

طراحی و ساخت سیستم کنترل بلادرنگ موقعیت عملگر پنوماتیکی برای یک پرنده هوایی

سید کمال الدین موسوی مشهدی^۱، سعید شمعقدری^۲، بهروز یونسی^۳

^۱عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، sk_mousavi@iust.ac.ir

^۲عضو هیأت علمی دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، shamaghdari@iust.ac.ir

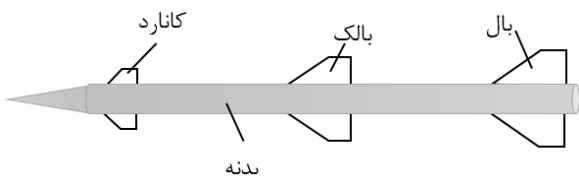
^۳دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه علم و صنعت ایران، behrooz_yonesie@yahoo.com

چکیده- در سیستم‌های پرنده، کنترل باله از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا جهت تغییر مسیر، کنترل جهت پرواز و پایداری از باله استفاده می‌شود. روش‌های مختلفی جهت کنترل موقعیت باله‌ی وسایل پرنده وجود دارد که هریک مزایا و معایب خود را دارند. در این مقاله با استفاده از نیروی هوای فشرده و پیستون پنوماتیکی، یک سیستم کنترل موقعیت باله‌ی موشک طراحی و پیاده سازی می‌شود. یکی از مزایای مهم استفاده از نیروی پنوماتیکی، بیشتر کردن توان تحمل اغتشاشات توسط باله و قدرت زیادتر است. در این سیستم کنترلی از هوای فشرده به عنوان منبع توان مکانیکی و از پیستون پنوماتیکی به عنوان عملگر، جهت تغییر موقعیت باله استفاده می‌شود. مدارات راه انداز و *conditioning* هم وظیفه‌ی ارتباط بین کنترل کننده و عملگر و افزایش قابلیت اطمینان سیستم نسبت به تداخل سیگنال‌ها را دارند. به منظور افزایش دقت کنترل موقعیت سیستم، مدارات *conditioning* به صورت نرم‌افزاری خطی سازی می‌شوند. عملیات کنترل موقعیت باله‌ی موشک به صورت کنترل زمان واقعی انجام می‌گیرد که توسط نرم افزار متلب پیاده سازی می‌شود. پس از طراحی و ساخت، با روش حلقه بسته ی زیگلر نیکولز با معیار میرایی یک چهارم بهترین کنترل کننده PID طراحی می‌گردد و ضرایب P ، I و D با دقت سه رقم اعشار محاسبه می‌شوند.

کلید واژه- پیستون پنوماتیکی، شیربرقی، کنترل بلادرنگ، PID، مدارات راه انداز

۱- مقدمه

روش‌های مختلفی جهت کنترل باله‌ی موشک وجود دارد، که مهم‌ترین آن‌ها موتورهای الکتریکی DC، نیروی پنوماتیکی و نیروی هیدرولیکی می‌باشد. نیروی پنوماتیکی به دلیل مزایای آن بر سایر نیروها در سیستم‌های کنترلی مختلف نظیر کنترل بازوی ربات‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. از جمله مزیت‌های استفاده از نیروی پنوماتیکی اشغال فضای کمتر نسبت به سایر نیروها در یک توان برابر، نیاز به استفاده از منابع انرژی الکتریکی کمتر در سیستم و توانایی از بین بردن سریع‌تر اغتشاشات نسبت به برخی نیروهای دیگر مثل نیروی هیدرولیکی می‌باشد [۶].



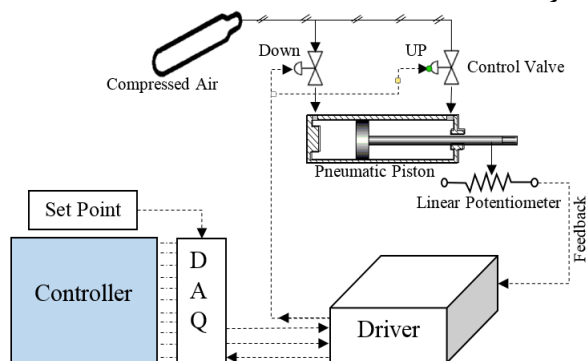
شکل ۱: موقعیت قرار گیری سطوح آیرودینامیکی جهت کنترل موشک بر بدنه‌ی آن [۷]

در این مقاله سیستم کنترلی جدیدی برای کنترل بلادرنگ^۱ سطوح آیرودینامیکی موشک با استفاده از پیستون پنوماتیکی معرفی می‌شود. در سیستم ارائه شده، از طریق کنترل فشار هوای ورودی به پیستون پنوماتیکی، زاویه‌ی سطوح آیرودینامیکی

هدف اصلی بیشتر موشک‌ها، رساندن محموله‌ی مشخص به یک هدف تعیین شده می‌باشد؛ برای این کار سیستم کنترلی موشک باید امکان دنبال کردن یک مسیر مشخص و از پیش تعیین شده را فراهم سازد. سرچنگی به همراه «سامانه‌ی هدایت و کنترل» درون بدنه‌ی موشک قرار می‌گیرد که نهایتاً بایستی به هدف تعیین شده اصابت کند. سیستم کنترل و هدایت یک موشک، سیستمی حلقه بسته است که در آن اطلاعات به صورت پیش‌خور و پس‌خور در فازهای مختلف سیستم مبادله می‌شود و باعث ایجاد پایداری در بخش‌های مختلف و اصلاح مسیر می‌گردد [۱]. بیشتر موشک‌ها از سطوح آیرودینامیکی برای کنترل استفاده می‌کنند که اغلب از عبارت کلی پره برای اشاره به این سطوح استفاده می‌شود [۲]. عموماً این سطوح آیرودینامیکی به سه دسته‌ی کاناردها، بال‌ها و بالک‌ها تقسیم بندی می‌شوند (شکل ۱) [۳]. هر یک از این سطوح مزایا و معایب خود را دارند و طراح باید با توجه به نوع تهدیدات و محیط عملیاتی به صورت بهینه‌ای از این سطوح جهت تحقق اهداف استفاده کند [۴]. متداول‌ترین نوع سطوح آیرودینامیکی بالک‌ها می‌باشند که به دلیل قرار گرفتن پیش از مرکز ثقل موشک، مانورپذیری زیادی را برای موشک فراهم می‌آورند. به عنوان مثال موشک Sparrow از بال‌های متحرک جهت کنترل و از بالک‌های ثابت برای پایداری بهره می‌برد [۴].

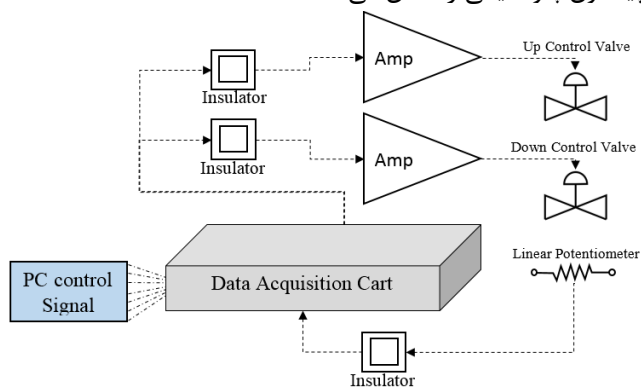
^۱ Real Time

پردازشگر در این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۲ بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی برای کنترل موقعیت باله‌ی موشک توسط پیستون پنوماتیکی و نحوه‌ی اتصال بخش‌های مختلف آن به یکدیگر را نشان می‌دهد. در این شکل سه نوع ارتباط سریال، آنالوگ و پنوماتیکی بین اجزای مختلف سیستم وجود دارد.



شکل ۲: شمای کلی بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی برای کنترل موقعیت جک پیستون پنوماتیکی

روش مورد استفاده‌ی کنترل باله‌ی موشک در این مقاله بدین گونه است که ابتدا توسط پتانسیومتر از خروجی موقعیت فیدبک گرفته می‌شود، سپس سیگنال فیدبک جهت ممانعت از ایجاد حلقه‌ی جریان، توسط راه‌انداز از سیگنال کنترل‌کننده، ایزوله شده و به پردازشگر ارسال می‌گردد. پردازشگر آن را با موقعیت مطلوب جک پیستون مقایسه می‌کند و دستورات کنترلی را به راه‌انداز ارسال می‌کند. راه‌انداز مجدداً پس از ایزوله کردن سیگنال کنترلی، توسط یک تقویت‌کننده، متناسب با شیرهای کنترلی، سطح سیگنال را افزایش داده و به دو شیر کنترلی اعمال می‌کند. شکل ۳ بلوک دیاگرام اعمال سیگنال کنترلی به شیرهای کنترلی و دریافت فیدبک از موقعیت فعلی پیستون پنوماتیکی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام اعمال سیگنال کنترلی به شیرهای کنترلی و دریافت فیدبک از موقعیت فعلی جک پنوماتیکی

متصل به موشک کنترل می‌شود. علیرغم سادگی و هزینه‌ی کم، مدارهای راه‌انداز^۱ و conditioning به گونه‌ای طراحی شده‌اند که سیستم دارای دقت زیاد و قابلیت اطمینان بالا باشد. در این پژوهش به منظور افزایش دقت کنترل موقعیت جک پنوماتیکی مدارات conditioning به صورت نرم‌افزاری خطی‌سازی می‌گردند. همچنین انواع کنترل‌کننده‌های P، PI و PID به روش حلقه بسته‌ی زیگلر نیکولز طراحی می‌شوند و بهترین کنترل‌کننده، که دارای زمان خیز^۲ حداقل و بدون فراجهش^۳ است، پیاده‌سازی می‌گردد.

۲- توضیح سخت افزار ، نرم افزار و نکات نصب

سخت‌افزار سیستم کنترل باله‌ی موشک، شامل اجزایی است که وظیفه‌ی ثابت نگه داشتن موقعیت باله‌ی موشک در راستای مطلوب و اعمال نیروی جبران‌ساز برای جبران اغتشاشات وارد شده به باله را بر عهده دارند. این اجزا عبارتند از: (۱) منبع هوای فشرده که تغذیه‌ی قدرت شیرهای کنترلی سیلندر پنوماتیکی می‌باشد. (۲) شیرهای برقی که وظیفه‌ی کنترل دبی هوای فشرده‌ی ورودی به پیستون پنوماتیکی را بر عهده دارند. (۳) پیستون پنوماتیکی که خروجی سیستم می‌باشد، در واقع هدف نهایی سیستم کنترل باله‌ی موشک کنترل موقعیت جک پیستون پنوماتیکی است که موجب تغییر در زاویه‌ی باله و در نتیجه تغییر مسیر حرکت موشک می‌شود. (۴) حسگر که وظیفه‌ی اندازه‌گیری موقعیت جک را بر عهده دارد. این حسگر در سیستم ارائه شده یک پتانسیومتر متصل شده به جک می‌باشد، به منظور فیدبک گرفتن از موقعیت جک، برای بستن حلقه‌ی کنترلی و اصلاح موقعیت فعلی استفاده می‌شود. (۵) راه‌انداز که وظیفه‌ی ایزوله کردن عملگر از بخش پردازشی، دریافت فیدبک از موقعیت جک، تقویت سیگنال کنترلی اعمال شده از طرف پردازشگر و اعمال سیگنال کنترلی تقویت شده به پیستون را بر عهده دارد. (۶) کارت جمع‌آوری داده^۴ که وظیفه‌ی دریافت سیگنال فیدبک از راه‌انداز و دادن آن به پردازشگر و اعمال سیگنال‌های کنترلی توسط پردازشگر به راه‌انداز را بر عهده دارد. (۷) رایانه که به عنوان

^۱ Driver

^۲ Rise time

^۳ Overshoot

^۴ Data Acquisition Cart (DAQ)

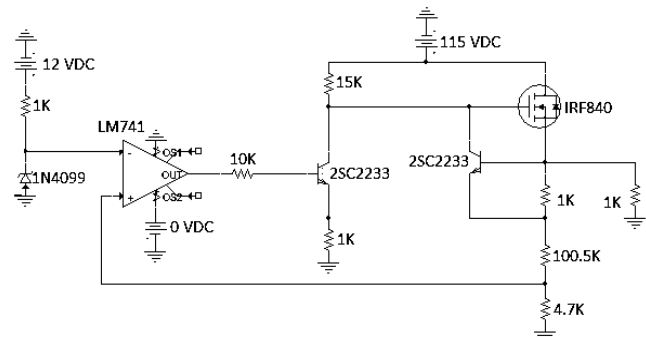
در حین نصب و راه‌اندازی این دستگاه، باید در ترتیب

اتصال سیم‌های کارت جمع آوری داده به راه‌انداز دقت کافی را لحاظ نمود زیرا در صورت عدم دقت منجر به آسیب دیدن جدی کنترل‌کننده و یا کارت جمع آوری داده می‌شود.

۱-۲- معرفی بخش الکترونیکی

یکی از بخش‌هایی که توسط این مقاله به صورت نوآورانه تشریح می‌شود نحوه‌ی طراحی راه‌انداز، ساخت مدارات آن و نکاتی است که باید در طراحی و ساخت آن لحاظ کرد. راه‌انداز شامل اجزای: منابع تغذیه، جداکننده‌ها و تقویت‌کننده‌ی سیگنال کنترلی می‌باشد که هریک به ترتیب در ادامه توضیح داده می‌شود.

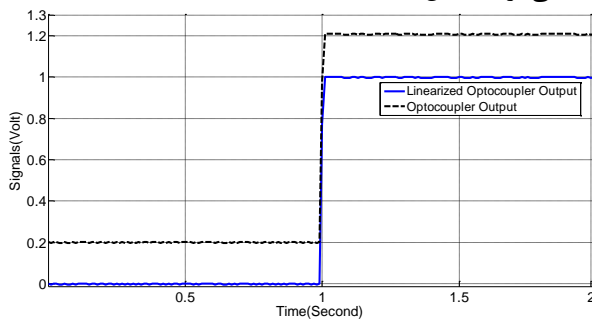
در طراحی این راه‌انداز ما نیاز به منابع تغذیه‌ی زیر داریم: منبع تغذیه ۱۵ ولت جهت روشن شدن جداکننده‌ها، ۲۴ ولت جهت تغذیه‌ی پتانسیومتر فیدبک جک خروجی پیستون پنوماتیکی، ۱۲ ولت جهت روشن شدن مدار تثبیت منبع تغذیه‌ی ۱۱۰ ولت و منبع تغذیه‌ی ۱۱۰ ولت جهت فعال شدن تقویت‌کننده‌ی سیگنال کنترلی. منابع تغذیه‌ی ۱۲، ۱۵، ۲۴ ولتی به ترتیب با تنظیم‌کننده‌های ولتاژ LM7812، LM7815، LM7824 قابل پیاده‌سازی هستند. مدار منبع تغذیه‌ی ۱۱۰ ولتی نیاز به تثبیت ولتاژ خروجی دارد به گونه‌ای که با تغییر جریان کشیده شده از آن، سطح ولتاژ خروجی افت نکند. به همین دلیل از مدار فیدبک‌دار شکل ۴ استفاده می‌شود.



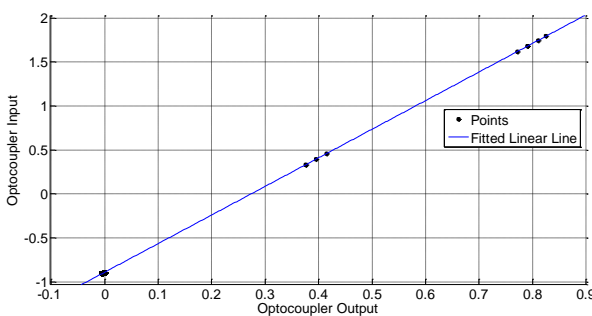
شکل ۴: شماتیک کلی منابع تغذیه‌ی ۱۱۰ ولتی

جداکننده، بخش مهم دیگر موجود در راه‌انداز است. مدار شامل جداکننده، به عنوان مدار conditioning وظیفه‌ی انتقال سیگنال الکتریکی از کنترل‌کننده به راه‌انداز و از راه‌انداز به کنترل‌کننده به صورت آنالوگ با رعایت ایزوله بودن دو بخش را

دارد. جداکننده‌ها معمولاً کاملاً خطی نیستند یعنی سیگنال را با یک مقدار اعوجاج و یک بایاس منتقل می‌کنند. بنابراین جهت افزایش دقت کنترل موقعیت از خطی‌سازی نرم افزاری استفاده می‌شود. در این مقاله سیگنال فیدبک از موقعیت جک که پس از عبور از جداکننده وارد کارت جمع آوری داده می‌شود توسط یک نمودار خطی موجود در نرم افزار، برازش و اصلاح می‌گردد. در این پژوهش به جداکننده یک سیگنال پله اعمال می‌شود و خروجی غیرخطی آن به صورت نرم‌افزاری خطی می‌گردد. شکل ۵ سیگنال خروجی جداکننده و سیگنال اصلاح شده را نشان می‌دهد. جهت محاسبه خط اصلاح‌کننده رفتار غیر خطی جداکننده (معادله‌ی ۱)، ورودی و خروجی آن در دو محور رسم می‌شود، خط مورد نظر از برازش خطی بر نقاط موجود در صفحه محاسبه می‌گردد (شکل ۶).



شکل ۵: سیگنال خروجی جداکننده و سیگنال اصلاح شده آن



شکل ۶: نمودار برازش شده برای اصلاح خروجی جداکننده

(۱)

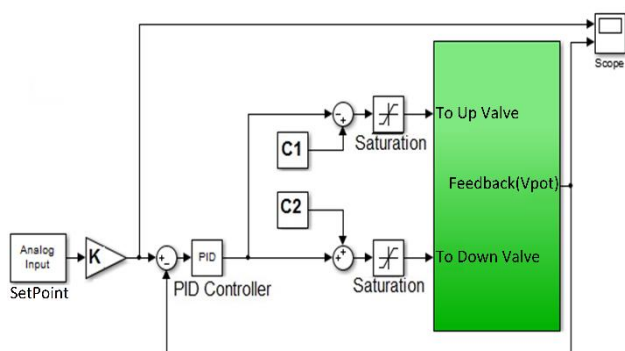
خروجی خطی شده‌ی جداکننده

$$= 3/2520 \times (\text{خروجی جداکننده}) - 0/1900$$

جداکننده استفاده شده در این دستگاه از نوع نوری می‌باشد، شکل ۷ شماتیک مدار جداکننده‌ی استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

بخش اصلی راه‌انداز، تقویت‌کننده‌ی سیگنال کنترلی می‌باشد. این بخش سیگنال کنترلی را که دارای ولتاژ ۰ تا ۱۲ ولت است، به یک سیگنال قدرت ۰ تا ۱۱۰ ولت تبدیل

RTWT محیطی برای شبیه سازی، تست و ساخت نمونه اولیه سیستم‌های بلادرنگ می‌باشد. جهت ارتباط متلب با محیط واقعی از کارت جمع آوری داده (Advantech PCI-1711) در فرکانس ۱۰۰ هرتز استفاده می‌شود. بلوک دیاگرام سیمولینک متلب جهت کنترل بلادرنگ پیستون پنوماتیکی در شکل ۹ آمده است. با توجه به محدودیت دامنه‌ی ولتاژ خروجی کارت جمع آوری داده، از بلوک‌های اشباع^۱ در مسیر سیگنال کنترلی استفاده می‌شود. و روی بلوک دیاگرام این سیستم کنترلی مقدار مرجع^۲ و خروجی آن تفاضل سیگنال‌های کنترلی اعمالی به دو شیر برقی می‌باشد. همچنین سیگنال کنترلی از طریق دو ثابت C1 و C2 به دو شیر برقی اعمال می‌گردد (شکل ۹).



شکل ۹: بلوک دیاگرام سیمولینک متلب جهت کنترل بلادرنگ پیستون پنوماتیکی

۳- طراحی کنترل کننده

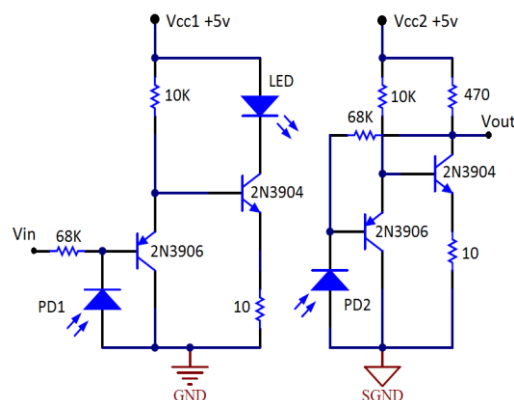
زیگلر و نیکولز در سال ۱۹۴۲ با مشاهده‌ی آزمایشات مختلف بر روی سیستم‌های متفات، قواعدی برای محاسبه‌ی ضرایب کنترل کننده‌های PID (T_d و T_i , K_p) بر اساس پاسخ پله سیستم پیشنهاد کردند. این روش زمانی که مدل ریاضی دقیقی از سیستم موجود نیست مفید است. معادله‌ی ۲ شکل کلی کنترل کننده‌ی PID را نشان می‌دهد [۹].

(۲)

$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

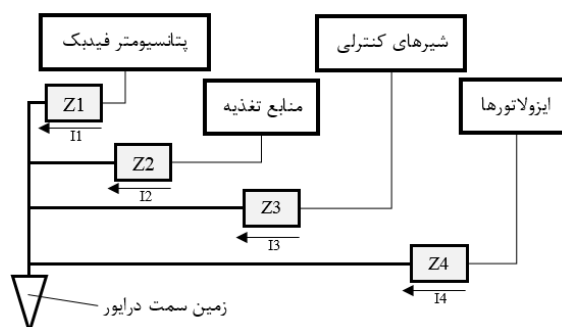
جهت محاسبه‌ی ضرایب کنترل کننده‌ی PID، زیگلر و نیکولز دو روش ارائه کرده‌اند، که در این مقاله از روش «معیار میرایی یک چهارم» به تنظیم آن می‌پردازیم. بر اساس این روش اگر طی

می‌نماید. این تقویت کننده توسط دو ماسفت که در ناحیه‌ی مقاومتی بایاس شده‌اند پیاده سازی می‌شود. در این تقویت کننده با اعمال سیگنال کنترلی به گیت ماسفت مقاومت درین سورس آن تغییر کرده و سیگنال قدرت مناسب با سیگنال کنترلی اعمال شده به راه‌انداز توسط کنترل کننده، تولید می‌شود.



شکل ۷: شماتیک مدار جداکننده

نکته‌ی مهمی که در پیاده سازی این سیستم باید به آن توجه داشت نحوه‌ی اتصال زمین‌های سیستم طراحی شده است، این سیستم دارای دو دسته زمین است، یکی زمین‌های سمت راه‌انداز و شیرهای کنترلی و دیگری زمین‌های بخش کنترل کننده. اتصال زمین‌های سمت راه‌انداز دستگاه باید به گونه‌ای باشد که اثرات جریان‌های برگشتی بر سیستم و افت پتانسیل ناشی از مجموع جریان‌های برگشتی بر هر یک از سیگنال‌ها حداقل گردد. برای این منظور زمین‌های این بخش همانند شکل ۸ به هم و سپس به زمین سمت راه‌انداز متصل می‌شوند [۸].



شکل ۸: مدار پیشنهادی برای اتصال صحیح زمین‌های سمت راه‌انداز و شیرهای کنترلی دستگاه طراحی شده

۲-۲- معرفی RTWT

متلب، نرم‌افزار قدرتمندی در زمینه‌ی کار با سیستم‌های بلادرنگ می‌باشد. در این مقاله از نرم افزار RTWT متلب جهت کنترل بلادرنگ سیستم طراحی و ساخته شده استفاده می‌گردد.

^۱ Saturation

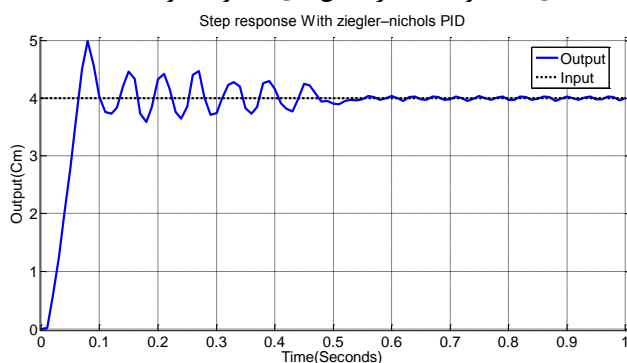
^۲ SetPoint

ضرایب کنترل کننده P، PI و PID برای این سیستم مطابق جدول ۲ استخراج می‌شود. با انجام آزمایشات مختلف به این نتیجه رسیدیم که کنترل کننده‌ی PD با تقویت نویز موجود در سیستم باعث ناپایداری آن می‌شود به همین دلیل نمی‌توان از کنترل کننده PD برای کنترل آن استفاده کرد.

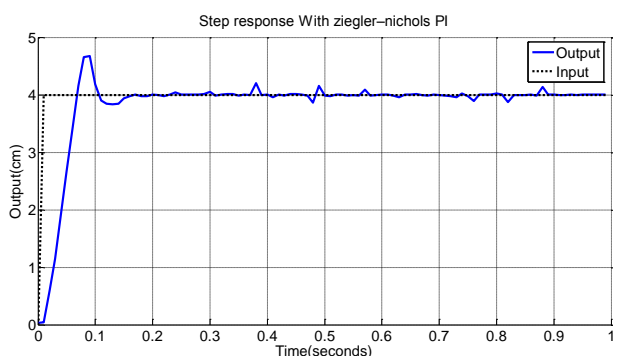
جدول ۲: ضرایب کنترل کننده‌های P، PI و PID زیگلر نیکولز

| کنترل کننده | ضرایب زیگلر نیکولز |
|-------------|--|
| P | $K_p = 12.9$ |
| PI | $K_p = 11.62, T_i = 0.016$ |
| PID | $K_p = 15.5, T_i = 0.0096, T_d = 0.0024$ |

برای ارزیابی سیستم کنترل حلقه بسته‌ی بدست آمده بر اساس این کنترل کننده‌ها، ضرایب تنظیم شده بر اساس معیار میرایی یک چهارم (جدول ۲) در پردازشگر به عنوان کنترل کننده پیاده سازی می‌شوند. پاسخ پله‌ی سیستم به کنترل کننده‌های P، PI و PID در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ آمده است.

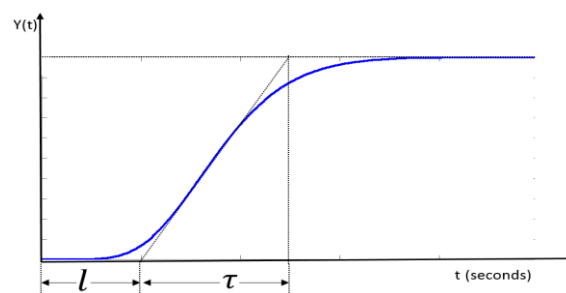


شکل ۱۲: پاسخ پله‌ی سیستم حلقه بسته به کنترل کننده P زیگلر نیکولز

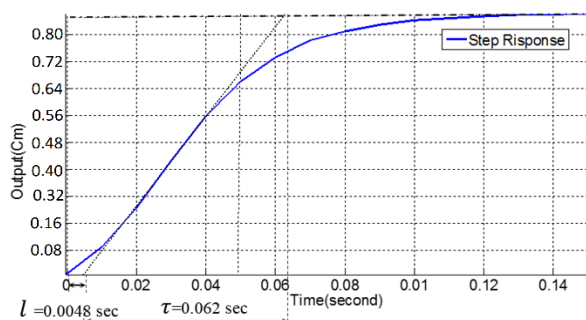


شکل ۱۳: پاسخ پله‌ی سیستم حلقه بسته به کنترل کننده PI زیگلر نیکولز

یک دوره تنها حدود ۲۵ درصد از حالت گذرا باقی بماند یک پاسخ خوب بدست آمده است [۱۰]. برای تنظیم ضرایب کنترل کننده مطابق روش معیار میرایی یک چهارم زیگلر نیکولز، ابتدا پاسخ پله‌ی سیستم را محاسبه می‌کنیم. برای محاسبه‌ی پاسخ پله‌ی سیستم اگر به جای کنترل کننده PID در شکل ۹ تنها گین واحد قرار گیرد و به ورودی سیستم پله اعمال شود پاسخ سیستم به ورودی پله بدست خواهد آمد. پاسخ پله‌ی سیستم شکلی همانند S (شکل ۱۰) دارد. این پاسخ دارای دو پارامتر l و τ است که ضرایب کنترل کننده‌ی PID بر اساس آن‌ها محاسبه می‌شود. شکل ۱۱ پاسخ سیستم ساخته شده به ورودی پله واحد را نشان می‌دهد. در این شکل ضرایب l و τ مشخص شده‌اند. جدول ۱ روابط تعریف شده توسط زیگلر نیکولز برای تنظیم ضرایب کنترل کننده‌ی PID بر اساس معیار میرایی یک چهارم را نشان می‌دهد [۱۱].



شکل ۱۰: منحنی عکس العمل فرآیند زیگلر نیکولز



شکل ۱۱: پاسخ پله سیستم ساخته شده به ورودی پله واحد

جدول ۱: روابط زیگلر نیکولز جهت محاسبه‌ی ضرایب کنترل کننده‌های P، PI و PID

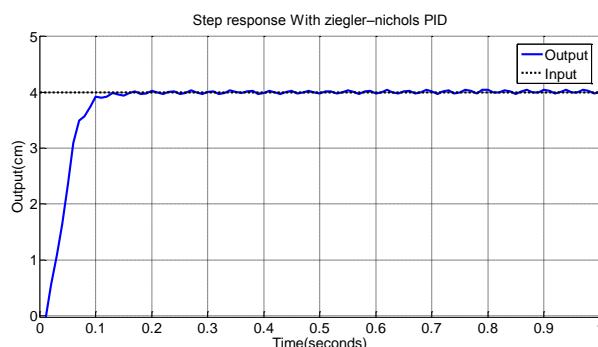
| کنترل کننده | ضرایب زیگلر نیکولز |
|-------------|--|
| P | $K_p = \frac{\tau}{l}$ |
| PI | $K_p = 0.9 \frac{\tau}{l}, T_i = \frac{l}{0.3}$ |
| PID | $K_p = 1.2 \frac{\tau}{l}, T_i = 2l, T_d = 0.5l$ |

با استفاده از روش معیار میرایی یک چهارم زیگلر نیکولز،

خروجی سیستم با کنترل‌کننده‌های P، PI و PID مشخص شد که کنترل‌کننده PID دارای بهترین پاسخ است و در عمل دقت موقعیت جک ۰/۰۶۴۳ سانتی متر می‌باشد.



شکل ۱۵: نمای کلی از سیستم کنترل‌کننده طراحی و ساخته شده



شکل ۱۴: پاسخ پله‌ی سیستم حلقه بسته به کنترل‌کننده PID زیگلر نیکولز

شکل ۱۲ پاسخ سیستم حلقه بسته را با کنترل‌کننده P به ورودی پله نشان می‌دهد که به دلیل صفر بودن I خروجی در اطراف مقدار مرجع نوسان می‌کند برای حذف این نوسانات کنترل‌کننده I را اضافه می‌نماییم که خروجی آن در شکل ۱۳ دیده می‌شود. با دقت به این شکل متوجه می‌شویم که خروجی پایدارتر شده است ولی پاسخ گذرای مناسبی ندارد. داشتن فراجش در عمل برای کنترل موشک مخرب است، لذا برای از بین بردن این خطا از کنترل‌کننده PID (جدول ۲) استفاده می‌شود که خروجی آن در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد. این کنترل‌کننده دارای پاسخ بدون فراجش با زمان خیز مناسب و خطای حالت دایم صفر می‌باشد. معادله‌ی ۳ تابع تبدیل کنترل‌کننده PID را نشان می‌دهد.

(۳)

$$G_{C_{PID}}(s) = 15.5 \left(1 + \frac{1}{0.0096s} + 0.0024s \right) = \frac{3.57 \times 10^{-4}s^2 + 15.5s + 1614.14}{s}$$

با توجه به اندک لقی سیستم مکانیکی و استهلاک آن، با اندازه‌گیری‌های صورت گرفته بر روی سیستم ساخته شده، دقت موقعیت جک تقریباً ۰/۰۶۴۳ سانتی‌متر می‌باشد که در عمل یک دقت قابل قبول است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله اقدام به طراحی، پیاده سازی و ساخت یک سیستم کنترل موقعیت پیستون پنوماتیکی شده است. در این پژوهش نحوه‌ی طراحی مدارات conditioning، راه‌انداز و کنترل‌کننده با دقت زیاد، قابلیت اطمینان بسیار بالا و هزینه کم ارائه شد. همچنین روش جبران سازی رفتار غیر خطی جداکننده‌ها جهت افزایش دقت موقعیت جک توضیح داده شد. سپس پاسخ پله‌ی سیستم استخراج گردید و ضرایب کنترل‌کننده PID به روش حلقه بسته زیگلر نیکولز برای آن محاسبه شد و پس از مقایسه

مراجع

- [1] Stanle J.Sawichi, Engineering Design Handbook - Ballistic Missile Series - Aerodynamics. U.S. Army Materiel Command Press, pp.11-12, 1965.
- [2] Charles M. Denegri Jr., James A. Dubben, and Kenneth S. Dawson. "Underwing Missile Control-Surface Effects on Aircraft Limit Cycle Oscillations", Journal of Aircraft, Vol. 51, No. 2, pp. 693-695, 2014.
- [3] Dalin Zhu, Shengjing Tang, Jie Guo, and Rui Chen, "Flight stability of a dual-spin projectile with canards", Journal of Aerospace Engineering, vol. 229, pp. 703-716, 2015.
- [4] Siouris and George, Missile Guidance and Control Systems. Springer-Verlag New York Press, pp. 92-35, 2004.
- [5] Mario Cheng, Stephan Riek, Sebastien Ourselin, and Marcus Watson, "Pneumatic Haptic Interface Fuzzy Controller for Simulation of Abdominal", Third Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems Salt Lake City, 2009.
- [6] Huang, K. David, and Sheng-Chung Tzeng. "Development of a hybrid pneumatic-power vehicle." Journal of Applied Energy, Vol. 80, No. 1, pp. 47-59, 2005.
- [7] Duan Chao-yang, Guo Jian-guo, and Zhou Jun, "Autopilot Design for Missile with Morphing Wings", 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Vol. 6, pp. 520-523, 2010.
- [8] Deon Reynders, Steve Mackay, and Edwin Wright, Practical Industrial Data Communications Best Practice Techniques. Elsevier Press, pp. 35-37, 2006.
- [9] دکتر سید علی اکبر صفوی، مهندس محمد رضوانی، "اصول و روش‌های کنترل صنعتی" موسسه‌ی انتشاراتی پژوهشگران نشر دانشگاهی، صفحات ۹۴-۹۷، ۱۳۹۳.
- [10] Karl Johan Åström, and Richard M. Murray, Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton University Press, pp.293-313, 2008.
- [11] K.J. Åström, and T. Hägglund, "Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control", Journal of Process Control 14, pp. 635-650, 2004.