد یک انکودر افزایشی تبدیل می‌گردد.

#### ۴-۲. محاسبه کننده تابع آرک تانژانت زاویه

شکل ۴ به طور شماتیک مراحل پردازش سیگنالها جهت درونیابی به روش محاسبه تابع آرک تانژانت زاویه را نشان می‌دهد. در این روش مقادیر عددی ولتاژ به پردازنده‌ای که معادله تانژانت  $S_1/S_2$  را محاسبه می‌کند وارد می‌شوند. مقدار زاویه مطابق با تانژانت زاویه محاسبه شده از جدول ذخیره شده در EPROM اخذ می‌گردد. جدول مزبور موقعیت را در یک دوره سیگنال نشان می‌دهد. در همان زمان سیگنالهای آنالوگ A و B به سیگنالهای مربع تبدیل می‌شوند، و دوره‌های سیگنال شمارش می‌شود. علاوه بر آن مقادیر تصحیح‌کننده می‌تواند از یک جدول در RAM خوانده شود و برای جبران خطاهای سیستمی به مقادیر موقعیت اضافه شود. نتیجه مقادیر عددی می‌باشد که به صورت سریال یا موازی به کنترل‌کننده، کامپیوتر یا نمایشگر انتقال می‌یابد. در این روش نیز پاسخ‌دهی مدارهای درونیابی بسیار بالا بوده و عملاً در کاربردهای با سرعت بالا قابل استفاده نمی‌باشد. [۱۰ و ۹ و ۷ و ۳ و ۱]



شکل ۴. محاسبه کننده تابع آرک تانژانت زاویه برای افزایش

تفکیک پذیری انکودرهای افزایشی [۸]

#### ۵-۲. روش PLL دو فازی

باتوجه به شکل ۵ در این روش سیگنالهای خروجی انکودر وارد آشکارساز زاویه فاز (PD) می‌شوند؛ و اختلاف فاز بین سیگنالهای ورودی و سیگنالهایی که توسط نوسان‌ساز با کنترل ولتاژ (VCO) شبیه سازی شده‌اند، محاسبه می‌گردد و برای حذف نویزهای آن وارد حلقه فیلتر پایین‌گذر (LF) می‌گردد. سپس خروجی LF به VCO انتقال می‌یابد تا فرکانس سیگنالهای خروجی آن را کنترل نماید، به طوریکه مقدار اختلاف فاز همیشه نزدیک صفر باشد. اگر به اجزاء درون بلوک VCO (شکل ۶) توجه شود، این بلوک شامل یک مبدل ولتاژ به فرکانس (V/F) می‌باشد که پالسهای آن توسط یک

### ۲-۳. جبران خطا

اما برای انتخاب روش مناسب و دقیق درونیابی باید خطاهای سیگنال خروجی انکودر را در نظر گرفت. این خطاها عبارتند از:

- ۱- تغییرات پریودیک دامنه سیگنالها در اثر نواقص محلی الگوی کد و واسطه شیشه دیسک انکودر [۱۲ و ۱۱].
- ۲- کاهش دامنه سیگنالها با افزایش فرکانس که عامل آن پاسخ فرکانسی گیرنده‌های نوری می‌باشد [۹].
- ۳- کاهش دامنه سیگنالها با گذشت زمان که مربوط به کاهش روشنایی منبع نور انکودر است [۱۳].
- ۴- تغییرات سرعت زاویه‌ای سیگنالها در اثر لنگی وانحراف جهت‌دار الگوی کد دیسک انکودر [۱۴].

۵- تغییرات اتفاقی دامنه سیگنالها که در اثر تعاش قطعات انکودر و میدانهای الکترومغناطیسی محیط به وجود می‌آید [۹ و ۵].

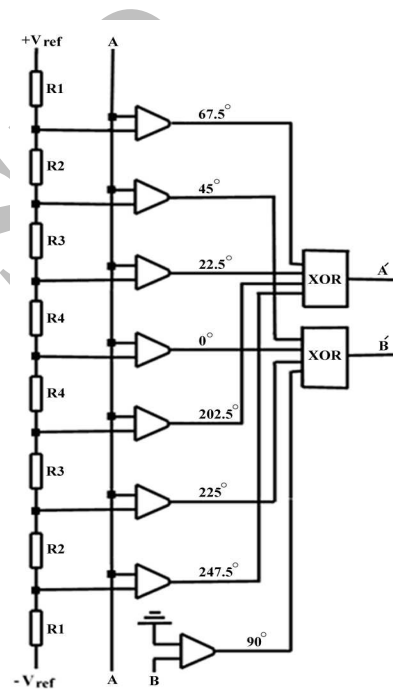
از خطاهای بالا مورد ۵ به دلیل داشتن ماهیت غیر سیستمی غیر قابل پیش‌بینی وجبران‌ساز نیست. به هر حال ساختمان انکودر باید دارای صلبیت کافی باشد و بدنه و خطوط انتقال داده آن در مقابل میدانهای الکترومغناطیسی به خوبی شیلد گردد و همچنین خطوط سیگنالهای خروجی آن به مدارات بعدی به صورت Double Ended اتصال یابد. تصحیح خطای مورد ۴ نیز مستلزم اتخاذ روشهای خاصی است که خارج از مدارهای درونیابی قابل اجرا است. این روشها در منبع شماره ۱۴ به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌است. در روش پیشنهادی ما خطاهای موارد ۱، ۲ و ۳ را در مدار درونیابی جبران خواهیم کرد. شکل ۹ بلوک دیاگرام مدارهای تولید کننده ولتاژهای مرجع را نشان می‌دهد. در این شکل هر کدام از ولتاژهای مرجع از سه مؤلفه ساخته می‌شوند و سپس توسط یک مدار جمع کننده با هم ترکیب می‌گردند و ولتاژهای مرجع  $+V_{ref}$  و  $-V_{ref}$  را می‌سازند. این سه مؤلفه عبارتند از:

۱- مؤلفه کاهش دامنه سیگنالها در اثر افزایش فرکانس: این مؤلفه توسط بلوک FVC ساخته می‌شود، که به طور پیوسته فرکانس سیگنال خروجی انکودر را اندازه گرفته و مقدار کاهش دامنه سیگنالها را در ولتاژهای مرجع اعمال می‌کند.

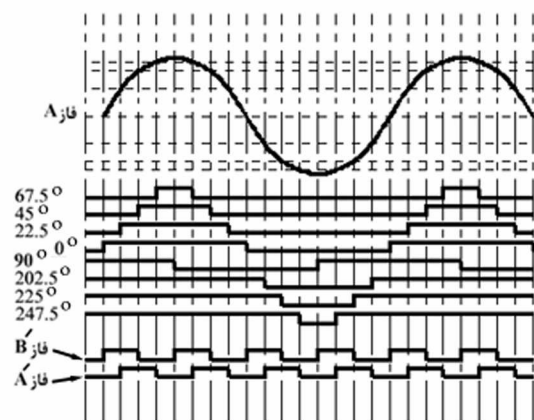
۲- مؤلفه کاهش دامنه سیگنالها در اثر کاهش روشنایی منبع نور انکودر: این مؤلفه از یک آشکارساز نوری که مستقیماً در معرض روشنایی نور انکودر قرار گرفته تولید شده و سپس تقویت می‌گردد (بلوک ID).

۳- مؤلفه تغییرات متقارن و نامتقارن دامنه سیگنالها: برای تولید این مؤلفه ابتدا خروجی آنالوگ انکودر (فازهای A, B, Z) توسط مبدل‌های TTL به سیگنالهای دیجیتال تبدیل می‌گردند و سپس توسط یک شمارنده دوجبهتی شمارش شده و خروجی آنها جهت آدرس‌دهی به مقادیر از پیش تعیین شده ماکزیممهای مثبت و منفی هریک از دوره‌های منحصربه فرد سیگنال A که قبلاً در حافظه‌های ROM ذخیره شده‌اند، بکار می‌روند.

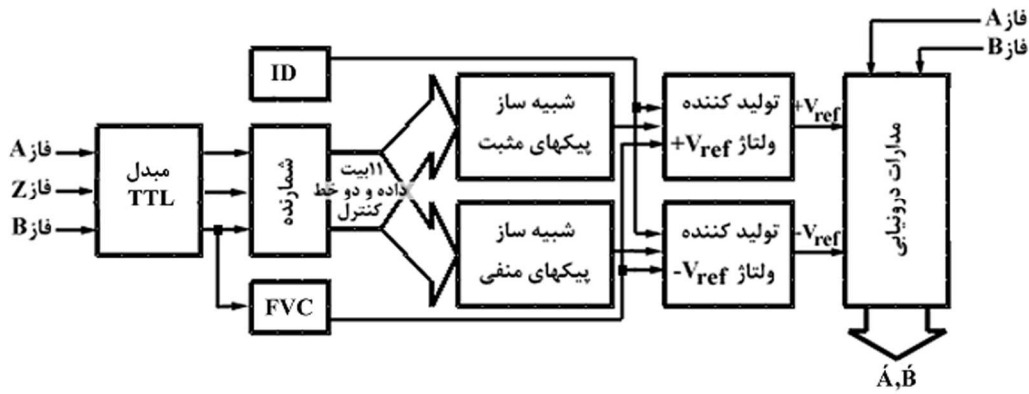
در این روش درونیابی، نمونه‌برداری از سیگنال ورودی به صورت لحظه‌ای و تنها در زوایای فاز مورد نظر انجام می‌گیرد، و از طرفی دیگر برای انتقال و پردازش داده‌ها نیازی به استفاده از یک سیستم زمانی نمی‌باشد؛ بنابراین پهنای باند خروجی انکودر تحت تأثیر مدار درونیابی قرار نمی‌گیرد. حداکثر فرکانس آشکارسازی هد و ماکزیمم سرعت مکانیکی انکودر تنها عوامل تعیین‌کننده پهنای باند می‌باشند. زمان پاسخ‌دهی مدار برابر با زمان پاسخ‌دهی مقایسه‌گرها و گیت‌های XOR می‌باشد، که با انتخاب مناسب این دو عنصر مجموع این دو زمان بیش از چندین نانو ثانیه نخواهد بود؛ و نتیجه اینکه در این روش درونیابی نسبت به روشهای مرسوم، داده‌ها در زمان واقعی‌تری به کنترلر انتقال داده می‌شود.



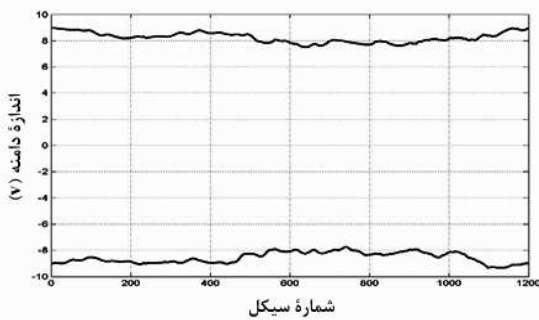
شکل ۷. روش پیشنهادی درونیابی برای ۴ مرتبه افزایش تفکیک پذیری



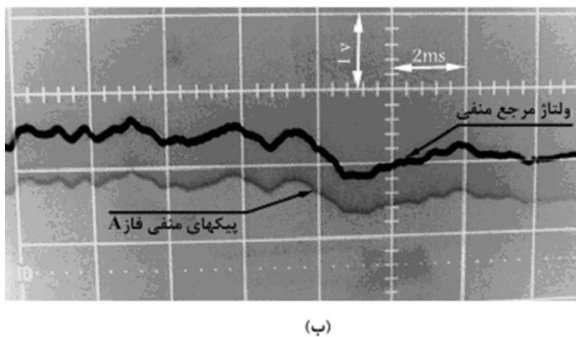
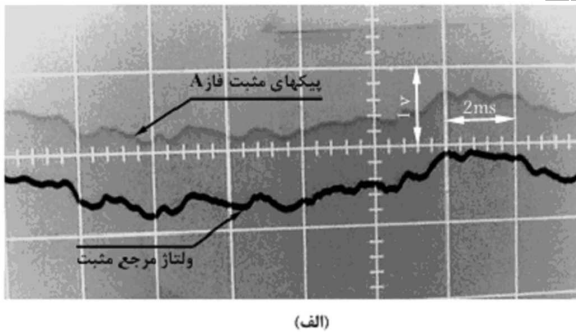
شکل ۸. دیاگرام زمانی روش پیشنهادی درونیابی برای ۴ مرتبه افزایش تفکیک پذیری



شکل ۹. بلوک دیاگرام مدارهای تولید کننده ولتاژهای مرجع



شکل ۱۰. تغییرات مثبت و منفی فاز A آنکودر مورد آزمایش



شکل ۱۱. مقایسه ماکزیممهای مثبت و منفی فاز A آنکودر مورد آزمایش به ترتیب با (الف) خروجی ولتاژ مرجع مثبت، (ب) خروجی ولتاژ مرجع منفی

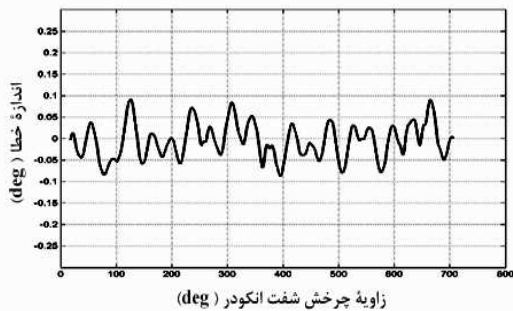
مقادیر ماکزیممهای مثبت و منفی قرائت شده مربوط به دوره سیگنال شمارش شده، توسط DACهای مجزا به دو ولتاژ آنالوگ تبدیل می‌شوند که به ترتیب قادرند پیکهای مثبت و منفی را تعقیب نمایند.

#### ۴. نتایج تجربی

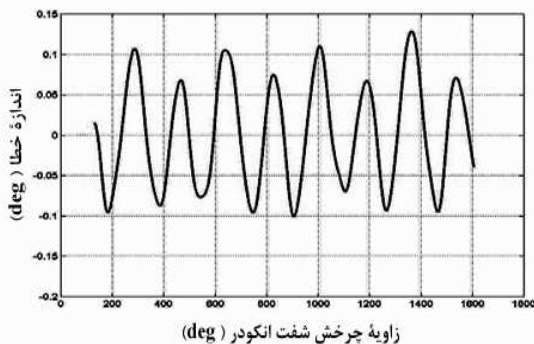
مدار درونیابی پیشنهادی برای افزایش تفکیک پذیری یک آنکودر افزایشی با خروجی 1200 CPR و پهنای باند 100kHz (سرعت دوران شفت آنکودر 5000 RPM) ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت. برای اندازه‌گیری ماکزیمم مثبت و منفی هر یک از دوره‌های سیگنال A از کارت A/D، PCL 818 HG استفاده گردید.

جهت تضمین دقت نمونه‌ها، نمونه‌برداری با فرکانس 40 kHz انجام گرفت و شفت آنکودر نیز توسط جعبه دنده‌ای با نسبت انتقال 1:40 به صورت دستی و به آرامی گردانده شد. همزمان شماره دوره‌های سیگنال آنکودر نیز توسط کارت آنکودر PCL 833 ثبت گردید. سپس مقادیر ماکزیمم مثبت و منفی دوره‌های سیگنال مطابق با شماره هر دوره درون ایپرامهای (D2716D) جداگانه ذخیره گشت. شکل ۱۰ تغییرات ماکزیمم مثبت و منفی فاز A آنکودر مورد آزمایش را در یک دور کامل نشان می‌دهد. تغییرات متقارن و نامتقارن دامنه هر دوره سیگنال خروجی را می‌توان در این منحنی مشاهده نمود. این تغییرات مربوط به نواقص محلی الگوی کد و واسطه شیشه دیسک آنکودر می‌باشد. برای شبیه‌سازی تغییرات دامنه از D/A های 7541 استفاده گردید. در این مدار فرکانس سیگنال خروجی آنکودر نیز توسط VFC 32 در زمان واقعی اندازه‌گیری می‌گردد. این آی‌سی قادر است تا ولتاژ ۱ تا ۹ ولت را مطابق با فرکانس بین ۰ تا ۱۰۰ کیلو هرتز تولید نماید. برای اندازه‌گیری شدت نور یک دیود نوری در تغذیه معکوس استفاده گردید. هر سه مؤلفه اندازه‌گیری شده فوق از طریق یک مقسم ولتاژ توسط یک مدار جمع کننده با هم ترکیب می‌گردند تا ولتاژهای مرجع ساخته شوند. شکل ۱۱ (الف) خروجی ولتاژ مرجع مثبت و ۱۱ (ب) خروجی ولتاژ مرجع منفی را به ترتیب با ماکزیممهای مثبت و منفی فاز A

قبل از درونیابی دارای هارمونیکهای معین ۱، ۲، ۳، ۵، ۶ و ۱۰ سیکل در دور و بعضی هارمونیکهای دیگر است، اما بعد از درونیابی تنها هارمونیکهای موجود ۱ و ۲ سیکل در دور می‌باشد. با مقایسه نتایج فوق می‌توان به این نتیجه رسید که بجز هارمونیک‌های ۱ و ۲ که به ترتیب مربوط به لنگی و بیضوی بودن الگوی کد دیسک انکودر می‌باشند، سایر هارمونیک‌های دیگر مربوط به تغییرات دامنه بوده است که در اثر نواقص محلی الگوی کد و واسطه شیشه دیسک انکودر به وجود آمده است. بازخورد مؤلفه تغییرات متقارن و نامتقارن دامنه سیگنالها در ولتاژهای مرجع مثبت و منفی مدار درونیابی، این مؤلفه‌های خطا را از سیگنال خروجی مدار درونیابی حذف نموده است. همانگونه که پیشتر ذکر شد حذف اثر لنگی و انحراف جهت-دار الگوی کد دیسک انکودر (هارمونیک‌های ۱ و ۲ سیکل در دور) مستلزم اتخاذ روشهای خاصی است که خارج از مدارهای درونیابی قابل اجرا است و لذا در مدار درونیابی تصحیح نشده‌اند. پاسخدهی مدار ساخته شده حدود ۸۰ نانوثانیه می‌باشد و این مقدار زمان پاسخدهی در بحرانی‌ترین شرایط، یعنی هنگامیکه انکودر مورد آزمایش در سرعت 5000 RPM بچرخد، 8.64" خطا ایجاد خواهد کرد. در صورتیکه خطای مجاز پاسخدهی را  $\pm 1/2$  quantum در نظر بگیریم، با حفظ پهنای باند انکودر می‌توان تفکیک‌پذیری این انکودر را تا ۱۲۵ مرتبه افزایش داد. بازخورد فرکانس خروجی در مدار درونیابی باعث شده است تا دقت خروجی مدار درونیابی در پهنای باند فرکانسی کاملاً پایدار باشد. بازخورد شدت روشنایی منبع نور نیز باعث پایداری طولانی مدت درستی مدار درونیابی می‌گردد.



شکل ۱۴. منحنی خطای خروجی انکودر قبل از درونیابی



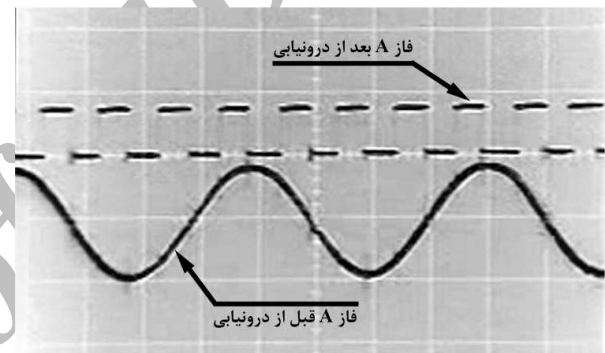
شکل ۱۵. منحنی خطای خروجی انکودر بعد از درونیابی

انکودر مورد آزمایش، مقایسه می‌کند. با توجه به شکل، ولتاژهای مرجع ساخته شده به خوبی می‌توانند در سرعت‌های مختلف انکودر ماکزیممهای مثبت و منفی را تعقیب نمایند.

شکل ۱۲ فاز A انکودر مورد آزمایش را قبل و بعد از چهار مرتبه درونیابی نشان می‌دهد. دقت و پایداری سیگنالهای درونیابی را به خوبی در این شکل می‌توان دید.

برای اندازه‌گیری خطای خروجی انکودر و خروجی مدار درونیابی از انکودر 5000 CPR (ROD 426 B) هایدن‌هاین به عنوان استاندارد اندازه‌گیری و از کارت انکودر PCL 833 به عنوان شمارنده استفاده شد.

شکل ۱۳ آرایش انکودر هایدن‌هاین و انکودر مورد آزمایش را برای اندازه‌گیری خطا نشان می‌دهد. برای این منظور تفکیک‌پذیری انکودر هایدن‌هاین توسط کارت انکودر چهار برابر گردید.



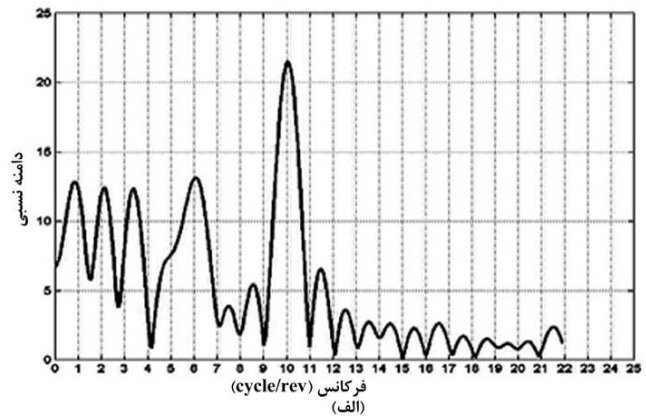
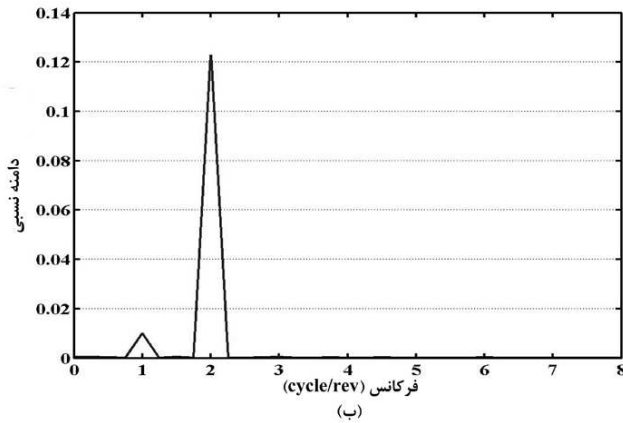
شکل ۱۲. فاز A قبل و بعد از درونیابی



شکل ۱۳. آرایش انکودر هایدن‌هاین و انکودر مورد آزمایش برای اندازه‌گیری خطا

عدم قطعیت مقادیر اندازه‌گیری شده برابر با خطای کوانتیزیشن ( $\pm 0.018^\circ$ ) به علاوه خطای سیستم انکودر ( $1/20$  گام شبکه دیسک انکودر [۹]) می‌باشد که برای انکودر ROD 426 B مجموع این دو خطا  $\pm 0.036$  درجه است. شکل ۱۴ منحنی خطای خروجی انکودر را قبل از درونیابی و شکل ۱۵ منحنی خطای خروجی را بعد از درونیابی نشان می‌دهد. با محاسبه FFT دو منحنی فوق هارمونیکهای موجود در این دو منحنی استخراج شد.

شکل ۱۶ (الف) و (ب) به ترتیب طیف فرکانسی منحنی خطای خروجی انکودر را قبل و بعد از درونیابی نشان می‌دهد. منحنی خطا



شکل ۱۶. طیف فرکانسی منحنی خطای سیگنال خروجی (الف) قبل از درونیابی، (ب) بعد از درونیابی

می‌باشند. با توجه به نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری خطای سیگنالها، در نتیجه بازخورد تغییرات پیرویدیک متقارن و نامتقارن دامنه سیگنالها، تمام هارمونیکهای منحنی خطا بجز هارمونیکهای ۱ و ۲ سیکل در دور بعد از درونیابی حذف گردیده است، بنابراین در این روش درونیابی نیازی به سیگنالهایی با کیفیت بسیار بالا وجود ندارد. حذف هارمونیکهای ۱ و ۲ سیکل در دور که به ترتیب مربوط به لنگی و بیضوی بودن الگوی کد دیسک انکودر می‌باشند، مستلزم اتخاذ روشهای خاصی است که خارج از مدارهای درونیابی قابل اجرا است و لذا در مدار درونیابی تصحیح نشده‌اند.

همچنین در مدار درونیابی ساخته شده برای پایداری طولانی مدت درستی درونیابی، بازخورد شدت روشنایی منبع نور به کار رفته است.

### مراجع

- [1] Hagiwara, N., Suzuki, Y., & Murase, H., "A Method of Improving The Resolution and Accuracy of Rotary Encoder Using a Code Compensation Technique", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 41, No.1, Feb.1992
- [2] Emura, T., Wang, L., & Arakawa, A., "A High-Resolution Interpolator for Incremental Encoders by Two-Phase Type PLL Method", IEEE, 1993, pp.1540-1545
- [3] René Mayer, J.R., "High-Resolution of Rotary Encoder Analog Quadrature Signals", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 43, No. 3, June.1992
- [4] Johnston, J.S., "linear Encoders-The Debate Heat up", Industrial Technology, Sep.1996
- [5] Futaba Pulscale Catalogue, 1990
- [6] Garrett, D.A., "Interpolation Method and Shaft Angle Encoder", U.S. Patent #5,041,829
- [7] Webster, J.G., (ed.), "The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook", CRC Press LLC, U.S., 1999
- [8] Charkey, E.S., "Electromechanical Systems Component", John Wiley, 1980
- [9] Heidenhain General Catalogue, 1991

### ۵. نتیجه‌گیری

با توسعه تکنولوژی ماشینهای ابزار و ماشینهای اندازه‌گیری به ابزاری با تفکیک‌پذیری بالا، زمان پاسخ‌دهی پایین، درستی بالا و سرعت بالا نیاز است. اگرچه انکودرهای نوری ذاتاً دارای چنین ویژگیهایی هستند ولی هنوز تفکیک‌پذیری و درستی آنها برای بعضی از کاربردها پایین می‌باشد. مدارهای درونیابی متنوعی وجود دارند که قادرند تفکیک‌پذیری و درستی این نوع انکودرها را افزایش دهند، اما آنها این عمل را با معاوضه بعضی از ویژگیهای ذکر شده انجام می‌دهند.

بعضی از مشکلاتی که این روشها دارند عبارتند از: نیاز به سیگنال ورودی با کیفیت بسیار بالا، عدم توانایی در تصحیح خطاهای ورودی و زمان پاسخ‌دهی بالا و بنابراین کاهش پهنای باند.

در این مقاله روش درونیابی پیشنهاد شده است که ضمن حفظ زمان پاسخ‌دهی پایین و پهنای باند، تفکیک‌پذیری و درستی یک انکودر نوری را افزایش می‌دهد.

در این روش برای انتقال و پردازش داده‌ها نیازی به استفاده از یک سیستم زمانی نمی‌باشد؛ بنابراین پهنای باند خروجی انکودر تحت تأثیر مدار درونیابی قرار نمی‌گیرد.

یک مدار درونیابی بر اساس این روش ساخته شد و برای افزایش تفکیک‌پذیری یک انکودر افزایشی با خروجی 1200 CPR و پهنای باند 100 kHz مورد آزمایش قرار گرفت.

زمان پاسخ‌دهی این مدار حدود ۸۰ نانو ثانیه می‌باشد و این مقدار زمان پاسخ‌دهی در بحرانی‌ترین شرایط، یعنی هنگامیکه انکودر مورد آزمایش در سرعت 5000 RPM بچرخد، "8.64 خطا ایجاد خواهد کرد. در صورتیکه خطای مجاز پاسخ‌دهی را  $\pm 1/2$  quantum در نظر بگیریم، با حفظ پهنای باند انکودر می‌توان تفکیک‌پذیری این انکودر را تا ۱۲۵ مرتبه افزایش داد.

بازخورد فرکانس خروجی در مدار درونیابی باعث شده است تا دقت خروجی مدار درونیابی در پهنای باند فرکانسی کاملاً پایدار باشد. آزمایشها نشان داده است که حداکثر فرکانس آشکارسازی هد و ماکزیمم سرعت مکانیکی انکودر تنها عوامل تعیین‌کننده پهنای باند

## فهرست علائم

A	Encoder's 'A' Channel
A'	Encoder's 'A' Channel after Interpolation
ADC	Analog to Digital Converter
B	Encoder's 'B' Channel
B'	Encoder's 'B' Channel after Interpolation
CPR	Cycle per Revolution
CRT	Cathode Ray Tube
DAC (D/A)	Digital to Analog Converter
FFT	Fast Furrier Transform
FVC	Frequency to Voltage Converter
ID	Intensity Detector
LF	Loop Filter
PD	Phase Detector
PLL	Phase Locked Loop
SHA	Sample and Hold Amplifier
VCO	Voltage Control Oscillator
VFC	Voltage to Frequency Converter
Z	Encoder's Reference Channel

[10] Mitsuyuki, T., & Tadashi, I., "Interpolation Circuit of Encoder", EP 0,874,223 A1

[11] Dr Ing. Rainer Hagel, "Position Encoders without Integral Bearing for Hollow Shafts", Heidenhainfo, Vol. 5, Issue2, June 1999, pp.1-6

[12] Dumbrăvescu, N., Schiaua, S., "Possibilities to Increase The Resolution of Photoelectric Incremental Rotary Encoders", Materials Science in Semiconductor Processing 3, 2000, pp.557-561

[13] Maschera, D., Simony, A., Gottardi, M., Gonzo, L., Gregori, S., liberali, V. & Torelli, G., "An Automatically Compensated Readout Channel for Rotary Encoder Systems", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 50, No. 6, December 2001

[14] Vossoughi, G.R., & Rezaei, J., "Influence of Code Pattern Runout on Accuracy of Rotary Encoder and Possibilities to Measuring and Reducing It", 5<sup>th</sup> Production and Manufacturing Engineering Conference in Iran, Feb. 2003

Archive of SID