

بنام خدا

# دستور کار آزمایشگاه کنترل مدرن

تهیه کننده: دکتر علی رضا فرهادی

تابستان ۱۳۹۵

**پیشگفتار:** هدف از راه اندازی آزمایشگاه کنترل مدرن با ظرفیت ۲۰ دانشجو در هر ترم، آشنایی عملی دانشجویان با مفاهیم

پایه ای کنترل مدرن نظیر مدل سازی فضای حالت، تحقق (ساخت سیستمی با تابع تبدیل یا مدل فضای حالت داده شده)، مزایای کنترل حلقه بسته با استفاده از فیدبک حالت یا فیدبک خروجی بر کنترل حلقه باز، طراحی فیدبک حالت و فیدبک خروجی، پیاده سازی و ساخت فیدبک حالت و فیدبک خروجی با استفاده از المانهای الکترونیکی اکتیو نظیر آپ-امپ و پسیو نظیر مقاومت و خازن می باشد.

مسئله کنترل سرعت موتورهای الکتریکی در حضور اغتشاش دارای کاربردهای صنعتی متنوعی منجمله در کوادروتورها، آسانسورها، پله های برقی، تسمه نقاله، خودروهایی برقی و هیبریدی می باشد. از اینرو تمرکز بخشی از آزمایشات این آزمایشگاه بر روی این مسئله مهم صنعتی معطوف است.

آزمایشات این آزمایشگاه، در سه بخش به شرح زیر انجام می شود:

۱- کالیبراسیون سنسور سرعت، شناسایی مدل موتور الکتریکی و بررسی عملکرد سیستم کنترل حلقه باز موتور در حضور اغتشاش (۲ جلسه)

۲- پیاده سازی فیدبک حالت برای کنترل سرعت موتور الکتریکی با استفاده از المانهای اکتیو (نظیر آپ-امپ) و پسیو (نظیر مقاومت و خازن) و بررسی عملکرد آن در حضور اغتشاش (۵ جلسه)

۳- پروژه: تحقق سیستم از روی تابع تبدیل، طراحی فیدبک حالت جهت حصول پاسخ مطلوب (۲ جلسه)، پیاده سازی فیدبک حالت (۱ جلسه) و پیاده سازی فیدبک خروجی (۲ جلسه)

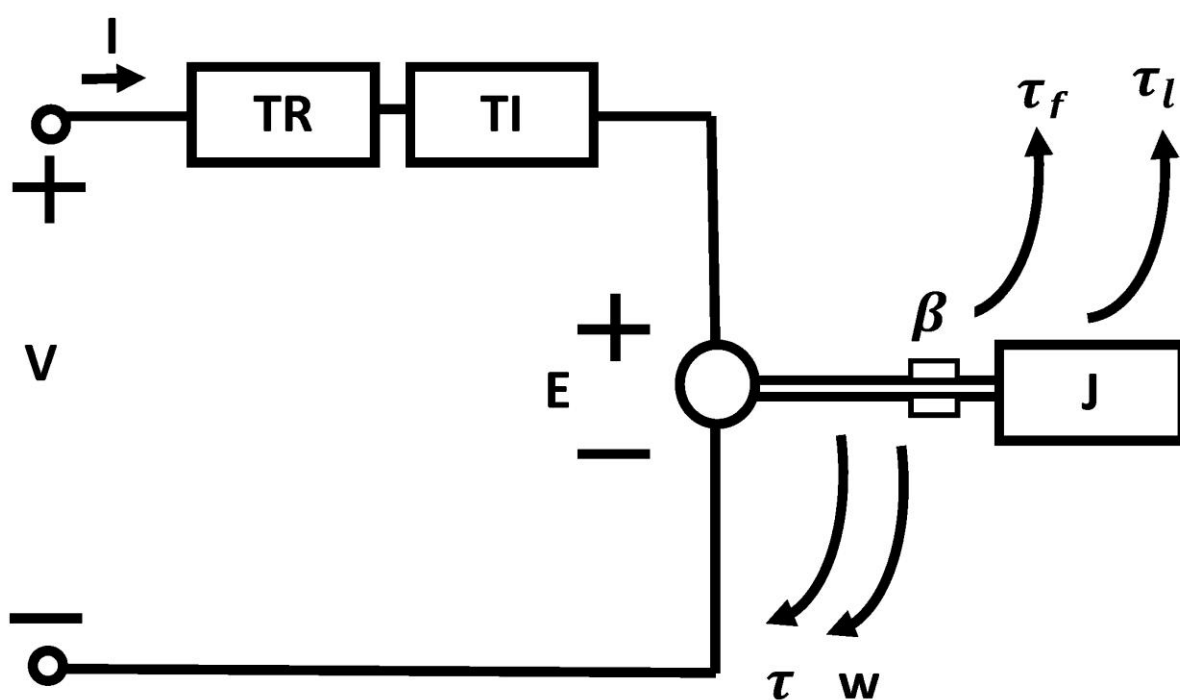
هر دانشجو موظف است در هر جلسه و در حین انجام آزمایشات مربوطه، گزارش کار خود را با توجه به پاسخی که از انجام آزمایشات می گیرد، تکمیل نموده و در پایان هر جلسه گزارش را تحویل مسول آزمایشگاه دهد. نمره کل ۲ بخش اول ۱۰ و نمره کل بخش سه-ام نیز ۱۰ می باشد.

فصل اول: کالیبراسیون سنسور، شناسایی  
مدل موتور الکتریکی و بررسی عملکرد  
سیستم کنترل حلقه باز

## ۱-۱- معرفی موتور الکتریکی

یکی از متداولترین موتورهای الکتریکی، موتور جریان مستقیم با تحریک مجزا می باشد. این موتور شامل یک بخش ثابت (استاتور) و در داخل آن یک بخش گردنده (روتور) می باشد. عموماً داخل استاتور آهنربای دائم قرار داده می شود و اقدام به سیم پیچی روتور می گردد. در این گونه موتورها با اعمال ولتاژ دی-سی به روتور، روتور به گردش در می آید.

مدل یک موتور الکتریکی جریان مستقیم تحریک مجزا به صورت زیر است:



شکل ۱- مدل یک موتور جریان مستقیم با تحریک مجزا.

در مدل بالا پارامترها عبارتند از:

V: Rotor voltage (input)

TR: Terminal resistance

TI: Terminal inductance

W: Motor speed (output)

$$E=1/Sp \cdot W$$

Sp: Speed constant

I: Motor current

$$\tau = Tc \cdot I$$

Tc: Torque constant

$$\tau_f = \beta W: \text{Friction torque}$$

$\beta$ : Friction constant

J: load inertia

$\tau_l$ : load torque

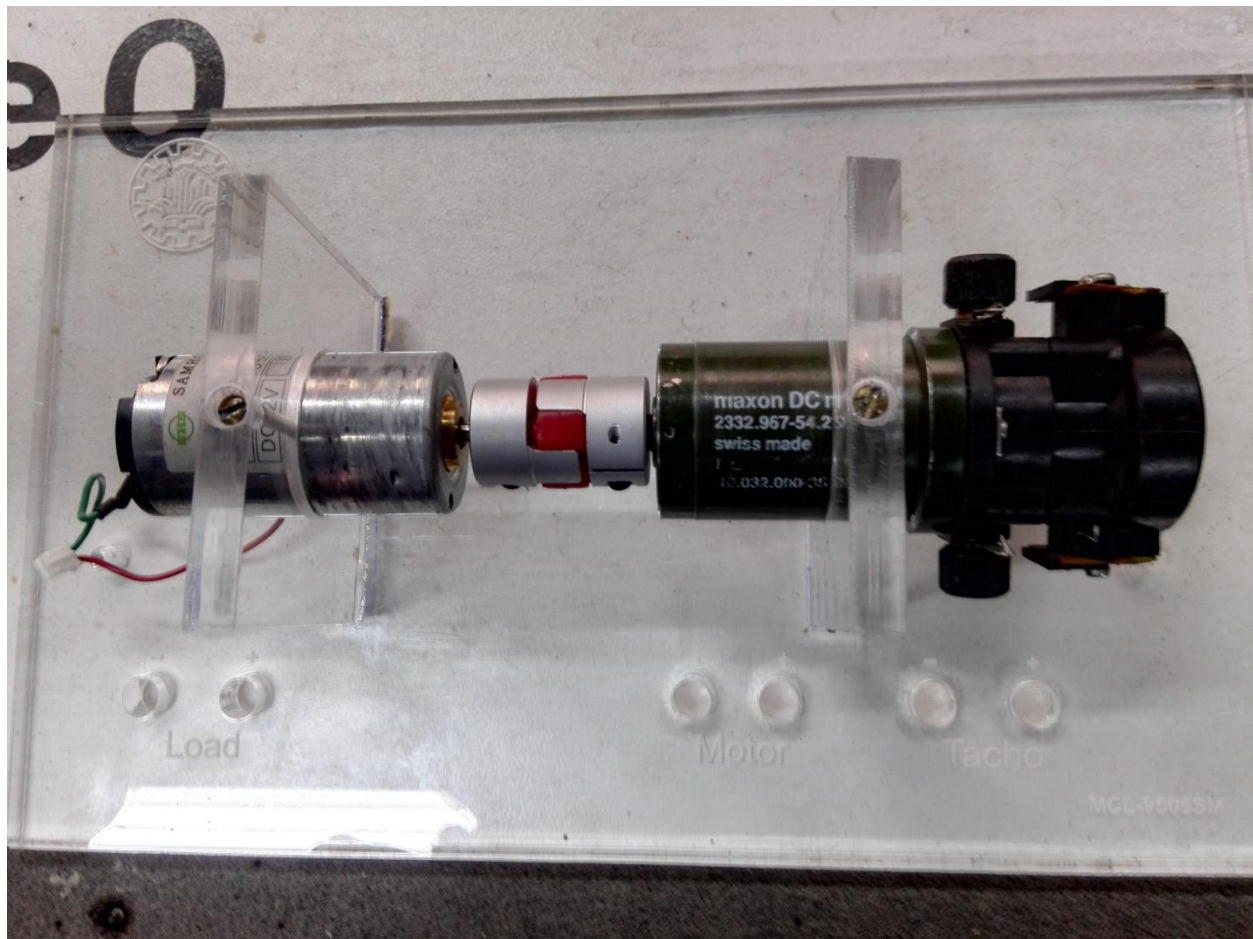
تمرین ۱-۱- با انتخاب جریان موتور به عنوان اولین متغیر حالت ( $x_1$ ) و سرعت موتور به عنوان دومین متغیر حالت ( $x_2$ )، مدل فضای حالت موتور را بدست آورید.

موتور مورد استفاده در این آزمایشگاه، موتور MAXON2332.967 می باشد که یک موتور جریان مستقیم تحریک مجزا می باشد. این موتور مجهز به یک تاکوژنراتور بعنوان سنسور سرعت و یک رسولور (Resolver) بعنوان شفت انکدر می باشد که در این آزمایشگاه تنها از سنسور سرعت استفاده می گردد. شکل ۲ این موتور را به تصویر کشیده است.



شکل ۲- نمایی از موتور MAXON2332.967

در این آزمایشگاه هدف کنترل سرعت چرخش شفت این موتور با استفاده از استراتژی فیدبک حالت و فیدبک خروجی برای حالتی است که این موتور تحت بار نامشخصی قرار می گیرد. برای اعمال بار به موتور در حین چرخش، از ماژول آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۳ استفاده می شود.



شکل ۳ - ماژول آزمایشگاه.

این ماژول شامل موتور ماکسون و یک ژنراتور جریان مستقیم کوچک است که توسط این موتور به گردش در می آید. هنگامی که خروجی این ژنراتور اتصال کوتاه می گردد، به موتور گشتاور اغتشاشی (بار) اعمال شده که مکانیزم فیدبک حالت باید اثرات آنرا در سرعت چرخش موتور جبران سازی نماید.

تمرین ۱-۲- با مراجعه به دیتا شیت موتور MAXON2332.967 ، پارامترهای این موتور را تعیین نمایید.

## ۱-۲- کالیبراسیون سنسور سرعت

منظور از کالیبراسیون سنسور، یافتن ضریب تبدیل خروجی سنسور و پارامتری است که می‌خواهیم آنرا اندازه‌گیری نماییم. در اینجا خروجی سنسور، ولتاژی است که متناسب با سرعت دور موتور می‌باشد. یعنی  $W = KV_s$ . پس هدف از کالیبراسیون در اینجا یافتن ثابت  $K$  می‌باشد.

تمرین ۱-۳- با توجه به آنکه به ازای ۱۰۰۰ دور در دقیقه، ولتاژ خروجی تاکوژنراتور ۰,۵۲ ولت است، کالیبراسیون سنسور سرعت را انجام دهید.

## ۱-۳- شناسایی پارامترهای موتور

تمرین ۱-۴- با مراجعه به دیتاشیت موتور تمامی پارامترهای موتور بکار رفته در ماژول آزمایشگاه قابل تعیین می‌باشد به غیر از ثابت اصطکاک و ممان اینرسی. حال آزمایش مناسبی را طراحی نمایید و با استفاده از آن این دو پارامتر را تعیین نمایید.

## ۱-۴- عملکرد سیستم کنترل حلقه باز

تمرین ۱-۵- ولتاژ ورودی به موتور را به گونه‌ای تعیین نمایید که موتور با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه بگردد. با انجام آزمایش و مشاهده خروجی سنسور سرعت توسط اسیلوسکوپ، صحت یافته‌ی خود را چک نمایید.

تمرین ۱-۶- حال در حین چرخش موتور، خروجی ژنراتور الکتریکی را اتصال کوتاه نمایید (این کار به منزله ترمز مغناطیسی است) و آزمایش تمرین ۱-۵- را مجدداً برای این حالت تکرار نمایید. سرعت چرخش موتور برای این حالت چند دور در دقیقه می‌باشد؟

تمرین ۱-۷- نتیجه‌گیری:



فصل دوم: پیاده سازی فیدبک حالت برای  
موتور الکتریکی و عملکرد آن در حضور  
اغتشاش

از آزمایشات فصل اول نتیجه گیری شد که در صورت فقدان اغتشاش بار، اگر چه سیستم کنترل حلقه باز موتور دارای عملکرد مطلوبی است ولی در حضور اغتشاش دارای عملکرد مناسبی نمی باشد. از آنجایی که در کاربردهای صنعتی، همواره اغتشاش وجود دارد باید با بکارگیری سیستم کنترل حلقه بسته، اثر اغتشاش را بر روی سیستم تا حد ممکن تضعیف کرد. در این راستا در این فصل به پیاده سازی فیدبک حالت برای کنترل سرعت موتور پرداخته می شود.

طراحی پیش جبران ساز استاتیکی در مسیر مرجع [سیستمهای کنترل مدرن، تالیف دکتر علی خاکی صدیق]:

فرض کنید که سیستم کنترل پذیر حالت بوده و دارای معادلات حالت و خروجی به فرم زیر باشد:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu(t) \\ y(t) &= CX(t) \end{cases}$$

برای این سیستم، سیستم کنترل حلقه بسته فیدبک حالت که سبب می گردد خروجی  $y(t)$  سیگنال مرجع  $r$  را دنبال نماید دارای توصیف زیر است:

$$u(t) = -KX(t) + \bar{u}$$

$$\bar{u} = -[C(A - BK)^{-1}B]^{-1}r$$

که با فرض آنکه سیستم تک ورودی است و مقادیر ویژه مطلوب  $\lambda_1^d, \dots, \lambda_n^d$  متمایز می باشند گین فیدبک حالت از رابطه زیر بدست می آید:

$$K = FT^{-1}$$

که  $T$  ماتریس مدال سیستم است (ستونهای آن شامل بردارهای ویژه ماتریس  $A$  می باشد) و  $F$  با ستونهای  $f_j$  از رابطه زیر محاسبه می شود ( $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  مقادیر ویژه ماتریس  $A$  می باشند):

$$f_j = \frac{\prod_{i=1}^n (\lambda_j - \lambda_i^d)}{b_j \prod_{i=1, i \neq j}^n (\lambda_j - \lambda_i)}$$

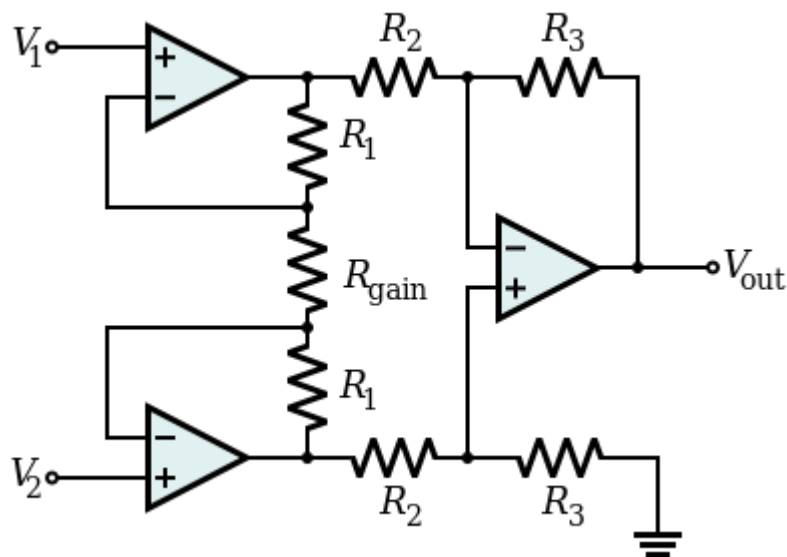
که  $b_j$  -ژامین المان بردار  $T^{-1}B$  می باشد.

تمرین ۲-۱- جهت اعمال فیدبک حالت، نیاز به اندازه گیری حالات سیستم (حالت اول: جریان موتور و حالت دوم: سرعت موتور) می باشد. سرعت موتور توسط سنسور سرعت کالیبره شده در فصل اول اندازه گیری می شود ( $y(t)$  خروجی سنسور سرعت می باشد). حال روشی را برای اندازه گیری مداوم جریان موتور با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه ارائه نمایید.

تمرین ۲-۲- با توجه به مدل شناسایی شده در فصل اول، ماتریسهای  $A, B, C$  و قطبهای حلقه باز موتور را تعیین نمایید.

تمرین ۲-۳- برای آنکه موتور بتواند اثر اغتشاش بار را تضعیف نماید از فیدبک حالتی با گین های  $k_1 = 10, k_2 = 1$  استفاده می شود. با استفاده از آپ امپ، مقاومت و خازن، شماتیک مدار الکترونیکی لازم جهت اعمال چنین فیدبک حالتی را رسم نمایید.

راهنمایی: جهت اندازه گیری ولتاژ دو سر مقاومت که جهت تعیین جریان موتور بکار می رود می توان از مدار تری آپ امپ اینسترومنتشن آمپلی فایر که در شکل ۴ نشان داده شده است استفاده نمود



شکل ۴- مدار تری آپ امپ اینسترومنتشن آمپلی فایر

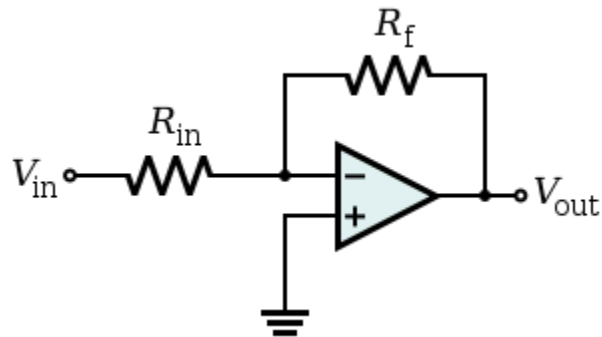
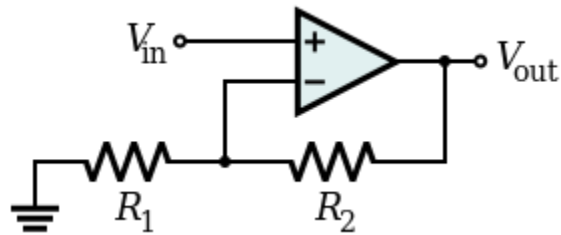
در مدار شکل بالا، دو آپ امپ اول نقش بافر با مقاومت ورودی بینهایت را ایفا می نمایند. با استفاده از آنها، ولتاژ دو سر مقاومت در هر لحظه نمونه برداری می گردد. آپ امپ سوم دارای عملکردی به صورت زیر است:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2}$$

که در آن  $V_{out}$  به گونه ای انتخاب می گردد که خروجی آپ امپ سوم معرف جریان موتور باشد.

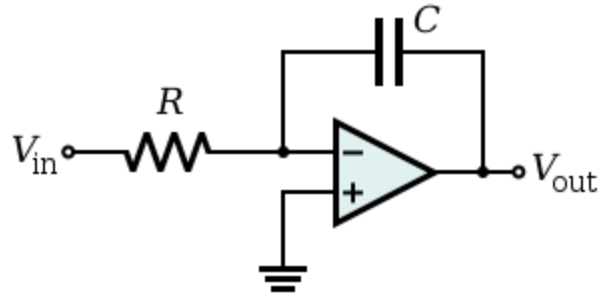
بدلیل مشخصات بسیار خوب آپ امپ OP07 در مواجهه با نویز برای کاربردهای آلات دقیق (ابزارهای اندازه گیری) مانند کاربرد بیان شده در بالا، از اینگونه آپ امپ استفاده می شود. دیتاشیت آپ امپ OP07 در بخش اپنندیکس موجود است.

شایان ذکر است بلوک بهره (گین) توسط مدار شکل ۵ و بلوک انتگرال گیر نیز توسط مدار شکل ۶ قابل تحقق می باشند.



شکل ۵- بلوک مدار بهره. رابطه بین ورودی و خروجی مدار بالا به فرم  $V_{out} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$  می باشد و رابطه بین ورودی

و خروجی مدار دوم نیز به فرم  $V_{out} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}}$  می باشد.



شکل ۶- بلوک مدار انتگرالگیر. رابطه بین ورودی و خروجی مدار بالا به فرم  $V_{out} = -\frac{1}{RCs} V_{in}$  می باشد.

تمرین ۲-۴- با استفاده از برد بورده، آپ امپ، خازن و مقاومت، مدار الکترونیکی فیدبک حالت طراحی شده را پیاده سازی نمایید. سپس با بکارگیری سیگنال ژنراتور و تولید پالسی با دامنه مناسب (به گونه ای که بدون حضور اغتشاش بار سرعت موتور ۱۵۰۰ دور در دقیقه باشد) و اعمال این پالس به مدار فیدبک حالت به عنوان سیگنال مرجع و اعمال خروجی این مدار به موتور از طریق درایور، صحت طراحی خود را با مشاهده خروجی سنسور سرعت بر روی اسیلوسکوپ چک نمایید.

تمرین ۲-۵- با اعمال ترمز مغناطیسی، عملکرد سیستم کنترل طراحی شده در مواجهه با اغتشاش (ترمز مغناطیسی) را بررسی نموده و با عملکرد سیستم کنترل حلقه باز مقایسه نمایید. سرعت چرخش موتور پس از اعمال ترمز مغناطیسی چند است؟

تمرین ۲-۶- تمرین ۲-۴ و ۲-۵ را برای گین های فیدبک زیر تکرار نمایید:

$$(k_1, k_2) = (2, 0)$$

$$(k_1, k_2) = (10, 0)$$

$$(k_1, k_2) = (0, 2)$$

$$(k_1, k_2) = (0, 10)$$

تمرین ۲-۷- نتیجه گیری:

فصل سوم: تحقق سیستم از روی تابع  
تبدیل، طراحی و پیاده سازی فیدبک حالت  
و خروجی

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + s + 8}$$

الف: مدل فضای حالت این سیستم را بدست آورید. ب: با بکارگیری آپ-امپ، مقاومت و خازن، شماتیک مدار الکترونیکی که دارای تابع تبدیل بالاست را بدست آورید.

۲-۳- الف: ضریب میرایی، درصد فراجش و زمان نشست سیستمی با تابع تبدیل بالا چند است؟ ب: با استفاده از آپ-امپ، مقاومت و خازن، سیستم الکترونیکی که دارای تابع تبدیل بالاست را تحقق ببخشید. سپس با اعمال پالسی با دامنه ۸ ولت و فرکانس ۰٫۱ هرتز، صحت تحقق خود را با انجام آزمایش چک نمایید.

۳-۳- حال می خواهیم سیستم تحقق یافته را مجهز به فیدبک حالتی نماییم به گونه ای که ضریب میرایی سیستم با فیدبک،  $\sqrt{2}/2$  و فرکانس طبیعی نیز  $2\sqrt{2}$  گردد. گین های فیدبک حالت را محاسبه نمایید. برای آنکه مقدار مانای خروجی ۱ باشد،  $\bar{u}$  چند باید باشد؟

۴-۳- با بکارگیری، برد برد، آپ-امپ، مقاومت و خازن، فیدبک حالت طراحی شده در مثال قبل را تحقق بخشید و صحت طراحی خود را با انجام آزمایش چک نمایید.

۵-۳- حال فرض نمایید که تنها خروجی سیستم در دسترس می باشد. لذا جهت تحقق فیدبک حالت لازم است که حالات سیستم از خروجی تخمین زده شود. برای این منظور تخمینگر لیونبرگر طراحی نمایید که با فراجش ۱۰ درصد و زمان نشست ۱ ثانیه اقدام به تخمین حالات سیستم با خطای مانای صفر نماید.

یادآوری: جهت اعمال فیدبک حالت نیاز به اندازه گیری مداوم تمامی حالات سیستم می باشد. لیکن در بسیاری از کاربردهای صنعتی اندازه گیری تمامی حالات سیستم ممکن است گرانقیمت یا ناممکن باشد. لذا در عمل، تنها حالاتی که اندازه گیری آنها آسان است، اندازه گیری شده و سپس با بکارگیری حالات تخمین زده شده و آن دسته از حالاتی که اندازه گیری آنها آسان است در فیدبک حالت، اقدام به کنترل حلقه بسته سیستم می نمایند. به استراتژی فوق الذکر استراتژی فیدبک خروجی گویند. یکی از متداولترین تخمینگرهای حالت، تخمینگر لیونبرگر است که در زیر تشریح می گردد:

**تخمینگر لیونبرگر [سیستمهای کنترل مدل، تالیف دکتر خاکی صدیق]:**

فرض کنید سیستم رویت پذیر و دارای معادلات حالت و خروجی به فرم زیر باشد:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu(t) \\ y(t) &= CX(t) \end{cases}$$

برای این سیستم، تخمینگر لیونبرگر دارای توصیف زیر است

$$\frac{d}{dt}\hat{X}(t) = A\hat{X}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{X}(t))$$

که ماتریس  $L'$  با استفاده از روش جابجایی قطبهای بیان شده در فصل دوم برای زوج  $(A', C')$  طراحی می گردد.

۳-۶- با بکارگیری آپ-امپ، مقاومت و خازن، شماتیک مدار الکترونیکی تخمینگر طراحی شده در بالا را رسم نمایید.

۳-۷- با بکارگیری برد برد، آپ-امپ، مقاومت و خازن، مدار الکترونیکی تخمینگر طراحی شده در بالا را تحقق ببخشید و با انجام آزمایش صحت طراحی خود را چک نمایید.

۳-۸- حال بجای استفاده مستقیم از حالات سیستم در مدار الکترونیکی فیدبک حالت، از حالات تخمین زده شده توسط تخمینگر استفاده نمایید و عملکرد فیدبک خروجی حاصل را با انجام آزمایش بررسی نمایید.