با نام او

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دانشکده‌ی مهندسی برق

دستور کار آزمایشگاه سیستم‌های کنترل خطی

با سپاس از:

عباس تاری وردی، فروغ شمسي، احسان اميدي، مینا نوردانش، اتابك دهبان، سعید پورجندقي، علیرضا دیرافزون، مریم السادات ساداتی، ریحانه رحیمی، وحید حسنی، محسن مصلح پور

نکاتی پیرامون آزمایشگاه کنترل سیستم‌های خطی

- همواره قبل از ورود به آزمایشگاه، دستور کار مربوط به آزمایش خود را مطالعه کرده و در صورت نیاز طراحی خواسته شده را از قبل انجام دهید.
- پیش از شروع هر آزمایش، مسئول آزمایشگاه توضیحات مربوط به آزمایش را به شما ارائه می‌دهد.
- قبل از روشن کردن دستگاه‌ها حتماً همه چیز را به دقت بازرسی کرده و پس از کسب مجوز از مسئول آزمایشگاه، دستگاه را روشن کنید.
- گزارش کار شامل شرح مختصری از آزمایش، پرسش به سوالات داخل متن و پرسش-های نتیجه گیری، نمودارها یا جدول‌های لازم و روند طراحی به همراه ذکر معادلات مربوط، خواهد بود.

بخش اول

آشنایی با نرم افزار متلب

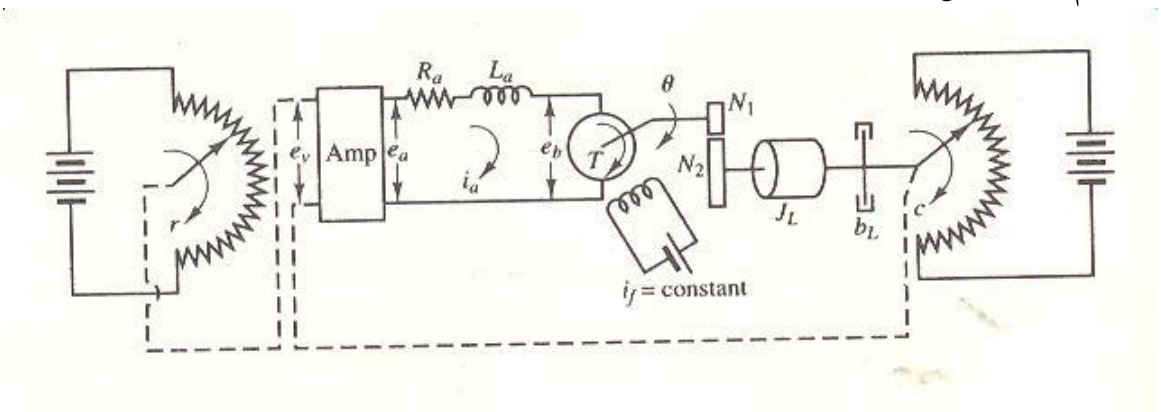
آزمایش اول: مدل‌سازی و کنترل موقعیت سیستم سرو موتور با استفاده از متلب

هدف

هدف از انجام آزمایش، آشنایی با مدل سیستم سرو موتور و نحوه کنترل آن در محیط شبیه سازی Simulink می باشد.

مقدمه

سیستم سرو شکل زیر را در نظر بگیرید:



نحوه عملکرد سیستم

یک جفت پتانسیومتر به عنوان وسیله اندازه گیری خط عمل می نماید. این دو پتانسیومتر، موقعیت های ورودی و خروجی را به سیگنال الکتریکی (ولتاژ) تبدیل می نماید. سیگنال ورودی موقعیت مرجع θ_r را مشخص می نماید و وضعیت شفت خروجی، موقعیت زاویه ای خروجی θ_c را تعیین می نماید که اختلاف این دو برابر خطای موقعیت می باشد:

$$e = \theta_r - \theta_c$$

خطای ولتاژ متناسب با خطای موقعیت می باشد:

$$e_v = e_r - e_c$$

که در آن e_r ولتاژ پتانسیومتر ورودی، e_c ولتاژ پتانسیومتر خروجی و e_v خطای ولتاژ است.

نسبت خطای ولتاژ و خطای موقعیت برابر بهره پتانسیومتر خواهد بود.

$$e_V = k(\theta_r - \theta_c) = ke$$

ولتاژ خط، توسط یک تقویت کننده با بهره k_1 تقویت می شود و ولتاژ خروجی به مدار موتور DC متصل می شود. در مدار موتور DC بر اثر اعمال ولتاژ $k_1 e_v$، جریان I_a در مدار تولید شده و گشتاور تولید شده بر اثر جریان فوق برابر

$$T = k_2 I_a$$

می باشد که k_2 ثابت گشتاور موتور است. با چرخیدن آرمیچر، ولتاژی در آرمیچر القا می شود:

$$e_b = K_۳ \frac{d\theta_c}{dt}$$

که به آن نیروی ضد محرکه موتور می گویند و $k_۳$ ثابت نیروی ضد محرکه است.

لذا جریان I_a به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$I_a = \frac{e_a - e_b}{R_a + L_a s}$$

که در آن $e_a = k_۱ e_v$ می باشد.

گشتاور تولید شده توسط موتور بر اساس رابطه زیر، چرخش زاویه ای در بار ایجاد می کند:

$$J_۰ \ddot{\theta}_c + b_۰ \dot{\theta}_c = T$$

که در آن $J_۰$، ضریب سختي موتور، بار و جعبه دنده متصل به شفت موتور و $b_۰$ ضریب دمپري موتور، بار و جعبه دنده است. فرض مي كنيم نسبت چرخ دنده طوري است كه شفت خروجي به ازاي هر دور چرخش شفت موتور n دور بگردد.

نحوه انجام آزمایش

- تابع تبديل بين تغيير زاويه شفت موتور و ولتاژ خطاي e_v را بدست آوريد.
- بلوك دياگرام سيستم ونيز ساده شده آن را با صرفنظر از L_a بدست آوريد.
- بلوك دياگرام سيستم فوق را با ورودي پلّه شبيه سازي نمائيد.

پارامترها و سیستم را به صورت زیر در نظر بگیرید:

- $k_۰$: بهره پتانسیومتر و برابر $۲٤/\pi$ ولت بر رادیان
- $k_۱$: بهره تقویت کننده و برابر ۱۰ ولت بر ولت
- $k_۲$: ثابت گشتاور موتور و برابر ٦×۱۰^{-٥}
- $k_۳$: ثابت ولتاژ ضد محرکه و برابر ۵.۵×۱۰^{-۲}
- n: نسبت چرخ دنده $(\frac{N_۱}{N_۲})$ و برابر $\frac{۱}{۱۰}$
- R_a: مقاومت سیم پیچ آرمیچر و برابر ۱/۵ اهم
- L_a: اندوکتانس سیم پیچ آرمیچر و برابر 0.1 هانری

- $J_۰ = ٤.٤ \times ۱۰^{-۲}$
- $b_۰ = ٤ \times ۱۰^{-۲}$

نتیجه گیری

- به نظر شما، اغتشاش و نویز از چه نقاطي مي تواند به سیستم وارد گردد؟ در بلوك دیاگرام مشخص نمایید.
- عوامل غیر خطي در این سیستم چیست؟
- اثر تغییر بهره تقویت کننده را بر روي سیستم از طریق شبیه سازي بررسي نموده و از نظر تئوري توجیه نمایید.
- با اعمال نویز به سیستم، پاسخ سیستم را در حالت حلقه باز وحلقه بسته بررسي نمایید.

بخش دوم

توپ و میله

معرفی کلی دستگاه

این دستگاه شامل یک موتور DC می باشد که می تواند به یک تاکومتر و Encoder مجهز شود. تاکو متر سرعت موتور را اندازه می گیرد و Encoder زاویه شفت خروجی را اندازه می گیرد.قسمت های مختلف این دستگاه را در زیر مشاهده می کنید:

UPM 2405

MultiQ PCI

SRV02-ET

با متصل کردن قسمت های مختلف به موتور DC، آزمایش های مختلفی را انجام دهیم. در جدول هر کدام از این آزمایش‌ها به اختصار توضیح داده شده است:

Module Name	Description
Ball & Beam	The Ball & Beam experiment requires the user to manipulate the position of a rolling ball on a beam.
Flexible Link	The Flexible Link experiment requires the user to command a *tip* position of the flexible link attached to the SRV02.
Flexible Joint	A rigid beam is mounted on a flexible joint that rotates via the SRV02 and the user is to command the tip position of this beam.
Gyro/Stable Platform	The purpose is to maintain the line of sight of an instrument mounted on a rotating platform (SRV02).
Inverted Pendulum	The purpose is to balance the inverted pendulum through a rotary motion arm (SRV02).
Double Inverted Pendulum	The double inverted problem adds to the complexity of the single pendulum by introducing a 2nd pendulum.
2 DOF robot module	This experiment requires the x-y positioning of the "end effector".
2 DOF Rotary Gantry	This experiment requires the control of the swing of a x-y gantry crane using a 5 DOF linkage.
2 DOF inverted pendulum	Balance a pendulum that is free to fall in 2 directions. The pendulum is attached to the tip of the 2 DOF robot.

آزمایش اول : کنترل موقعیت موتور (SRV02)

هدف

هدف از انجام این آزمایش کنترل موتور با استفاده از جبران ساز PD و Lead و PI می باشد و در انتهای این آزمایش شما باید بدانید که:

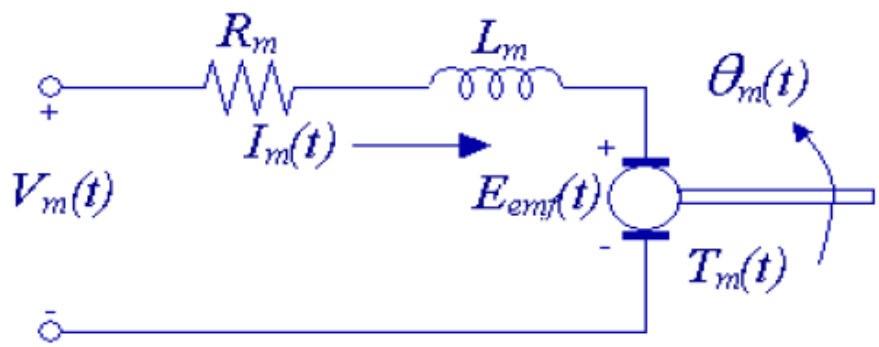
۱- چگونه یک کنترل کننده PD و Lead و PI طراحی می شود.

۲- چگونه تغییر پارامترهای کنترل‌کننده، پاسخ سیستم را تغییر می دهد.

۳- چگونه کنترل‌کننده طراحی شده را به کار گرفته و نتیجه را مشاهده نمایید.

مدل ریاضی

شکل زیر شماتیک الکتریکی مدار آرمیچر را نشان می دهد:



با استفاده از قانون KVL معادلات زیر مربوط به این مدار الکتریکی بدست مي آید.

$$V_m - R_m I_m - L_m \frac{dI_m}{dt} - E_{emf} = ۰$$

با فرض اینکه $L_m \ll R_m$ می باشد پس داریم :

$$I_m = \frac{V_m - E_{emf}}{R_m}$$

$$I_m = \frac{V_m - K_m \dot{\theta}_m}{R_m} \ , (\dot{\theta}_m = \omega_m)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - \frac{T_l}{\eta_g K_g}$$

$$J_l \ddot{\theta}_l = T_l - B_{eq} \dot{\theta}_l$$

$$J_l\ddot{\theta}_l = \eta_g K_g T_m - \eta_g K_g J_m \ddot{\theta}_m - B_{eq}\dot{\theta}_l$$

$$T_m = \eta_m K_t I_m$$

$$\theta_m = K_g \theta_l$$

با جایگذاری داریم:

$$J_l\ddot{\theta}_l + \eta_g K_g^۲ J_m \ddot{\theta}_l + B_{eq}\dot{\theta}_l = \eta_g \eta_m K_g K_t I_m$$

$$\frac{\theta_t(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g \eta_m K_t K_g}{J_{eq} R_m s^۲ + \left(B_{eq} R_m + \eta_g \eta_m K_m K_t K_g^۲\right) s} \qquad (*)$$

که در این رابطه :

$$J_{eq} = J_l + \eta_g J_m K_g^۲$$

برای محاسبه تابع تبدیل موتور با استفاده از فرمول (*) از جدولی که در ضمیمه آورده شده است، استفاده نمایید.

شرح آزمایش

❖ کنترل‌کننده‌های PD و Lead

- تابع تبدیل سیستم را به روش شرح داده شده محاسبه نمایید.
- پاسخ Open Loop سیستم را با استفاده شبیه سازی مشاهده نمایید.
- کنترل‌کننده را برای رسیدن به شرایط مطلوب زیر طراحی نمایید.
  - Overshoot کمتر از ۵ درصد
  - $T_s = ۰.۱\ s$
- با توجه به شرایط داده شده و تابع تبدیل موتور، کنترل کننده PD و Lead را برای آن طراحی نمایید. پس از طراحی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مکان هندسی ریشه‌های سیستم حلقه بسته را رسم کرده و نتیجه مشخصات حاصل شده را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید. آیا نیازمند طراحی Pre-filter در این

مقطع خواهیم بود؟ اگر پاسخ مثبت است؛ Pre-filter را طراحی کرده و اثر آن را بررسی کنید.

- حال مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده را وارد کرده و پاسخ سیستم واقعی مشاهده نمایید.
- پنجره هایی که سیگنال‌های measured theta & simulated theta هر دو به همراه (reference theta را ذخیره کنید.
- مقدار overshoot و rise time آن دو را با هم مقایسه نمایید.

❖ کنترل‌کننده‌های PI

- تابع تبدیل سیستم را به روش شرح داده شده محاسبه نمایید.
- پاسخ Open Loop سیستم را به ورودی شیب واحد با استفاده شبیه سازی مشاهده نمایید.
- کنترل‌کننده PI را برای تعقیب بدون خطا ورودی شیب واحد طراحی نمایید.
- پس از طراحی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مکان هندسی ریشه‌های سیستم حلقه بسته را رسم کرده و نتیجه مشخصات حاصل شده را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید.
- حال مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده را وارد کرده و پاسخ سیستم واقعی مشاهده نمایید.
- پنجره هایی که سیگنال‌های measured theta & simulated theta هر دو به همراه (reference theta را ذخیره کنید.
- مقدار overshoot و rise time آن دو را با هم مقایسه نمایید.

نتیجه گیری

۱- بعد از طراحی کنترل کننده، آیا مقدار overshoot و rise time سیگنال‌های measured theta & simulated theta با هم و با مقدار مطلوب تفاوت داشت؟ اگر جواب مثبت

است دلیل آن را توضیح دهید. به نظر شما آیا راه حلی وجود دارد که این اختلاف به حداقل برسد؟ توضیح دهید.

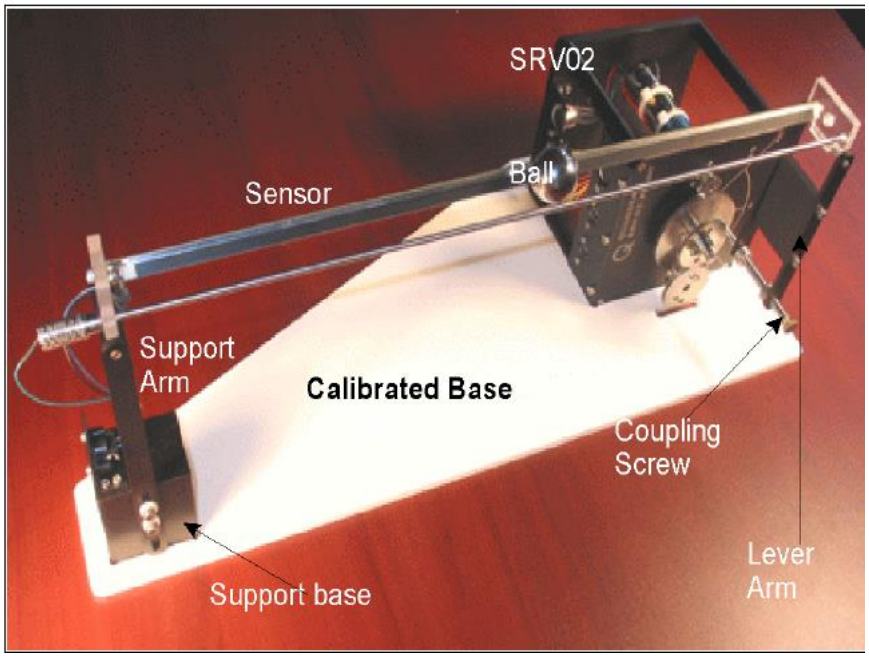
۲- تفاوت میان کنترل‌کننده‌ی PD و Lead را در پیاده‌سازی عملی شرح دهید.

آزمایش دوم: سیستم گوی و میله (Ball & Beam)

هدف

دستگاهی که در اختیار شماست شامل یک موتور، یک میله و یک توپ است. خروجی موتور یک حرکت دورانی است. این حرکت دورانی موجب حرکت میله می شود.

هدف از انجام آزمایش طراحی کنترل کننده برای مدل ball & beam است به طوریکه بتوانید موقعیت توپ را روی یک نقطه روی میله کنترل کنید. مکان این نقطه با سیگنال set point تعیین می گردد.



From...	*To...*	*Cable*	*Description*
'To Load' on the UPM	Motor Power on the SRV02	6 pin DIN to 4 pin DIN	This is the Motor Power supplied from the UPM amplifier.

سیگنال "To Load" را به سیگنال " motor" روی موتور وصل کنید.

From...	*To...*	*Cable*	*Description*
Encoder on the SRV02	Encoder #0 on the terminal board	5 pin DIN to 5 pin DIN	This is the digital encoder data that measures the servo angle.

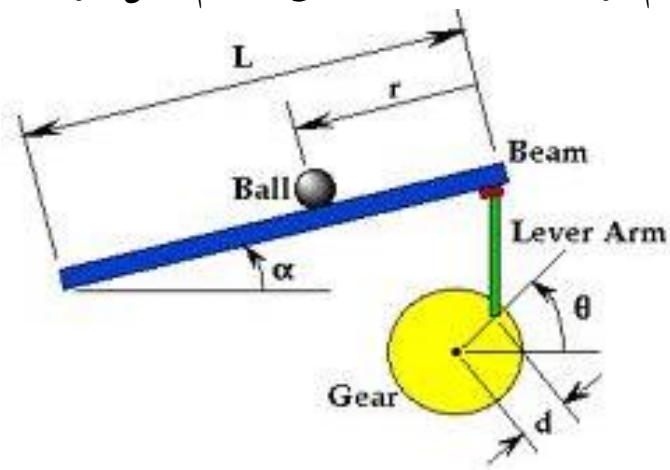
سیگنال Encoder را به ورودی MultiQ برد وصل نمایید.

From...	*To...*	*Cable*	*Description*
Beam sensor	*SI* on the UPM	6 pin – 6 pin DIN	Analog ball position measurement.

خروجی سنسور موقعیت توپ به ورودی S3 روی UPM وصل شود.

مدل ریاضی

مدل ریاضی سیستم برای رسیدن به مدل ریاضی سیستم شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل ٤/٢/٢ ـ مدل توپ و میله

نیروهایی که به توپ وارد می شود را در نظر بگیرید

$$F_{tx} = m\,g\sin\alpha$$

$$T_r = F_{rx}R = J\,a = J\frac{\ddot{x}}{R} \quad , \quad J = \frac{2}{5}m\,R^2$$

$$F_{rx} = \frac{2}{5}m\,\ddot{x}$$

$$m\,\ddot{x} = \Sigma F = F_{tx} - F_{rx} = m\,g\sin\alpha - \frac{2}{5}m\,\ddot{x}$$

$$\ddot{x} = \frac{5}{7}g\sin\alpha$$

$$\frac{X(s)}{\alpha(s)} = \frac{5\,g}{7\,s^2}$$

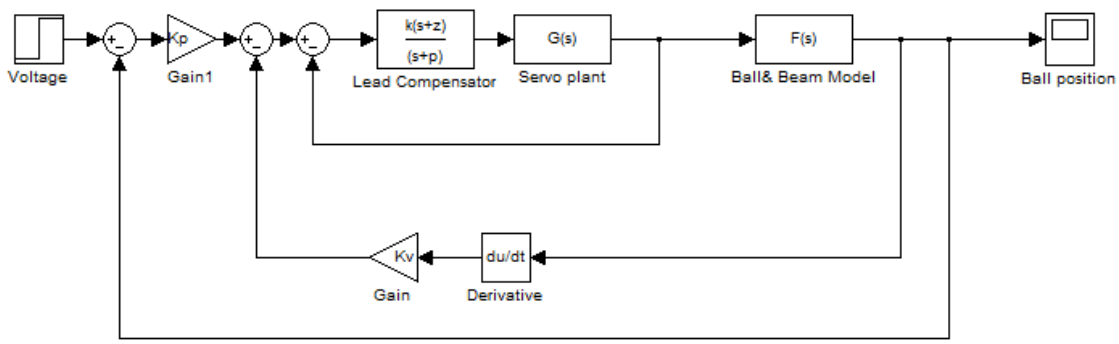
$$\theta\,r = Arc = \alpha\,L \;\rightarrow\; \theta = \frac{L}{r}\alpha$$

$$\frac{\theta_L(s)}{V_m(s)} = \frac{\eta_g\eta_m K_t K_g}{J_{eq}R_m s^2 + (B_{eq}R_m + \eta_g\eta_m K_m K_t K_g^2)s}$$

$$\frac{X(s)}{V_m(s)}=\frac{\theta_L(s)}{V_m(s)}\frac{\alpha(s)}{\theta_L(s)}\frac{X(s)}{\alpha(s)}$$

$$\frac{L}{r} = ١٦.٧٥$$

به شکل زیر توجه کنید:



همان‌طور که از شکل فوق پیداست، سیستم این آزمایش از ۲ حلقه تشکیل شده است. کنترل کننده خارجی وظیفه‌ی ایجاد سیگنال زاویه مطلوب برای کنترل کننده داخلی را بر عهده دارد. با فرض آنکه حلقه داخلی (موتور) بسیار سریع است، می‌توان در طراحی کنترل کننده از آن صرف نظر کرده و آن را با یک گین واحد تقریب زد. پس از رسیدن موتور به زاویه مطلوب، توپ نیز در مکان خواسته شده ثابت باقی می‌ماند. در این آزمایش از یک کنترل‌کننده PV و Lead به ترتیب برای حلقه‌های خارجی و داخلی استفاده خواهد شد. کنترل کننده PV شبیه کنترل کننده PD از خانواده PID است. با این تفاوت که مشتق‌گیر آن در فیدبکی که از خروجی به سمت ورودی است قرار دارد.

شرح آزمایش

- تابع تبدیل سیستم را به روش شرح داده شده با استفاده از فرمول‌های بالا حساب نموده و پاسخ Open Loop سیستم را با استفاده شبیه سازی مشاهده نمایید.
- کنترل کننده PV را برای رسیدن شرایط ایده آل زیر طراحی کنید:
  - Overshoot کمتر از ٤/٦ درصد

$T_p = ۱.۵\ s$ ○

برای طراحی این کنترل کننده می توانید تابع تبدیل سیستم را با صرفنظر کردن از حلقه داخلی، حساب کرده و با کسر زیر برابر قرار دهید:

$$\frac{\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$$

- با توجه به شرایط داده شده و تابع تبدیل موتور، کنترل کننده PV و Lead و را برای آن طراحی نمایید. پس از طراحی، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مکان هندسی ریشه‌های سیستم حلقه بسته را رسم کرده و نتیجه مشخصات حاصل شده را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید.
- بعد از طراحی کنترل کننده و وارد کردن پارامترهای آن، پاسخ سیستم واقعی را مشاهده نمایید.
- پنجره هایی که سیگنال های simulated ball position و Measured ball position به همراه Reference Position را نشان میدهد، ذخیره کنید.
- مقدار overshoot و rise time آن دو را یادداشت کرده و با هم و با حالت قبل مقایسه کنید.

نتیجه گیری

۱- بعد از طراحی کنترل کننده و مشاهده پاسخ، آیا مقدار overshoot و rise time سیگنال‌های simulated ball position و Measured ball position با هم و با مقدار مطلوب تفاوت داشت؟ اگر جواب مثبت است دلیل آن را توضیح دهید. به نظر شما آیا راه حلی وجود دارد که این اختلاف به حداقل برسد؟ توضیح دهید.

۲- از چه کنترل کننده‌های دیگری می توانستید استفاده کنید؟ دلیل استفاده از کنترل کننده PV را توضیح دهید.

۳- آیا می‌توان به جای استفاده از کنترل کننده Lead برای کنترل موقعیت موتور نیز از کنترل‌کننده‌ی PV استفاده نمود؟ اگر بله به لحاظ تئوری طراحی و شبیه‌سازی نمایید و همچنین ملاحظات عملی را نیز بررسی نمایید. اما اگر پاسخ منفی است؛ چرا؟

٤- آیا با عدم صرف نظر از حلقه‌ی داخلی همچنان می‌توان از PV برای حلقه‌ی خارجی استفاده نمود؟ اگر بله به لحاظ تئوری طراحی و شبیه‌سازی نمایید. اما اگر پاسخ منفی است یک کنترل کننده برای این منظور پیشنهاد داده و عملکرد آن را بررسی کنید.

٥- بر اساس پاسخی که به سوال قبلی می‌دهید با قراردادن منحنی‌های خروجی بر روی یکدیگر؛ اثر ایده‌آل در نظر گرفتن حلقه داخلی را بررسی کنید.

Appendix - A: SRV02 Nomenclature

Symbol	Description	MATLAB Variable	Nominal Value SI Units
V_m	Armature circuit input voltage		
I_m	Armature circuit current		
R_m	Armature resistance	Rm	**2.6**
L_m	Armature inductance		
E_{emf}	Motor back-emf voltage		
θ_m	Motor shaft position		
ω_m	Motor shaft angular velocity		
θ_l	Load shaft position		
ω_l	Load shaft angular velocity		
T_m	Torque generated by the motor		
T_l	Torque applied at the load		
K_m	Back-emf constant	Km	**0.00767**
K_t	Motor-torque constant	Kt	**0.00767**
J_m	Motor moment of inertia	Jmotor	**3.87 e-7**
J_{eq}	Equivalent moment of inertia at the load	Jeq	**2.0 e-3**
B_{eq}	Equivalent viscous damping coefficient	Beq	**4.0 e-3**
K_g	SRV02 system gear ratio (motor->load)	Kg	**70 (14x5)**
η_g	Gearbox efficiency	Eff_G	**0.9**
η_m	Motor efficiency	Eff_M	**0.69**
ω_n	Undamped natural frequency	Wn	
ζ	Damping ratio	zeta	
K_p	Proportional gain	Kp	
K_v	Velocity gain	Kv	
T_p	Time to peak	Tp	

بخش سوم

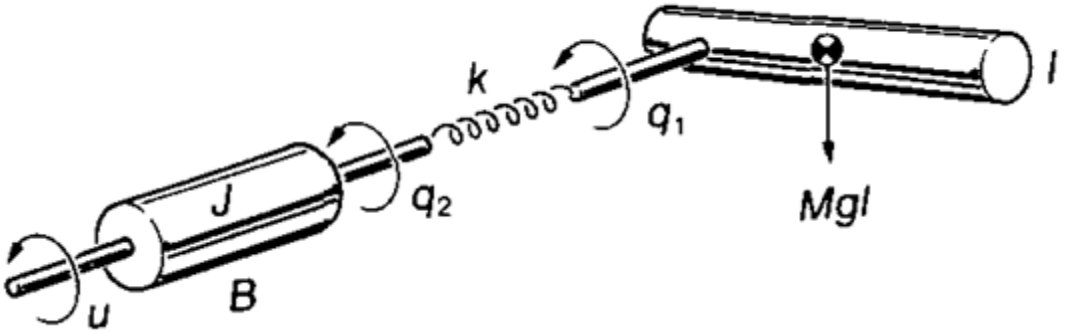
روبات با مفصل نرم

مقدمه

آشنایی با روبات با مفصل نرم (Flexible Joint Robot)

در طراحي روبات ها، توسعه بازوهاي سبك تر كه قادر به حمل بار سنگين تري مي باشند اهميت قابل ملاحظه اي دارد.اين امر بوسيله چرخ دنده هايي مناسب در مفاصل روبات قابل دسترسي است. بنابراين با طراحي مناسب اين دنده ها، بازوهاي كوچكتر به گشتاور بزرگتري خواهند رسيد ولي اين كار عواقبي نيز به دنبال خواهد داشت كه از آن جمله مي توان به پديده انعطاف پذيري (Flexibility) در مفصل روبات اشاره نمود كه ممكن است باعث ايجاد نوسان هاي شديد و مخرب در انتهاي بازوي روبات گردد. انعطاف پذيري در مفصل روبات بدين معنی است كه اتصال یک بازوی سخت (Rigid) به چرخ دنده و از طريق آن به موتور محرک، به صورتي مي باشد كه در آن لزوما زاويه چرخ دنده و شفت موتور با زاويه بازوی روبات برابر نخواهد بود.اين عامل باعث ايجاد ديناميك غيرخطي پيچيده و پارامترهاي متغير در سيستم خواهد شد.

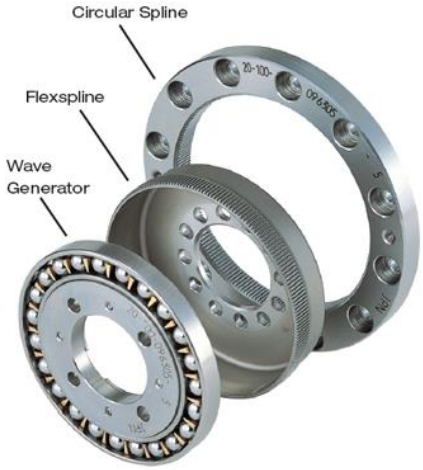
در مدلسازی سیستم‌های دینامیکی در نظر گرفتن نرمی مفاصل می‌تواند تاثیر بسزایی در عملکرد کلی سیستم داشته باشد. از این رو در سیستم‌های روباتیکی پیشرفته امکان صرفنظر کردن از مدلسازی این پدیده وجود نخواهد داشت.



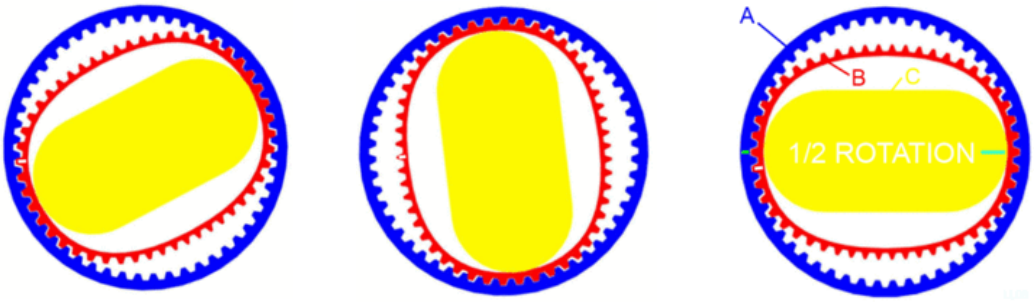
یکی از روش‌های متداول برای مدلسازی انعطاف پذيري مفصل روبات، در نظر گرفتن آن به صورت يك فنر پيچشي بين شفت موتور و بازوي روبات مي باشد.

انعطاف پذيري مفصل روبات لزوما پديده اي مزاحم و مشكل‌ساز نيست و در بسیاری از پروژه-های روباتیکی از آن برای بهبود کارایی روبات و تقلید حرکات انسانی توسط روبات ، از آن استفاده می‌گردد. مثل عملكرد دست هاي مصنوعي و استفاده در هارمونيك درايو.

نمونه‌هایی از کاربرد هاي روبات‌های با مفصل نرم



هارمونيك درايو



نمايي از برش جانبي هارمونيك درايو هنگام حركت

هارمونيك درايو روشی برای جايگزين كردن چرخ دنده مكانيكي مي باشد. اين قطعه در سال ۱۹۵۷ م اختراع شده است و بر خلاف معادله ديناميكي پيچيده آن به دليل انعطاف پذيري، نسبت به چرخ دنده هاي عادي مزاياي زيادي دارد كه از جمله مي توان به ورن سبك، قابليت فشردگي، دقت، تكرارپذيري، توليد گشتاور ونسبت چرخ دنده اي بالا اشاره نمود.

همان گونه كه در شكل های بالا مشاهده مي كنيد، اين قطعه از سه بخش تشكيل شده است:

۱-توليد كننده موج (Wave Generator): از يك ديسك به جنس استيل به نام wave generator plug ساخته شده است. به شكل بيضي است و معمولا به يك سرووموتور وصل شده و به عنوان محرك اوليه ورودي شناخته شده مي باشد.

۲ـ نوار انعطاف پذير(Flex Spline): همانند يك فنجان كم عمق است كه در لبه ها باريك و در قسمت انتهايي سخت و ضخيم مي باشد. در ديواره خارجي اين قطعه دندانه هايي به صورت شعاعي قرار دارد. نوار انعطاف پذير به صورت تنگاتنگ با توليد كننده موج قرار دارد و هنگامي كه wave generator plug مي چرخد، نوار انعطاف پذير همراه با آن نمي چرخد بلكه تغيير شكل مي دهد .

۳ـ نوار دايروي خارجي(Circular Spline): يك قطعه دايروي صلب و ثابت از جنس استيل كه در ديواره داخلي آن دنده هايي قرار گرفته است. [۱]

از هارمونيك درايو ها بدليل نسبت چرخ دنده اي بالا، در صنايع روبوتيك، هوافضا و كنترل سرعت استفاده مي گردد.

در اين بخش قصد داريم تا با ايجاد سيستمی مشابه به يک اتصال نرم عملكرد اين نوع سيستم‌ها را مورد بررسی قرار دهيم. در اين ساختار كه در ادامه با آن آشنا خواهيم شد از دو عدد فنر برای ايجاد يک مفصل نرم و انعطاف پذير در بازو استفاده شده است.

[۱] Heidar A. Talebi, Farzaneh Abdollahi, R. V. Patel, Kh.Khorasani,"Neural Network-Based State Estimation of Nonlinear Systems", Springer

هدف

هدف از انجام این آزمایش هاي این بخش، به کار گیری تکنیک‌های کنترل آموخته شده برای کنترل رفتار بازو با مفصل نرم وکاهش نوسانات انتهای بازو می باشد. پس از آن در قسمتهای بعدی به مطالعه پاسخ فرکانسی این سیستم به ورودی با فرکانسهای مختلف و تاثیر تاخیر در رفتار این سیستم خواهیم پرداخت. سیستم مورد آزمایش در آزمایشگاه متشکل از یک موتور (SRV02) است که یک مفصل نرم (ROTFLEX) را می‌گرداند. اتصال بین بازوي سخت سوار شده روي مفصل و خود بدنه مفصل از طریق دو عدد فنر و یک نقطه اتصال می‌باشد تا بتوان ساختاری انعطاف‌پذیر را به صورت کامل محقق ساخت. کنترل این سیستم مشابه مسائل کنترلی در روبات‌هایی با مقیاس‌های خیلی بزرگتر در صنعت می باشد که در مفاصل آن ها انعطاف رخ می دهد. در شکل زیر نمایی از این دستگاه را مشاهده می‌نمایید.

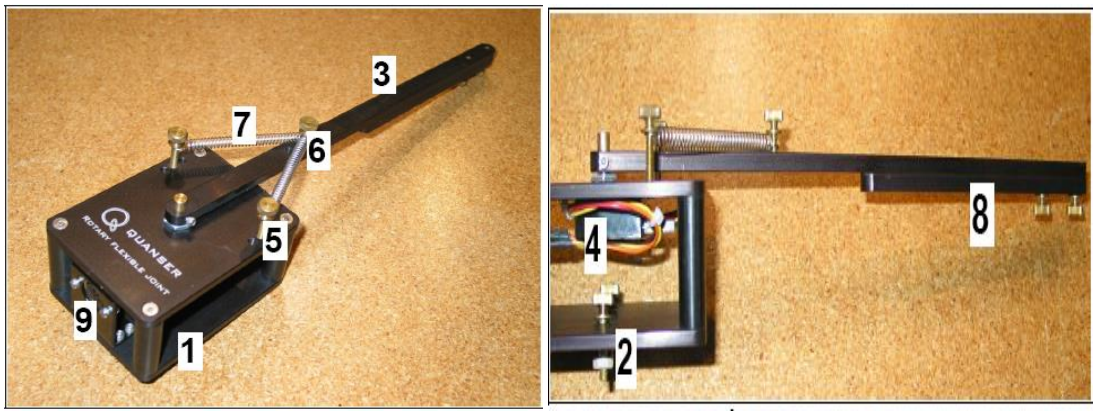
نمایی از Quanser Flexible Joint

در این سیستم زاویه انتهای میله (γ) از مجموع زاویه شفت موتور (θ) به علاوه زاویه انحراف (α) به‌دست می‌آید. زاویه شفت موتور توسط یک انکدر نوری با دقت بالا (٤٠٩٦ قطاع)، و زاویه انحراف بازو نیز توسط یک پتانسیومتر نسبت به زاویه شفت موتور اندازه‌گیری می‌شوند.

تمامی آزمایش‌های این بخش در محیط Matlab Simulink و با استفاده از Real Time Workshop و نرم‌افزار QUARC (محصول شرکت Quanser) صورت می‌گیرد. یک کارت واسط DAC و ADC واسط بین این دستگاه و رایانه می‌باشد. این کارت وظیفه دارد تا اطلاعات سنسورها را به صورت دیجیتال به رایانه و سیگنال‌های کنترلی را به صورت آنالوگ به موتور اعمال کند.

آشنایی مختصر با دستگاه و طرز کار آن

جدول زیر قسمت های مختلف دستگاه را توضیح می دهد:



بخش هاي مختلف سيستم

1	پایه‌ی Flexible Joint	6	محل اتصال فنرها به بازو
2	محل اتصال به موتور	7	فنرها
3	بازوی ROTFlex	8	بار اضافه
4	سنسور (Encoder) زاویه انحراف	9	ارتباط دهنده سنسور ها
5	محل اتصال فنر به بدنه		

آزمایش اول: مدل‌سازی سیستم روبات با مفصل نرم

برای آنکه بتوانیم رفتار یک سیستم را به درستی کنترل کنیم، ابتدا می‌بایست آن را با یک مدل ریاضی توصیف نماییم و پارامترهای آن را طی انجام یک سری آزمایش ها بدست آوریم که به این عمل شناسایی سیستم گفته می شود. سیستم‌های فیزیکی اکثرا با روابط ریاضی دینامیکی توصیف می‌گردند. روش‌های مختلفی برای مدلسازي این روابط وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش اویلر_ لاگرانژ اشاره نمود.

کاربرد مستقیم قوانین حرکت نیوتن براي حرکت سیستم هاي ساده، راحت و آسان است. اما در صورتي که تعداد ذرات سیستم بیشتر شود، در این صورت استفاده از قوانین نیوتن کار دشواري خواهد بود. در این حالت از يك روش عمومي، پیچیده و بسیار دقیق که به همت ریاضیدان فرانسوي ژوزف لویي لاگرانژ ابداع شده است استفاده مي شود. به این ترتیب مي توان معادلات حرکت براي تمام سیستم هاي دینامیکي را پیدا کرد. این روش چون نسبت به معادلات نیوتن حالت کلي تري دارد، در مورد حالت هاي ساده که با معادلات حرکت نیوتن به راحتي حل مي شود، نیز قابل اعمال است.

معادله لاگرانژ صورت دیگری از قانون نیوتون است. برای استفاده از قانون نیوتون ابتدا باید تمام نیروهای وارد بر سیستم در نظر گرفته شود و با در نظر گرفتن تعامل بین آنها و قوانین نیوتون روابط را بدست آورد. اما معادله لاگرانژ از دیدگاه انرژی مسائل را بررسی میکند. این معادله در واقع همان معادلات فیزیک کلاسیک است که پایداری تکانه و پایداری انرژی را با هم ترکیب می کند. این معادلات با در نظر گرفتن مختصات تعمیم یافته نوشته می شوند.

مدلسازي دینامیکي روبات با مفصل نرم

انعطاف پذیري مفصل باعث پیچیدگي مدلسازي بازوی ربات مي گردد. برای بدست آوردن معادلات حرکتي سیستم، ابتدا باید L (لاگرانژین) را به صورت زیر تعریف نمود.

$$L \triangleq T - U$$

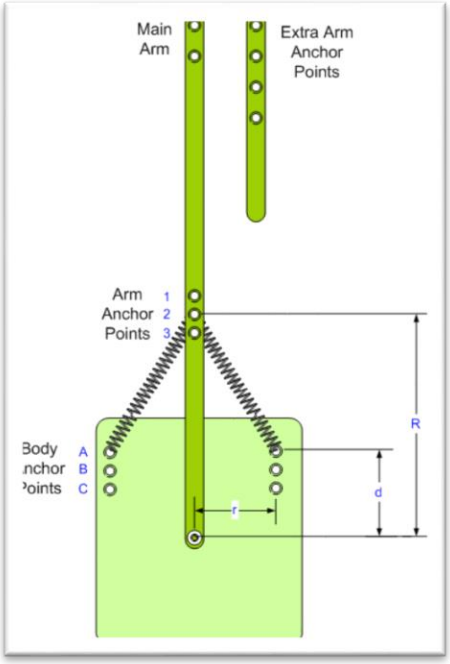
در این رابطه T بیانگر انرژی جنبشی سیستم و U بیانگر انرژی پتانسیل آن می‌باشد. در مرحله بعد با مشخص کردن مختصات تعمیم یافته برای سیستم، به معادلات لاگرانژ می رسیم:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j$$

در این رابطه q_j برابر است با هر یک از مختصه های تعمیم یافته و Q_j نیز برابر است با نیرو یا گشتاور خارجی وارد بر سیستم در راستای مختصه تعمیم یافته q_j.

نکته: مختصات تعمیم یافته در کل مفهوم پیچیده‌ای در علم مکانیک دارند، اما در مورد سیستم روبات با مفصل نرم این مختصات برابر با دو زاویه θ (زاویه شفت موتور)و α (زاویه انحراف بازو)در نظر گرفته می‌شوند.

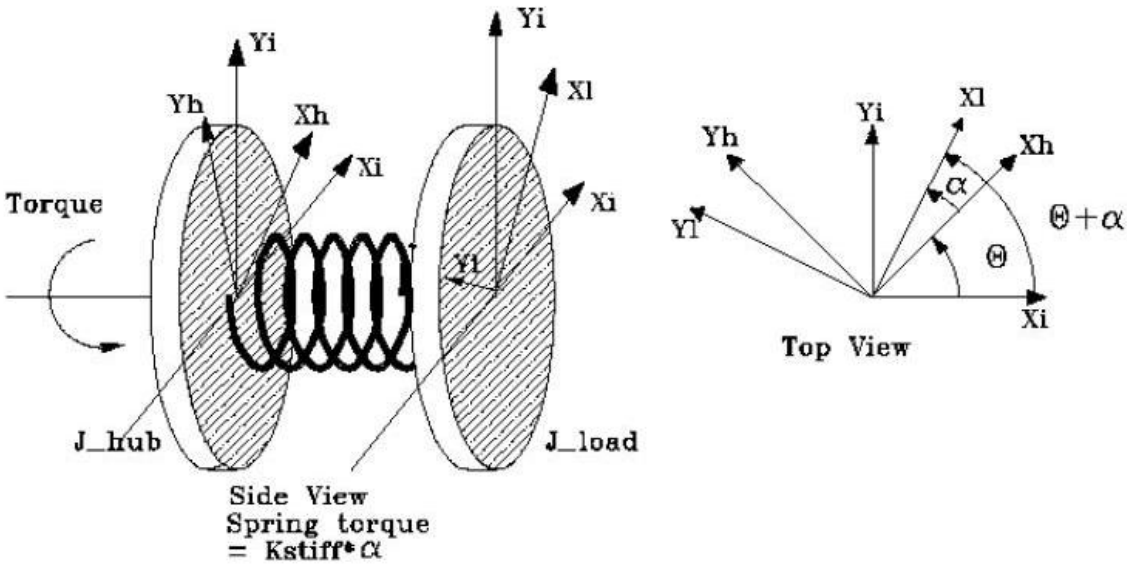
در شکل ذیل؛ شماتیک سیستم روبات با مفصل نرم را مشاهده می‌نمایید.



شماتیک سیستم روبات با مفصل نرم

توضیح	نشانه	توضیح	نشانه
طول فنرهای ۱و۲	L1,L2	فاصله مفصل تا محل اتصال فنرها به بازو	R
نیروی فنرهای ۱و۲	F1,F2	فاصله مفصل تا محل اتصال هر فنر به بدنه	D
ضریب سختی فنر	K	فاصله ی ثابت و برابر ۳/۱۸cm	R
طول اولیه فنرها	L	زاویه شفت موتور	θ
مقدار ممان	M	انحراف بازو (رادیان)	α

در ادامه این بخش با ساده‌سازی سیستم به صورت يك فنر چرخشي (Rotational Spring) و اعمال معادلات لاگرانژ سعی می‌کنیم تا معادلات دینامیکی حاکم بر آن را استخراج کنیم.

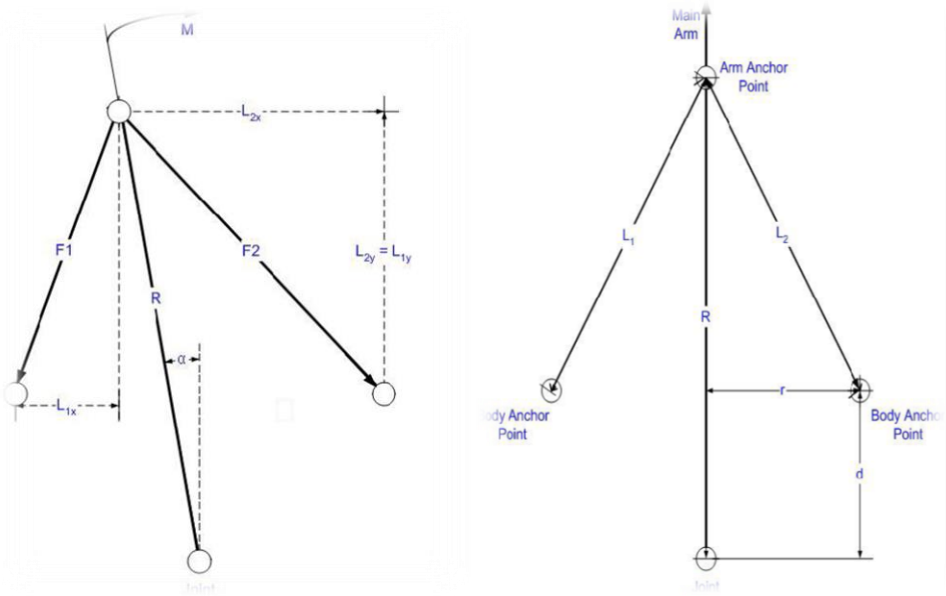


سیستم ساده شده به صورت فنر چرخشي

معادله حاکم بر یک فنر پیچشی در حالت کلی به صورت زیر خواهد بود.

$$M = K_{stiff}\alpha$$

که در این مدل K_{stiff} متناظر با ثابت فنر خواهد بود اما یک پارامتر ثابت نیست بلکه رابطه‌ی غیر خطی آن با α می‌تواند با تقریب خوبی سیستم اصلی یعنی مفصل نرم را مدلسازي کند. بدین ترتیب با بررسی معادلات دینامیکی سیستم سعی می‌کنیم تا K_{stiff} را محاسبه نماییم.



شکل راست : سیستم در حالت سکون، شکل چپ : سیستم در حال حرکت

همانطور که در شکل بالا مشخص است هنگام حرکت سیستم فنر سمت چپ در حال فشرده شدن و فنر دیگر در حال کشیده شدن می‌باشد برای بدست آوردن مدل سیستم ابتدا معادلات مربوط به طول فنرها را بدست می آوریم.

$$L_{۱x} = r - R\sin(\alpha)$$
$$L_{۱y} = R\cos(\alpha) - d$$
$$L_{۱x} = r + R\sin(\alpha)$$
$$L_{۲y} = L_{۱y} = R\cos(\alpha) - d$$
$$L_{۱} = \sqrt{L_{۱x}^{۲} + L_{۱y}^{۲}}$$
$$L_{۲} = \sqrt{L_{۲x}^{۲} + L_{۲y}^{۲}}$$

سپس نیروی هر فنر را می نویسیم:

$$F_{۱} = K(L_{۱} - L) + F_r$$
$$F_{۲} = K(L_{۲} - L) + F_r$$
$$F_{۱x} = F_{۱}\frac{L_{۱x}}{L_{۱}}$$
$$F_{۱y} = F_{۱}\frac{L_{۱y}}{L_{۱}}$$
$$F_{۲x} = F_{۲}\frac{L_{۲x}}{L_{۲}}$$
$$F_{۲y} = F_{۲}\frac{L_{۲y}}{L_{۲}}$$

نکته: F_r نیروی بازگرداننده طبیعی فنر است، زیرا فنرها در حالت سکون مفصل نرم نیز نیرویی را وارد می‌کنند.

با توجه به شکل بالا درمیابیم که $F_۱$ و $F_۲$ هر دو بر محل اتصال فنرها به بازو وارد می شوند. همان طور که می بینیم المان هایی که در راستای محور X قرار دارند ،در خلاف جهت هم و المان هایی که در راستای محور Y قرار دارند در جهت هم عمل می کنند. پس داریم:

$$F_x = F_{۲x} - F_{۱x}$$
$$F_y = F_{۲y} + F_{۱y}$$

در نهایت این دو نیرو بر محل اتصال فنرها به بازو (Anchor Point) وارد می شوند و تمایل دارند که بازو را به مکان اولیه بازو برگردانند. این دو نیرو گشتاوری حول مفصل (Joint) بوجود می آورند. همان طور که می دانیم این گشتاور برابر است با ضرب داخلی R (فاصله مفصل تا محل اتصال فنرها به بازو) و برآیند نیروهایی که به نقطه اتصال فنر و بازو وارد می‌شوند. پس معادلات و در نهایت گشتاوری که بازو را به مکان اولیه پس می راند به صورت زیر بدست می آیند:

$$M_x = R_x F_x = R F_x \sin\left(\frac{\pi}{۲} - \alpha\right) = R F_x \cos\alpha$$
$$M_y = R_x F_y = RF_y \sin(۲\pi - \alpha) = -RF_y \sin\alpha$$
$$M = M_x + M_y = R\cos\alpha\,(F_{۲x} - F_{۱x}) - R\sin\alpha\,(F_{۲y} + F_{۱y})$$

همچنین مشاهده می‌شود که با داشتن M می‌توان به راحتی K_{stiff} را محاسبه نمود. برای ساده-سازی سیستم، از خطی‌سازی مرتبه اول استفاده می‌کنیم و K_{stiff} را به صورت زیر محاسبه می‌نماییم.

$$K_{stiff} = \left(\frac{\partial}{\partial\alpha} M\right)\Big|_{\alpha=۰}$$

سوال: معادله نهایی توصیف کننده K_{stiff} را بدست آورید.

سوال: با فرض در دسترس بودن ممان چرخشی بدنه و همچنین ممان چرخشی بازو (J_{hub} و J_{arm}) انرژی پتانسیل و جنبشی کلی سیستم را محاسبه نمایید.

با قرار دادن هریک از مختصات تعمیم یافته (θ و α) در معادله لاگرانژ معادلات زیر را محاسبه می‌کنیم.

$$\frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta L}{\delta\dot{\theta}}\right) - \frac{\delta L}{\delta\theta} = T_{output} - B_{eq}\dot{\theta}$$
$$\frac{\delta}{\delta t}\left(\frac{\delta L}{\delta\dot{\alpha}}\right) - \frac{\delta L}{\delta\alpha} = ۰$$

نکته: T_{output} برابر گشتاور اعمالی از طرف موتور می‌باشد و رابطه آن با ولتاژ اعمالی به موتور (V_m) به صورت زیر توصیف می‌گردد که پارامترهای آن همگی اعداد ثابت هستند.

با اعمال معادلات اویلر_لاگرانژ به این سیستم، می‌توانیم معادلات دینامیکی حاکم بر آن و در نهایت معادلات دینامیکی حاکم بر روبات با مفصل نرم را به صورت زیر بدست آوریم.

$$J_{eq}\ddot{\theta} + J_{Arm}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) = T_{output} - B_{eq}\dot{\theta}$$
$$J_{Arm}(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + K_{stiff}\alpha = ۰$$

لذا می‌توان نوشت:

$$T_{output} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g (V_m - K_g K_m \dot{\theta})}{R_m}$$

J_{eq}	0.0021	B_{eq}	0.0040
J_{Arm}	0.0019	K_{stiff}	1.2485

η_m	0.69	K_g	70
η_g	0.9	R_m	2.6
$K_t = K_m$	0.00767		

سوال: ترم $B_{eq}\dot{\theta}$ بیانگر چه پارامتری در سیستم می‌باشد؟

سوال: با استفاده از معادلات دینامیکی نهایی سیستم و با در نظر گرفتن فرم فضای حالت زیر به صورت زیر ماتریس‌های توصیف فضای حالت برای سیستم مفصل نرم را به دست آورید (خروجی سیستم شامل هر دو حالت θ و α باشد).

$$x \triangleq \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = Ax + B\,V_m$$
$$Y = Cx$$

همانطور که مشاهده می کنید این سیستم دو دسته متغیر حالت دارد: theta و مشتق آن و alpha و مشتق آن. در این آزمایش تنها زاویه theta کنترل می شود. اما کنترل کننده باید طوری طراحی شود که زاویه alpha که کنترل مستقیمی روی آن نیست نوسانات زیادی نداشته باشد.

سوال: با استفاده از ماتریس A قطب‌های سیستم را مشخص و رسم کنید.

سوال: پس از یافتن فضای حالت، تابع تبدیل $\frac{\alpha(s)}{V_m(s)}$ و $\frac{\theta(s)}{V_m(s)}$ را بدست آورده و پاسخ ضربه و پله هریک از این توابع تبدیل را رسم نمایید.

سوال: آیا در این سیستم قطب‌ها و مقادیر ویژه برابرند؟ توضیح دهید.

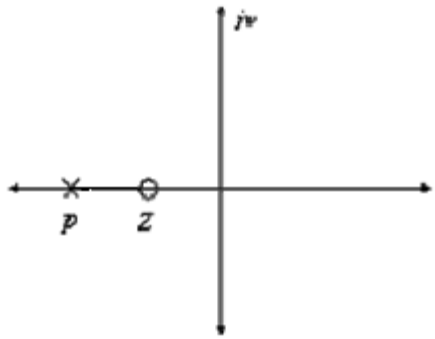
آزمایش دوم: طراحی کنترل کننده lead برای کنترل رفتار مفصل نرم

پس از بدست آوردن معادلات فضای حالت بازو با مفصل نرم و همچنین تابع تبدیل $\frac{\theta(s)}{V_m(s)}$ در این قسمت باید کنترل کننده کننده‌ای طراحی کنید که پاسخ سیستم $\frac{\theta(s)}{V_m(s)}$ را به شرایط مطلوب ما نزدیک کند. بدین منظور در بخش اول این آزمایش سیستم را شبیه‌سازی نموده و یک کنترل کننده Lead برای آن طراحی کنید. سپس این کنترل کننده را بر روی مدل واقعی سیستم ارزیابی کنید.

معرفی کنترل کننده Lead در حوزه‌ی فرکانس

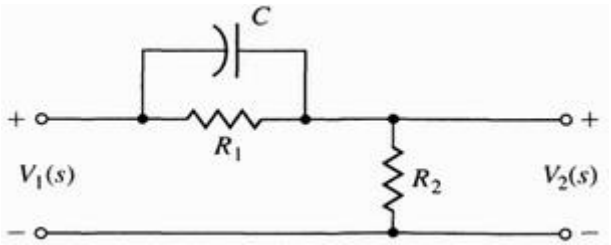
همان طور که می‌دانید جبرانساز PD علاوه بر مشکل تحقق دقیق، ورود نویز به سیستم را تسهیل می نماید. این مشکل با اضافه کردن یک قطب به جبرانساز PD بدین ترتیب رفع می شود.

$$G_c(s) = K\frac{s+Z}{s+P} \quad , |P| > |Z|$$



کنترل کننده Lead

جبرانسازی که بدین ترتیب شکل می گیرد جبرانساز پیشفاز Lead نام دارد. جبرانساز Lead برای بهبود پاسخ حالت گذرا به کار می رود و دارای فاز مثبت است که این امر موجب افزایش پایداری نسبی سیستم می گردد. این جبرانساز در فرکانس های بالا به سیستم گین و فاز اضافه می کند که اضافه کردن بهره برای ما مطلوب نبوده ولی اضافه شدن فاز مفید می باشد. چرا؟

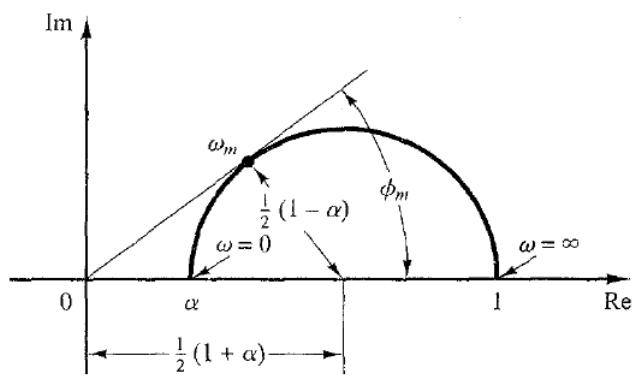


جبرانساز Lead همانند یک فیلتر بالاگذر عمل می‌کند.

طراحی در حوزه فرکانس به‌کمک پاسخ فرکانسی حلقه و به‌کمک نمودار Bode انجام می‌گیرد. کنترلر مدنظر را به شکل زیر در نظر بگیرید که در آن باید پارامترهای مجهول را پیدا کنید.

$$G_c(s) = K_c\alpha\frac{Ts+۱}{\alpha Ts+۱} = K_c\frac{s+\frac{۱}{T}}{s+\frac{۱}{\alpha T}} \qquad ۰ < \alpha < ۱$$

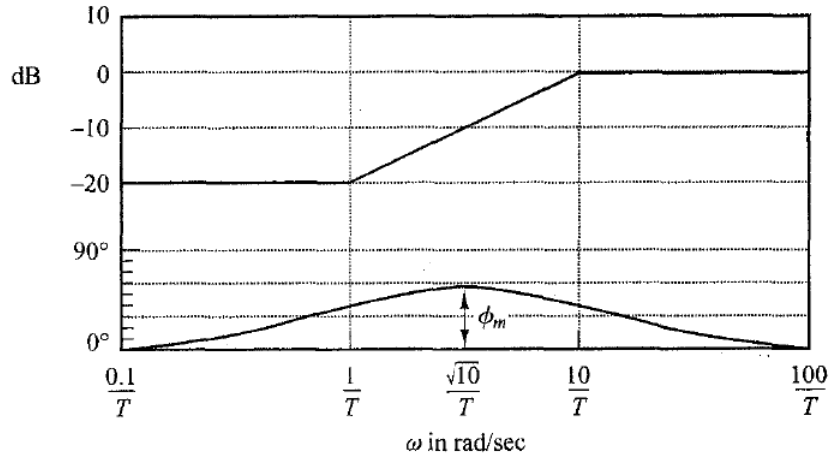
قطب این کنترلر همواره در سمت چپ صفر قرار می‌گیرد که با افزایش α این قطب به صفر نزدیک می‌شود. در ساخت عملی این کنترلر محدودیت‌هایی وجود دارد که سبب می‌شود برای پارامتر α معمولا یک مقدار کمینه در نظر گرفته شود، این مقدار کمینه معمولا برابر ۰/۰۵ می‌باشد که بیانگر این است که بیشترین فازی که یک کنترلر Lead می‌تواند تولید کند تقریبا برابر ٦٥ درجه خواهد بود. اگر برای کنترلر ذکر شده با فرض $K_c = ۱$، منحنی قطبی را رسم کنید، شکل زیر حاصل خواهد شد.



که در آن ϕ_m بیانگر بیشینه فازی است که کنترلر به ازای یک مقدار مشخص از α می‌تواند تولید کند همچنین ω_m بیانگر فرکانسی است که این بیشینه فاز در آن حاصل می‌شود. توجه داشته باشید که منحنی ترسیم شده در شکل فوق یک نیم‌دایره می‌باشد. بنابراین

$$\sin(\phi_m) = \frac{\frac{۱-\alpha}{۲}}{\frac{۱+\alpha}{۲}} = \frac{۱-\alpha}{۱+\alpha}$$

با در نظر گرفتن $K_c = ۱$ و $\alpha = ۰.۱$ می‌توان دیاگرام بود را برای کنترلر فوق به شکل زیر رسم نمود.



با بررسی این شکل متوجه خواهید شد که ω_m برابر با میانگین هندسی فرکانس قطب و صفر کنترلر می‌باشد به عبارتی دیگر:

$$\log \omega_m = \frac{۱}{۲}\left(\log\frac{۱}{T} + \log\frac{۱}{\alpha T}\right) \Rightarrow \omega_m = \frac{۱}{\sqrt{\alpha}T}$$

شرح آزمایش

یک کنترل‌کننده Lead در حوزه فرکانس طراحی کنید که شرایط زیر را برآورده سازد:

- $PM_{desired} = ۷۰^\circ$
- $K_v = ۱۰$
- در نهایت کنترلر بدست آمده را طوری تنظیم کنید که پهنای باند سیستم حلقه بسته نزدیک به ۵ rad/sec باشد.

روند طراحی

به منظور ساده‌تر شدن پارامترها، تساوی $K \triangleq K_c\alpha$ را در نظر بگیرید.

با استفاده از پارامترهای ثابت خطای حالت دائم همچون K_v، K_p و ... بهره کنترلر (K) را محاسبه نمایید. به عنوان مثال:

$$K_v = \lim_{s\to ۰} sG(s)G_c(s)$$

با رسم نمودار بود برای سیستم KG(s) میزان P.M را برای آن به‌دست آورده سپس با مقایسه این عدد با مقدار مطلوب P.M، میزان زاویه‌ای را که کنترلر باید تامین کند به‌دست آورید، به عبارتی دیگر

$$\phi_m = P.M_{desired} - P.M_{KG(s)} + ۵^\circ$$

سوال: دلیل افزودن 5° به میزان تحلیلی به‌دست آمده را توضیح دهید.

حال با توجه به روابط ذکر شده در بخش قبل پارامترهای α و K_c قابل محاسبه هستند. بدین ترتیب تا این مرحله میزان فازی که کنترلر باید تامین کند کاملا مشخص شده است، اما این مقدار فاز در یک فرکانس خاص تولید می‌شود و که این فرکانس می‌بایست در Gain Crossover Frequency قرار داشته باشد. اما با مراجعه به شکل نمودار بود کنترل‌کننده متوجه می‌شوید که در فرکانس ω_m کنترلر علاوه بر افزودن فاز، مقداری گین نیز به سیستم اضافه می‌کند. این گین اضافه شده باعث تغییر Gain Crossover Frequency شده و در نتیجه فاز تامین شده توسط کنترلر در نقطه مدنظر قرار نخواهد گرفت. از این رو ابتدا باید اندازه کنترلر را در فرکانس ω_m که برابر با گین اضافه شده به سیستم می‌باشد را حساب کنید:

$$\left|\frac{1+j\omega T}{1+j\omega\alpha T}\right|_{\omega=\frac{1}{\sqrt{\alpha}T}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} = -10\log\alpha$$

سوال: چرا در محاسبه اندازه کنترلر در رابطه فوق پارامتر K در محاسبه دخیل نشد؟

در نتیجه اندازه دیاگرام بود سیستم حلقه باز $KG(s)G_c(s)$ در فرکانس ω_m به اندازه‌ی $-10\log\alpha$ شیفت می‌یابد. برای جبران این تغییر، فرکانسی را که در آن اندازه سیستم $KG(j\omega)$ به $+10\log\alpha$ می‌رسد را Gain Crossover Frequency جدید ($\omega_{GCF,new}$) بنامید تا تغییر اندازه سیستم $KG(s)G_c(s)$ در این فرکانس (فرکانسی که P.M در آن محاسبه می‌شود) جبران شود. در نتیجه

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{\alpha}T} = \omega_{GCF,new}$$

در نتیجه با استفاده از رابطه فوق سایر پارامترهای مجهول کنترلر نیز محاسبه خواهند شد.
پس از طراحي کنترل کننده خود می‌توانید آن را بر روی سیستم شبیه‌سازی شده تست نمایید.

نتیجه گیري

۱- پاسخ سیستم حلقه بسته (θ و α) را به ورودی پله رسم کنید و بیشینه انحراف α، زمان نشست، زمان صعود (Rise Time) و درصد بالازدگي (Percent Of Overshoot) سیستم حلقه بسته را محاسبه نمایید.

۲- علت بروز تفاوت احتمالي بين پاسخ شبيه‌سازي و پاسخ عملي را توضيح دهيد.
۳- کنترل کننده Lead چه مزایایی نسبت به کنترل کننده PD دارد؟

آزمایش سوم: طراحی کنترل کننده‌های Lag و Laed-Lag برای کنترل رفتار مفصل نرم

قسمت اول: کنترل کننده Lag

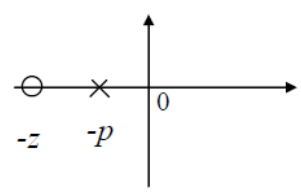
از دلایل استفاده از کنترلر PI کاهش خطای حالت دائم و افزایش ثوابت خطا می باشد و کنترلر Lag تقریبی از PI است بطوری که توسط المان های پسیو قابل تحقق است. بطور کلی هدف از طراحی جبرانساز Lag در حوزه ی فرکانس رسیدن به حالت دائمی و حاشیه فاز مطلوب می باشد در عین حال که شرایط گذرا را دستخوش تغییر ننماید.

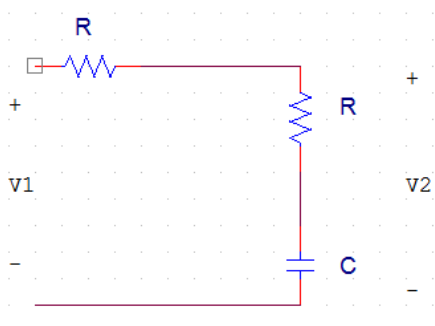
جبرانساز Lag دارای مشخصه ی پایین گذر بوده (مانند فیلتر پائین گذر) بطوری که قطب آن نسبت به صفرش به محور $j\omega$ نزدیکتر است.

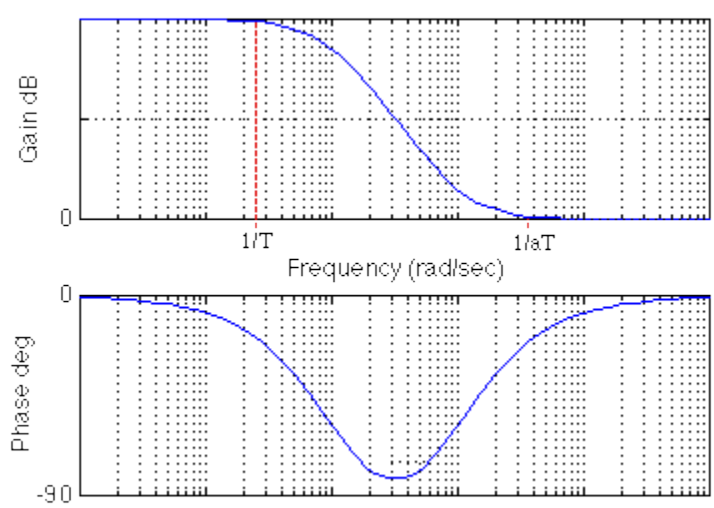
فرم های کلی این جبرانساز:

$$G_{Lag} = K_c\left[\frac{1}{\alpha}\frac{s+z_c}{s+p_c}\right] = K_c\left[\frac{s/z_c+1}{s/p_c+1}\right] = K_c\left[\frac{\tau s+1}{\alpha\tau s+1}\right]$$

$$z_c > 0 \qquad p_c > 0 \qquad \alpha \triangleq \frac{z_c}{p_c} > 1 \qquad \tau = \frac{1}{z_c} = \frac{1}{\alpha p_c}$$







تاثیرات جبرانساز Lag بر روی عملکرد سیستم حلقه بسته

- کاهش پهنای باند: معمولا معادل افزایش زمان صعود و نشست بوده و در نهایت منجر به کاهش نویزپذیری(فرکانس بالا) می شود. علت را توضیح دهید؟
- کاهش گین پیرامون فرکانس عبور بهره ی صفر (فرکانسی که در آن حاشیه فاز محاسبه می‌شود) که باعث افزایش پایداری نسبی سیستم شده ولی سیستم را کندتر خواهد کرد. چرا؟
- افزایش ثوابت خطا یعنی در واقع کاهش خطای حالت ماندگار. علت را توضیح دهید ؟

نکته: هرسیستم تنها یک ثابت خطای محدود (مخالف صفر و بی نهایت) دارد.

شرح آزمایش

با توجه به آزمایش قبل ، هدف بهبودی خطای حالت ماندگار با ضریب ٥ و نسبت میرایی معادل ٠/٤٨٦ می باشد.

روند طراحی

الف) محاسبه گین جبرانساز

اولین مرحله در طراحی چنین جبرانسازی محاسبه گین آن بنه حوی است که خطای حالت ماندگار مطلوب ارضا گردد.

$$K_c = \frac{e_{ss-plant}}{e_{ss-specified}} = \frac{K_{x-requierd}}{K_{x-plant}}$$

$$K_x = \lim_{s \to ٠} S^N . G(s)$$

ب) حال با توجه به گین بدست آمده نمودار بود سیستم $K_c . G(s)$ را رسم کنید. حال با توجه به حاشیه ی فاز مطلوب داده شده (توجه شود که گاها بجای حاشیه فاز مطلوب، میزان درصد بالازدگی و یا نسبت میرائی داده می شود) میزان زاویه ای که جبرانساز Lag می بایست تامین کند را بدست آورید. رابطه میان نسبت میرایی و حاشیه فاز را بیابید.

$$PM_{lag} = PM_{desired} + \varphi$$

ترم آخر عبارت بالا فاکتور تصحیح بوده و $۵^\circ \leq \varphi \leq ۱۲^\circ$. علت افزودن فاکتور تصحیح چیست؟

ج) حال فرکانسی را که PM_{lag} حاصل می شود را بدست آورید. (ω_g) ، و بدیهی است که هدف این است که در این فرکانس نمودار اندازه ؟؟۰ باید باشد، لذا با پارامتر α ،این مهم را برآورده می‌شود.

د) اندازه بودی سیستم را در فرکانس (ω_g) بدست آورید. حال جبرانساز Lag می بایست قرینه ی این اندازه را تولید نماید.

یعنی:

$$\alpha = ۱۰^{\frac{|K_c.G(\omega_g)|_{dB}}{۲۰}}$$

نکته قابل تذکر در این مرحله مقدار α می باشد که گاها این مقدار برای یک جبرانساز تک مرحله مقدار بزرگی است یعنی مقادیر مقاومت و خازن مورد نیاز برای پیاده سازی این جبرانساز با مقدارα افرایش می یابد در واقع در بسیاری از مراجع $\alpha \leq ۱۰$ برای یک جبرانساز تک مرحله ای مناسب است.

سوال: روند طراحی جبرانساز Lag چند مرحله ای را تحقیق کنید.

هـ) مرحله نهایی یافتن p_c و z_c می باشد . ابتدا z_c را یک دهه زیر فرکانس عبور بهره قرار دهید. چرا؟

حال با توجه به رابطه $\alpha \triangleq \frac{z_c}{p_c}$ قطب جبرانساز مشخص خواهد شد.

قسمت دوم: کنترلر Lag-Lead

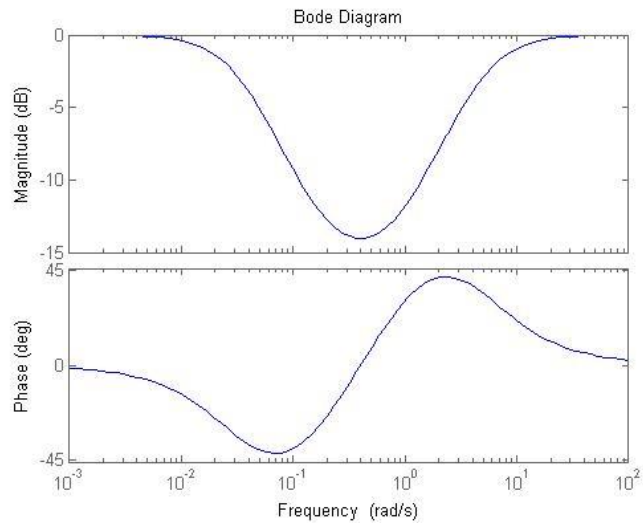
در این کنترلر ابتدا Lead را برای بهبود پاسخ حالت گذرا طراحی نموده و در نهایت برای بهبود خطای حالت دائم کنترلر پس فاز طراحی می شود. مشخصه حاشیه فاز بیانگر پایداری نسبی سیستم ناشی از تاخیر خالص در سیستم یا بیانگر مشخصه پاسخ گذرای مطلوب است و پهنای باند (بطور معادل فرکانس عبور بهره) در حوزه زمان بیانگر سرعت پاسخ و در حوزه فرکانس بیانگر این خواهد بود که چه فرکانس های از سیگنالهای سینوسی بدون میرایی قابل توجهی از سیستم عبور داده خواهند شد. رابطه سرانگشتی میان پهنای باند و فرکانس عبور بهره به صورت زیر است.

$$\omega_{BW} \approx ۱.٦\ \omega_g$$

فرم کلی این جبرانساز:

$$G_{Lag-Lead} = K_c\left[\frac{۱}{\alpha_{Lag}}\frac{s+z_{Lag}}{s+p_{Lag}}\right]\left[\frac{۱}{\alpha_{Lead}}\frac{s+z_{Lead}}{s+p_{Lead}}\right] = K_c\left[\frac{s/z_{Lag}+۱}{s/p_{Lag}+۱}\right]\left[\frac{s/z_{Lead}+۱}{s/p_{Lead}+۱}\right]$$
$$= K_c\left[\frac{\tau_{Lag}s+۱}{\alpha_{Lag}\tau_{Lag}s+۱}\right]\left[\frac{\tau_{Lead}s+۱}{\alpha_{Lead}\tau_{Lead}s+۱}\right]$$

$$z_{Lag} > ۰ \qquad p_{Lag} > ۰ \qquad \alpha_{Lag} \triangleq \frac{z_{Lag}}{p_{Lag}} > ۱ \qquad \tau_{Lag} = \frac{۱}{z_{Lag}} = \frac{۱}{\alpha_{Lag}p_{Lag}}$$
$$z_{Lead} > ۰ \qquad p_{Lead} > ۰ \qquad \alpha_{Lead} \triangleq \frac{z_{Lead}}{p_{Lead}} < ۱ \qquad \tau_{Lead} = \frac{۱}{z_{Lead}} = \frac{۱}{\alpha_{Lag}p_{Lead}}$$



نمودار بود مربوط به جبرانساز Lag-Lead

$$z_{Lead} = ۰.۸ \quad p_{Lead} = ۵ \quad K_c = ۱ \quad z_{Lag} = ۰.۲ \quad p_{Lag} = ۰.۰۳۲$$

شرح آزمایش

با توجه به آزمایش قسمت اول ، هدف بهبود خطای حالت ماندگار با ضریب ۵ ، حاشیه فاز ۸۰° و فرکانس عبور بهره ی $۵\,\frac{rad}{sec}$ می باشد.

روند طراحی

الف) محاسبه گین جبرانساز

اولین مرحله در طراحی چنین جبرانسازی محاسبه گین آن به نحوی است که خطای حالت ماندگار مطلوب ارضا گردد.

$$K_c = \frac{e_{ss-plant}}{e_{ss-specified}} = \frac{K_{x-requierd}}{K_{x-plant}}$$

$$K_x = \lim_{s \to ۰} S^N . G(s)$$

ب) حال با توجه به گین بدست آمده نمودار بود سیستم $K_c . G(s)$ را رسم کنید. با توجه به پهنای باند داده شده و یا فرکانس عبور بهره ی مطلوب ω_g ، میزان فاز θ را در این فرکانس، از نمودار بود $K_c . G(s)$ بدست می آید.

$$PM_{uncompensated} = +۱۸۰^{\circ} + \theta$$

ج) در این مرحله از طراحی جبرانساز Lead منحنی فاز را در فرکانس عبور بهره را با توجه به φ_{max} به سمت بالا حرکت می دهد.

$$\varphi_{max} = PM_{desired} + \varphi - PM_{uncompensated}$$

حال برای بدست اوردن α_{Lead} از رابطه زیر استفاده کنید:

$$\alpha_{Lead} = \frac{۱ - \sin\ \varphi_{max}}{۱ + \sin\ \varphi_{max}}$$

دقت شود که برای $\varphi_{max} \approx ۵۵^{\circ} \equiv \alpha_{Lead} > ۰.۱$ طراحی چند مرحله ای جبرانساز Lead مورد نیاز است.

سوال: نحوه طراحی جبرانساز چند مرحله ای Lead را بیابید.

سپس صفر و قطب جبرانساز lead را باید تعیین کنید.

$$z_{Lead} = \omega_g \sqrt{\alpha_{Lead}}$$
$$\alpha_{Lead} = \frac{z_{Lead}}{p_{Lead}}$$

در ضمن جبرانسازlead را بصورت $G_{Lead} = K_c \left[\frac{۱}{\alpha_{Lead}} \frac{s+z_{Lead}}{s+p_{Lead}}\right]$ در نظر بگیرید.

د) منحنی اندازه با توجه به اندازه جبرانساز lead در فرکانس عبور بهره مطلوب ω_g به سمت بالا جابجا می شود ، لذا لازم است با α_{Lag} منحنی اندازه را بگونه ای جابجا کنید تا در فرکانس عبور بهره‌ی مطلوب ω_g ، اندازه ۰ گردد.

اندازه $\left|G_{Lead}(j\omega_g) . G_p(j\omega_g)\right|_{dB}$ را با توجه به نمودار بود بدست آورید.

$$\alpha_{Lag} = ۱۰^{\frac{\left|G_{Lead}(j\omega_g) . G_p(j\omega_g)\right|_{dB}}{۲۰}}$$

هـ) در مرحله آخر هم صفر و قطب جبرانساز lag را تعیین می‌شود. ابتدا z_{Lag} را یک دهه زیر فرکانس عبور بهره قرار می دهیم. چرا؟ حال با توجه به رابطه $\alpha_{Lag} \triangleq \frac{z_{Lag}}{p_{Lag}}$ قطب جبرانساز مشخص خواهد شد.

آزمایش چهارم: طراحی کنترل کننده با روش فیدبك حالت (State Feedback)

یکی از نخستین کاربردهای فضای حالت در سیستم های خطی، استفاده از یک ابزار بسیار قدرتمند به نام فیدبک حالت، برای جابه جایی مقادیر ویژه سیستم در طراحی سیستم های کنترلی می باشد. ج.برترام در سال ۱۹۵۹ اولین کسی بود که نشان داد اگر سیستمی تحقق کنترل پذیر داشته باشد، می توان هر معادله مشخصه مطلوبی را با فیدبک حالت بدست آورد و قطب ها را در مکان های مناسب منتقل نمود. در سال ۱۹٦۲ روزنبراک ،استفاده از فیدبک حالت را برای انتقال مقادیر ویژه سیستم، جهت بدست آوردن مشخصه های بهتر پاسخ مورد بحث قرار داده است.

می دانیم که نوع پاسخ زمانی توسط مقادیر ویژه ماتریس A تعیین می شود و اگر یک یا چند مقدار ویژه A در RHP باشد یا حتی در LHP بوده و میرایی کمی داشته باشد پاسخ زمانی سیستم نامطلوب می باشد. در این قسمت با طراحی فیدبک حالت برای پایدارسازی و بهبود عملکرد سیستم های خطی آشنا خواهیم شد.

پس از بدست آوردن معادلات فضای حالت سیستم مفصل نرم قصد داریم تا با فیدبك گرفتن از تمامي حالت‌هاي سيستم (States) کنترل‌کننده‌اي را طراحي کنيم که بتواند زاويه θ را کنترل نموده و همزمان مانع افزايش بيش از حد زاويه α گردد. بدين منظور در اين آزمايش سيستم را شبيه‌سازی نموده و یک کنترل کننده State Feedback برای آن طراحی می‌نماییم سپس این کنترلر را بر روی مدل واقعی سیستم تست خواهیم کرد.

هدف طراحی کنترل کننده‌ای می‌باشد که بتواند شرایط زیر را برای سیستم حلقه بسته فراهم آورد:

- زمان صعود کمتر از ۲۵۰ ميلي‌ثانيه
- Percent of overshoot کمتر از ۵ درصد
- بيشينه ميزان زاويه انحراف α کمتر از ۱۰ درجه
- خطای حالت ماندگار کمتر از ۲ درجه

روش جايگذاري قطب (Pole Placement)

قبل از پرداختن به روش جايگذاري قطب ابتدا با مفهوم کنترل‌پذيري براي يك سيستم ديناميكي آشنا مي‌شويم. در اواسط دهه ۱۹۵۰ ،کالمن با معرفی ایده های کنترل پذیری و رویت پذیری، برای اولین بار توانست دلایل عدم موفقیت جبران سازی حذف قطب ناپایدار سیستم با صفر ناپایدار جبران کننده را توضیح دهد .اگرچه قبل از کالمن نیز طراحان سیستم های کنترل در عمل به این نتیجه رسیده بودند که حتی با فرض حذف کامل قطب ناپایدار سیستم توسط صفر

ناپایدار جبران کننده ،سیستم کنترل طراحی شده ناموفق خواهد بود ولی کالمن نشان داد که حذف قطب ـ صفر کامل،تنها به سیستمی منجر خواهد شد که تابع تبدیل پایداری دارد.
در این حالت ،تابع تبدیل مرتبه ای کمتر از مرتبه سیستم خواهد داشت و مودهای ناپایدار یا از ورودی سیستم تاثیر نمی پذیرند (کنترل ناپذیرند) و یا در خروجی سیستم مشاهده نخواهند شد (رویت ناپذیرند).
يك سيستم كنترل‌پذير ناميده مي‌شود هنگامي كه بتوان تمام قطب‌هاي آن را از طريق فيدبك حالت در مكان دلخواه قرار داد. يك روش معمول براي پي‌بردن به كنترل‌پذيري سيستم استفاده از Rank ماتريس كنترل‌پذيري (C_{AB}) مي‌باشد. اين ماتريس براي يك سيستم با چهار متغير حالت به صورت زير تعريف مي‌گردد.

$$C_{AB} = [B \quad AB \quad A^{۲}B \quad A^{۳}B]$$

در اين صورت سيستم متناظر با ماتريس‌هاي حالت A و B كنترل‌پذير ناميده مي‌شود اگر و فقط اگر :

$$\mathrm{rank}(C_{AB}) = n$$

كه در آن n تعداد حالت‌هاي سيستم است كه در مورد سيستم بازو با مفصل نرم برابر با ٤ مي‌باشد.

سوال: كنترل‌پذيري سيستم مفصل نرم را بررسي نماييد.

فيدبك حالت (State Feedback)

اين كنترل كننده با اعمال ورودي به سيستم به فرم معادله زير سعي مي‌كند تا قطب‌هاي سيستم را در محل مطلوب خود جاي داده و در نهايت پاسخ زماني مطلوب را به دست آورد.

$$u = -Kx(t) \quad , \quad K = [K_\theta \quad K_\alpha \quad K_{\dot\theta} \quad K_{\dot\alpha}]$$

با اعمال اين ورودي، سيستم حلقه بسته به فرم زير به‌دست مي‌آيد.

$$\dot{x} = (A - BK)x(t)$$

بدين ترتيب ديناميك سيستم حلقه بسته، و به همراه آن پايداري سيستم حلقه بسته و در نهايت شكل پاسخ پله سيستم، به طور كامل توسط ترم $A - BK$ تعيين مي‌شود. قطب‌هاي سيستم حلقه بسته در اين شرايط مقادير ويژه ماتريس $A - BK$ خواهند بود كه از رابطه زير قابل محاسبه هستند.

$$p(s) = \det(sI - A + BK) = ۰$$

$p(s)$ معادله مشخصه سيستم ناميده ميشود. هدف از طراحي كنترل‌كننده فيدبك حالت به دست آوردن بردار K به نحوي است كه بتواند براي قطب‌هاي مطلوب $\lambda_۱$، $\lambda_۲$، $\lambda_۳$ و $\lambda_٤$ معادله زير را برآورده سازد.

$$p(s) = r(s) = (s - \lambda_۱)(s - \lambda_۲)(s - \lambda_۳)(s - \lambda_٤)$$

از آنجا كه به‌دست آوردن اين ماتريس، فراتر از مباحث مطرح شده در درس كنترل خطي مي‌باشد در اينجا تنها به دستور متناظر با آن در نرم افزار MATLAB® اشاره مي‌كنيم. با استفاده از دو دستور place و acker در اين نرم افزار، ميتوان بردار K را به راحتي محاسبه نمود، ورودي‌هاي اين دو دستور ماتريس‌هاي A، B و محل قطب‌هاي مطلوب مي‌باشد. براي آشنايي بيشتر با اين دستورات به قسمت Help نرم‌افزار مراجعه نماييد.

شرح آزمايش

- قطب‌هاي سيستم حلقه باز را بدست آورده و نمودار Root-Locus را براي سيستم حلقه باز $\frac{\theta(s)}{V_m(s)}$ ترسيم نماييد و قطب‌هاي غالب سيستم را نيز مشخص نماييد.
- با توجه به خواسته‌هاي مطلوب، تابع تبديل استاندارد درجه ۲ را براي سيستم حلقه بسته بدست آوريد.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^۲}{s^۲ + ۲\zeta\omega_n s + \omega_n^۲}$$

- چگونه مي‌توان اين سيستم درجه ۲ را با سيستم درجه ٤ مفصل نرم متناظر دانست؟
- تعيين كنيد كه هريك از ٤ قطب سيستم حلقه بسته مفصل نرم در كجاي صفحه s قرار گيرند تا خواسته‌هاي مطلوب مسئله برآورده گردد.
- با بدست‌آوردن محل قطب‌هاي مطلوب و همچنين ماتريس‌هاي A و B از دستورات نرم‌افزار MATLAB® كمك گرفته تا ضرايب كنترل كننده فيدبك حالت (بردار K) را محاسبه نماييد.
- كنترل كننده خود را شبيه‌سازی كنيد و در صورت برآورده نشدن خواسته‌هاي مطلوب، محل قطب‌هاي مطلوب را تغيير دهيد و ضرايب كنترل كننده را مجددا محاسبه كنيد.

نتيجه گيري

۱ ـ پاسخ سيستم حلقه بسته (θ و α) را به ورودی پله رسم کنيد و بيشينه انحراف α، زمان نشست، زمان صعود (Rise Time) و درصد بالازدگي (Percent Of Overshoot) سيستم حلقه بسته را محاسبه نماييد.

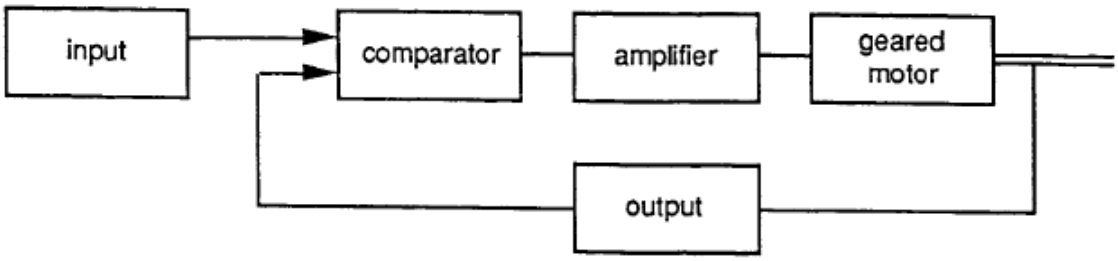
۲ ـ علت بروز تفاوت احتمالي بين پاسخ شبيه‌سازي و پاسخ عملي را توضيح دهيد.

بخش چهارم
پیاده‌سازی آنالوگ
کنترل‌کننده‌ها

مقدمه

سيستم سرو موتور MS150 يك سيستم كنترل داراي فيدبک است كه به منظور كنترل وضعيت (سرعت و يا موقعيت) يك موتور DC به كار مي رود. اين دستگاه ساختار ماجولار دارد كه در ادامه درباره هر يك توضيحات لازم ارائه خواهد شد.

از آنجايي كه سيستم قادر است تا اطلاعات وضعيت واقعي را با وضعيت مطلوب مقايسه نمايد، يك سيستم حلقه بسته مي باشد. ساختار بلوك دياگرام سيستم فوق در شكل ذيل نشان داده شده است.



در اين عمل مقايسه سيگنالهاي ورودي و خروجي توسط مقايسه كننده انجام مي گيرد و سيگنال خطاي حاصله پس از تقويت براي به حركت در آوردن موتور DC به درايور موتور اعمال مي شود تا سرعت يا موقعيت شفت خروجي اصلاح گردد.

همانگونه كه مي دانيم در يك سيستم كنترل اتوماتيك، به اجزايي مانند حسگر، عملگر، و مقايسه كننده احتياج داريم.

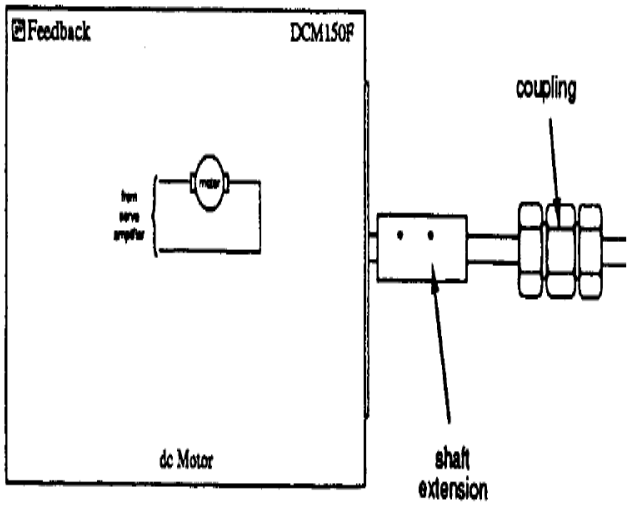
علاوه بر آن براي به حركت در آوردن موتور DC نيز به يك تقويت كننده (درايور) سرؤ براي توليد سيگنالهاي مناسب براي چرخش موتور با سرعت و جهت دلخواه نيازمنديم. تمامي اجزاي مورد نياز براي سيستم حلقه بسته كنترل وضعيت موتور، به صورت ماجولهاي جداگانه فراهم شده اند كه با اتصال اين ماجولها به شيوه هاي مختلف، سيستم هاي حلقه باز يا حلقه بسته متفاوتي را آزمايش خواهيم نمود. در ابتدا لازم است تا با هر يك از اين ماجولها به صورت مختصر آشنا شويم.

معرفي اجزاي سيستم سرو موتورDC

۱. منبع تغذيه PS150E

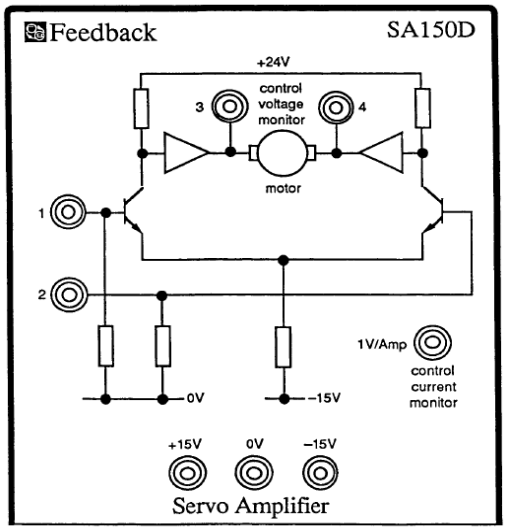
براي تأمين ولتاژهاي مورد نياز مجموعه به كار مي رود. ولتاژ ۲٤ ولت ۲ آمپر توسط يك سوكت به واحد تقويت كننده سرو براي تغذيه موتور متصل مي شود. علاوه بر آن بر روي اين واحد، دو مجموعه سوكت براي تأمين ولتاژهاي ۱۵± ولت دی سی فراهم شده است كه براي تغذيه ماجولهاي ديگر به كار مي رود.

۲. موتورDC M150F DC



اين موتور يک موتور DC با آهنربای دائم می باشد که از طريق ترمز مغناطيسی می توان بارهای مختلفی را بر روی شفت آن قرار داد. همچنين برای اندازه گيری سرعت موتور می توان آن را به واحد تاکوژنراتور متصل نمود تا ولتاژ متناسب با سرعت در خروجی اين واحد مشاهده شود.

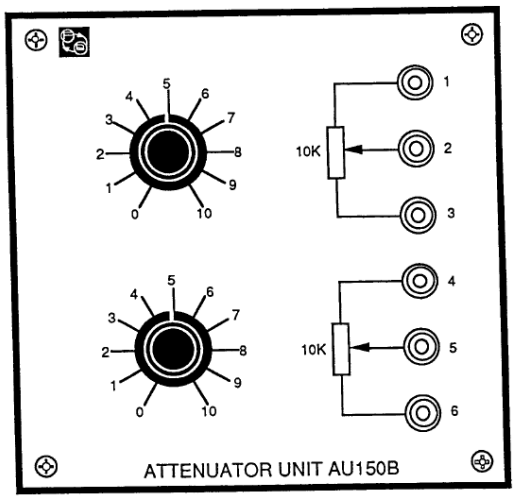
۳. تقويت كننده سرو SA150D



در اين واحد ترانزيستورهايي قرار دارند كه مي توانند موتور را در دو جهت راه اندازی كنند. براي جلوگيري از اضافه بار موتور، يك محدود كننده جريان ۲ آمپری در خروجی تقويت كننده سرو قرار داده شده است.

٤. تضعیف کننده AU150B

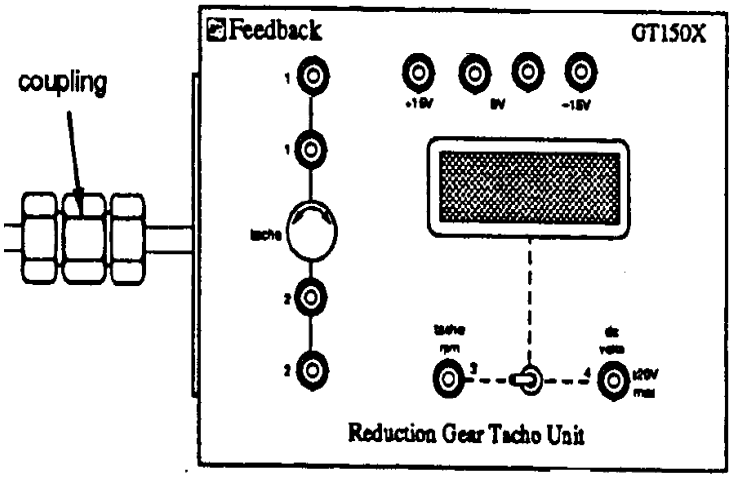
در این واحد دو پتانسیومتر ۱۰kΩ قرار داده شده اند. نسبت مقاومت مورد نظر توسط یك پیچ مدرج از ۰ تا ۱۰ انتخاب مي گردد. از این واحد براي تنظیم بهره استفاده مي شود.



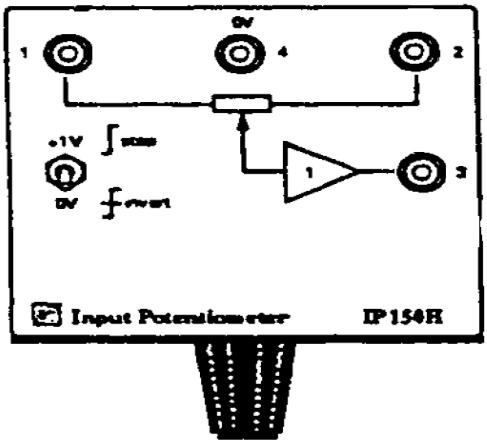
۵. واحد جعبه دنده کاهشي GT150X

این جعبه دنده با نسبت ۳۰ به ۱ سرعت ورودی (سرعت موتور) را به سرعت خروجی (سرعت چرخش پتانسیومتر OP150K) تبدیل می کند.

این جعبه دنده شامل یک تاکوژنراتور نیز هست. این تاکوژنراتور متشکل از یک ولت متر و یک تاکومتر بوده که برای نمایش ولتاژ و سرعت موتور (بر حسب r/min) بر روی صفحه نمایش این واحد به کار می رود.

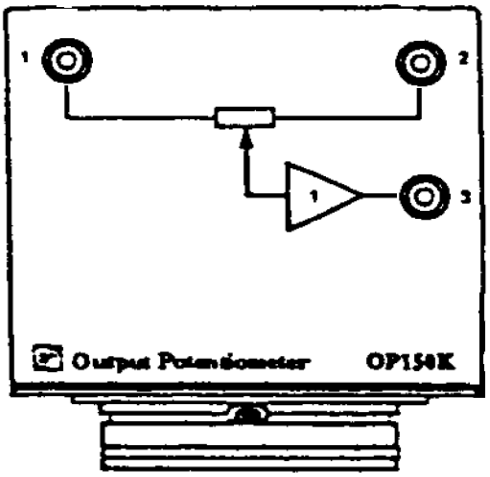


اساس کار این تاکوژنراتور این گونه است که در سرعت ۱۰۰۰r/min ولتاژ خروجی به میزان ۲/۷۵ ولت و در سرعت ۱۸۰۰ r/min این ولتاژ به ۵ ولت می رسد. این تاکوژنراتور در آزمایش های کنترل سرعت و کنترل موقعیت به کار می رود.



٦. پتانسيومترهاي ورودي وخروجي , IP150H OP150K

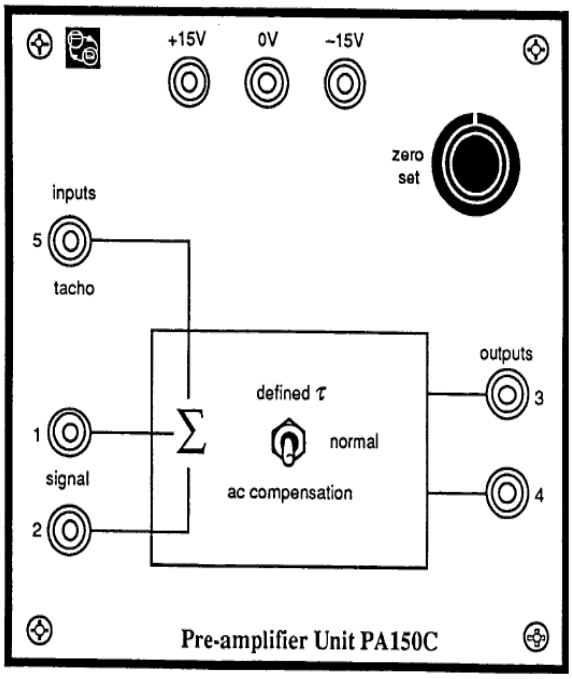
پتانسيومترهاي چرخشي هستند كه در آزمايشهاي كنترل موقعيت موتور استفاده مي شوند. پتانسيومتر ورودي، مي تواند ۱۵۰± حركت نمايد و براي توليد يك ولتاژ مرجع در محدوده ۱۵± ولت براي كنترل موقعيت به كار مي رود.



پتانسيومتر خروجي هيچ گونه بازدارنده مكانيكي ندارد و توسط يك محور به جعبه دنده كاهشي متصل است و متناسب با موقعيت محور خروجي جعبه دنده، ولتاژ خروجي در محدوده ۱۵± ولت توليد مي كند.

نكته: هر دو پتانسيومتر ورودي و خروجي مي بايست به ۱۵+ و ۱۵ـ ولت متصل شوند و جهت اتصال اهميتي ندارد.

۷. واحد پيش تقويت كننده PA150C

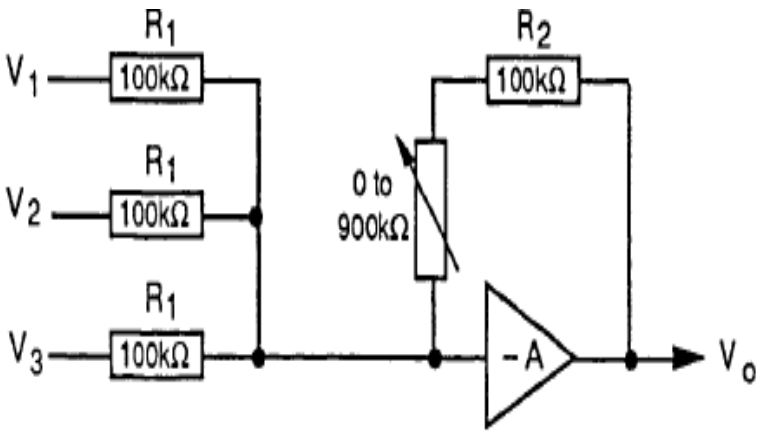


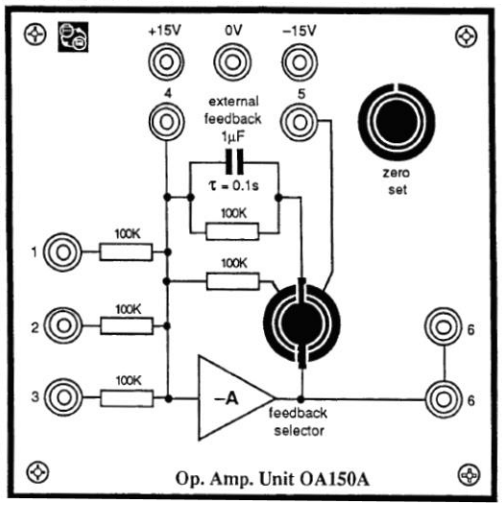
اين واحد براي توليد سيگنالهاي مطلوب براي واحد تقويت كننده عملياتي به كار مي رود. در اين واحد، ورودي هاي ۱و۲ با هم جمع مي شوند. اگر سيگنال حاصل، داراي مقدار مثبتي بود، خروجي ۳، تقريبا ۲۵ برابر اين مقدار مثبت ولتاژ خواهد داشت و خروجي ٤ نزديك صفر باقي مي ماند. اگر سيگنال حاصل داراي مقدار منفي بود، خروجي ٤، تقريبا ۲۵ـ برابر اين مقدار منفی ولتاژ خواهد داشت و خروجي ۳ نزديك صفر مي ماند.

نكته: با توجه به تغذيه ۱۵± ولت اين ماژول در حالت اشباع خروجی تقريبا ۱۳/۵ ولت خواهد بود

۸. واحد آپ امپ (تقويت كننده عملياتي) OA150A

اين واحد براي جمع كردن دو يا چند سيگنال با بهره ولتاژ منفي به كار مي رود. علاوه بر آن داراي امكانات جبرانسازي مي باشد. شماي كلي اين واحد و مدار الكتريكي آن در شكل‌هاي زير قابل مشاهده است.

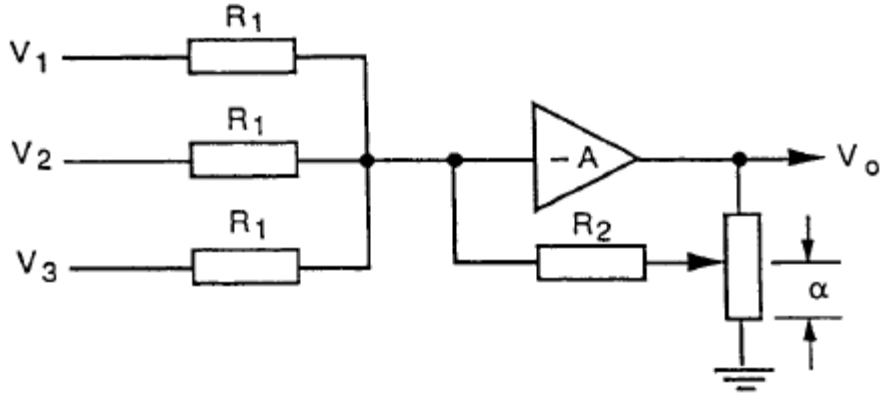




امپدانس $R_۲$ توسط کلید انتخاب گر مي تواند به سه حالت مقاومت ۱۰۰KΩ ، مقاومت به همراه خازن جبرانگر و یا امپدانس خارجي براي تنظیم بهره آپ امپ انتخاب شود. ولتاژ خروجي آپ امپ به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$V_\circ = \frac{-R_۲(V_۱ + V_۲ + V_۳)}{R_۱}$$

نکته: اگر بخواهیم بهره آپ امپ را تغییر دهیم باید از مقاومت خارجي استفاده نمائیم. از آنجایي که مقاومت R_1 وR_2 داخلي برابر ۱۰۰KΩ مي باشند ، لذا براي ایجاد بهره مثلاً ۱۰ مي بایست از یك مقاومت خارجي در حد ۱MΩ (مگااهم) استفاده نمائیم که منطقي به نظر نمي رسد. لذا مي توانیم از اتصالات مطابق شکل زیر استفاده نمائیم.



تمرین: نشان دهید در این حالت اگر $R_1 = R_2$ باشد بهره آپ امپ برابر $\frac{-1}{\propto}$ خواهد بود که در آن $\propto$ در شکل بالا نشان داده شده است.

آزمايش اول: شناسايي موتور DC توسط كنترل حلقه باز سرعت

هدف

هدف از انجام اين آزمايش، آشنايي با مشخصات موتور DC مورد استفاده در سيستم سرو و نحوه كنترل آن با تقويت كننده سرو مي باشد.

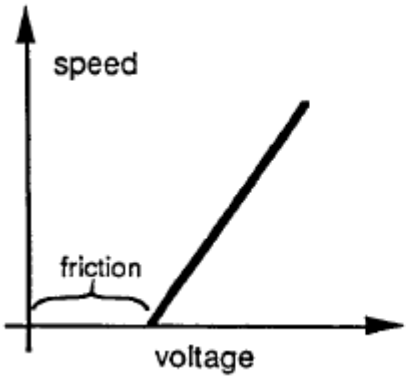
مقدمه

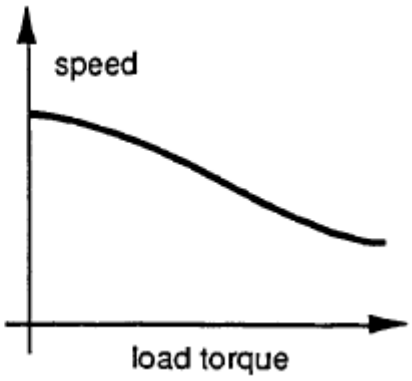
براي اينكه بتوانيم يك سيستم را به درستي كنترل نمائيم، ابتدا مي بايست آنرا با یک مدل رياضی توصيف كنيم و پارامترهای آن را طي انجام يك سري آزمايش ها بدست آوريم كه به عمل فوق شناسايي سيستم گفته مي شود.

ساده ترين روش شناسايي يك سيستم اعمال ورودي پلّه به آن مي باشد. لذا در ادامه با اعمال ورودي پلّه به سيستم مشخصات حالت ماندگار و حالت گذراي آن را بدست خواهيم آورد.

موتور مورد استفاده در اين سيستم، يك موتور از نوع آهنرباي دائم بوده كه جريان آن توسط تقويت كننده هاي قدرت كنترل شده و مي تواند در هر دو جهت بچرخد.

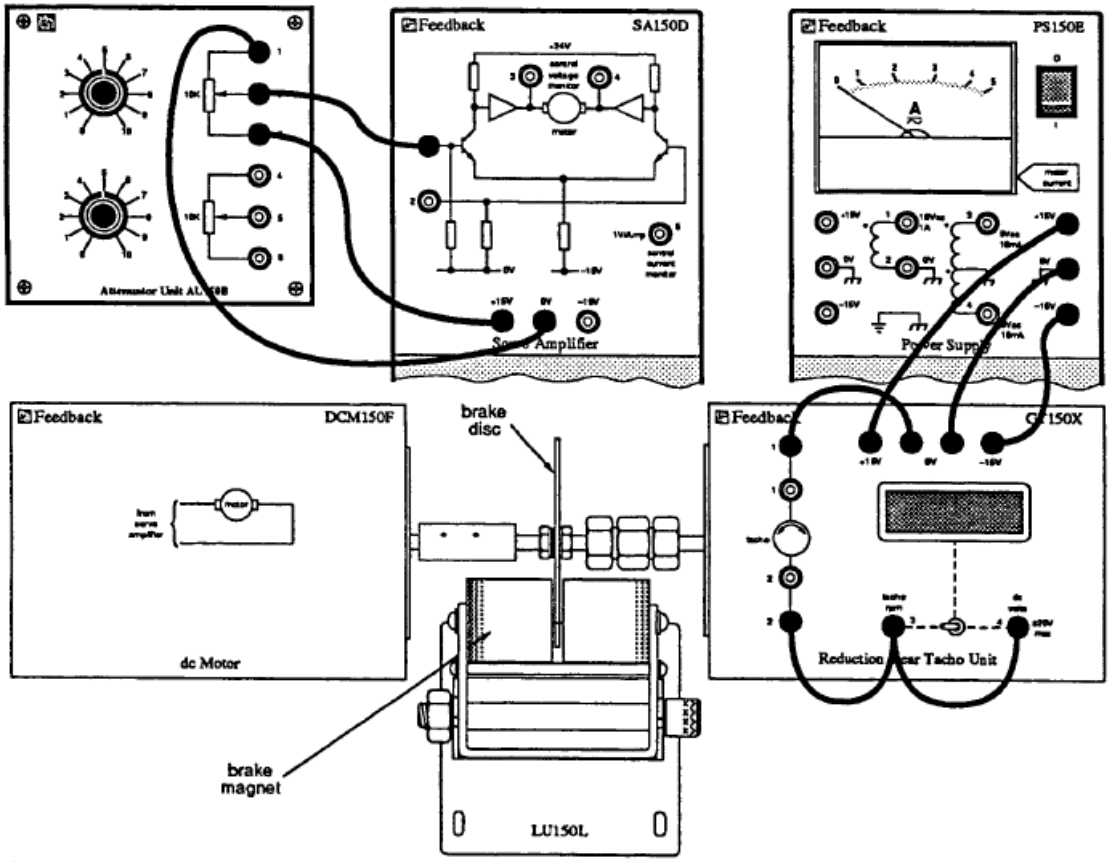
مشخصات سرعت ـ ولتاژ و سرعت ـ گشتاور بار اين موتور در شكل زير نشان داده شده اند.





قسمت اول ـ تعيين مشخصه سرعت ولتاژ وبهره DC :

- اتصالات را مطابق شكل زير اما بدون ترمز ببنديد.



بلوک PS150E وظیفه تغذیه کل این مجموعه را به عهده دارد. این بلوک به طور پیش فرض تقویت کننده سرو (SA150D) را تغذیه می کند. تقویت کننده سرو می تواند خود به عنوان یک منبع تغذیه عمل کرده و ۱۵± ولت دی سی به عنوان خروجی تولید کند. این ولتاژ در ادامه در یک تقسیم کننده ولتاژ (AU150B) رفته و از آن به ورودی بیس موتور متصل می شود، تا از طریق ترانزیستورهای قدرت موتور راه اندازی شود.

منبع تغذیه همچنین بلوک تاکوژنراتور (GT150X) را نیز تغذیه می کند. ولتاژ تولیدی توسط تاکومتر به پین های ورودی صفحه نمایش (پین های ۳ و ٤) متصل می شوند و با استفاده از کلید موجود می‌توان تعیین کرد ولتاژ دو سر تاکو و یا سرعت شفت موتور بر حسب rpm نمایش داده شود.

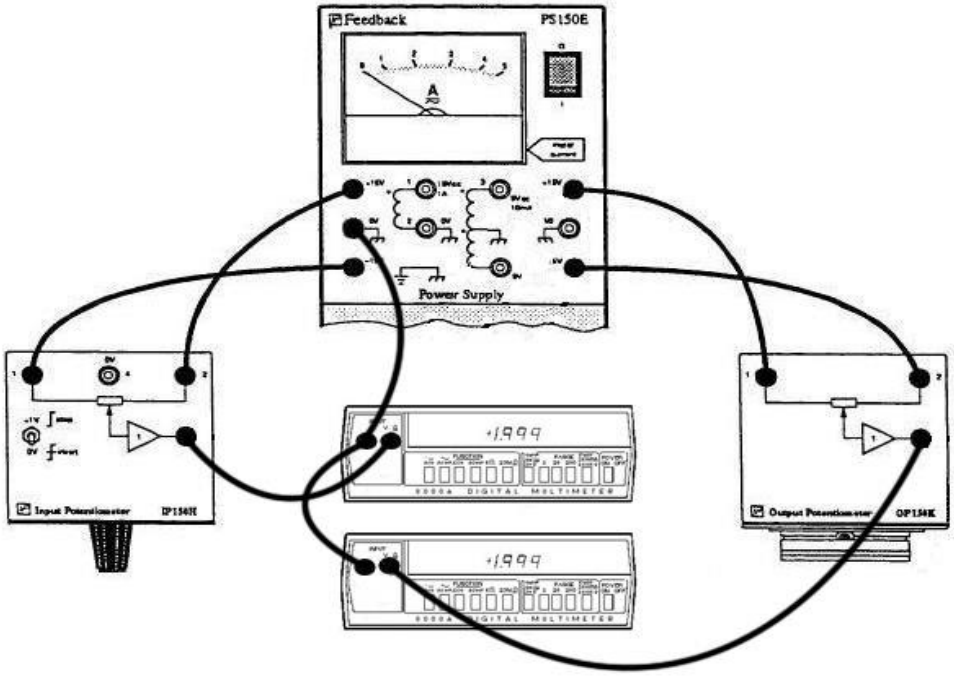
- ولتاژ ورودي را تا جايي كاهش دهيد كه موتور از حركت باز نماند.
- با افزايش ولتاژ ورودي به فواصل ۰/۱ ولت، مقادير ولتاژ ورودي، ولتاژ تاكوژنراتور و سرعت موتور را در جدول ۱/۲ يادداشت نماييد. اين عمل را تا حدود سرعت $^{r}/_{min}$ ۲۰۰۰ كه ماكزيمم سرعت موتور است انجام دهيد.

نتیجه گیری

- مشخصات ولتاژ ورودي ـ سرعت و سرعت ـ ولتاژ تاکوژنراتور را رسم نمائید.
- ضریب (ولتاژ ورودي/سرعت موتور = K) را بدست آورید.
- ضریب(سرعت موتور /ولتاژ تاکوژنراتور = K_G) را تعیین کنید.

قسمت دوم ـ تعیین ضرایب پتانسیومتر ورودي و خروجي

- ابتدا موتور را خاموش نموده و کلیه اتصالات را قطع کنید سپس اتصالات را مطابق شکل۱۵/۲ برقرار کنید.
- ترمینال هاي ۱ و ۲ پتانسیومترهاي ورودي و خروجي را به ولتاژ ۱۵± ولت متصل نمایید.
- با چرخاندن پتانسیومترهاي فوق در زوایاي بین ۱۵۰± باگام های ۳۰ درجه ای، ولتاژ خروجي این پتانسیومتر ها (پین ۳) را یادداشت نموده و نسبت زاویه /ولتاژ خروجي (k_{op}, k_{ip}) را به دست آورید.

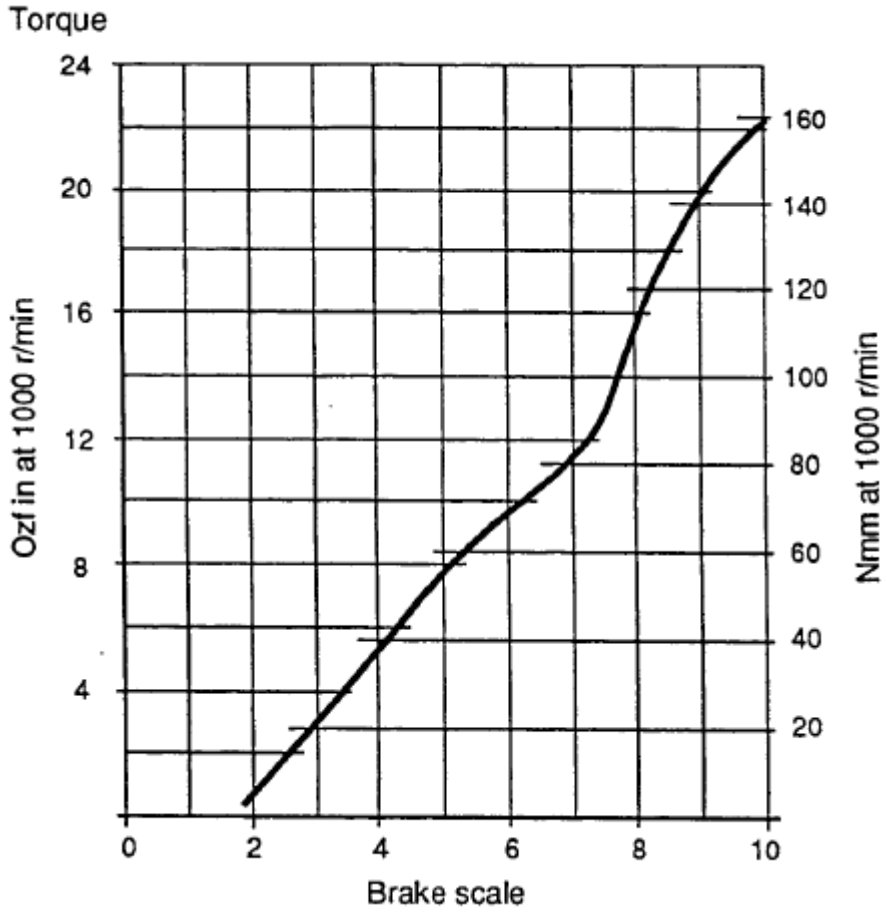


قسمت سوم- تعيين مشخصه سرعت- گشتاور

- اتصالات شكل ۱٤/۲ را با قرار دادن ترمز مغناطيسی دوباره برقرار كنيد.
- ترمز مغناطيسي را در موقعيتي قرار دهيد كه ديسك بتواند به راحتي حركت نمايد.
- موقعيت ترمز را برابر صفر قرار دهيد و ولتاژ ورودي را، تا جايي كه موتور نزديك به سرعت موتور ماكزيمم خود ($۲۰۰۰\ r/min$) حركت كند و جريان موتور از ۲ آمپر بيشتر نشود (آمپرمتر منبع تغذيه)، افزايش دهيد و تا پايان اين مقدار را ثابت نگه داريد.
- ترمز را در موقعيت ۱۰ قرار دهيد.
- در صورتي كه جريان موتور از ۲ آمپر بيشتر شد، ولتاژ ورودي موتور را كاهش دهيد تا جريان به ۲ آمپر برسد (در صورت تغيير ولتاژ ورودی موتور، اين مقدار جديد را يادداشت كرده و تا پايان آزمايش ثابت نگه داريد).
- با افزايش موقعيت ترمز، با گام يک واحد، از صفر تا ده، مقادير ولتاژ تاكوژنراتور، سرعت موتور، جريان ورودی موتور و موقعيت ترمز را اندازه گيری كرده و در جدول ۲/۲ ثبت نماييد.

توجه: برای تغيير وضعيت ترمز مغناطيسی ابتدا كل سيستم را خاموش كرده و سپس بدون تغيير محل قرارگيری ترمز، مقدار آن را عوض كنيد.

- مشخصه گشتاورِ بار بر اساس موقعيت ترمز براي سرعت $۱۰۰۰\ r/min$ در شكل زير نشان داده شده است. براي سرعت هاي به دست آمده در قسمت قبل، با استفاده از شكل زيرمشخصه سرعت- گشتاور را رسم نمائيد (در شكل زير گشتاور ترمز متناسب با سرعت تغيير می كند).



قسمت چهارم- تعيين مشخصات حالت گذاري موتور DC با استفاده از پاسخ پلّه

در اينجا هدف از انجام آزمايش، تعيين مشخصات ديناميكي موتور و يا به عبارتي تابع تبديل آن با استفاده از پاسخ پلّه مي باشد.

همانگونه كه مي دانيم تابع تبديل موتور DC را مي توان به صورت ساده شده زير در نظر گرفت:

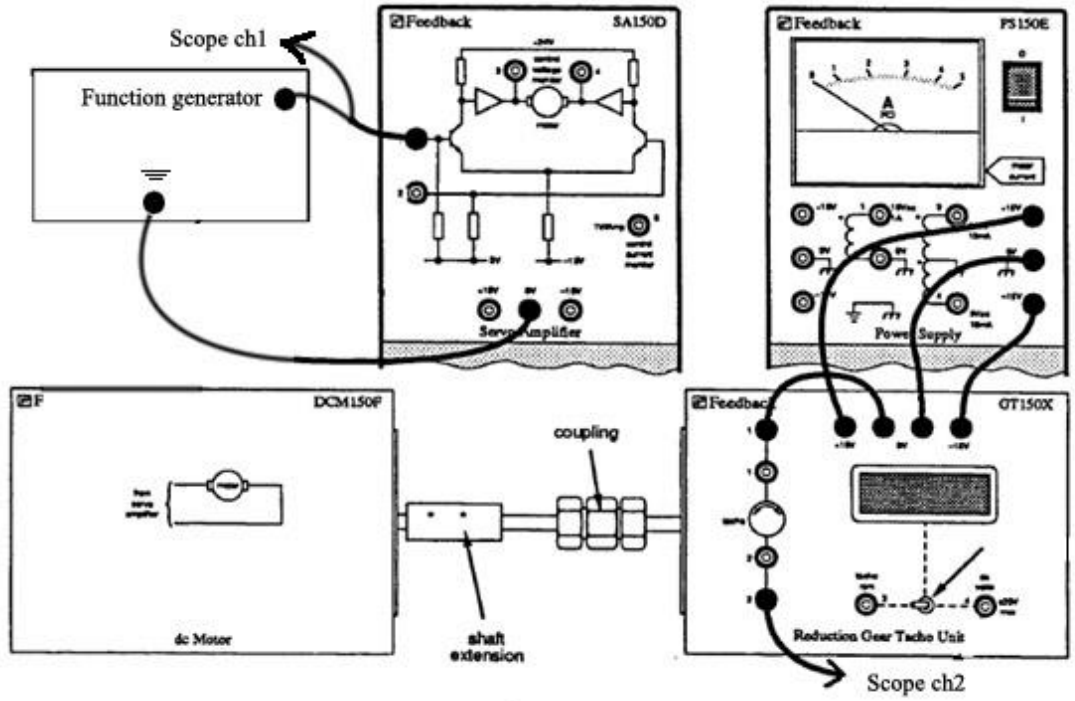
$$\frac{\upsilon}{V} = \frac{\acute{K}}{(JS + B)} = \frac{K}{\tau S + ۱}$$

كه در آن V ولتاژ ورودي، υ سرعت موتور، J ممان اينرسی، B ضريب دمپري، $\acute{K}$ بهره دی‌سی و τ ثابت زماني موتور است كه $\tau = J/B$ و $K = \acute{K}/B$ مي‌باشد.

لذا برای تعيين ضرايب تابع تبديل می توانيم از پاسخ سيستم به ورودی پلّه سرعت استفاده می كنيم. برای مشاهده بهتر پاسخ پلّه در اسيلوسكوپ از موج مربعی به عنوان ورودی استفاده می كنيم.

- برای انجام اين آزمايش، اتصالات را مطابق شكل ذيل ببنديد.

- موج مربعی با دامنه ۳ ولت (۰ تا ۳+ ولت) peak-to-peak و فرکانس ۰/۱ Hz تولید کنید.
- با مشاهده همزمان شکل موج ولتاژ ورودی و نیز شکل موج ولتاژ حاصل از تاکوژنراتور خروجی، پاسخ پلّه سیستم را به ورودی ولتاژ را مشاهده وچاپ نمایید.
- ثابت زمانی سیستم را که معادل زمانی است که دامنه خروجی به ٦٣% مقدار نهایی خود می رسد، بدست آورید.
- گین دی سی سیستم (K) را نیز از روی پاسخ مشاهده شده بدست آورید. (توجه داشته باشید که ورودی سیستم پله واحد نیست)



نتیجه گیری

۱- با توجه به مشخصه گشتاور ـ سرعت موتور، مشخصه توان ـ سرعت موتور را بدست آورده و با استفاده از آن نقطه توان بیشینه را روی نمودار گشتاور سرعت مشخص کنید.

۲- با توجه به K بدست آمده در آزمایش قبل و τ بدست آمده در این آزمایش، چه تابع تبدیلی برای سیستم فوق پیشنهاد می کنید؟

۳- با فرض J برابر ۱٤ gr/cm^2، ضریب دمپری موتور و K' را بدست آورید.

ولتاژ ورودی(V)	ولتاژ تاکوژنراتور(V)	سرعت موتور(rpm)

سرعت موتور(rpm)	جریان ورودی موتور(A)	ولتاژ تاکو(V)	موقعیت ترمز

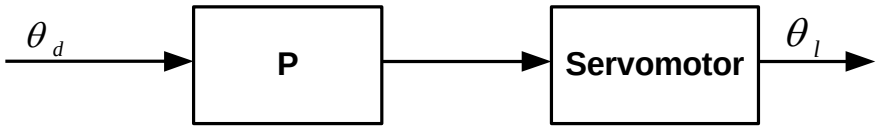
آزمایش دوم :کنترل موقعیت موتور با کنترل کنندهٔ تناسبی

هدف

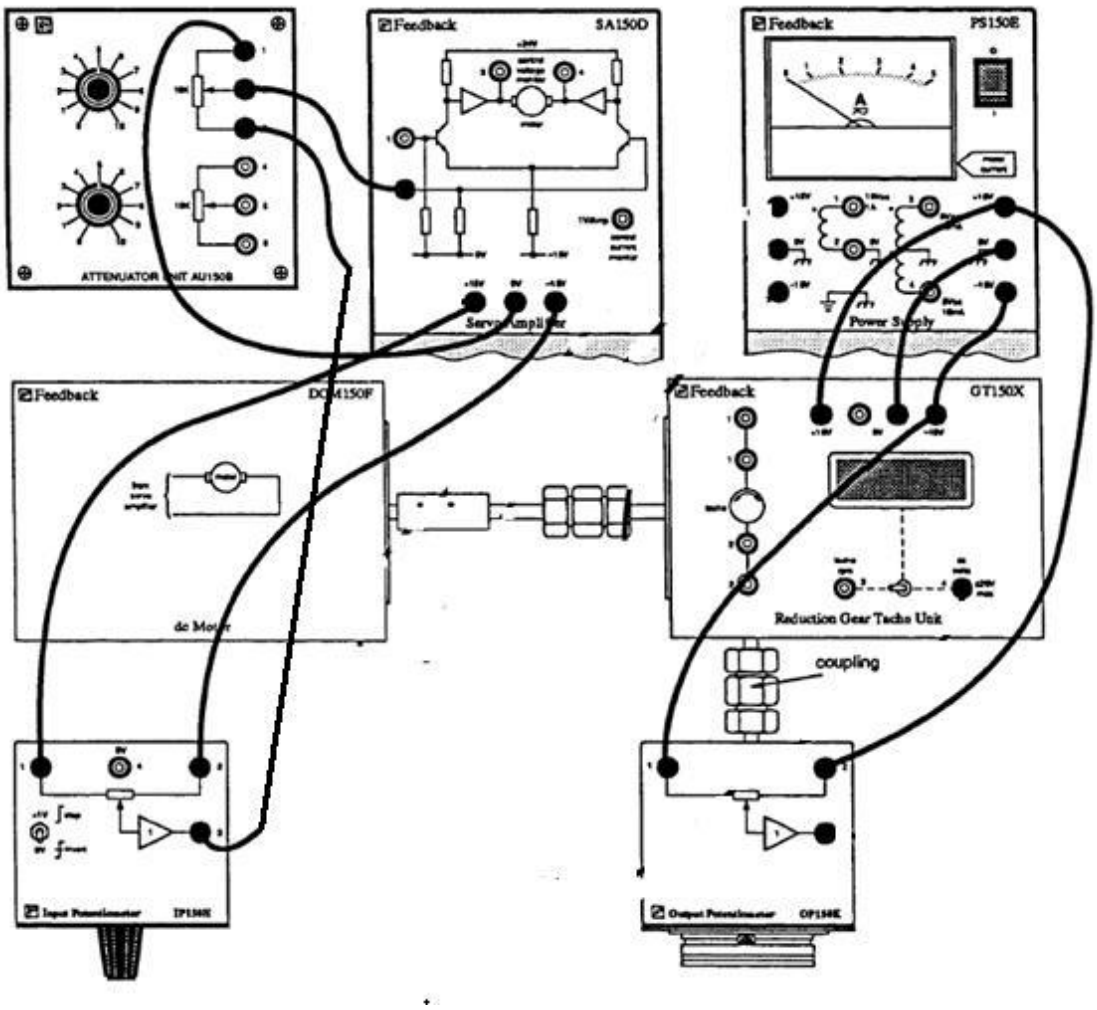
در این آزمایش موقعیت موتور با کنترل کنندهٔ تناسبی به صورت حلقه باز و بسته کنترل می شود.

قسمت اول– کنترل حلقه باز موقعیت

هدف از انجام این آزمایش، آشنایی با نحوه عملکرد سیستم کنترل موقعیت در حالت حلقه باز است. در اینجا سیگنال کنترلی از خطای موقعیت استفاده نمی کند، بلکه متناسب با ورودی اعمالی به سیستم تغییر خواهد کرد. بلوک دیاگرام سیستم حلقه باز در شکل زیر قابل مشاهده است.



- سیستم حلقه باز را مطابق شکل ذیل ببندید.
- قبل از روشن کردن منبع تغذیه، کنترل کننده تناسبی (پتانسیومتر AU150) را برابر صفر قرار دهید تا موتور حرکت نکند.
- حال با افزایش تدریجی این پتانسیومتر، زاویه‌ای که به ازای آن موتور آغاز به حرکت می نماید را P_0 نامیده و مقدار آنرا همراه با جهت چرخش پتانسیومتر خروجی یادداشت نمایید.
- پتانسیومتر AU150 را صفرکنید.
- حال زاویه پتانسیومتر خروجی را برابر صفر قرار دهید.
- پتانسیومتر ورودی را روی یک مقدار دلخواه بگذارید و آن مقدار را یادداشت کنید.
- کنترل کننده تناسبی (پتانسیومتر AU150) را برابر P_0 قرار دهید تا موتور حرکت کند و پتانسیومتر خروجی به مقدار تعیین شده برای پتانسیومتر ورودی نزدیک شود. حال با کاهش پتانسیومتر AU150، پتانسیومتر خروجی را به زاویه مورد نظر برسانید. مقدار پتانسیومتر AU150 را در این حالت یادداشت نمایید.



θ_d θ_l

سؤال: با نزدیک شدن به زاویه مورد نظر، چه اتفاقی می افتد؟ آیا خطا برابر صفر می گردد؟

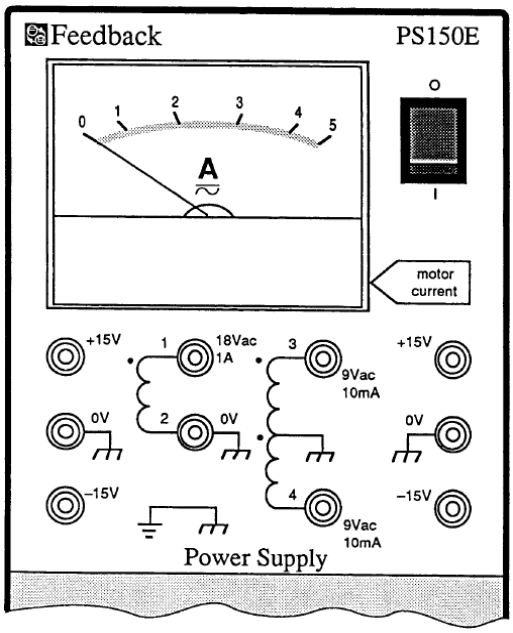
حال ترمینال ۲ پتانسیومتر ورودی را به ۱۵+ و ترمینال ۱ را به۱۵ـ ولت وصل کنید.

سؤال: با تغییر ولتاژ ورودی پتانسیومتر از بازه صفر تا ۱۵ به بازه ۱۵ـ تا ۱۵+ چه تغییری حاصل می شود؟

نتیجه گیری

مکان هندسی سروموتور برای کنترل موقعیت را رسم کنید.

قسمت دوم- کنترل حلقه بسته موقعیت موتور با کنترل کننده تناسبی

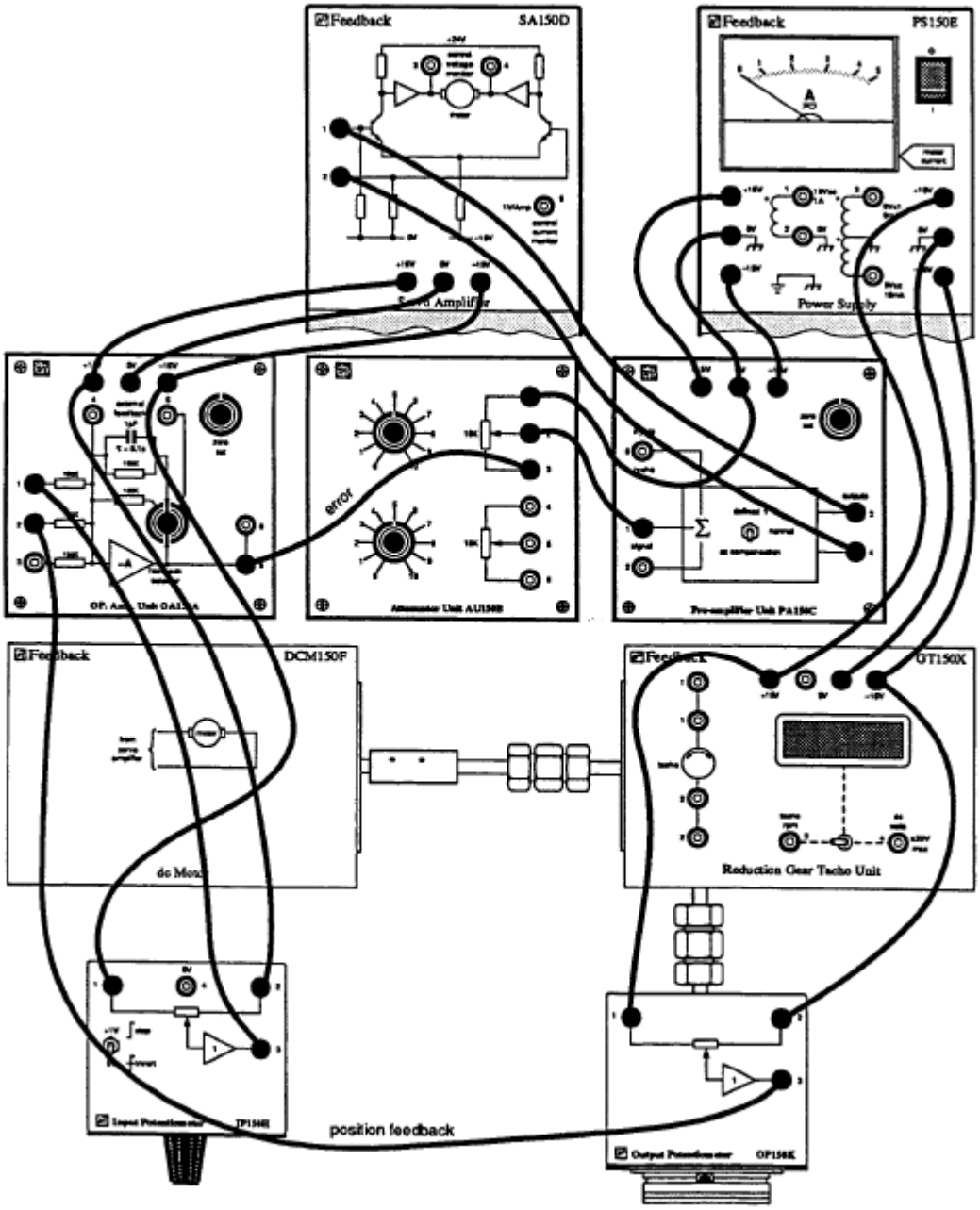


مقدمه

پتانسیومتر های چرخان ورودی و خروجی را می توان برای تولید سیگنال خطا به کار برد. این سیگنال خطا متناسب با اختلاف زاویه این دو پتانسیومتر می باشد. حال اگر این سیگنال خطا را به یک کنترل کننده اعمال کرده و خروجی کنترل کننده را به عنوان ولتاژ ورودی موتور اعمال نمائیم و پتانسیومتر خروجی را به شفت موتور متصل نمائیم، یک سیستم کنترل موقعیت اتوماتیک خواهیم داشت. به عبارتی، از سیگنال خطای موقعیت، برای چرخاندن موتور به نحوی استفاده می کنیم که تفاوت زوایای دو پتانسیومتر به صفر برسد. در اینجا با اعمال ولتاژهای پتانسیومتر های ورودی و خروجی به آپ امپ، سیگنال خطا راتولید می نمائیم. سپس با اعمال سیگنال خطا به واحد تضعیف کننده، می توانیم یک بهره تناسبی قابل تنظیم به سیگنال خطا اعمال نموده و سپس با اعمال سیگنال خروجی به واحد پیش تقویت کننده، خروجی جهت دار (با دامنه ثابت) جهت چرخاندن موتور در جهتی که خطای موقعیت صفر شده، داشته باشیم.

شرح آزمایش

- سیستم حلقه بسته را مطابق شکل ببندید.



بلوک اپ امپ OA150A وظیفه تشکیل سیگنال خطا را برعهده دارد. با توجه به اتصال وارونه پتاسیومتر چرخان ورودی این بلوک تفاضل بین این دو سیگنال (سیگنال خطا) را تولید می‌کند (چرا؟)

توجه: به وضعیت کلید روی این بلوک توجه کنید تا گین اپ امپ برابر ۱ باشد.
بلوک پیش تقویت کننده PA150C با توجه به سیگنال دریافتی از ورودی، در صورت مثبت بودن این سیگنال، خروجی پین ۳ را مثبت و خروجی پین ٤ را صفر می کند. و در صورت منفی بودن این سیگنال خروجی پین ۳ را صفر و خروجی پین ٤ را مثبت می کند. کلید موجود بر روی این بلوک می‌تواند در سه حالت قرار گیرد. توجه داشته باشید که این کلید روی حالت ac compensation قرار گرفته باشد.

- قبل از روشن نمودن منبع تغذیه، بهره را برابر صفر قرار دهید تا با روشن کردن آن، موتور حرکت نکند.
- حال با چرخش پتانسیومتر ورودی به یک زاویه دلخواه و افزایش بهره، پتانسیومتر خروجی می بایست به زاویه ای نزدیک به زاویهٔ پتانسیومتر ورودی بچرخد.
- برای کاهش خطای حالت دائم می توانیم با افزایش بهره، سیگنال کنترلی را افزایش دهیم تا موتور به آن پاسخ داده و خطا کاهش یابد.
- حال با توجه به اتصالات سیستم، بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته را رسم نمائید و تابع تبدیل حلقه باز و حلقه بسته سیستم را بدست آورید.

توجه: در رسم بلوک دیاگرام به ضریب کاهش جعبه دنده، ضریب زاویه به ولتاژ پتانسیومترها و نیز ضریب تبدیل دور موتور به رادیان بر ثانیه دقت کنید.
نکته: در سیستم کنترل موقعیت، توقف آرام موتور در هر موقعیت، از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر فرا جهش (overshoot) اتفاق بیافتد، می بایست سیگنالی برای جبران آن تولید شود. اگر این سیگنال بزرگ باشد (با توجه به بهره سیستم)، رسیدن به توقف آرام، هموار و صحیح، بسیار مشکل می شود و در نهایت سیستم حول نقطه تعادل خود نوسان خواهد کرد. لذا با افزایش بهره، سیستم به سمت ناپایداری سوق پیدا خواهد کرد.

- با توجه به تابع تبدیل به دست آمده، محدوده k_p (بهره تناسبی) را که به ازای آن سیستم فوق میرای بحرانی، فوق میرا و زیر میرا است، بدست آورید.
- حال با قرار دادن پتانسیومتر ورودی در زاویه ٦٠ درجه و پتانسیومتر خروجی در صفر درجه، بهره تناسبی را از ۰/۱ تا ۰/۵ با گام ۰/۱ تغییر داده و مقادیر فراجهش، زمان نشست و خطای حالت ماندگار را در جدول ۳/۲ یادداشت نمائید.

نتیجه گیری

۱- مهمترین دلایل برای وجود اختلاف بین پتانسیومتر ورودی و خروجی در کنترل کننده حلقه بسته چیست؟

۲- عملکرد کنترل کنندهٔ حلقه باز و حلقه بسته را با هم مقایسه کنید.

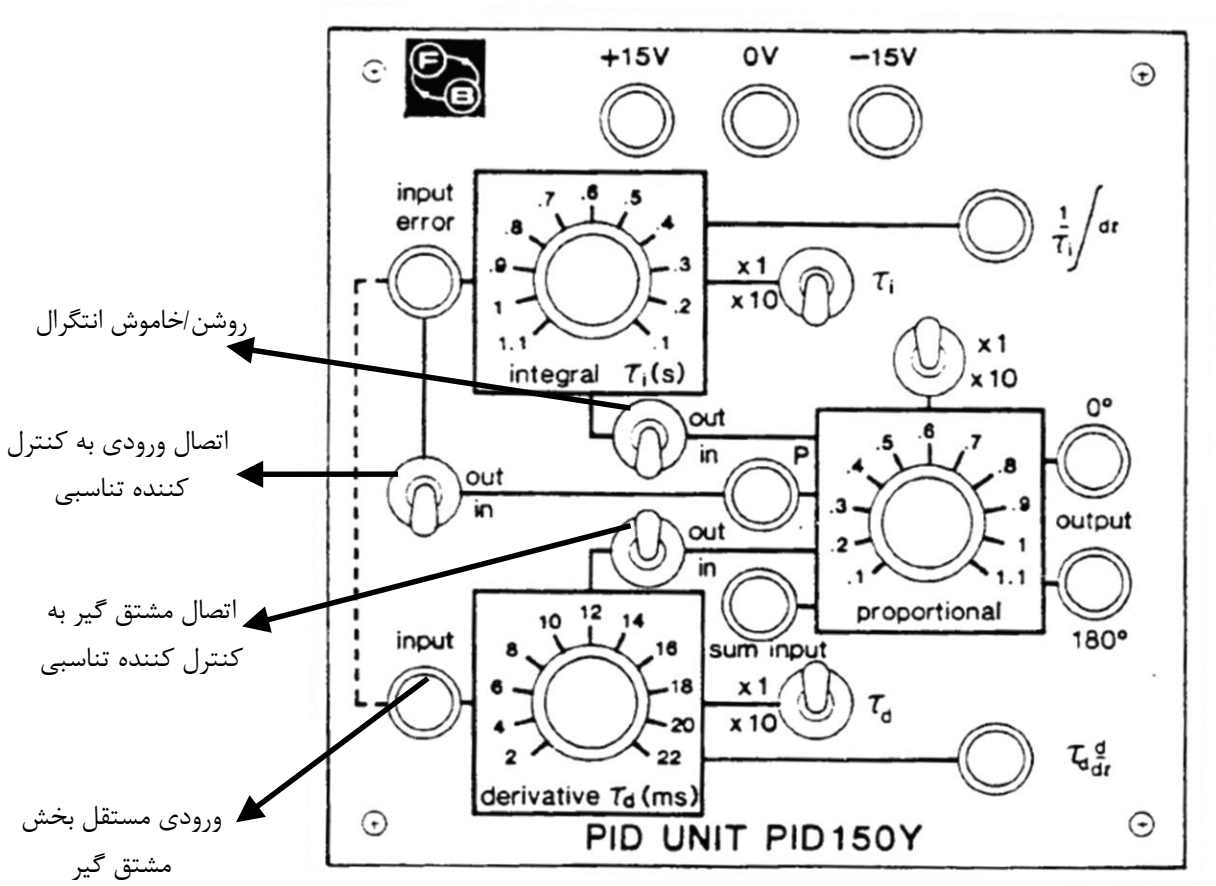
۳- به نظر شما با توجه به تابع تبدیل سیستم، با افزایش بهره تناسبی، سرعت سیستم و میزان فرا جهش آن چه تغییری خواهند کرد؟

۴- نتایج بدست آمده از جدول ذیل را با نتایج تئوری مقایسه کنید.

زمان نشت	فراجهش	بهره تناسبی

آزمایش سوم :کنترل موقعیت موتور با کنترل کننده های PD,PI

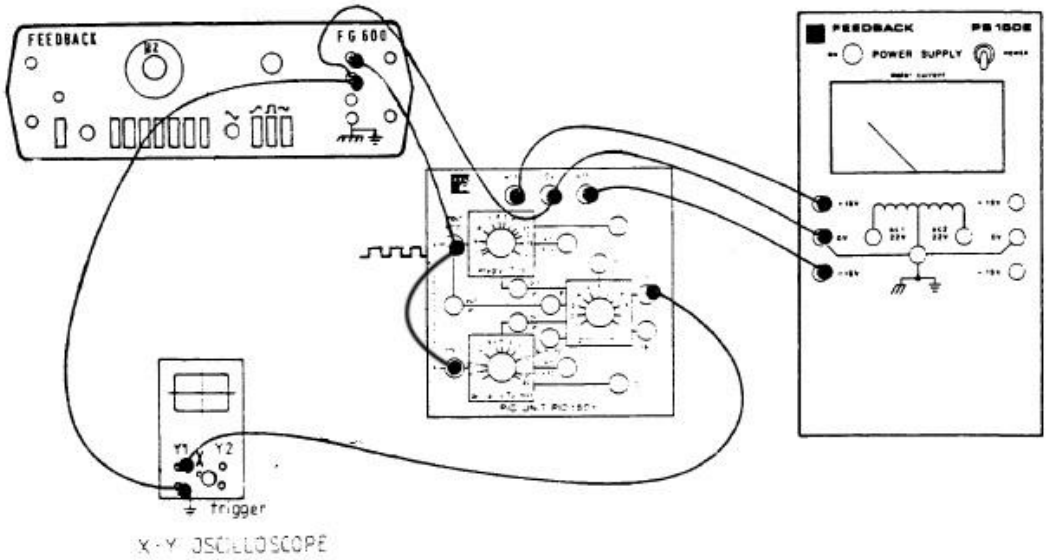
قسمت اول-آشنایی با بلوک PID 150Y



این بلوک وظیفه پیاده سازی کنترل کننده PID را برعهده دارد. بدین ترتیب سیگنال خطا (Deviation) به ورودی input error وارد می شود و با قرار دادن کلید هر قسمت (انتگرال گیر، مشتق گیر و تناسبی) در حالت in می توان خروجی متناسب با آن قسمت را دریافت کرد.

توجه: ورودی قسمت مشتق گیر مستقل از ورودی input error بوده (چرا؟) و در صورت لزوم این دو ورودی باید به هم متصل گردند.

توجه: به منظور استفاده از گین منفی از خروجی ۱۸۰° استفاده نمایید.



شرح آزمایش

- مدار را طبق شکل بالا ببندید.
- با اعمال ورودی پالس مربعی با دامنه $1V_{pp}$ و فرکانس ۵۰Hz، به input error، کلید انتگرال‌گیر را در حالت out قرار داده و خروجی °۰ را به scope متصل نمایید و با تغییر وضعیت پیچ proportional به شکل موج حاصله دقت کنید.
- حال کلید انتگرال‌گیر را در وضعیت in قرار داده و خروجی را مستقیما از بخش انتگرال گیر گرفته و چاپ کنید.
- در این مرحله با اعمال موج مثلثی به ورودی input خروجی مشتق‌گیر را مستقیما به scope متصل نموده، و در نهایت شکل موج ورودی و خروجی مشتق‌گیر را چاپ کنید.

نتیجه گیری

۱- چرا دامنه سیگنال خروجی انتگرال‌گیر مشاهده شده در مد dc (ورودی scope) به طور مداوم در حال کاهش یا افزایش است؟

۲- با نوشتن روابط مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر شکل موج های چاپ شده را توجیه نمایید.

قسمت دوم- کنترل حلقه بسته موقعیت موتور با کنترل کننده مشتق گیر – تناسبی

همانگونه که در آزمایش دوم دیدیم، که با افزایش بهره سیستم میزان فراجهش افزایش یافته و با کاهش بهره، سرعت سیستم کاهش می یابد. تابع تبدیل این کنترل کننده می بایست به صورت $K_p(1 + \tau_d s)$ باشد.

مشخصه مطلوب سیستم معمولاً بر اساس میزان فراجهش و زمان نشست سیستم بیان می شوند. با توجه به این مشخصات برای یک سیستم مرتبه دو ، می توانیم میزان ξ و ω_n مرتبط با این مشخصات را بدست آوریم. روشهای متعددی برای طراحی کنترل کنندهٔ PD ارائه شده است. در ادامه یکی از روشهای متداول با استفاده از روش مکان هندسی عنوان می شود:

روش طراحی

- با استفاده از مقادیر مطلوب پاسخ گذرا ξ و ω_n مرتبط با مشخصات مطلوب را بدست آورید.

به عنوان مثال اگر زمان نشست و حداکثر فراجهش مطلوب معلوم باشد از روابط زیر می توان ξ و ω_n را بدست آورد.

$$t_s = \frac{4}{\xi\,\omega_n}, \qquad MP = 100e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}}$$

- با استفاده از معادله مشخصهٔ سیستم

$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$ قطب های (غالب) مطلوب حلقه بسته را بدست آورید.

- نمودار مکان ریشه سیستم حلقه باز را رسم نمائید.
- کنترل کننده PD را به صورت زیر درنظر بگیرید:

$$k_p + kd.S = k_p(1+\frac{kd}{kp}S) = k_p(1+\tau_d s)$$

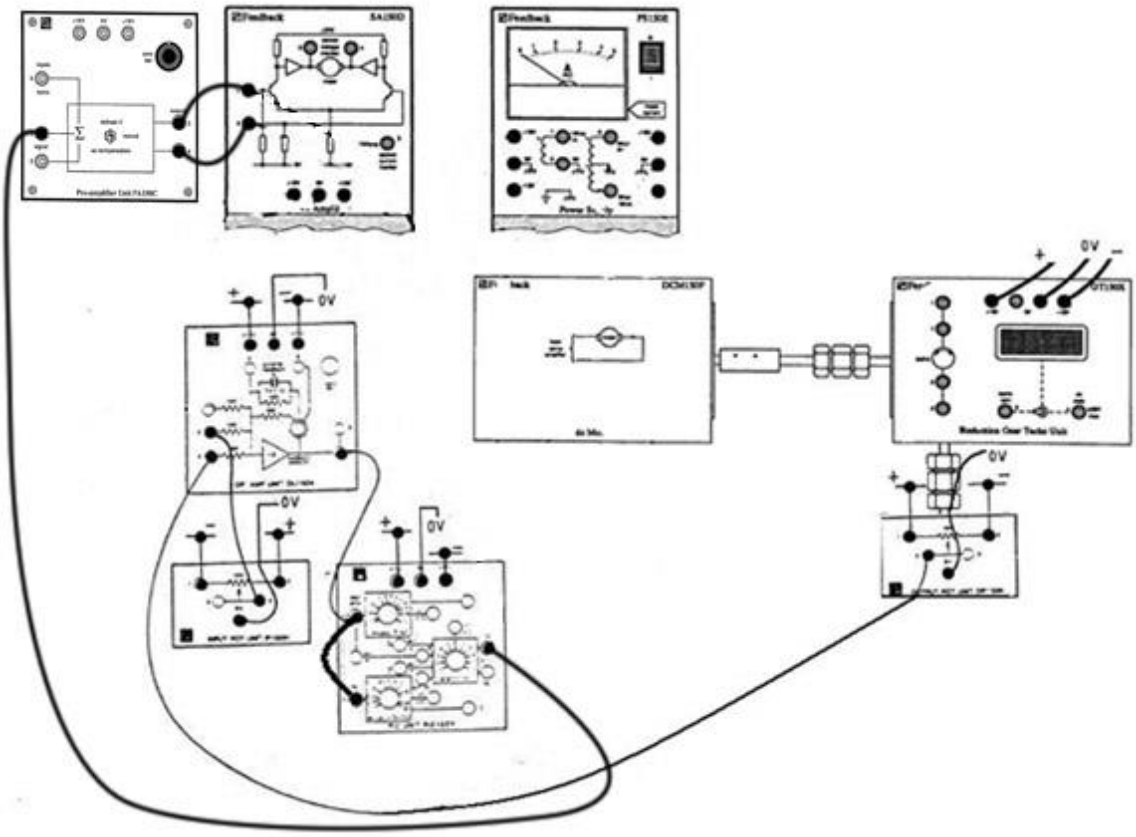
بنابراین کنترل کننده دارای یک صفر در $S = -\frac{1}{\tau_d}$ می‌باشد. حال می‌بایست مکان صفر و بهره k_p را به گونه‌ای انتخاب نمائیم تا مکان ریشه سیستم از قطب‌های حلقه بسته مطلوب عبور نماید.

- مکان صفر را با توجه به شرط زاویه در مکان ریشه‌ها بدست آورید.
- بهره k_P را با توجه به شرط اندازه بدست آورید.

توجه: مقادیر ممکن در این سیستم برای τ_d بین ۲ تا ۲۲۰ می‌باشد.

شرح آزمایش

۱. سیستم حلقه بسته را مطابق شکل ذیل ببندید.



۲. با استفاده از تابع تبدیل بدست آمده، و روش عنوان شده برای طراحی کنترل کننده، یک کنترل کننده PD برای مشخصات زیر طراحی و شبیه سازی نمایید.

$$\begin{cases} \text{زمان نشست : ۰/۳ ثانیه} \\ \text{حداکثر فراجهش : ۵٪} \end{cases}$$

توجه: با در نظرگرفتن مشخصات غیرخطی بلوک Preamplifier گین بلوک PID را کمتر از مقدار محاسبه شده قرار دهید.

۳. پس از طراحي، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مکان هندسي ريشه‌هاي سيستم حلقه بسته را رسم کرده و نتیجه را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید.

٤. کلید وضعیت بلوک PID را در حالت PD قرار دهید.

۵. ضریب کنترل کنندهٔ مشتق گیر را تغییر داده و مقادیر فراجهش و زمان نشست را در هر حالت اندازه گرفته و جدول انتهای آزمایش را کامل کنید.

نتیجه گیری

۱- با توجه به نمودار مکان ریشه سیستم، اثر افزودن صفر به سیستم حلقه باز را در پاسخ حلقه بسته سیستم را بررسی کرده و با نتایج بدست آمده از روش عملی مقایسه کنید.

قسمت دوم- کنترل حلقه بسته موقعیت موتور با استفاده از کنترل کننده انتگرال‌گیر- تناسبی

از کنترل کننده PI معمولاً در جهت حذف خطای حالت ماندگار سیستم و حذف اغتشاش استفاده می شود. این کنترل کننده با اضافه نمودن یک قطب در مبدأ و بالا بردن مرتبه سیستم، باعث حذف خطای حالت ماندگار می‌گردد. تابع تبدیل کنترل PI به صورت $K_p + \frac{K_I}{s}$ می‌باشد. برای اینکه این کنترل کننده تأثیر زیادی در مکان ریشه‌های سیستم و پاسخ گذرا نگذارد، می‌بایست صفر آنرا نیز نزدیک به مبدأ انتخاب کنیم تا کاهش زاویه‌ای که به سیستم اعمال می‌شود، قابل صرفنظر کردن باشد.

کنترل کننده PI را به صورت زیر درنظر بگیرید:

$$K_p + \frac{K_I}{s} = K_p\left(1 + \frac{\frac{K_I}{s}}{K_p}\right) = K_p\left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) = K_p\left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}\right)$$

همانگونه که می‌بینیم کنترل کننده فوق دارای یک صفر در $S = -\frac{1}{\tau i}$ و یک قطب در S=0 بوده و بهره dc آن برابر k_p می‌باشد.

نکته: در طراحی کنترل کنندهٔ انتگرالگیر فرض بر این است که پاسخ گذارای سیستم مطلوب است و تنها بهبود پاسخ ماندگار با حفظ پاسخ گذرا، مطلوب می باشد.

در ادامه یکی از روشهای طراحی کنترل کنندهٔ PI با استفاده از روش مکان هندسی بیان شده است:

روش طراحی

۲- ابتدا مکان ریشه‌های سیستم کنترل نشده را رسم نمائید.

۳- با توجه به مشخصات مطلوب مکان ریشه های مطلوب را پیدا کنید.

٤- بافرض اینکه قطبهای مطلوب متعلق به مکان ریشه ها هستند (در غیر این صورت باید ابتدا یک کنترل کنندهٔ PD طراحی کنید.)، یک قطب در مبدأ اضافه نمائید.

۵- یک صفر در نزدیکی مبدأ به گونه‌ای اضافه نمائید که زاویه صفر و قطب کوچک (کمتر از 10°) باشد و تغییر شکل مکان ریشه‌های جدید، قابل صرفنظر باشد.

٦- آنگاه با توجه به شرط اندازه، مقدار k_p را محاسبه نمائید.

در این قسمت با فرض اینکه پاسخ گذرای مطلوب با استفاده از کنترل کنندهٔ مشتق گیر قسمت قبل به دست آمده، کنترل کنندهٔ انتگرال گیری به آن اضافه می کنیم که خطای ماندگار را صفر کند.

شرح آزمایش

۱- سیستم حلقه بسته با کنترل کنندهٔ انتگرال گیر را مطابق شکل ۲۳/۲ ببندید.

۲- کلید وضعیت واحد PID را در حالت PID قرار دهید

۳- با استفاده از روش عنوان شده ضرایب کنترل کنندهٔ انتگرال گیر را محاسبه کنید.

٤- حال کنترل کننده بدست آمده را پس از شبیه‌سازی، به سیستم واقعی اعمال نمائید و نتایج بدست آمده را ثبت نمایید.

۵- پس از طراحي، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB مکان هندسي ریشه‌هاي سیستم حلقه بسته را رسم کرده و نتیجه را به مسئول آزمایشگاه نشان دهید.

٦- آیا می‌توانیم ضرایب کنترل کننده را به گونه‌ای تعیین نمائیم که سرعت و فراجهش هر دو بهبود یابند؟ چرا؟

۷- آزمایش را برای ضرایب دیگر کنترل کنندهٔ انتگرال‌گیر تکرار و تاثیر این تغییر را توجیه کنید.

نتیجه گیری

۱- نتایج عملی و تئوری را با هم مقایسه و بحث نمائید.

τ_d	زمان نشست	حداکثر فراجهش

آزمایش چهارم: کنترل سرعت حلقه بسته موتور

هدف

هدف از این آزمایش کنترل حلقه بسته سرعت با کنترل کننده تناسبی است.

شرح آزمایش

در آزمایش قبلی، نحوه عمکلرد سیستم کنترل حلقه بسته موقعیت را مورد بررسی قرار دادیم. در این آزمایش، به کنترل سرعت موتور از طریق فراهم نمودن یک سیستم حلقه بسته خواهیم پرداخت.

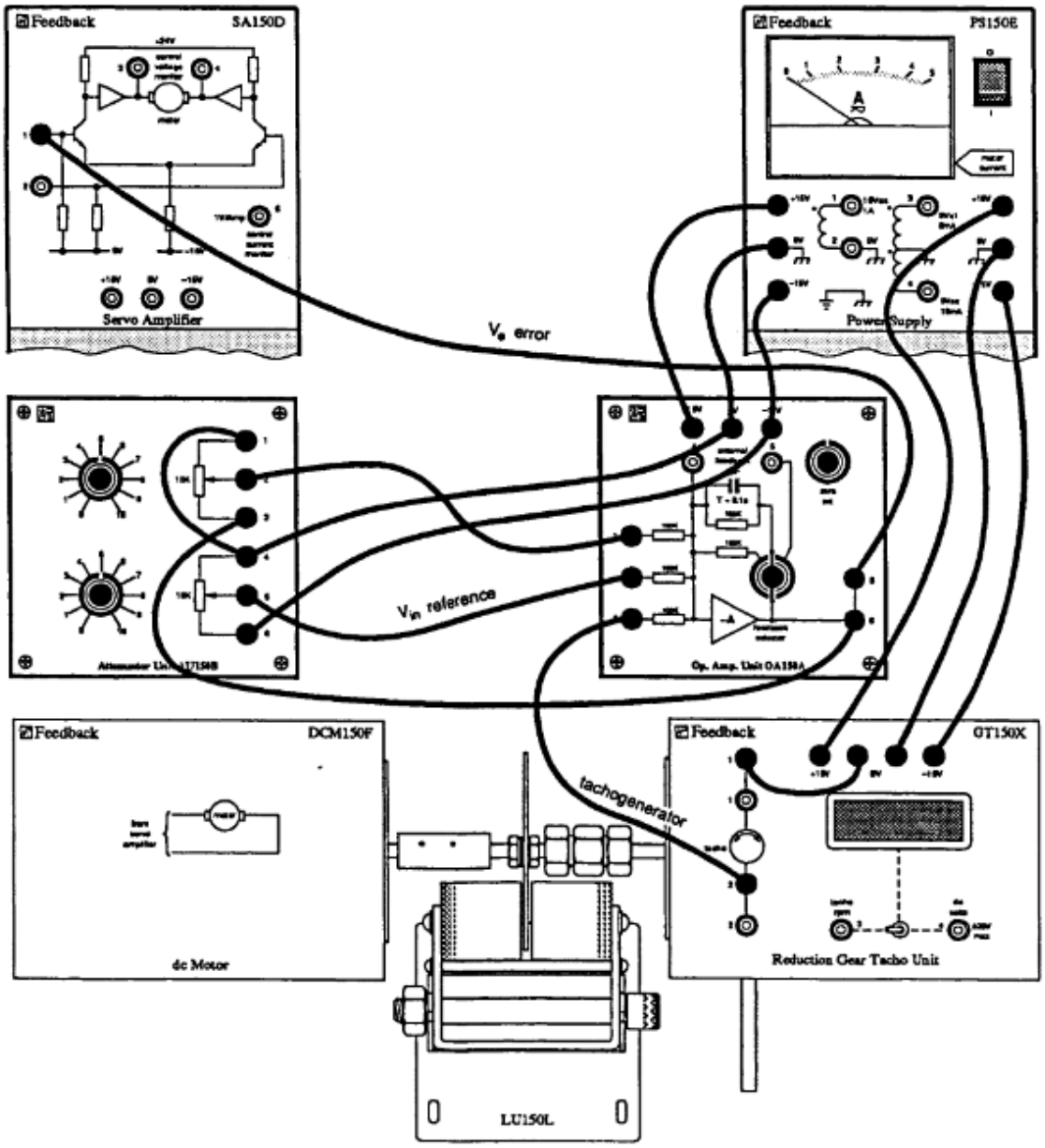
در آزمایش اول، مشخصه سرعت ـ ولتاژ موتور را بدست آوردیم. این بدان معنی است که بدون هیچ گونه باری، می‌توانیم موتور را با تغییر ولتاژ ورودی به سرعت دلخواه خود (در محدوده سرعت مجاز) برسانیم.

سوال: با توجه به مشخصه گشتاور ـ ولتاژ موتور در آزمایش اول، اگر برروی شفت موتور بار متغیر قرار دهیم، چه اتفاقی خواهد افتاد؟

با توجه به پاسخ سوال فوق، در این آزمایش بهبود حاصل از بستن حلقه و ایجاد فیدبک را در کنترل سرعت نشان می دهیم. در این حالت، سرعت واقعی با سرعت مطلوب مقایسه شده (از طریق واحد آپ ـ امپ) و سیگنال خطا را تولید خواهد نمود که این سیگنال به تقویت کننده سرو فرستاده شده و موتور را در سرعت مورد نظر می‌چرخاند.

در ابتدا، یک سیگنال متناسب با سرعت را که از تاکو ژنراتور بدست می‌آید به واحد مقایسه کننده (آپ امپ) فرستاده و آنرا با سیگنال مرجع با قطبیت معکوس مقایسه می‌نمائیم و سیگنال خروجی را به یکی از پتانسیومتر های واحد تضعیف کننده اعمال می کنیم و خروجی آن را (سیگنال خطای تقویت شده) به تقویت کننده سرو اعمال می‌نمائیم. سیگنال مرجع را می‌توانیم توسط پتانسیومترهای بهره، به صورت کسری از سیگنال منبع تغذیه انتخاب نمائیم.

- مدار را مطابق شکل ذیل و بدون ترمز معناطیسی ببندید.



- در واحد آپ امپ، کلید انتخاب فیدبک را روی حالت External Feedback قرار دهید.
- قبل از اتصال تاکو ژنراتور به ورودی آپ امپ، تغذیه را روشن نموده و ولتاژ مرجع را افزایش دهید تا زمانی که موتور شروع به چرخش نماید.

توجه: به مقدار zero set در واحد اپ آمپ توجه کنید. در صورتی که ورودی صفر است، خروجی نیز باید برابر صفر باشد.

توجه: پلاریته ولتاژ رفرنس باید در جهت معکوس نسبت به ولتاژ تاکوژنراتور اعمال شود. قبل از اتصال موتور، از صحت سیگنال خطا مطمئن شوید.

- حال ولتاژ مرجع را صفر کرده و با افزایش تدریجی این ولتاژ، جدول انتهایی را کامل نمایید.
- در ادامه با اعمال بار بر روی موتور، به ازای دو مقدار بار مختلف قسمت قبل را تکرار کنید.

نتیجه گیری

۱. ولتاژ خطا را برحسب سرعت در حالت بی باری رسم نمائید.
۲. اگر اتصال تاکو ژنراتور برعکس بسته می‌شد، چه اتفاقی می‌افتاد و چه نوع فیدبکی ایجاد می‌شد؟
۳. تغییر دادن بار چه تاثیری بر مشخصه سرعت موتور داشت؟ توضیح دهید.
٤. دلایل وجود خطا بین مقدار ولتاژ تاکوژنراتور و ولتاژ رفرنس در حالت ماندگار چیست؟
٥. دیاگرام بلوکی سیستم را رسم کنید.

سرعت rpm	ولتاژ خطا	ولتاژ تاکو	ولتاژ مرجع