



آزمایشگاه کنترل خطی

شناسایی سروموتورهای DC

مقدمه

در این آزمایش به شناسایی تابع تبدیل سروموتور DC خواهیم پرداخت. در بخش اول دستور کار با مراحل کنترل یک سیستم آشنا خواهیم شد. در بخش دوم به معرفی قسمت‌های مختلف مجموعه آموزشی موتور DC می‌پردازیم. در نهایت، در بخش سوم و چهارم با به کارگیری دو روش بررسی پاسخ زمانی و پاسخ فرکانسی سیستم به شناسایی و محاسبه تابع تبدیل موتور می‌پردازیم.

بخش اول) آشنایی با مراحل کنترل سیستم

می‌توان مراحل کنترل یک سیستم را به مراحل اصلی زیر تقسیم کرد که عبارت‌اند از: مدل‌سازی سیستم، تخمین یا محاسبه پارامترهای مدل، تحلیل رفتار سیستم در میدان زمان (یا فرکانس)، طراحی کنترل‌کننده و در نهایت پیاده‌سازی کنترل‌کننده طراحی شده و آزمودن و اصلاح طراحی‌های انجام شده. در ادامه شرح مختصری در مورد برخی از این مراحل داده می‌شود.

۱-۱- مدل‌سازی ریاضی سیستم و تخمین پارامترهای مدل

همانطور که می‌دانیم، برای تحلیل رفتار هر سیستمی، طراحی کنترل‌کننده و تنظیم خروجی آن باید اطلاعاتی از آن سیستم در اختیار داشته باشیم. دو روش کلی برای مدل کردن هر سیستم و تحلیل رفتار آن وجود دارد: روش جعبه سیاه^۱ و روش استخراج معادلات ریاضی سیستم به کمک بررسی فیزیک مسئله. در روش جعبه سیاه، با استخراج ارتباط ریاضی سیگنال‌های ورودی و خروجی سیستم، مدلی برای سیستم به دست می‌آید. در این روش نیازی به بررسی فیزیک مسئله و استخراج معادلات ریاضی پیچیده نیست، بلکه باید مدلی از پیش آماده برای سیستم انتخاب نمود و با کمک داده‌های ورودی-خروجی سیستم فیزیکی پارامترهای مدل را محاسبه کرد (تخمین زد). از سوی دیگر، مدل به دست آمده از رویکرد جعبه سیاه، تنها با فرض کفایت تعداد (اندازه‌گیری کثیر) دسته سیگنال‌های ورودی-خروجی که با کمک آن‌ها پارامترهای مدل از پیش انتخاب شده محاسبه می‌شود، معتبر است. از طرف دیگر اعتبار مدل حاصل از فیزیک سیستم وابسته به حیطه اعتبار فرض‌های فیزیکی و روابط فیزیکی نوشته شده است و داده‌های ورودی-خروجی سیستم نیز در تعیین پارامترهای مدل تاثیرگذار هستند. در بسیاری از سیستم‌های واقعی، جهت تحلیل و طراحی کنترل‌کننده، کفایت مدل سیستم را حول نقطه کار محاسبه کنیم. چنانچه مدل ریاضی سیستم به کمک فیزیک مسئله استخراج شده باشد، می‌توانیم معادلات ریاضی سیستم را حول نقطه کار خطی‌سازی و تابع تبدیل ورودی به خروجی سیستم را محاسبه کنیم. در این حالت، برای شناسایی سیستم و تعیین پارامترهای نامعلوم مدل، می‌توان به اندازه‌گیری پارامترها از روی داده‌های ثبت‌شده از سیستم واقعی پرداخت. در رویکرد جعبه سیاه، بسته به مدل انتخاب شده، روش‌های مختلفی برای تعیین پارامترهای نامعلوم مدل انتخاب شده وجود دارد که ذکر همه آن‌ها در حوصله این دستور کار نمی‌گنجد. بطور کلی روش جعبه سیاه در مقایسه با روش اندازه‌گیری، ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشد. به عنوان مثال، در موتورهای DC می‌توان مقاومت الکتریکی و اندوکتانس آرمیچر، ثابت گشتاور موتور، ثابت نیرو محرکه ضد القایی و سایر پارامترهای آن را با انجام آزمایش و اندازه‌گیری الکتریکی به دست آورد. در مقابل می‌توان پاسخ زمانی سیستم را مشاهده و تابع تبدیل سیستم را شناسایی کرد. در این آزمایش، با بررسی پاسخ زمانی سیستم مدل سیستم حول نقطه کار شناسایی شده و پارامترهای نامعلوم تابع تبدیل سیستم تعیین خواهد شد. در این آزمایش

^۱ Black Box

تابع تبدیل موتور به روش دوم (جعبه سیاه) شناسایی می‌شود. پس از شناسایی سیستم، مدل ارائه‌شده را به کمک نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی و با مقایسه رفتار مدل ارائه شده و سیستم واقعی، از صحت مدل ارائه شده اطمینان حاصل می‌کنیم.

۲-۱- تحلیل سیستم در میدان زمان و طراحی کنترل کننده

پایدارسازی سیستم، ردیابی، تضعیف یا حذف اغتشاش از جمله مسائل پیش‌روی ما در طراحی کنترل کننده مناسب برای سیستم می‌باشد. در این میان، خطای حالت دائمی سیستم و از طرف دیگر داشتن پاسخ گذرای سریع و در عین حال قابلیت پذیرش و یا عدم پذیرش نوسان و فراجش در پاسخ سیستم از معیارهای مطرح در طراحی کنترل کننده هستند. در موتورهای DC هدف کنترل موقعیت و سرعت موتور است به طوری که ردیابی ورودی مرجع در حضور اغتشاش بدون خطا و سریع انجام شود.

در آزمایش‌های آتی مربوط به موتور DC، به کمک مدل ریاضی به دست آمده در این آزمایش از سیستم فیزیکی، عملکرد چند کنترل کننده متداول (مثل کنترل کننده‌های پیش‌فاز-پس‌فاز و تناسبی-انتگرال-مشتق‌گیر) را برای کنترل موقعیت و سرعت فرآیند سروموتور DC خواهیم دید.

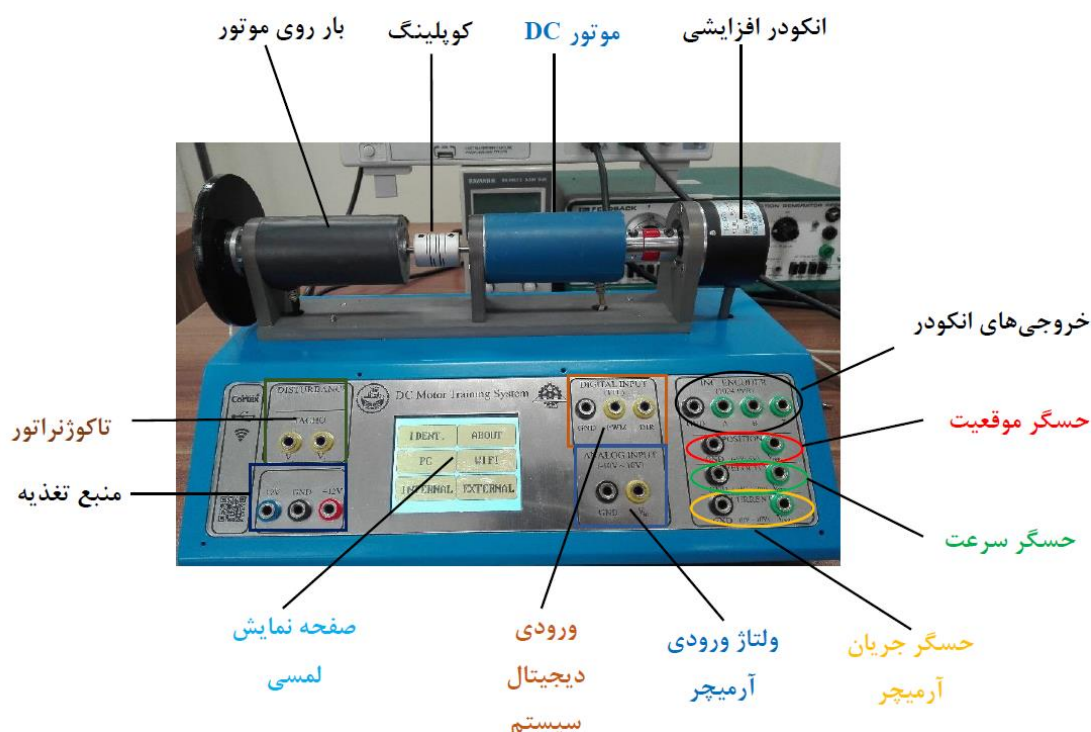
۳-۱- پیاده‌سازی عملی کنترل کننده و بررسی عملکرد آن

در نهایت، موثر بودن کنترل کننده طراحی شده با پیاده‌سازی عملی آن بر روی سیستم اصلی سنجیده می‌شود. بنابراین در جلسات آتی نیز در موتورهای الکتریکی DC مورد آزمایش، کنترل کننده انتخاب شده (طراحی شده) را به کمک ادوات و ابزارهای آنالوگ پیاده‌سازی و سیگنال کنترل تولید شده از طریق درایور به موتور اعمال می‌کنیم.

تذکر: وظیفه درایور موتور دریافت سیگنال کنترل جریان پایین و تبدیل آن به سیگنال کنترل جریان بالا جهت راه‌اندازی موتور می‌باشد.

بخش دوم) معرفی قسمت‌های مختلف مجموعه آموزشی موتور DC

شکل ۱ قسمت‌های مختلف مجموعه آموزشی موتور DC مورد استفاده در این آزمایشگاه را نشان می‌دهد. در این آزمایش و جلسات آتی با قسمت‌های مختلف این مجموعه آموزشی آشنا خواهیم شد.

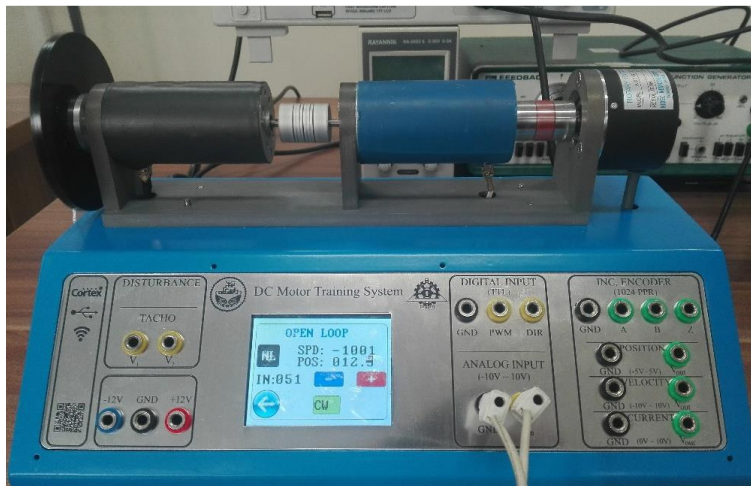


شکل ۱: نمای کلی مجموعه آموزشی موتور DC

مراحل مختلف این آزمایش را به ترتیب ذیل و با دقت انجام دهید و نتایج و سیگنال‌های نمایش داده شده بر روی اسیلوسکوپ را ثبت کنید.

۱-۳- راه‌اندازی موتور

با روشن کردن موتور، از منوی اصلی، گزینه OPEN LOOP را انتخاب کنید. شکل ۲ صفحه نمایش موتور را در حالت OPEN LOOP نشان می‌دهد. مود کاری OPEN LOOP موتور برای بررسی رفتار موتور در حالت حلقه باز می‌باشد. در صفحه باز شده سرعت موتور (SPD) بر حسب دور بر دقیقه، موقعیت موتور (POS) بر حسب درجه، وضعیت بار موتور در دو حالت بی‌باری و با بار (به ترتیب NL و L) جهت چرخش موتور در دو حالت ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد (به ترتیب CW و CCW) درصد ولتاژ منبع تغذیه‌ای اعمال شده به آرمیچر (IN) نمایش داده شده است. در صفحه نمایش لمسی موتور می‌توان با فشار دادن کلید مثبت و منفی، به ترتیب درصد ولتاژ منبع تغذیه اعمال شده به آرمیچر (موتور در فرم کنترل آرمیچر کار می‌کند) را افزایش و کاهش داد. با فشار دادن کلید NL از روی صفحه نمایش، می‌توانید وضعیت موتور را بین دو حالت بارداری و بی‌باری عوض کنید. همچنین می‌توانید با فشار دادن کلید CW، جهت چرخش موتور را عوض کنید. فلش پایین سمت چپ صفحه نمایش برای خارج کردن مود کاری موتور از حالت OPEN LOOP و برگشتن به منوی اصلی می‌باشد.



شکل ۲: سیستم موتور DC در وضعیت OPEN LOOP

۲-۳- اندازه‌گیری ناحیه مرده

- موتور DC مورد آزمایش دارای یک ناحیه مرده در مشخصه عملکردی خود است (مشخصه غیرخطی). به این معنی که به ازای ولتاژهای کوچک، موتور شروع به حرکت نمی‌کند. جهت به دست آوردن عرض ناحیه مرده موتور، ابتدا وارد مودکاری OPEN LOOP موتور شوید. در منوی نمایش داده شده، درصد منبع تغذیه اعمال شده به موتور را روی صفر قرار دهید. حال ولتاژ آرمیچر را به آهستگی افزایش دهید تا موتور شروع به حرکت کند. مقدار ولتاژ ورودی را در لحظه آغاز حرکت موتور به عنوان عرض ناحیه مرده موتور ثبت کنید. جهت چرخش موتور را عوض کنید، مراحل قبل را تکرار و عرض ناحیه مرده موتور را ثبت کنید.

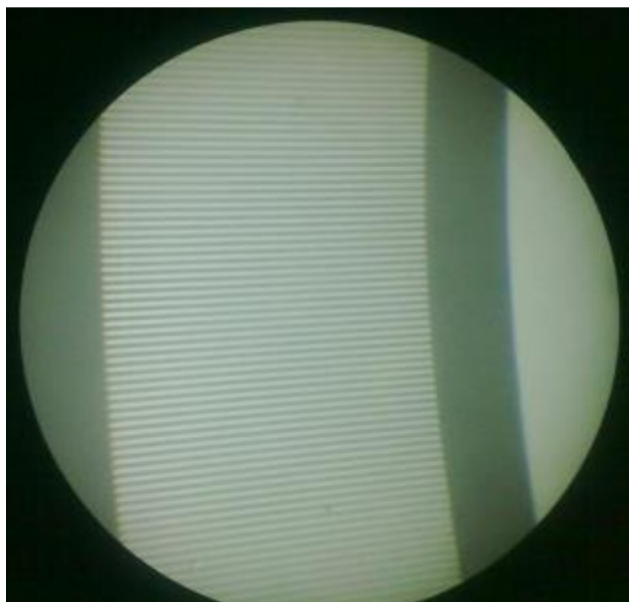
۳-۳- انکودر^۱

در این آزمایش با انکودر و کاربرد آن در تعیین سرعت و جهت چرخش موتور آشنا می‌شویم. انکودر به وسیله‌ای گفته می‌شود که یک حرکت مکانیکی (خطی یا دورانی) را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند. به بیان ساده‌تر انکودرها وسیله‌ای هستند که حرکت خطی یا دورانی را به سیگنال دیجیتالی ۰ یا ۱ تبدیل می‌کنند. در موتور DC آموزشی از انکودر افزایشی 1024PPR استفاده شده است که در آن به ازای هر دور

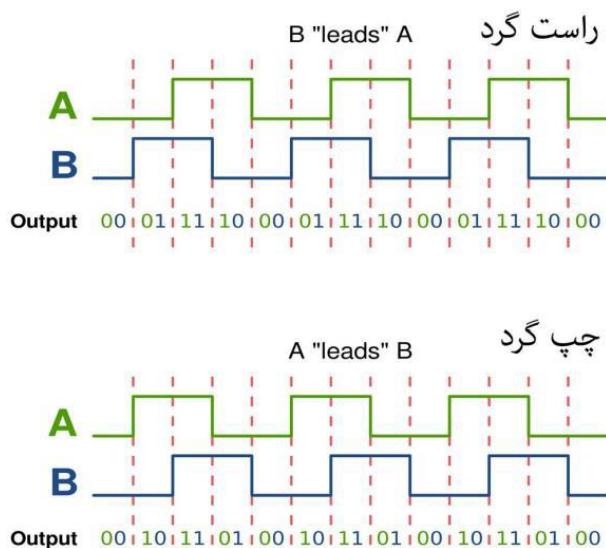
^۱ Encoder

کامل موتور، انکودر ۱۰۲۴ پالس تولید می‌کند. انکودرها انواع مختلفی دارند که یکی از معمول‌ترین آنها انکودر افزایشی^۱ می‌باشد. در انکودر افزایشی از یک جفت شمارنده نوری در دو طرف چرخ شیاردار با فاصله مشخص استفاده می‌شود (شکل ۳). نحوه قرارگیری این شمارنده‌ها به گونه‌ای است که با چرخش صفحه چرخنده دو پالس خروجی A و B که با یکدیگر ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند، ایجاد می‌گردد و بر اساس آن می‌توان جهت چرخش CW (یا CCW) را نیز مشخص نمود (شکل ۴). در این نوع انکودر، یک خروجی با نام Z نیز وجود دارد به ازای هر دور کامل انکودر (از لحظه حرکت تا یک دور کامل) یک پالس تولید می‌کند (شکل ۵).

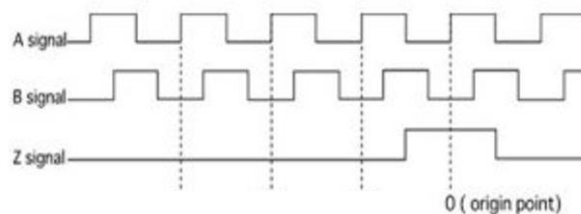
- برای اندازه‌گیری سرعت موتور، خروجی A یا B انکودر موتور آموزشی را به اسیلوسکوپ متصل کنید. دوره تناوب یکی از پالس‌های A یا B را اندازه‌گیری و با استفاده از آن سرعت موتور را بر حسب دور بر دقیقه محاسبه کنید و سرعت چرخش موتور را در مقادیر نشان داده شده در جدول ۱ قرار دهید و هر بار با سرعت به دست آمده از انکودر مقایسه کنید (جدول ۱ را تکمیل کنید).



شکل ۳: تصویر واقعی از صفحه یک انکودر افزایشی



شکل ۴: تشخیص جهت چرخش انکودر (راست گرد CCW و چپ گرد CW)



شکل ۵: خروجی Z انکودر افزایشی به ازای ۴ پالس در هر دور

جدول ۱: اندازه‌گیری سرعت موتور با استفاده از انکودر

سرعت اندازه‌گیری شده با استفاده از خروجی انکودر	سرعت نمایش داده شده در مد OPEN LOOP
	500RPM
	1000RPM
	1500RPM

- برای تعیین جهت چرخش موتور می‌توان خروجی فاز A و فاز B انکودر را با یکدیگر مقایسه کرد. برای این کار خروجی A و B انکودر را همزمان بر روی اسیلوسکوپ نمایش دهید. شکل موج‌های فاز A و B انکودر را در دو حالت ثبت کنید و نکته فوق را تحقیق کنید.

۳-۴- شناسایی تابع تبدیل موتور DC با بررسی پاسخ زمانی

در این قسمت به بررسی پاسخ زمانی موتور DC می‌پردازیم. با توجه به آنچه در مورد موتور DC کنترل آرمیچر می‌دانیم، چنانچه خروجی را سرعت سیستم بر حسب دور بر دقیقه (N) و ورودی آن را ولتاژ آرمیچر (V_a) در نظر بگیریم، تابع تبدیل سیستم به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{N(s)}{V_a(s)} = \frac{K'_m}{T_ms + 1} \quad (1)$$

در سرتاسر آزمایش، از حسگر سرعت (تاکوژنراتور) برای اندازه‌گیری خروجی سیستم استفاده می‌کنیم. ولتاژ خروجی این حسگر با سرعت موتور متناسب می‌باشد. چنانچه، سرعت موتور را بر حسب ولتاژ و ضریب تبدیل rad/s به ولتاژ تبدیل کنیم و ضریب تبدیل را با بهره K'_m در رابطه ۱ تلفیق نمائیم، تابع تبدیل موتور به صورت رابطه (۲) نوشته می‌شود.

$$\frac{V_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{T_ms + 1} \quad (2)$$

که V_m خروجی حسگر سرعت بر حسب ولت می‌باشد. هدف از شناسایی سیستم، تعیین پارامترهای بهره حالت ماندگار K_m و ثابت زمانی T_m در تابع تبدیل محاسبه شده (۲) با استفاده از بررسی پاسخ زمانی آن است.

- برای شناسایی موتور، ابتدا از منوی اصلی وارد مود EXTERNAL سیستم شوید. مولد سیگنال را به گونه‌ای تنظیم کنید که یک سیگنال مربعی متقارن با دامنه پیک تا پیک حدود ۴ ولت و فرکانس حدود ۱۰۰ میلی‌هرتز که بر روی یک ولتاژ بایاس ۶ ولت

سوار است تولید کند. شکل موج حاصل را توسط اسیلوسکوپ مشاهده کنید و پس از اطمینان از مشخصات آن، خروجی مولد سیگنال^۱ را به پایانه ورودی آنالوگ V_{in} موتور متصل کنید.

- شکل موج سرعت موتور را از طریق خروجی حسگر سرعت آن بر روی اسیلوسکوپ مشاهده کنید. دامنه شکل موج ورودی آرمیچر موتور و شکل موج خروجی حسگر سرعت موتور را در جدول ۲ ثبت کنید. ثابت زمانی موتور را با توجه به شکل موج بالارونده خروجی بدست آورید. مقیاس زمانی اسیلوسکوپ را به گونه‌ای تنظیم کنید که یک شکل موج کامل شامل هر دو قسمت بالارونده و پایین‌رونده در نمایشگر مشاهده شود. مشخصات شکل حاصل را در جدول ۲ ثبت کنید.
- همین آزمایش را در حالت موتور با بار تکرار کنید و نتایج را در جدول ۲ ثبت کنید. نتایج این دو قسمت را با یکدیگر مقایسه کنید. چه نتیجه‌ای می‌گیرید.

جدول ۲: شناسایی تابع تبدیل موتور با بایاس ۶ ولت

شکل موج	ثابت زمانی	بهره حالت ماندگار	دامنه خروجی	دامنه ورودی	
					حالت بدون بار
					حالت با بار

- به نظر شما نقش بایاس ۶ ولت چیست؟ لطفاً توضیح دهید. سیگنال بایاس را ۳ ولت انتخاب کنید و جدول ۲ را یک بار دیگر برای این حالت پر کنید.

جدول ۳: شناسایی تابع تبدیل موتور با بایاس ۳ ولت

شکل موج	ثابت زمانی	بهره حالت ماندگار	دامنه خروجی	دامنه ورودی	
					حالت بدون بار
					حالت با بار

۴-۳- شناسایی تابع تبدیل موتور در حوزه فرکانس

در این قسمت از آزمایش هدف شناسایی تابع تبدیل سیستم با استفاده از بررسی پاسخ فرکانسی سیستم می‌باشد. پاسخ فرکانسی، به معنای پاسخ حالت دائمی سیستم به ورودی سینوسی می‌باشد. یک سیستم کنترلی خطی، پایدار و تغییرناپذیر با زمان در نظر بگیرید که تابع تبدیل آن $G(s)$ باشد. اگر ورودی این سیستم یک سیگنال سینوسی باشد، آنگاه خروجی این سیستم به این ورودی در حالت دائمی، یک سینوسی با فرکانسی برابر با فرکانس ورودی اما دارای اندازه و فاز جدید خواهد بود. اگر ورودی سیستم یک سینوسی با فرکانس ω و اندازه X باشد، خروجی سیستم به صورت زیر می‌باشد.

$$x(t) = X \sin(\omega t) \Rightarrow X(s) = X \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (3)$$

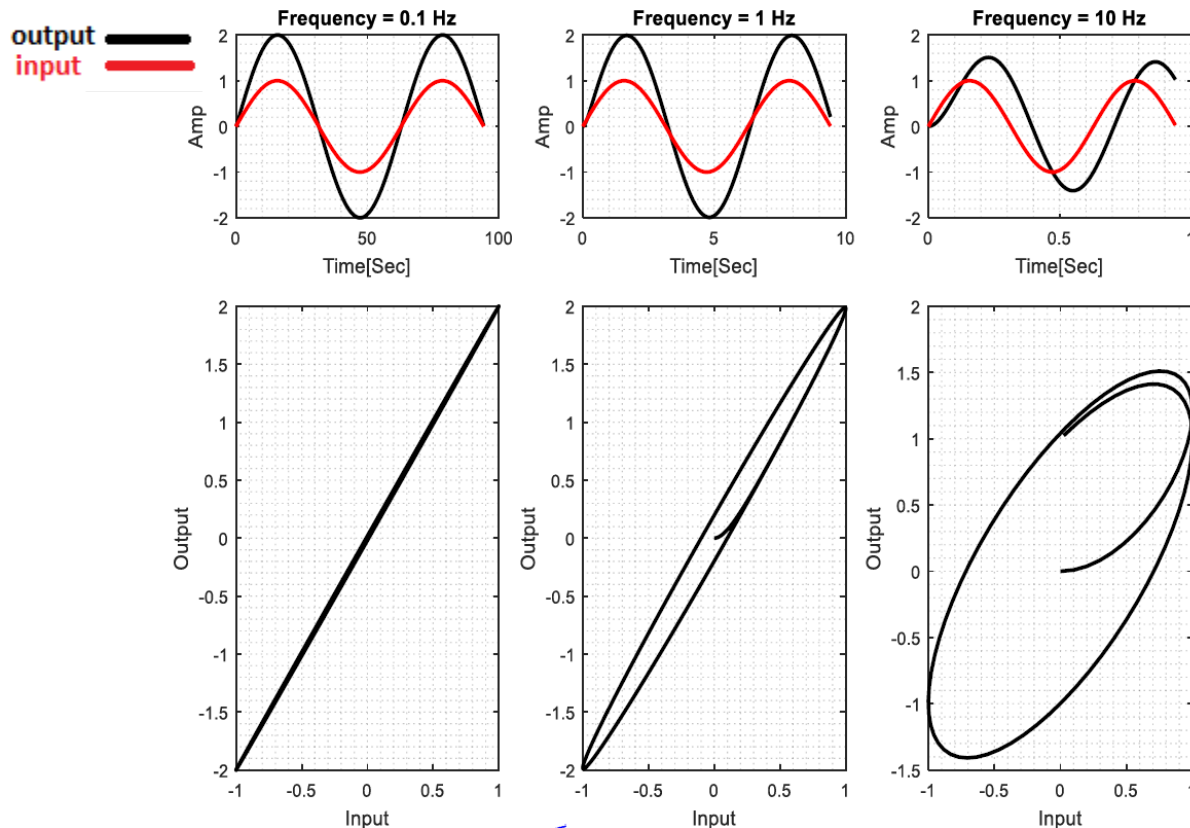
$$Y(s) = G(s)X(s)$$

با لاپلاس معکوس گرفتن از خروجی سیستم در رابطه ۳، رابطه ۴ نتیجه می‌شود.

¹ Function Generator

$$y(t) = X|G(j\omega)|\sin(\omega t + \angle G(j\omega)) \quad (4)$$

- برای مثال تابع تبدیل $G(s) = \frac{2}{0.1s+1}$ را در نظر بگیرید. به این تابع تبدیل ورودی سینوسی با فرکانس‌های ۰.۱، ۱ و ۱۰ هرتز را اعمال می‌کنیم. پاسخ این سیستم را در شکل ۶ می‌توان دید. افزایش فرکانس چه تاثیری بر روی دامنه و فاز گذاشته است؟ چرا با کاهش فرکانس رابطه ورودی و خروجی (ردیف دوم شکل ۶) به سمت یک خط میل می‌کند؟ لطفاً این پاسخ را تحلیل کنید.



شکل ۶: پاسخ سیستم $G(s) = \frac{2}{0.1s+1}$ به ازای ورودی سینوسی با فرکانس‌های ۰.۱، ۱ و ۱۰ هرتز

در شکل ۶ ردیف اول پاسخ هم‌زمان ورودی و خروجی بر حسب زمان را نشان می‌دهد، ردیف دوم ورودی را بر حسب خروجی نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده گردید تغییرات فرکانس تاثیر بر دامنه و فاز پاسخ می‌گذارد. حال اگر فرکانس را از ۰ تا بی‌نهایت تغییر دهیم و در فرکانس‌های مختلف اندازه تابع تبدیل $|G(j\omega)|$ و فاز تابع تبدیل $\angle G(j\omega)$ را رسم کنیم، نموداری تحت عنوان نمودار اندازه و فاز Bode به دست می‌آید. نمودار اندازه تابع تبدیل و فاز تابع تبدیل را به ازای فرکانس‌های مختلف نمایش می‌دهد که در واقع شناسایی تابع تبدیل سیستم در حوزه فرکانس صورت گرفته است. در نمودار اندازه و فاز Bode، محور عمودی به ترتیب اندازه دامنه بر حسب دسی‌بل (همانند رابطه (۵)) و فاز تابع تبدیل بر حسب درجه و محور افقی فرکانس‌های ورودی به صورت لگاریتمی (برای تفکیک‌پذیری به صورت لگاریتمی استفاده می‌کنند) می‌باشد.

$$|G(j\omega)|_{dB} = 20\log|G(j\omega)| \quad (5)$$

- حال به شناسایی موتور در این حوزه می‌پردازیم. ابتدا از منوی اصلی وارد مد EXTERNAL سیستم شوید. مولد سیگنال را به گونه‌ای تنظیم کنید که یک سیگنال سینوسی متقارن با دامنه پیک تا پیک حدود ۴ ولت، ولتاژ آفست ۶ تولید کند. با اعمال ورودی سینوسی در فرکانس‌های مختلف، جدول ۴ و ۵ را کامل کنید.

- در ادامه به کمک داده‌های ثبت‌شده در جدول ۴، نمودار اندازه Bode سیستم را بر حسب دسی‌بل به صورت لگاریتمی رسم کنید (از دستور semilogx در MATLAB استفاده نمایید).
- به کمک داده‌های ثبت‌شده در جدول ۵ نمودار فاز Bode سیستم را بر حسب درجه به صورت لگاریتمی در MATLAB رسم کنید.

جدول ۴: شناسایی اندازه تابع تبدیل

0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	فرکانس (Hz)
								نسبت دامنه خروجی به ورودی
								نسبت دامنه خروجی به ورودی (dB)
2	1.8	1.4	1.3	1.2	1.1	1	0.9	فرکانس (Hz)
								نسبت دامنه خروجی به ورودی
								نسبت دامنه خروجی به ورودی (dB)

جدول ۵: شناسایی فاز تابع تبدیل

1.5	1.2	1	0.8	0.4	0.1	فرکانس (Hz)
						اختلاف فاز ورودی و خروجی (درجه)
45	20	6	4	3	2.2	فرکانس (Hz)
						اختلاف فاز ورودی و خروجی (درجه)

با توجه به نتایج به دست آمده و در نظر گرفتن تابع تبدیل سیستم به صورت $\frac{V_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1}$ به پرسش‌های زیر لطفا پاسخ دهید.

- با افزایش فرکانس ورودی سینوسی، اختلاف فاز خروجی و ورودی سیستم نهایتاً به چه مقداری همگرا می‌شود؟
- پارامتر بهره حالت ماندگار K_m با استفاده از نمودار اندازه چه مقداری به دست می‌آید؟
- فرکانس قطع سیستم فرکانسی است که دامنه یا انرژی سیستم پس از عبور از آن شروع به تضعیف شدن می‌نماید (فرکانسی که در آن بهره سیستم نسبت به بهره سیستم در فرکانس صفر، 3dB کاهش پیدا کند). فرکانس قطع در این سیستم چند رادیان بر ثانیه می‌باشد؟
- آیا رابطه‌ای بین فرکانس قطع بهره سیستم با ثابت زمانی سیستم می‌توان یافت؟
- مقدار فاز تابع تبدیل سیستم در فرکانس قطع چند درجه است؟

۴-۴- مقایسه تابع تبدیل موتور در حوزه زمان و فرکانس

- تابع تبدیل به دست آمده در حوزه فرکانسی را با تابع تبدیل به دست آمده در حوزه زمان مقایسه نمایید.

نکته مهم: در شبیه‌سازی آزمایش‌های بعدی، تابع تبدیل موتور را یک از این دو تابع تبدیلی که اینجا به دست آوردید قرار دهید.