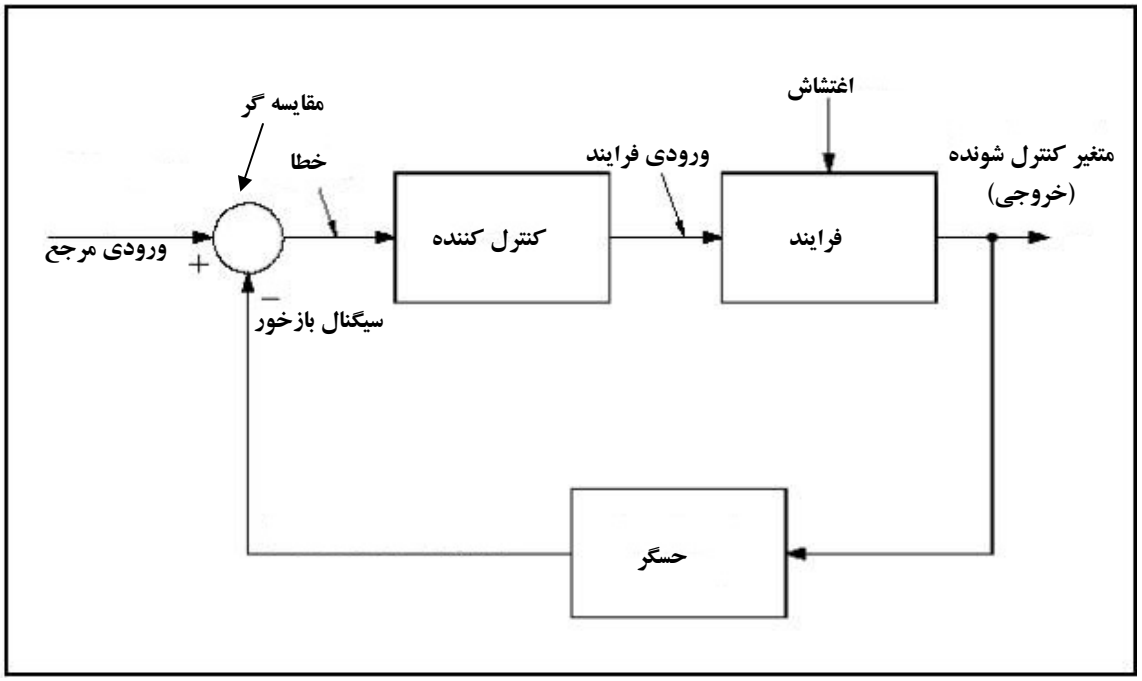
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی برق



دستور کار آزمایشگاه
کنترل خطی

www.ir-micro.com

مقدمه

در این آزمایشگاه شما با سیستمهای کنترل خطی آشنا خواهید شد. در این راستا آزمایشهایی طراحی گشته اند که شما را با تحلیل، پیاده سازی و شناسایی فرایندها و کنترل کننده های مختلف آشنا نموده و پس از آن با کاربرد این سیستمها در کنترل چند فرایند آشنا خواهید شد.

آزمایشها در دو بخش تدوین گشته اند، در بخش اول با پیاده سازی الکترونیکی فرایندهای خطی و جبران سازها آشنا شده و پس از بررسی آنها کاربرد جبران سازها به صورت حلقه باز و همچنین حلقه بسته را فرا خواهید گرفت. در انتها کاربرد کنترل کننده های متداول پیش فاز-پس فاز و تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر را در کنترل فرایندهای خطی بررسی خواهیم کرد.

برای آشنایی بیشتر با کاربردهای کنترل کننده های بررسی شده در بخش اول، این کنترل کننده ها را برای کنترل فرایند حرارتی و سرو موتور DC به کار خواهیم برد. در این راستا ابتدا با این فرایندها آشنا شده و به شناسایی آنها می پردازیم سپس برای رسیدن به اهداف کنترلی، جبرانسازهای مناسب طراحی و پیاده سازی شده و بر این فرایندها اعمال خواهیم نمود.

برای استفاده بهتر از جلسات آزمایشگاه رعایت نکات زیر توصیه می شود:

- در جلسه اول آزمایشگاه عناصر لازم برای پیاده سازی الکترونیکی فرایندها و کنترل کننده ها در اختیار گروهها قرار می گیرد و لذا انتظار می رود در جلسات بعد متناسب با هر جلسه مدارهای لازم پیش از شروع آزمایش بسته شده و جهت کار کلاسی آماده باشند.
- مطالعات لازم جهت دنبال کردن مسیر آزمایش و کارهایی که باید انجام شود و مشاهدات مورد انتظار از قبل لازم بوده و در غیر این صورت شما قادر به انجام آزمایشها نخواهید بود.
- رعایت نظم و قوانین آزمایشگاه و حضور به موقع، نکته دیگری است که می تواند به استفاده مفید از جلسات آزمایشگاه کمک نماید.
- رعایت موارد ذکر شده و همچنین مطالبی که در بخش *آموزشی* صفحه اینترنتی آزمایشگاه در آدرس:

  http://saba.kntu.ac.ir/eecd/lcsl

  موجود است جهت بهره برداری بهتر از آزمایشها لازم و ضروری است، لذا توصیه می شود پیش از شروع آزمایشها، مطالب صفحه اینترنتی آزمایشگاه را مطالعه نمایید.

www.ir-micro.com

آزمایش اول: آشنایی با نحوه پیاده سازی الکترونیکی و شناسایی فرایندها و کنترل کننده ها

۱-۱- مقدمه

بسیاری از کنترل کننده ها در صنعت به صورت الکترونیکی پیاده سازی می شوند، این نوع پیاده سازی علیرغم ساختار نسبتا ساده کارایی بالای خود را اثبات نموده است. آزمایش اول با هدف آشنایی دانشجویان با نحوه پیاده سازی الکترونیکی طراحی شده و طی آن با اصول کلی پیاده سازی الکترونیکی جبرانسازها و فرایندها آشنا خواهند شد. در ضمن یک اصل اساسی در طراحی سیستمهای کنترلی که از بازخور استفاده می کنند را نیز عملاً بررسی خواهد گردید.

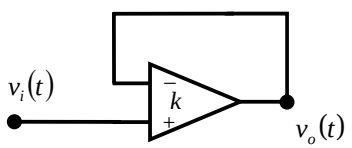
۱-۲- پیشنیاز

- آشنایی با طرز کار تقویت کننده های عملیاتی و نحوه بستن مدار بر روی برد آزمایشگاهی،
- بررسی روش تحقق الکترونیکی فیلترها،
- آشنایی با روشهای شناسایی پاسخ زمانی (نحوه محاسبه ثابت زمانی و بهره DC) و پاسخ فرکانسی (نحوه محاسبه بهره و اختلاف فاز).

۱-۳- آشنایی با تقویت کننده های عملیاتی

با استفاده از منبع تغذیه و پتانسیومتری که در اختیار دارید ولتاژ خروجی ۶ ولت بسازید. حال باری به اندازه $10k\Omega$ از خروجی بگیرید. ولتاژ خروجی چه تغییری می کند؟ پتانسیومتر را تغییر دهید تا دوباره ولتاژ ۶ ولت را در خروجی مشاهده نمایید. مجدداً باری به اندازه $10k\Omega$ از خروجی بگیرید. این بار ولتاژ خروجی به چه مقداری تغییری می کند؟ دلیل تغییرات ولتاژ خروجی را در چه می دانید؟

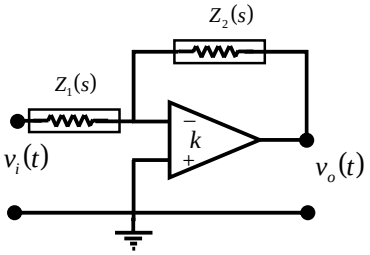
در این آزمایشها از تقویت کننده عملیاتی TL074 استفاده خواهد شد که دارای مقاومت ورودی بسیار بالایی می‌باشد. مشخصات این تقویت کننده در برگه ضمیمه آمده است. تقویت کننده عملیاتی را مطابق شکل زیر در حالت بافری بسته و خروجی پتانسیومتر را به ورودی بافر و بار را به خروجی بافر وصل کنید. حال آزمایش بالا را تکرار نموده و نتایج را با یکدیگر مقایسه نمایید.



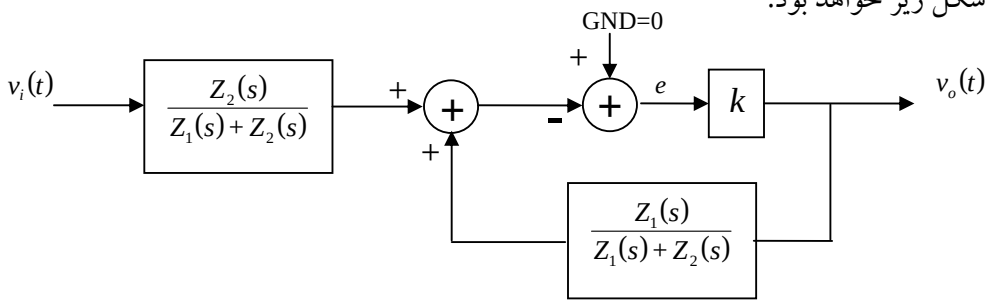
آیا با قرار دادن بافر مشکل حالت قبل برطرف شده است؟ علت را توضیح دهید. این کار تا کجا به خوبی پیش می رود؟

۱-۴- پیاده سازی توابع تبدیل به کمک تقویت کننده های عملیاتی و نحوه شناسایی آنها

در صورتی که تقویت کننده عملیاتی را مانند شکل زیر در مدار به کار ببریم:



که در آن $Z_1(s)$ و $Z_2(s)$ امپدانسهای معادل هستند، ثابت می شود که نسبت $v_o(t)$ به $v_i(t)$ در مدار بالا معادل نسبت آنها در شکل زیر خواهد بود:



حال با توجه به بهره بالای تقویت کننده عملیاتی و وجود بازخور منفی در مدار، خطا یعنی اختلاف پتانسیل ورودیهای تقویت کننده در حد صفر باقی خواهد ماند و لذا درباره شکل بالا می توان نوشت:

$$v_i \frac{Z_2(s)}{Z_1(s)+Z_2(s)} + v_o \frac{Z_1(s)}{Z_1(s)+Z_2(s)} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{v_o}{v_i} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

با توجه به معادله بالا و با انتخاب مناسب $Z_1(s)$ و $Z_2(s)$ می توان توابع تبدیل مختلف را تحقق بخشید.

- در ابتدا لازم است تا با نحوه عملکرد و محدودیت های سیستمی که با آن سروکار دارید بیشتر آشنا گردید. به این منظور با استفاده از مطالب بالا مداری ببندید که توسط آن بتوان بهره های DC از ۰,۱ تا ۱۰ را تحقق بخشید. عملکرد مدار را برای ورودی DC ۲ ولت امتحان کنید. آیا همواره یک رابطه خطی بین ورودی و خروجی سیستم وجود دارد؟

- با انتخاب مناسب $Z_1(s)$ و $Z_2(s)$ تابع تبدیل $G(s) = -\frac{1}{s+2}$ را تحقق دهید. با انتخاب ورودی مناسب، پاسخ زمانی و فرکانسی مدار را مشاهده نموده و صحت طراحی خود را بررسی نمایید.

آزمایش دوم: مقایسهٔ کنترل بدون بازخور (حلقه باز) و کنترل به کمک بازخور (حلقه بسته)

۲-۱- مقدمه

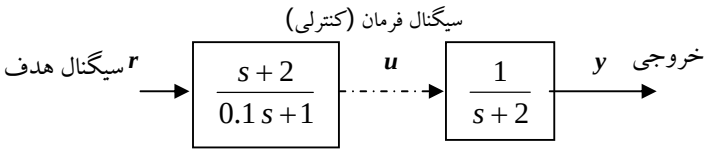
هدف از این آزمایش، مقایسه عملکرد بین کنترل بدون بازخور (حلقه باز) و کنترل به کمک بازخور (حلقه بسته) است. بدین منظور ابتدا روش جبرانسازی حلقه باز را بررسی نموده و پس از آن کنترل با استفاده از بازخور را مشاهده می نماییم. در ادامه با انجام آزمایشهایی عملکرد کنترلی دو روش را در حالات مختلف با یکدیگر مقایسه می کنیم.

۲-۲- پیشنیاز

- بررسی مفهوم بازخور، کنترل حلقه باز و حلقه بسته و مزایا و معایب هر یک از روشها،
- آشنایی با نحوه محاسبه ثابت زمانی و خطای ماندگار در پاسخ پله سیستمهای مرتبه اول،
- آشنایی با اثر تغییر پارامترهای سیستم (بهره و قطب) بر روی پاسخ پله سیستم (در صورت لزوم می توان از روشهای شبیه سازی نیز کمک گرفت).

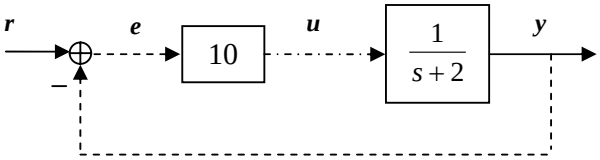
۲-۳- بررسی دو روش کنترلی حلقه باز و حلقه بسته

- سیستم حلقه باز: در این بخش سعی شده تا با استفاده از یک جبرانساز به روش حلقه باز سرعت و دقت سیستم را افزایش داد. بدین منظور سیستمی به شکل زیر پیاده سازی نمایید.



در این روش سعی شده تا با سری کردن یک فیلتر پیشفاز سرعت پاسخ پنج برابر گردد. پس از پیاده سازی، درستی نحوه کار را با مشاهده پاسخ پله و محاسبه ثابت زمانی و خطای ماندگار سیستم مورد بررسی قرار دهید. سیگنال کنترلی u را مشاهده کرده و سعی کنید دریابید که هدف کنترلی (افزایش سرعت) چگونه تحقق یافته است. به نظر شما با توجه به محدودیتهایی که وجود دارد روند افزایش سرعت تا کجا به خوبی ادامه خواهد داشت؟

- سیستم حلقه بسته: سیستم صفحه بعد را در نظر بگیرید. این بار برای رسیدن به سرعت بیشتر از یک سیستم حلقه بسته استفاده شده است که در آن با مقایسه سیگنال مرجع و سیگنال بازخورخروجی، خطا محاسبه شده و سیگنال کنترلی از بزرگنمایی خطا به دست می آید که به ورودی سیستم اصلی اعمال می شود. سعی کنید مدار کنترلی را به گونه ای پیاده کنید که امکان جابه‌جایی با روش کنترلی بدون بازخور به سادگی فراهم گردد.



پس از پیاده سازی، این بار نیز درستی این روش را با بررسی پاسخ پله و محاسبه ثابت زمانی و خطای ماندگار سیستم مورد مطالعه قرار دهید. در اینجا نیز سیگنال کنترلی u را مشاهده کنید و سعی کنید نحوه افزایش سرعت را در روش حلقه بسته توجیه کنید. به نظر شما آیا فلسفه کار در اینجا با بخش قبل تفاوت اصولی دارد؟

۲-۴- بررسی حساسیت کنترل حلقه باز و حلقه بسته در برابر تغییر پارامترهای سیستم

به منظور مشاهده اثر تغییر پارامترهای سیستم اصلی بر خروجی، چند حالت مختلف زیر را در نظر بگیرید و برای سیستم حلقه باز و حلقه بسته پیاده سازی کنید.

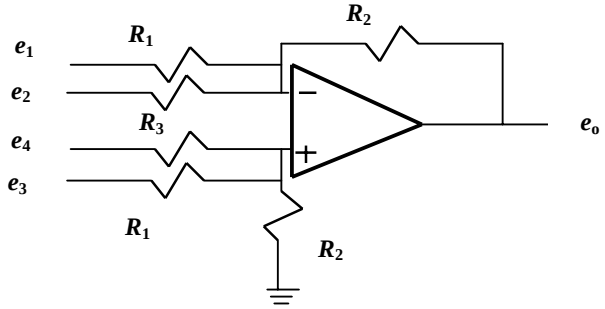
۱- اثر تغییرات قطب سیستم اصلی: ابتدا قطب سیستم اصلی را نصف کنید (ثابت زمانی و بهرهٔ DC دو برابر می شوند) نتیجه را یک بار با کنترل حلقه باز و بار دیگر با کنترل حلقه بسته، مشاهده کنید و رفتار سیستم کنترلی را به لحاظ سرعت و دقت (خطای ماندگار) در دو روش مقایسه کنید. چه نتیجه ای می گیرید؟

سپس همین روند را برای حالتیکه قطب سیستم اصلی دو برابر گردد(به نحوی که ثابت زمانی و بهرهٔ DC نصف گردند) تکرار نمایید. چه نتیجه ای می گیرید؟

۲- اثر تغییرات بهره سیستم: این بار، **فقط** بهرهٔ سیستم را دو برابر و نصف کنید. نتیجه را یک بار با کنترل حلقه باز و بار بعد با کنترل حلقه بسته، مشاهده کنید و رفتار سیستم کنترلی را به لحاظ سرعت و خطای ماندگار در دو حالت مقایسه کنید. چه نتیجه ای می گیرید؟

پرسش: میزان مقاوم بودن دو روش کنترلی، حلقه باز و حلقه بسته، نسبت به تغییراتی که ممکن است در سیستم به وجود آید چگونه است؟ چرا؟

توجه: برای تفریق یا جمع نمودن سیگنالها از مدار سادهٔ زیر می توانید الهام بگیرید:



$$e_o = \frac{R_2}{R_1}(e_3 - e_1) + \frac{R_2}{R_3}(e_4 - e_2)$$

به عنوان نمونه برای پیاده سازی سیستم حلقه بسته نیاز به یک مقایسه‌گر و بهره تناسبی دارید که هر دو را می توانید بطور همزمان با مدار بالا بسازید.

آزمایش سوم: پیاده سازی و شناسایی جبرانساز پیشفاز و چگونگی استفاده از آن در سیستمهای حلقه بسته

۳-۱- مقدمه

در آزمایش سوم، ابتدا با استفاده از اصول کلی که برای ساختن فیلترهای سادهٔ گوناگون در آزمایش اول آموخته اید، به پیاده سازی و شناسایی (حوزه زمان و حوزه فرکانس) جبرانساز پیشفاز، که در طراحی کنترل کننده ها نقش مهمی را ایفا می کند، می پردازید. سپس با چگونگی کاربرد آن به عنوان یک جبرانساز در سیستمهایی که از بازخور استفاده می کنند آشنا خواهید شد.

۳-۲- پیشنیاز

- آشنایی با مشخصه حوزه زمانی و حوزه فرکانسی جبرانساز پیشفاز
- آشنایی با نحوه عملکرد جبرانساز پیشفاز در سیستمهای حلقه بسته (در صورت لزوم می توان از روشهای شبیه سازی نیز کمک گرفت)
- آشنایی با رفتار سیستمهای مرتبه دوم در مدار حلقه باز و حلقه بسته
- آشنایی با نحوه محاسبه پارامترهای مشخصه زمانی سیستم مرتبه دوم (زمان خیز، زمان نشست، میزان فراجهش)

۳-۳- پیاده سازی و شناسایی جبرانساز پیشفاز

برای این منظور، تابع تبدیل زیر را در نظر بگیرید:

$$\frac{s+2}{0.1\,s+2}$$

با استفاده از خازنها و مقاومتهایی که در اختیار دارید جبرانساز را پیاده سازی نمایید. در صورتیکه نیاز می بینید، ورودی و یا خروجی را بافر کنید. چگونه پیشفاز بودن این فیلتر را توجیه می کنید؟

- شناسایی حوزه زمان: برای این منظور پاسخ پله سیستم را مشاهده نمایید. با توجه به محدودیت اشباع تقویت کننده عملیاتی، دامنهٔ پله را مناسب انتخاب نموده و آنرا اعمال کنید. انتظار دارید پاسخ پله سیستم چگونه باشد؟ با حالت تئوری مقایسه کنید.

- شناسایی حوزه فرکانس: با بکارگیری روشی که در آزمایش اول آموختید شناسایی حوزه فرکانس را انجام دهید. فرکانسهای اصلی جبرانساز را بیابید، از حدود ۰٫۱ کوچکترین تا ۱۰ برابر بزرگترین آنها در چندین نقطهٔ مناسب بهره (نسبت دامنه خروجی به دامنه ورودی) و اختلاف فاز (اختلاف زاویه بین خروجی و ورودی) را اندازه گیری کنید و پاسخ فرکانسی را بدست آورید. مراقب باشید که در اندازه گیریها سیستم در ناحیهٔ خطی قرار داشته باشد. پاسخ فرکانسی این جبرانساز چگونه خواهد بود؟ با حالت تئوری مقایسه کنید.

- درک حس فیزیکی رفتار جبرانساز پیشفاز: در این مرحله با آزمایشی ساده می خواهیم نسبت به رفتار این جبرانساز و کاری که انجام می دهد حس فیزیکی پیدا کنیم. برای این منظور ورودی را از سر وسط یک ولوم گرفته و با تغییر دادن آن، ورودی را تغییر داده و رفتار خروجی را مشاهده کنید. چه احساسی دارید و به نظر شما این جبرانساز نسبت به ورودی چگونه عکس العمل نشان می دهد؟ سعی کنید که با تکرار این کار بتوانید در چند جمله کوتاه رفتار این جبرانساز را توصیف کنید. سوال اصلی این است: این جبرانساز نسبت به تغییرات مختلف که در ورودی ممکن است رخ دهد چگونه عکس العمل نشان می دهد؟

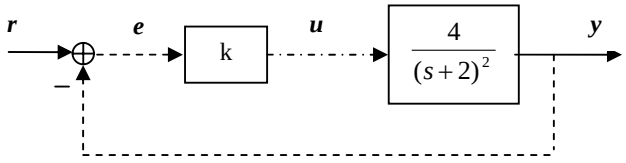
۳-۴- کاربرد جبرانساز پیشفاز در سیستمهای حلقه بسته

سیستم مرتبهٔ دوم سادهٔ زیر را، در نظر بگیرید.

$$\frac{4}{(s+2)^2}$$

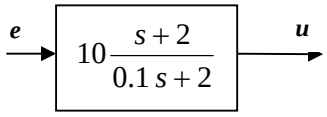
سیستم را پیاده سازی کرده و پاسخ پله آن را مشاهده نمایید. رفتار سیستم مرتبه دوم را توجیه نموده و با سیستم مرتبه اول مقایسه نمایید.

همانطور که از آزمایش دوم به یاد دارید، به وسیلهٔ جبرانساز تناسبی در سیستمهای با بازخور، می توان سرعت سیستم را افزایش داد. ابتدا با بستن سیستمی به شکل زیر این موضوع را بررسی کنید.



پاسخ پله سیستم را به ازاء بهره های ۲ ، ۵ و ۱۰ مشاهده نموده و در هر بخش پارامترهای زمان خیز، زمان نشست، میزان فراجهش و خطای حالت ماندگار را محاسبه نماید. با مقایسه نتایج بگوید تا چه بهره ای رفتار سیستم قابل قبول است؟ مشکلات موجود چیست؟ نتایج را با حالت تئوری مقایسه کنید.

در ادامه برای اینکه بتوان سرعت سیستم را (نزدیک ۵ تا ۱۰ برابر) افزایش داده و به مشکل بالا برخورد نکنیم، پیشنهاد می کنیم جبرانساز پیشفازی که پیش از این با آن آشنا شده اید، به همراه بهرهٔ ۱۰ (در زیر نشان داده شده) را به صورت حلقه بسته به کار گیرید.



جبرانساز پیشفاز به همراه بهرهٔ ۱۰

پاسخ پله را مشاهده نمایید و نتایج آن را با وقتی که فقط بهرهٔ ۱۰ داشتید مقایسه کنید.

سعی کنید با توجه به مشاهداتتان، چگونگی کارکرد این جبرانساز را توجیه کنید. برای این منظور لازم است به ورودی سیستم اصلی یعنی همان خروجی جبرانساز نیز توجه کنید. بسیار مناسب است که خروجی جبرانساز

(سیگنال u) و ورودی جبرانساز (سیگنال خطای e) را همزمان مشاهده کنید. به عنوان نمونه مشاهده می کنید که زمانهایی هست که خطا مثبت است ولی خروجی جبرانساز منفی است و بر عکس. به رابطه این رفتار با پاسخ فرکانسی پیش فاز که در ابتدای آزمایش به دست آورده اید فکر کنید و سعی کنید توجیه مناسبی بیابید.

آیا می توانید به طور کلی بگویید، در چه مواقعی این جبرانساز می تواند کمک کند؟

سعی کنید توجیه طراحی فوق را به کمک نمایش منحنی بودی پاسخ فرکانسی حلقه باز سیستم اصلی، سیستم اصلی با بهره ۱۰ و نهایتاً سیستم اصلی به همراه جبرانساز کامل فوق را مشاهده کنید و به حد فاز توجه کنید.

آزمایش چهارم: پیاده سازی و شناسایی جبرانساز پسفاز و چگونگی استفاده از آن در سیستمهای حلقه بسته

۴-۱- مقدمه

در آزمایش چهارم، ابتدا به پیاده سازی و شناسایی (حوزه زمان و حوزه فرکانس) جبرانساز پسفاز، که در طراحی کنترل کننده ها نقش مهمی را ایفا می کند، می پردازید. سپس با چگونگی کاربرد آن در سیستمهایی که از بازخور استفاده می کنند، آشنا خواهید شد.

۴-۲- پیشنیاز

- آشنایی با مشخصه حوزه زمانی، حوزه فرکانسی و نحوه عملکرد جبرانساز پسفاز در سیستمهای حلقه بسته (در صورت لزوم می توان از روشهای شبیه سازی نیز کمک گرفت)
- آشنایی با رفتار سیستمهای مرتبه دوم در مدار حلقه باز و حلقه بسته
- آشنایی با نحوه محاسبه پارامترهای مشخصه زمانی سیستم مرتبه دوم (زمان خیز، زمان نشست، میزان فراجهش)

۴-۳- پیاده سازی و شناسایی جبرانساز پسفاز

برای این منظور، تابع تبدیل زیر را در نظر بگیرید:

$$\frac{s+3}{s+0.3}$$

با استفاده از خازنها و مقاومتهایی که در اختیار دارید جبرانساز را پیاده سازی نمایید.

موارد خواسته شده در بخش ۳-۳ از آزمایش سوم را برای این جبرانساز نیز انجام دهید.

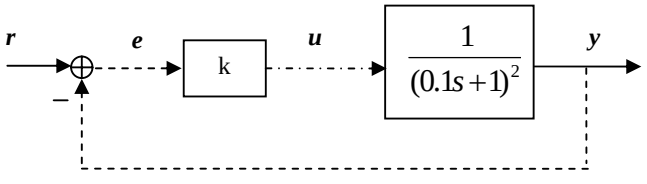
۴-۴- کاربرد جبرانساز پسفاز در سیستمهای حلقه بسته

سیستم مرتبهٔ دوم سادهٔ زیر را، در نظر بگیرید.

$$\frac{1}{(0.1s+1)^2}$$

سیستم را پیاده سازی کرده و پاسخ پله آن را مشاهده نمایید.

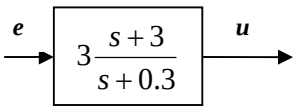
آنگونه که در آزمایش دوم مشاهده نمودید، به وسیلهٔ جبرانساز تناسبی در سیستمهای با بازخور، می توان دقت سیستم را افزایش داد، یعنی خطای ماندگار را کاهش دهد. ابتدا با بستن سیستمی به شکل زیر این موضوع را بررسی کنید.



www.ir-micro.com

پاسخ پله سیستم را به ازاء بهره های ۳ ، ۱۰ و ۳۰ مشاهده نموده و در هر بخش پارامترهای زمان خیز، زمان نشست، میزان فراجهش و خطای حالت ماندگار را محاسبه نماید. با مقایسه نتایج بگوید تا چه بهره ای رفتار سیستم قابل قبول است؟ مشکلات موجود چیست؟ نتایج را با حالت تئوری مقایسه کنید.

در ادامه برای اینکه بتوان دقت سیستم را افزایش داده و به مشکل بالا برخورد نکنیم، پیشنهاد می کنیم جبرانساز پسفازی که پیش از این با آن آشنا شده اید، به همراه بهرهٔ ۳ (در زیر نشان داده شده) را به صورت حلقه بسته به کار گیرید.



جبرانساز پسفاز با بهره ۳

پاسخ پله را مشاهده نمایید و نتایج آن را یکبار با وقتی که فقط بهرهٔ ۳ داشتید و بار دیگر با حالتیکه فقط بهره ۳۰ داشتید مقایسه کنید.

سعی کنید با توجه به مشاهداتتان، چگونگی کارکرد این جبرانساز را توجیه کنید. مناسب است که به خروجی جبرانساز (سیگنال u) نیز توجه کنید. سعی کنید همزمان ورودی و خروجی جبرانساز را مشاهده کنید و توجه کنید که این جبرانساز چگونه کار می کند.

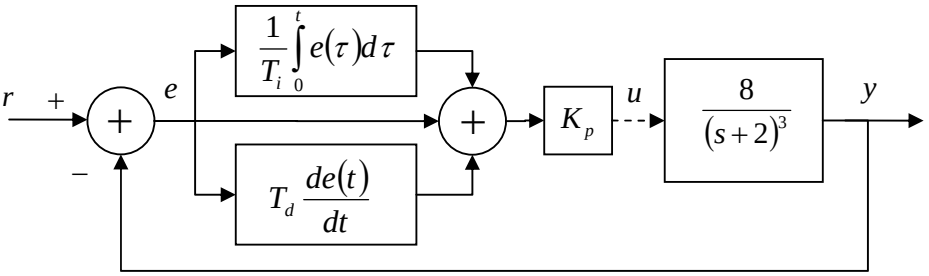
آیا می توانید به طور کلی بگویید، در چه مواقعی این جبرانساز می تواند کمک کند؟

سعی کنید طراحی فوق را به کمک نمایش بودی پاسخ فرکانسی حلقه باز سیستم اصلی، سیستم اصلی به همراه بهره ۳ و نهایتاً سیستم اصلی به همراه جبرانساز پسفاز فوق توجیه کنید. لازم است این بار هم به حد فاز و هم به بهره فرکانسهای پایین در شرایط مختلف توجه کنید و قاعده کلی $e_{ss} = \frac{1}{1+k}$ را در نظر بگیرید.

آزمایش پنجم: کنترل کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق‌گیر (PID)

۵-۱- مقدمه

در آزمایش پنجم، با توجه به اهمیتی که کنترل کننده های PID در صنعت ایفا می کنند، با یک نوع پیاده سازی الکترونیکی و عملکرد این کنترل کننده آشنا می شوید. نمودار بلوکی کلی سیستم در شکل زیر آورده شده است.



$$u(t)=K_p\left(e(t)+\frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau+T_d\frac{de(t)}{dt}\right)$$

۵-۲- پیشنیاز

- آشنایی رفتار سیستم مرتبه سوم و تفاوت آن با سیستم مرتبه دوم
- آشنایی با عملکرد اجزای کنترل کننده PID و اثر تغییرات پارامترهای کنترل کننده بر روی پاسخ پله سیستم
- آشنایی با نحوه تنظیم ضرایب کنترل کننده PID به روش زیگلر- نیکولز

۵-۳- آشنایی با عملکرد کنترل کننده تناسبی

در این بخش اثر کنترل کننده تناسبی را به تنهایی در مدار مشاهده می نمایید. برای داشتن بهره های تناسبی متفاوت از یک پتانسیومتر استفاده نمایید. با مشاهده پاسخ پله سیستم، تاثیر تغییرات بهره تناسبی را در مشخصه حالت گذرا و حالت ماندگار سیستم بررسی کنید.

۵-۴- آشنایی با عملکرد کنترل کننده تناسبی- انتگرالی

برای آنکه خطای حالت دائم را به صفر برسانیم در حالی که سرعت سیستم را نیز نسبت به حالت بهره تناسبی چندان متاثر نسازیم، از شبکه انتگرال گیر و تناسبی استفاده می کنیم.

- ابتدا کنترل کننده را با پارامترهای کنترلی: $K_p=2, T_i=2$ پیاده سازی کنید و پاسخ پله را مشاهده نموده و پارامترهای مورد نیاز را اندازه گیری نمایید.
- پاسخ سیستم را برای ورودی شیب نیز مشاهده نمایید. آیا خطای ماندگار در این حالت نیز صفر می شود. چرا؟
- به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای کنترل کننده انتگرالی در پاسخ سیستم مقدار پارامتر T_i را یکبار به نصف و بار دیگر به دو برابر تغییر دهید، با مشاهده پاسخ پله و اندازه گیری پارامترهای مورد نظر اثر آن را در پاسخ حالت گذرا و حالت ماندگار سیستم بررسی و نتایج را با هم مقایسه کنید.

www.ir-micro.com

۵-۵- آشنایی با عملکرد کنترل کننده تناسبی- مشتق‌گیر

به منظور افزایش سرعت پاسخ از شبکه تناسبی و مشتق‌گیر استفاده می نماییم. ابتدا کنترل کننده را با پارامترهای: $K_p = 4, \quad T_d = 0.5$ بسته و پاسخ پله را مشاهده نموده و پارامترهای مورد نیاز را اندازه گیری نمایید.

- به منظور بررسی اثر تغییر پارامترهای کنترل کننده، مقدار پارامتر T_d را یکبار به یک پنجم و بار دیگر به دو برابر تغییر دهید، با مشاهده پاسخ پله و اندازه گیری پارامترهای مورد نظر اثر آن را در پاسخ حالت گذرا و حالت ماندگار سیستم بررسی و نتایج را با هم مقایسه کنید. سعی کنید β را ثابت و برابر ۱۰ نگاه دارید.

۵-۶- آشنایی با عملکرد کنترل کننده تناسبی- انتگرالی – مشتق‌گیر

برای کاهش خطای حالت ماندگار در حالی که می خواهیم سرعت پاسخ را نیز افزایش دهیم از کنترل کننده تناسبی- انتگرال گیر- مشتق‌گیر استفاده می نماییم. در این بخش کنترل کننده را با پارامترهای: $K_p = 4, \quad T_i = 2, \quad T_d = 0.5$ بسته و پاسخ پله را مشاهده نمایید. ببینید آیا سرعت نسبت به حالت کنترل تناسبی-انتگرالی بهتر شده است؟ آیا خطای حالت ماندگار نسبت به حالت کنترل تناسبی-مشتق‌گیر بهتر شده است؟

۵-۷- تنظیم کنترل کننده تناسبی- انتگرالی – مشتق‌گیر به روش زیگلر- نیکولز

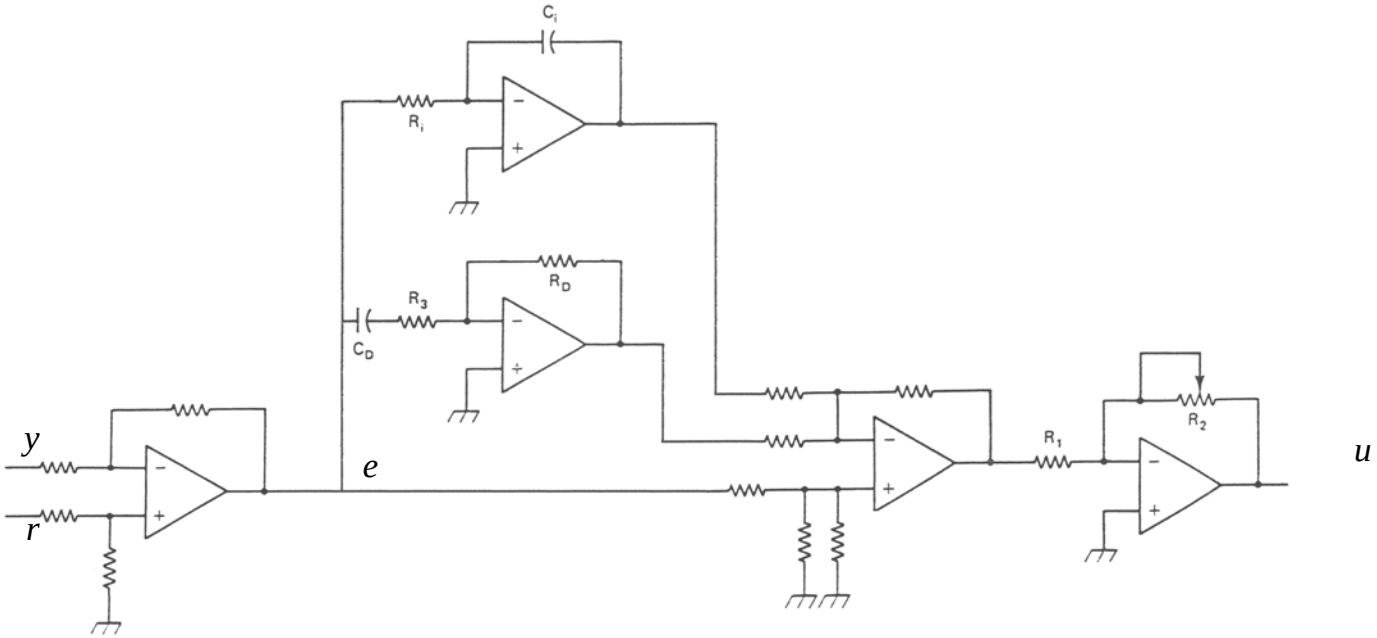
عملاً در بسیاری از موارد امکان مدلسازی مناسب سیستم وجود ندارد، در این حالت نمی توان تابع تبدیل مشخصی ($G(s)$) برای سیستم در نظر گرفت بلکه فقط می توان برای بعضی ورودی ها خروجی را مشاهده نموده و از روی آن تا حدودی رفتار سیستم را مدل نمود. در بعضی موارد حتی این هم به صورت حلقه باز مقدور نیست بلکه می بایست در حالی که سیستم حلقه بسته در حال کار است با تغییر پارامترهای کنترلی و مشاهده خروجی، رفتار سیستم را مشاهده نمود و امکان قطع حلقه وجود ندارد. این امر موجب شد، روشهایی برای تنظیم پارامترهای کنترلی ابداع شود که در آنها تنظیم پارامترهای کنترلی صرفاً بر اساس دانش مختصری که از سیستم می توان کسب نمود، انجام می شود. یکی از کاربردی ترین روشها، ایده ای است که توسط زیگلر و نیکولز ارائه شد که بر اساس فرضیات و محاسبات نسبتاً دقیقی صورت پذیرفت و نهایتاً منجر به جدول تنظیم معروفی شد که در زیر می آید.

در این روش با افزایش بهره تناسبیِ تنها، سیستم حلقه بسته را به مرز ناپایداری برده و بهره تناسبی در این حالت (K_U) و دوره تناوب نوسانات (T_U) را به دست می آورید. با استفاده از این مقادیر و با توجه به روابط زیر پارامترهای کنترل کننده را به دست آورده و پیاده سازی نمایید.

$$K_p = 0.6K_U, \qquad T_i = 0.5T_U, \qquad T_d = 0.125T_U$$

نتایج خروجی را با نتایج بخش ۵-۶ مقایسه نمایید.

شکل مدار کنترل کننده تناسبی- انتگرالی- مشتق‌گیر (ساختار جمعی)



مدار بالا برای تحقق کنترل کننده PID به صورت جمعی مناسب است: $\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\left(1+\frac{1}{T_i s}+\frac{T_d s}{\frac{T_d}{\beta}s+1}\right)$

که در آن: $K_p = \frac{R_2}{R_1}, \qquad T_i = R_i C_i, \qquad T_D = R_D C_D, \qquad \beta = \frac{R_D}{R_3}$

توجه داشته باشید که مقاومت R_3 برای کاهش اثر نویز در خروجی مشتق‌گیر اضافه شده است.

برای مراحل مختلف آزمایش مقادیر عناصر مدار به شرح زیر خواهد بود:

کنترل کننده PI: $C_i = 1\mu F + 1\mu F, \quad R_i = 1M\Omega, \quad R_1 = 100k\Omega, \quad R_2 = 100k\Omega + 100k\Omega,$

کنترل کننده PD: $R_3 = 100k\Omega \quad C_D = 1\mu F/2, \quad R_D = 1M\Omega, \quad R_1 = 100k\Omega/2, \quad R_2 = 100k\Omega + 100k\Omega,$

کنترل کننده PID: $R_3 = 100k\Omega \quad C_D = 1\mu F/2, \quad R_D = 1M\Omega, \quad C_i = 1\mu F + 1\mu F, \quad R_i = 1M\Omega, \quad R_1 = 100k\Omega/2, \quad R_2 = 100k\Omega + 100k\Omega,$

نکته: مقدار تمامی مقاومتهایی که اندازه آنها ذکر نشده $100k\Omega$ است.

www.ir-micro.com

آزمایش ششم: شناسایی و کنترل فرایند حرارتی

۶-۱- مقدمه

در این بخش با سیستم حرارتی که در اختیار شما قرار گرفته آشنا شده و به شناسایی این فرایند می پردازیم. این سیستم از چهار بخش(جعبه) اصلی تشکیل شده است که با کمک این مجموعه شما قادر خواهید بود با به کارگیری کنترل کننده هایی که در آزمایشهای قبل طراحی و پیاده سازی نموده اید، دمای فرایند حرارتی را در دمای دلخواه تنظیم نموده و سرعت سیستم را تا حد امکان افزایش دهید. با توجه به اینکه بر خلاف قبل در اینجا مدل دقیقی از فرایند در دست نداریم، ناچاریم در ابتدا به شناسایی آن بپردازیم. پس از آشنایی با بخشهایی که در زیر معرفی خواهند شد، اتصالات لازم را بسته و قبل از روشن نمودن منابع تغذیه به مربی خود نشان دهید.

۶-۲- منبع تغذیه

این بخش(جعبه) از سیستم، تغذیه مورد نیاز برای سایر قسمتها را فراهم می آورد. در هنگام کار می بایست این جعبه را به بخشهای دیگر متصل نمایید. در این جعبه موارد زیر را می توانید مشاهده کنید:

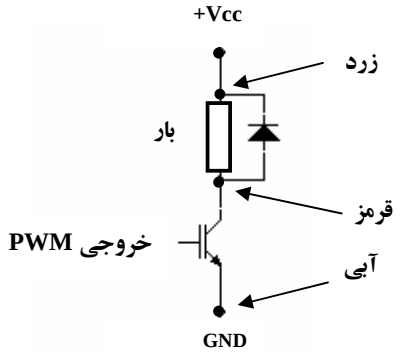
۱- کلید روشن-خاموش منبع تغذیه،

۲- فیوز منبع تغذیه،

۳- اتصال خروجی منبع تغذیه که دارای چهار پین است.

۶-۳- کلید الکترونیکی (ترانزیستور قدرت IGBT[1])

در این جعبه یک ترانزیستور قدرت وجود دارد، که جریان مورد نیاز جهت گرم شدن سیم المنت در سیستم حرارتی را فراهم می کند. برای استفاده از این کلید قدرت جهت راه اندازی بار نیاز است که مداری مطابق شکل زیر بسته شود:



این جعبه دارای سه پایه (۱-(زرد) ، ۲-(قرمز) ، ۳-(آبی)) در روی جعبه و همچنین دو پایه (۵-(فلزی) ، ۶-(سبز)) در پشت جعبه می باشد. شرح پایه ها به صورت زیر است:

[1] Insulated Gate Bipolar Transistor

www.ir-micro.com

۱- پایه زرد، که به Vcc+ قدرت وصل می شود، پایه کاتد یک دیود هرزگرد می باشد. درصورتیکه باری به شکل بالا به این جعبه متصل شود این دیود بین پایه های زرد و قرمز به طور موازی با آن قرار می گیرد و وظیفه آن حفاظت از ترانزیستور قدرت می باشد.
۲- پایه قرمز، کلکتور ترانزیستور قدرت است.
۳- پایه آبی، که به GND قدرت متصل شده و امیتر ترانزیستور قدرت است.
۴- پایه فلزی؛ که چهار پین دارد و ورودی است که از منبع تغذیه وارد می شود.
۵- پایه سبز، که خروجی بخش(جعبه) PWM به آن وارد شده و گیت ترانزیستور قدرت است.

۶-۴- بخش PWM[2]

بخش(جعبه) PWM در حقیقت برای راه اندازی و کلید زنی ترانزیستور قدرت بکار می رود و دارای ۳ پایه ورودی (۱-(آبی) ، ۲-(سیاه) ، ۳-(فلزی)) در پشت جعبه و ۴ پایه خروجی (۴، ۵، ۶ و ۷ (زرد و قرمز)) در قسمت جلوی جعبه است. شرح این پایه ها به شکل زیر می باشد،

۱- پایه آبی، که سیگنال ورودی سیستم به آن اعمال می شود.
۲- پایه سیاه، که به GND سیگنال متصل می گردد.
۳- پایه فلزی، که چهار پین دارد و ورودی منبع تغذیه می باشد.
۴ و ۵ – پایه های زرد، پالس خروجی ایجاد شده توسط PWM می باشد.
۶ و ۷- پایه های قرمز، مقدار NOT پایه های ۴ و ۵ می باشد.

طرز کار بخش PWM به این ترتیب است که، خروجی PWM یک موج مربعی است و تغییر ولتاژ ورودی که از پایه آبی اعمال می شود می تواند Duty Cycle پالس را تغییر دهد. به نحوی که اگر ورودی صفر اعمال شود Duty Cycle برابر ۵۰٪ خواهد بود، اگر ورودی 10V+ اعمال شود Duty Cycle برابر ۱۰۰٪ بوده و اگر ورودی 10V- باشد Duty Cycle برابر صفر خواهد بود. می دانیم که هرچه Duty Cycle موج مربعی خروجی PWM بیشتر باشد، ترانزیستور قدرت بیشتر هدایت کرده و سطح ولتاژ و توان متوسط بیشتری به بار منتقل می شود. در این آزمایش این امر موجب خواهد شد، از المنت گرم کننده جریان بیشتری عبور کرده و دمای سیستم حرارتی بیشتر شود.

۶-۵- فرایند حرارتی

این بخش(جعبه) تشکیل شده است از:
- سیستم گرمایشی پیاده سازی شده با سیم المنت حرارتی که در روی جعبه قرار دارد،
- سیستم سرمایشی که به صورت مداوم کار می کند،

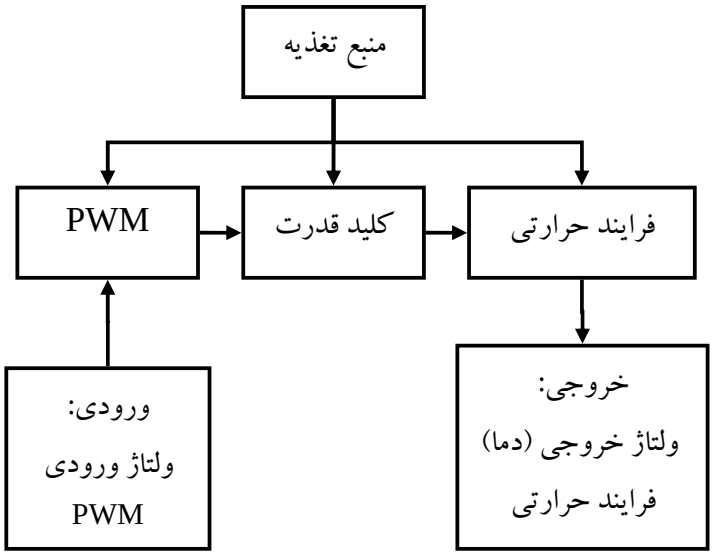
[2] Pulse Width Modulation

www.ir-micro.com

- حسگر دما به همراه مدارهای اندازه گیری و آمایش سیگنال خروجی،
- و مدارهای حفاظتی مورد نیاز.

دمای سیم با عبور جریان از آن افزایش می یابد و مقدار دما توسط یک حسگر، اندازه گیری می شود. این حسگر به ازای هر یک درجه سانتیگراد دما، ۰٫۱ ولت خروجی نشان می دهد. علاوه بر این در داخل این جعبه یک رله وجود دارد که به محض اینکه دمای المنت به حدود ۸۵ درجه برسد، این رله عمل کرده و از افزایش دما جلوگیری می کند. این جعبه دارای ۳ پایه ورودی (۱-(آبی)، ۲-(سیاه)، ۳-(فلزی)) در پشت جعبه است که پایه های آبی و سیاه در واقع دو سر المنت گرمایشی هستند که در مدار داده شده در قبل به عنوان بار وصل می شوند و پایه فلزی تغذیه این جعبه را تامین می نماید. در بالای جعبه ۲ پایه زرد و سیاه وجود دارند که به ترتیب خروجی دما و GND سیگنال خروجی می باشند.

نمودار بلوکی کل سیستم حرارتی و نحوه ارتباط چهار بخش(جعبه) معرفی شده به صورت زیر است:



۶-۶- شناسایی فرایند حرارتی

همانطور که پیشتر گفته شد، هدف از این آزمایش کنترل دمای فرایند حرارتی است. برای انجام این کار ابتدا باید سیستم مدل سازی شود. در اینجا می خواهیم سیستم بوسیله یک تابع تبدیل درجه اول با تاخیر $\frac{ke^{-T_D s}}{\tau s+1}$ مدل سازی کنیم. یعنی یک سیگنال پله به سیستم اعمال نماییم و مقدار k و τ و T_D را از روی پاسخ زمانی سیستم به دست آوریم. قبل از انجام این کار سیستم را به صورت ماندگار (استاتیکی) شناسایی نمایید به این ترتیب که به ورودی مقادیر مختلف داده و مقدار ماندگار خروجی را ببینید، این امر موجب خواهد شد ناحیه مناسبی برای ورودی پله لازم برای شناسایی تعیین نمایید. پس از شناسایی استاتیکی، ورودی پله مناسبی به سیستم اعمال کرده و پارامترهای دینامیکی مدل را شناسایی نمایید، این آزمایش را با ورودیهای مناسب دیگر تکرار نمایید و نتایج را مقایسه نمایید.

۶-۷- کنترل فرایند حرارتی

پس از شناسایی سیستم در آزمایش قبل، سعی نمایید کنترل کننده مناسبی جهت رسیدن به دمای مطلوب با سرعت مناسب طراحی نمایید. به این منظور ابتدا از یک کنترل کننده ساده تناسبی شروع نموده و در صورتی که لازم دیدید بخش انتگرالی و مشتق‌گیر نیز به آن اضافه نمایید.

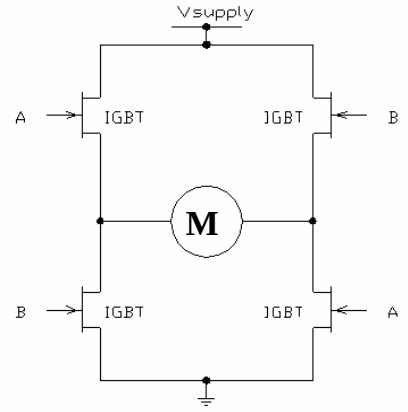
آزمایش هفتم: شناسایی و کنترل سیستم سرو موتور DC

۷-۱- مقدمه

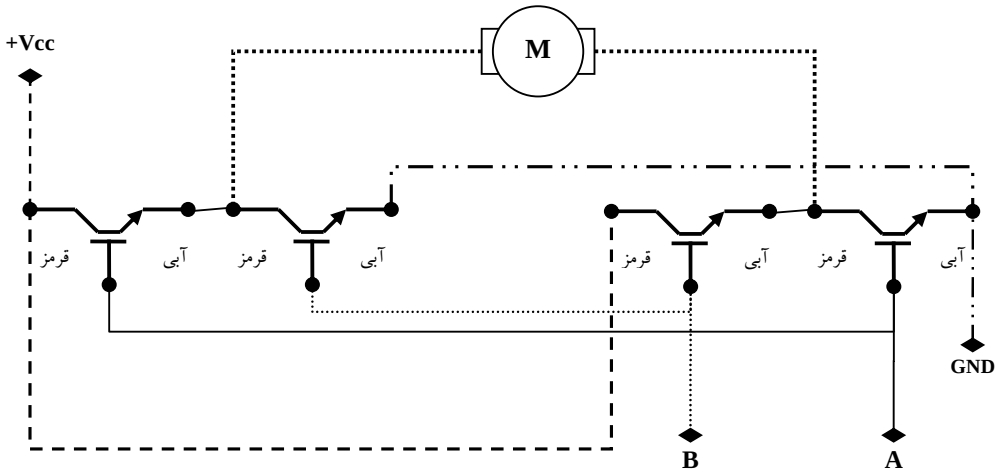
مجموعه سرو موتور شامل بخشهای زیر است:

- موتور جریان مستقیم (DC) که پایانه های آن در اختیار قرار داده شده و با اعمال ولتاژ به این پایانه ها می توان سرعت و مکان محور موتور را کنترل نمود.
- تاکو متر که در واقع حسگر سرعت موتور بوده و ولتاژی متناسب با سرعت موتور(1v/500rpm) در پایانه های آن تشکیل می شود که از آن می توان به عنوان سیگنال بازخور استفاده نمود.
- پایه های نگه دارنده که سامانه مناسب جهت اتصال بخشهای بالا را فراهم می آورد.

در این بخش با استفاده از مدارهای مورد استفاده در آزمایش قبل می خواهیم موتور DC را راه اندازی نموده و آنرا کنترل نماییم. برای این کار لازم است مداری مطابق شکل زیر بسته شود:



برای بستن مدار بالا می توانید از شکل زیر استفاده نمایید:



که در آن سیگنالهای A و B سیگنالهای خروجی PWM هستند. با اعمال ولتاژ Vsupply به مدار، بسته به عرض پالسی که توسط PWM ایجاد می شود موتور به یک سمت می چرخد. اگر انرژ ی که همان سطح زیر پالس است در یک جهت بیشتر باشد موتوردر آن جهت می چرخد و حالت دیگر به عنوان یک ترمز برای موتور به حساب می آید وسرعت آنرا کمتر می کند اما جهتش را تغییر نمی دهد زیرا موتور به علت لختی قابلیت تغییرجهت سریع را ندارد.

۷-۲- شناسایی سیستم

برای آنکه با کارکرد سیستم آشنا شوید لازم است آنرا شناسایی کنید. فرایند شناسایی شامل دو بخش شناسایی استاتیک و دینامیک خواهد بود. ابتدا سرعت نهایی موتور به ازاء ورودیهای مختلف را مشاهده نموده و پس از آن به بررسی پاسخ پله سیستم بپردازید و مدل درجه یک به صورت: $\frac{k}{\tau s+1}$ برای سیستم به دست آورید.

۷-۳- کنترل سرعت

در این بخش کنترل سرعت سیستم سرو موتور مورد نظر است که با هدف کاهش خطای ماندگار و رسیدن به سرعت بیشتر انجام می گیرد. با توجه به مدلی که برای سیستم به دست آوردید و با استفاده از جبرانسازهایی که با آنها آشنا شده اید، سیستم را کنترل نمایید.

۷-۴- کنترل زاویه

سعی کنید با استفاده از مجموعه ای که در اختیار دارید و بدون استفاده از حسگر دیگری زاویه محور موتور را کنترل نمایید.