

به نام خدا



دانشگاه تهران

پردیس دانشکده‌های فنی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

سیستم‌های کنترل پیشرفته

پروژه فاز دو

نیمه زمان پور

810198407

دی ماه 1401

## فهرست

|         |               |
|---------|---------------|
| 3.....  | خواستہ 1..... |
| 5.....  | خواستہ 2..... |
| 6.....  | خواستہ 3..... |
| 8.....  | خواستہ 4..... |
| 10..... | خواستہ 5..... |
| 11..... | خواستہ 6..... |

## خواسته 1

بر اساس تابع تبدیل بدست آمده در فاز قبل، قطب های سیستم  $s = 15.6, -15.7, -250$  است. که قطب  $-250$  سریع است و بقیه کند هستند.

برای معادلات حالت سیستم داریم:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 244.83 & -0.09828 & 26.867 \\ 0 & 0 & -250 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0 \quad 0]X$$

تابع تبدیل سیستم بصورت زیر است:

$$G(s) = \frac{b(s)}{a(s)} = \frac{134.38}{s^3 + 250.1s^2 - 291.92s - 61230}$$

برای جابجایی قطب های سیستم از حالت نامطلوب به مطلوب ابتدا برای دسته قطب های سریع قطب های  $-50, -60, -80$  در نظر می گیریم.

$$\alpha(s) = s^3 + 190s^2 + 11800 + 24e4$$

از روش بس و گیورا استفاده می کنیم.

$$K = (\alpha - a)\Psi^{-1}C^{-1}$$

$$\alpha = [190 \quad 11800 \quad 24e4], a = [250.1 \quad -291.92 \quad -61230]$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 250.1 & -291.92 \\ 0 & 1 & 250.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 134.34 \\ 0 & 134.34 & -33600 \\ 5 & -1250 & 312500 \end{bmatrix}$$

$$K = [2132 \quad 89.494 \quad -12.02]$$

حال این کار را مجددا برای دسته قطب های کند  $-2, -4, -5$  انجام می دهیم.

$$\alpha(s) = s^3 + 11s^2 + 38s + 40$$

$$K = (\alpha - a)\Psi^{-1}C^{-1}$$

$$\alpha = [11 \quad 38 \quad 40], a = [250.1 \quad -291.92 \quad -61230]$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} 1 & 250.1 & -291.92 \\ 0 & 1 & 250.1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 134.34 \\ 0 & 134.34 & -33600 \\ 5 & -1250 & 312500 \end{bmatrix}$$

$$K = [20.16 \quad 2.097 \quad -47.82]$$

برای شبیه سازی سیستم به کمک فیدبک حالت  $u = -kx + r$  قرار می دهیم. برای قطب تند و کند نتایج بصورت زیر است:

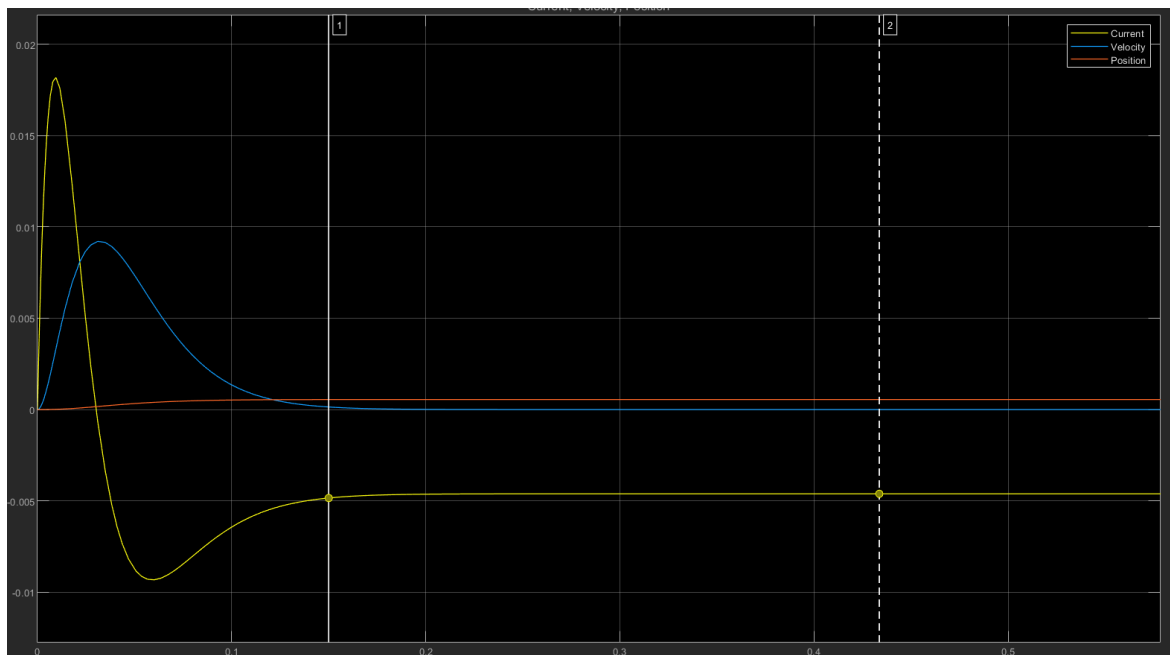


Figure 1 نمودار متغیر های حالت سیستم با فیدبک حالت تند

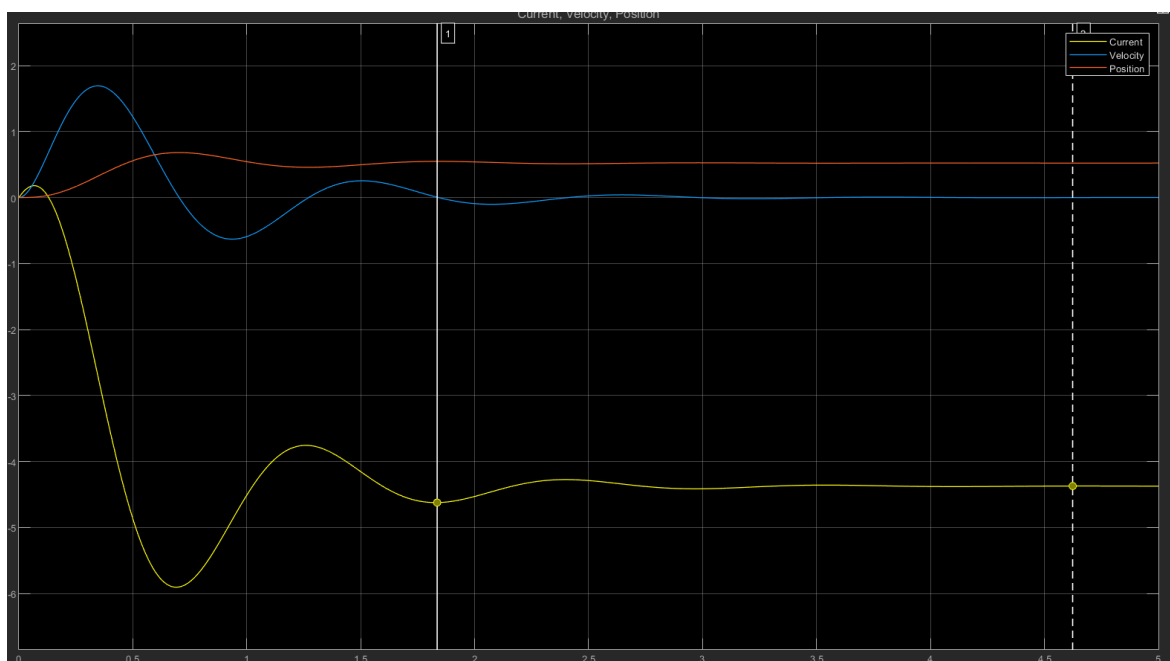


Figure 2 نمودار متغیر های حالت سیستم با فیدبک حالت کند

همانطور که در شکل می بینید با جابجایی قطب ها به قطب های سریعتر زمان صعود و نشست کمتر شده است. (حدود 0.1 در مقایسه با 1.9 برای موقعیت و 0.15 و 1.85 برای جریان). اما بزرگ بودن ضرایب کنترل کننده باعث شده فراجاهش زیاد شود. یعنی در ابتدا سیستم جریان بسیار زیادی می کشد که این

مسئله ممکن است سیم ها را ذوب کند. همچنین بزرگ پیاده سازی آن را پیچیده تر و پرهزینه تر می کند. همچنین می توان دید که مقدار steady-state متغیر های حالت در کنترلر تند بسیار کوچکتر از متغیر های حالت در کنترلر کند است.

$$\dot{x} = A_c x + Bu, A_c = A - Bk, u = -kx + r$$

به این دلیل است که چون در حالت steady-state  $\dot{x} = 0$  است. با زیاد شدن  $K$ ،  $X$  نیز کاهش پیدا می کند. که برای رفع این مشکل نیاز به طراحی ردیاب است.

## خواسته 2

از یک سیگنال ژنراتور با سیگنال سینوسی فرکانس 5hz و دامنه 0.05 استفاده می کنیم. و آن را با متغیر های حالت جمع می کنیم. همانطور که می توان دید کنترلر حالت موفق به حذف اغتشاش نشده و خروجی سیستم نوسانی است. که برای رفع این مشکل نیاز به کنترلر انتگرالی داریم.

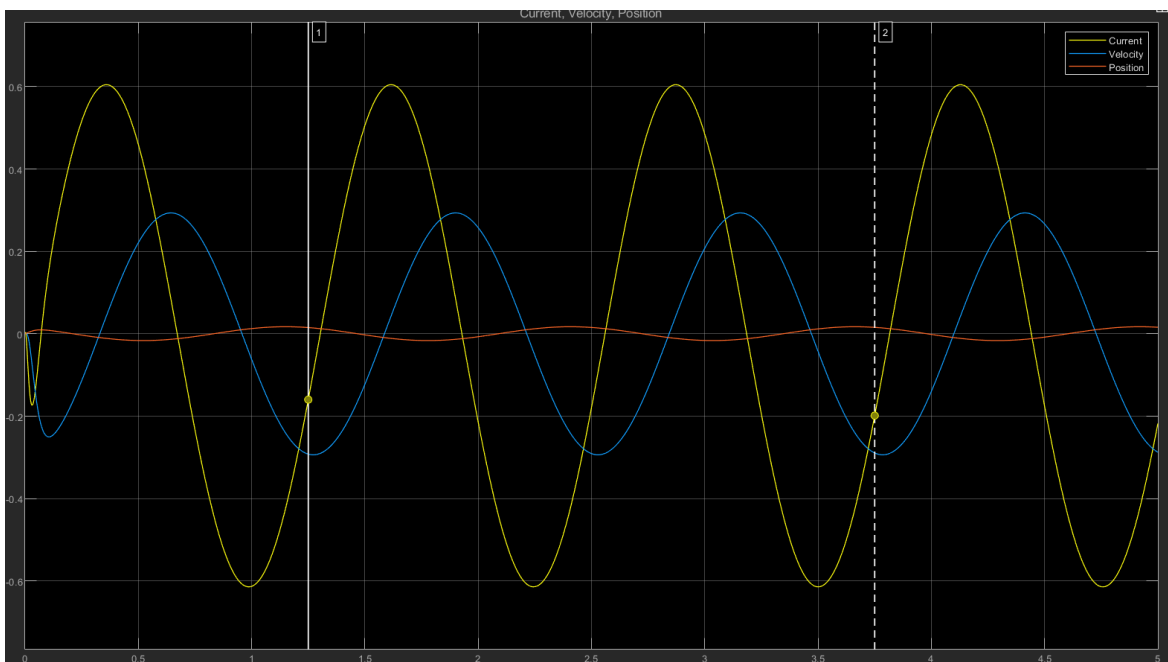


Figure 3 نمودار متغیر های حالت سیستم با فیدبک حالت کند در حضور اغتشاش

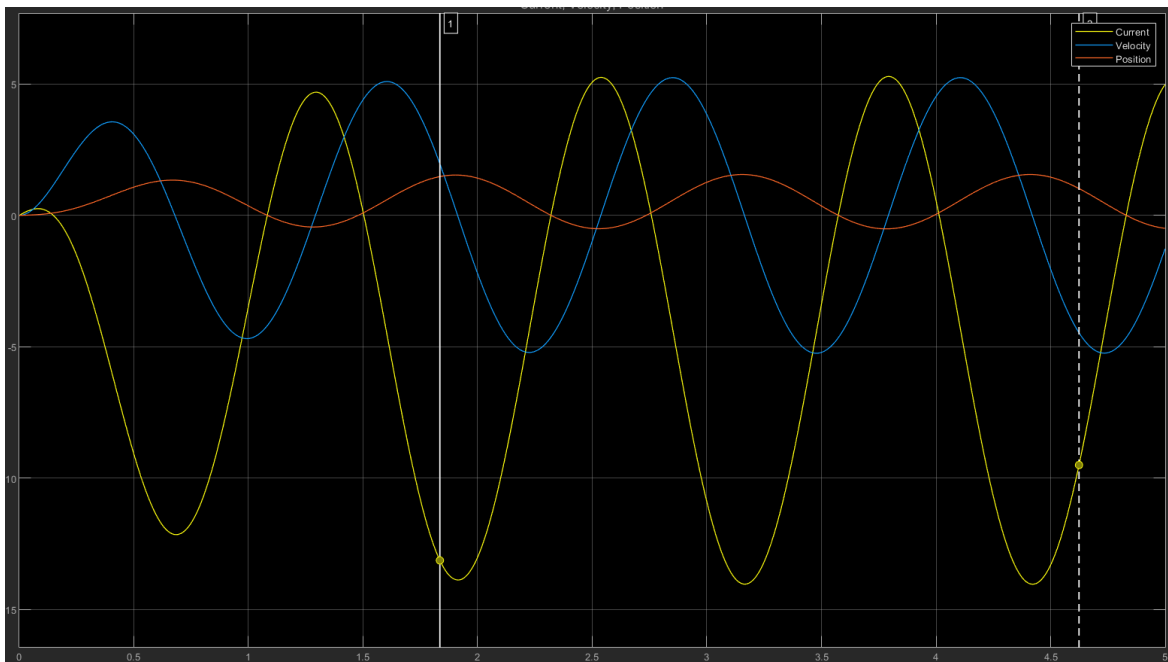


Figure 4 نمودار متغیرهای حالت سیستم با فیدبک حالت تند در حضور اغتشاش

### خواسته 3

برای طراحی ردیاب با فیدبک حالت و کنترل انتگرالی داریم:

$$u = -k_1 x - k_2 q, q = r - y(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} r$$

$$y = [C \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ q \end{bmatrix}$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 244.83 & -0.09828 & 26.867 & 0 \\ 0 & 0 & -250 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \\ 0 \end{bmatrix}$$

شرط لازم برای کنترل پذیری به کمک ورودی  $u$  کنترل پذیر بودن  $\bar{A}, \bar{B}$  است.

$$Co = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 134.34 & -3.36e4 \\ 0 & 134.34 & -3.36e4 & 8.321e6 \\ 5 & -1250 & 312500 & -7.813e8 \\ 0 & 0 & 0 & -134.34 \end{bmatrix}$$

رنگ ماتریس کنترل پذیری 4 است. پس زوج  $\bar{A}, \bar{B}$  کنترل پذیر است.

حال کنترلر حالت را برای  $\bar{A}, \bar{B}$  می نویسیم. قطب های سیستم حلقه بسته را -10, -15, -20 و قطب

انتگرال گیر را -5 قرار می دهیم. از روش آکرمین استفاده می کنیم.

$$K = q_n^T \alpha(A), \quad q_n^T \alpha = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1]_{1,n} Co^{-1}$$

$$\alpha(s) = s^4 + 50s^3 + 875s^2 + 6250s + 15000$$

$$K = [137.47 \quad 8.3 \quad -40.02 \quad -111]$$

با طراحی دیاگرام ردیاب فیدبک حالت و کنترلر انتگرالی مطابق جزوه درس و همچنین اضافه کردن یک اغتشاش با اندازه ثابت 5 خروجی سیستم بصورت زیر است:

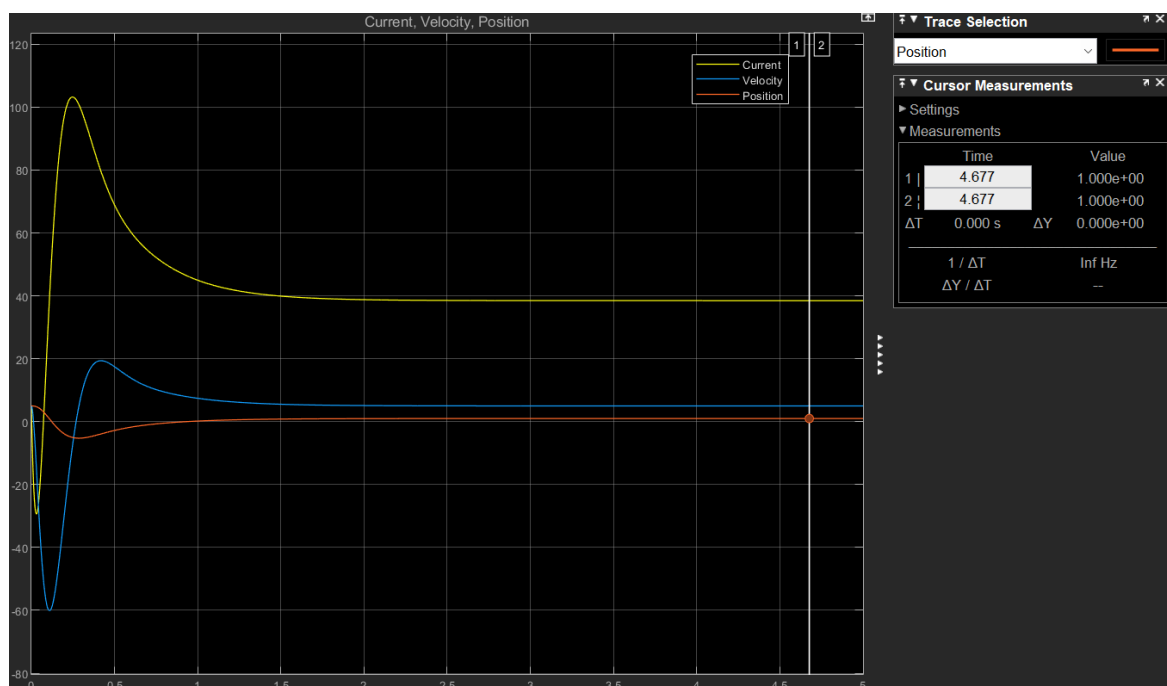


Figure 5 نمودار متغیرهای حالت سیستم در حضور اغتشاش با ردیاب فیدبک حالت و کنترلر انتگرالی

همانطور که می‌توان دید علی‌رغم این که اغتشاش باعث شده steady-state سایر متغیرهای حالت جابجا شود. اما چون مشتق  $q$  به سمت صفر می‌رود. پس  $y(t) = r \rightarrow r - y(t) = 0$  پس خروجی سیستم به خوبی مرجع را دنبال می‌کند. و هدف ما تامین می‌شود.

از نتایج کنترلر PID فاز قبل داریم:



Figure 6 نمودار متغیر های حالت با کنترلر PID

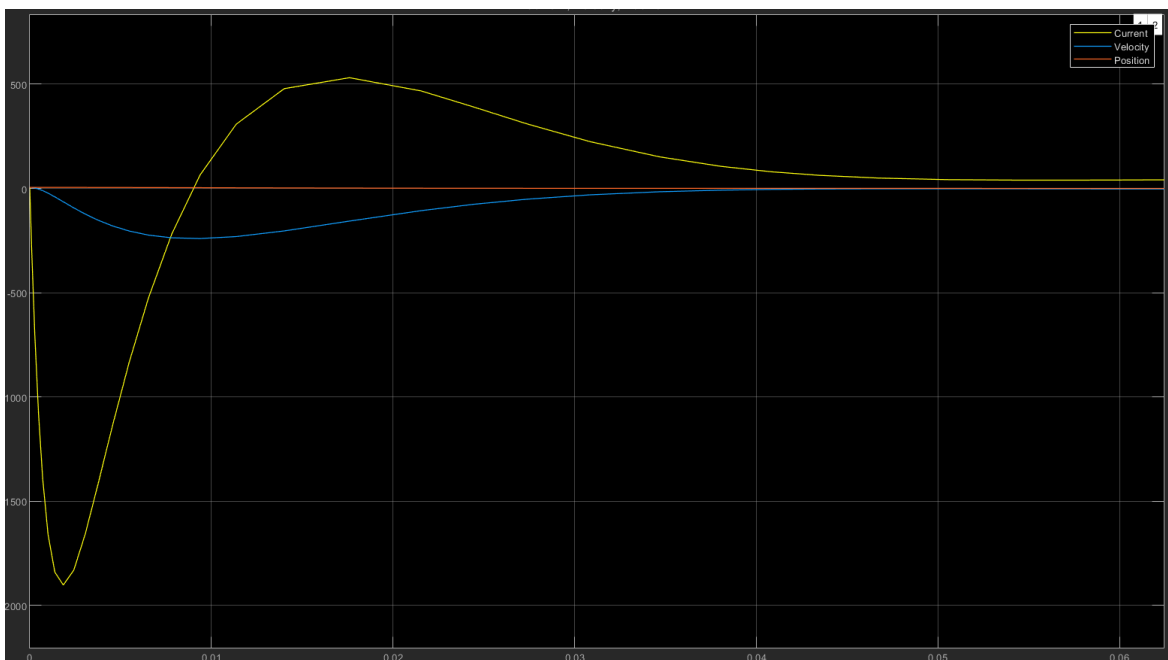


Figure 7 نمودار متغیر های حالت با کنترلر PID از نمای نزدیک

با مقایسه 2 نمودار می توان دید که کنترلر انتگرالی فراجش کمتر و زمان نشست بیشتری دارد و کنترلر PID فراجش بیشتر و زمان نشست کمتری دارد.

## خواسته 4

برای طراحی یک رویتر خطی از خاصیت دوگانی استفاده می کنیم. و یک کنترلر با قطب های  $-50$ ،  $-60$ ،  $-80$  طراحی می کنیم. به کمک روش آکرمین:



$$\begin{cases} K \rightarrow L^T \\ B \rightarrow C^T \\ A \rightarrow A^T \end{cases}$$

$$K = q_n^T \alpha(A), \quad q_n^T \alpha = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1]_{1,n} Co^{-1}$$

$$\alpha(s) = s^3 + 190s^2 + 11800s + 24e4$$

$$L = \begin{bmatrix} -60.01 \\ 27051 \\ -240360 \end{bmatrix}$$

ماتریس L را یکبار دیگر برای قطب های سیستم کند بصورت -100, -150, -200 بدست می آوریم:

$$K = q_n^T \alpha(A), \quad q_n^T \alpha = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1]_{1,n} Co^{-1}$$

$$s^3 + 450s^2 + 65000s + 3e6$$

$$L = \begin{bmatrix} 200 \\ 15225 \\ -27906 \end{bmatrix}$$

حال مطابق دیاگرام بلوکی جزوه، فیدبک حالت از حالت تخمینی را شبیه سازی می کنیم.

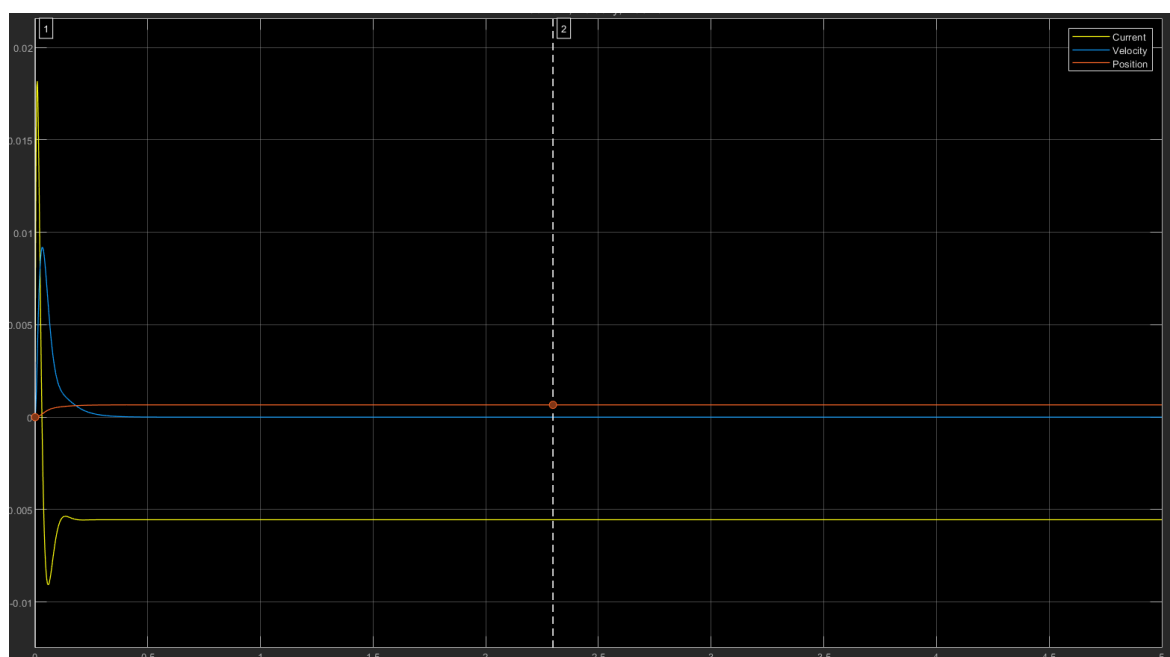


Figure 8 نمودار متغیر های حالت سیستم در فیدبک حالت از حالت تخمینی قطب های تند

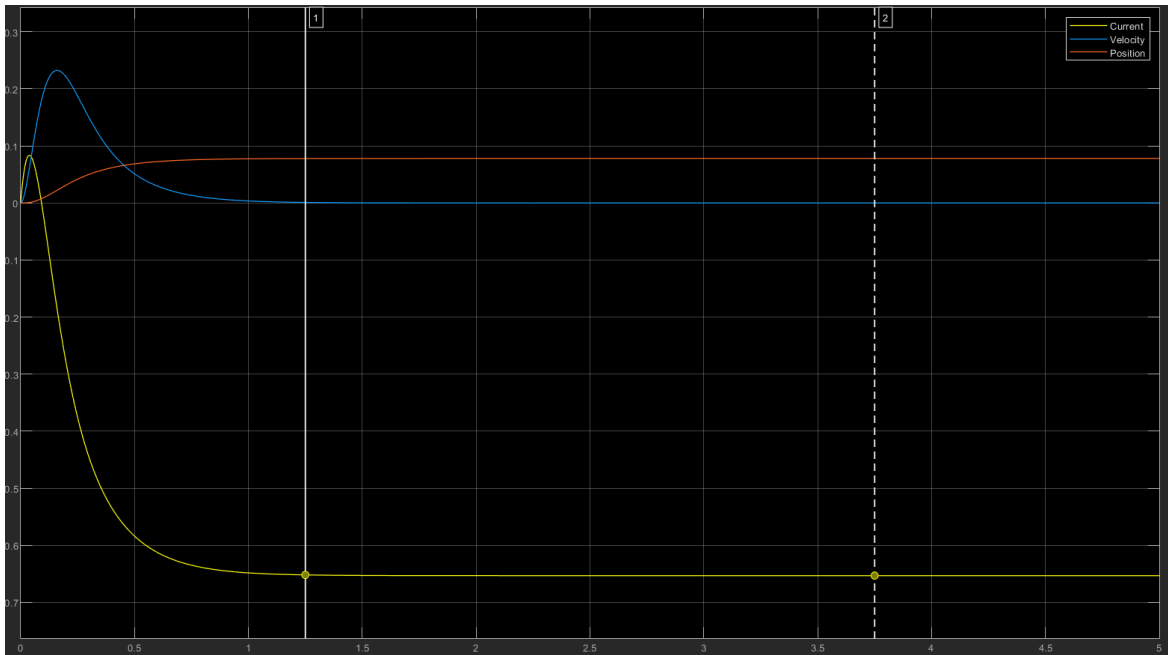


Figure 9 نمودار متغیرهای حالت سیستم در فیدبک حالت از حالت تخمینی قطب های کند

رویتگر حالت بخوبی توانست متغیرهای حالت سیستم را تخمین بزند. و کنترلر حالت نیز قطب های سیستم را جابجایی کرد و سیستم پایدار شد.

## خواسته 5

برای طراحی رویتگر کاهش مرتبه یافته ابتدا دقت می کنیم. که  $L = 1$  است. پس یک ماتریس پایدار  $F_{2 \times 2}$  انتخاب می کنیم که مقدار ویژه مشترک با  $A$  نداشته باشد.

$$F = \begin{bmatrix} -10 & 2 \\ 0 & -40 \end{bmatrix}, \lambda = -10, -40$$

سپس  $L$  را طوری انتخاب می کنیم که  $(F, L)$  کنترل پذیر باشند:

$$L = \begin{bmatrix} 1 \\ -10 \end{bmatrix}, Co = \begin{bmatrix} 1 & -30 \\ -10 & 400 \end{bmatrix},$$

سپس  $T$  را از معادله زیر بدست می آوریم:

$$TA - FT = LC$$

$$T = \begin{bmatrix} -0.0029 & 0.0018 & 1.628e-4 \\ -0.2953 & 0.0074 & 9.471e-4 \end{bmatrix}$$

در این صورت معادلات زیر تخمین  $x$  را می دهند:

$$\dot{z} = Fz + TBu + Ly$$

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -200.01 & 3500 & -712.57 \\ 1875 & -27344 & 6624 \end{bmatrix}$$

با بدست آمدن ماترس  $P^{-1}$  حالت بلوک دیاگرام سیستم را مشابه سیستم 4 اما با تفاوت در تخمینگر(بر اساس فرمول های بالا) طراحی می کنیم. با تلاش های بسیار و امتحان کردن مقادیر مختلف برای  $K, F, L$  متاسفانه سیستم پایدار نشد. شکل زیر بهترین نتیجه سیستم است:



Figure 10 نمودار های متغیر های حالت در فیدبک حالت از حالت تخمینی کاهش مرتبه یافته

## خواسته 6

کنترلر قسمت 4 را برای سیستم غیر خطی پیاده سازی می کنیم. به دلیل وجود محدود کننده برای سیستم غیر خطی موجود در بلوک Magnetic Levitation مقدار و تغییر موقعیت همواره بین 0 تا 0.1 است. و متغیر جریان حداکثر تا 16000 زیاد می شود. به همین دلیل برای همه مقادیر ورودی  $r(t)$  سیستم غیر خطی پایدار است.

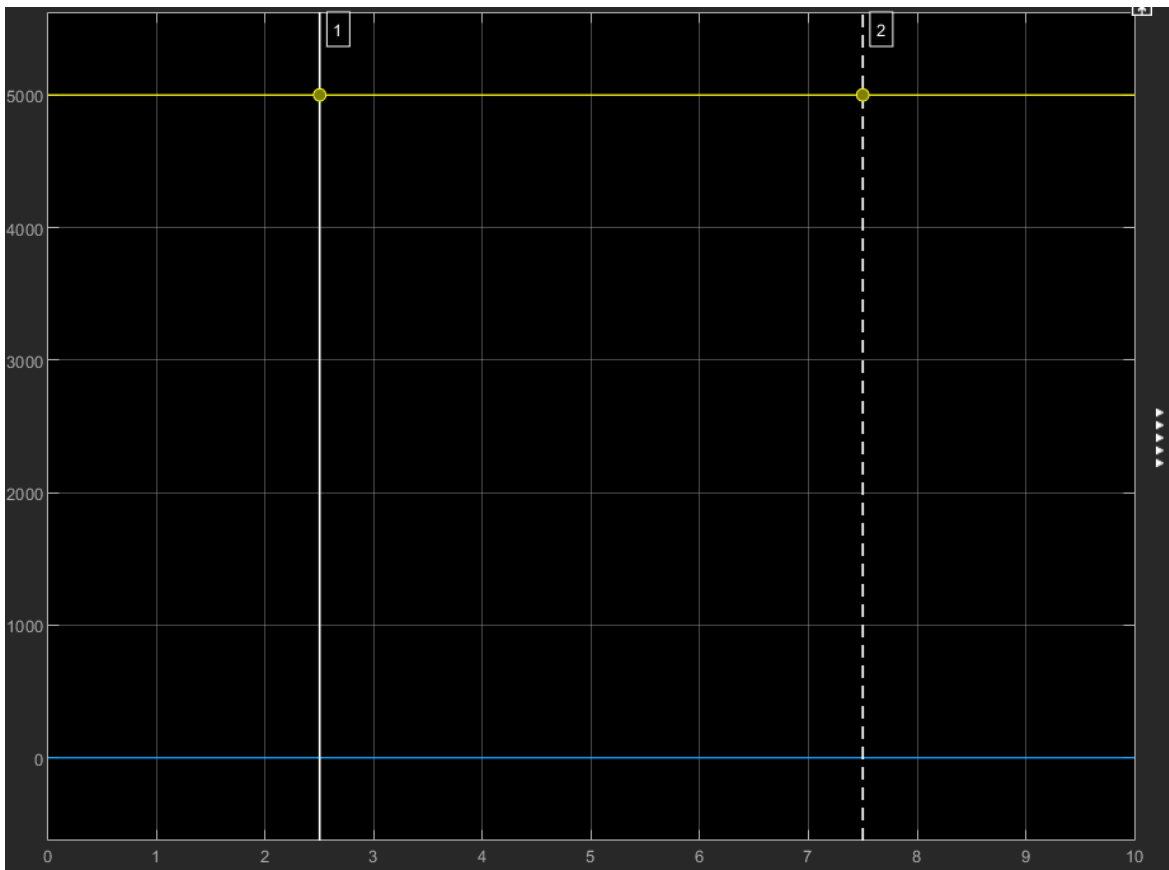


Figure 11 نمودار موقعیت و رفرنس سیستم



Figure 12 نمودار جریان و سرعت در  $r(t) = 5000$