

دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده برق - گروه مکترونیک

تمرین درس کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل دوره کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مکترونیک

عنوان

تمرین درس کنترل مبتنی بر پیش بینی مدل

نگارش

علیرضا امیری

آذر ۱۴۰۳

فصل ۱

پاسخ سوالات سری سوم

پاسخ سوال ۱

سوال یکم

تابع تبدیل سیستم به صورت زیر داده شده است:

$$\frac{K_s k_e k_{sp} (A_o + A_i)}{(s\tau + 1)(sA_o^\gamma + sA_i^\gamma + (K_p + Cs)(m_a s^\gamma + ds + k_e))}$$

برای محاسبه ی معادلات حالت این سیستم، از روش تحقق مینیمال استفاده می شود. لازم به ذکر است که این تبدیل به وسیله ی تابع $tfss$ امکان پذیر نیست، چرا که در محاسبه ی آن مقادیر نمادین مورد استفاده قرار گرفته اند. برای محاسبه به روش تحقق مینیمال، ابتدا لازم است صورت و مخرج تابع تبدیل به صورت چند جمله ای مرتب در آید. بنابراین خواهیم داشت:

$$C_{num} = K_s k_e k_{sp} (A_o + A_i)$$

$$C_{den} = \begin{pmatrix} K_p k_e & A_o^\gamma + A_i^\gamma + C k_e + K_p d + K_p k_e \tau & C d + K_p m_a + \tau (A_o^\gamma + A_i^\gamma + C k_e + K_p d) & C m_a + \tau (C d + K_p m_a) & C m_a \tau \end{pmatrix}$$

طبق تعریف تحقق مینیمال ارائه شده برای این تمرین، ماتریس های حالت با تعاریف زیر محاسبه می شوند.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\beta}{s^n + \alpha_1 s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1} s + \alpha_n}$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_n & -\alpha_{n-1} & -\alpha_{n-2} & \dots & -\alpha_1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \beta \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} x(t)$$

که در آن:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{(\tau(K_p m_a + C d) + C m_a)}{\tau C m_a} \\ \alpha_2 = \frac{(\tau(K_p d + C k_e + A_i^\gamma + A_o^\gamma) + (K_p m_a + C d))}{\tau C m_a} \\ \alpha_3 = \frac{(\tau K_p k_e + (K_p d + C k_e + A_i^\gamma + A_o^\gamma))}{\tau C m_a} \\ \alpha_4 = \frac{K_p k_e}{\tau C m_a} \\ \beta = \frac{k_{sp} K_s k_e (A_i + A_o)}{\tau C m_a} \end{cases}$$

با این تعاریف، ماتریس های حالت به دست می آیند.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{C m_a \tau}{K_p k_e} & -\frac{C m_a + \tau (C d + K_p m_a)}{K_p k_e} & -\frac{C d + K_p m_a + \tau (A_o^\gamma + A_i^\gamma + C k_e + K_p d)}{K_p k_e} & -\frac{A_o^\gamma + A_i^\gamma + C k_e + K_p d + K_p k_e \tau}{K_p k_e} \end{pmatrix}$$

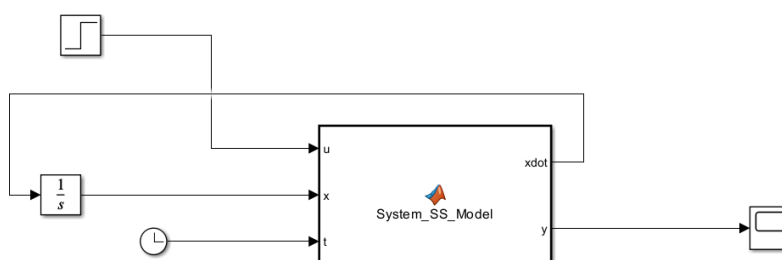
$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_s k_{sp} (A_o + A_i)}{K_p} \end{pmatrix}$$

$$C = [1, 0, 0, 0]$$

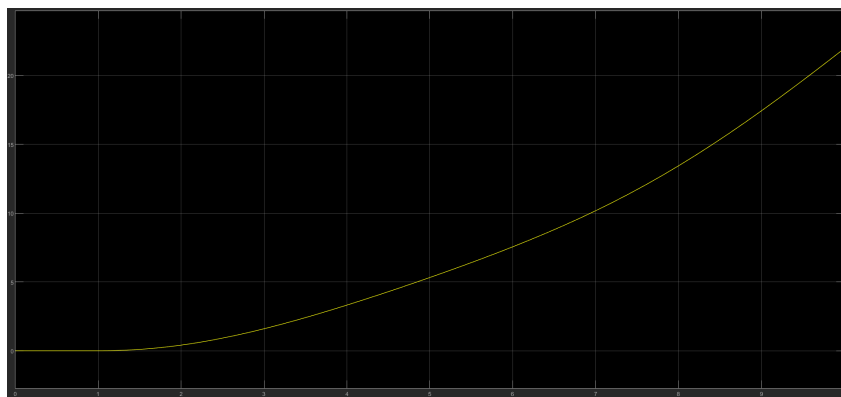
$$D = 0$$

سوال دوم

برای حل سوال دوم، که کنترل سیستم ذکر شده به روش MPC خطی است، لازم است ابتدا معادلات حالت این سیستم در فضای سیمولینک تعریف شوند.

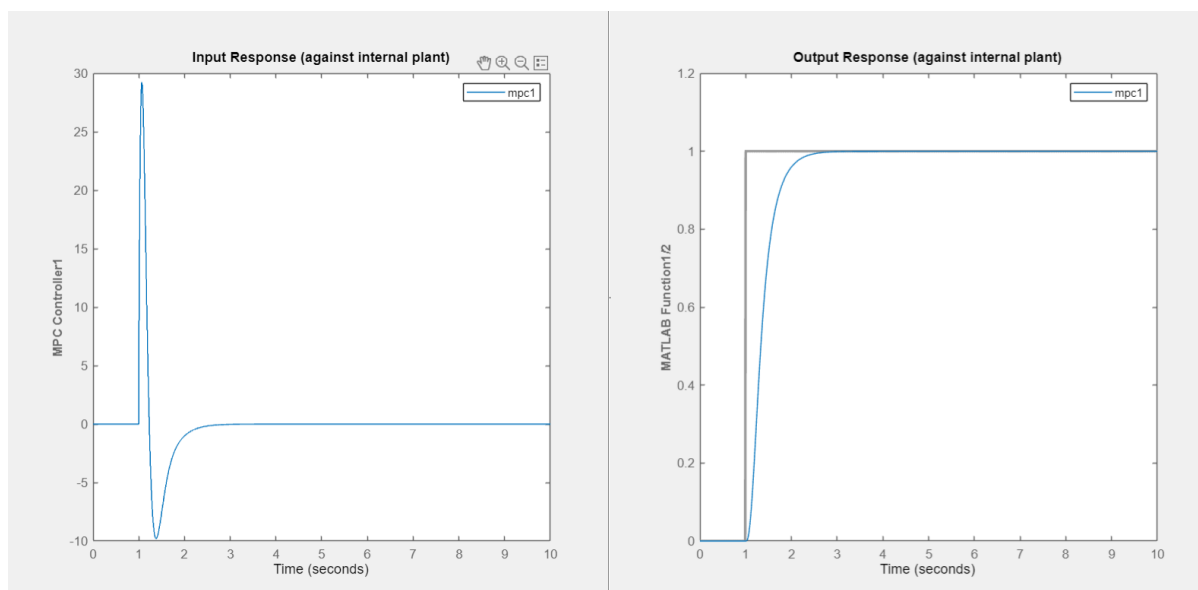


شکل ۱.۱: دیاگرام سیستم حلقه باز در محیط سیمولینک



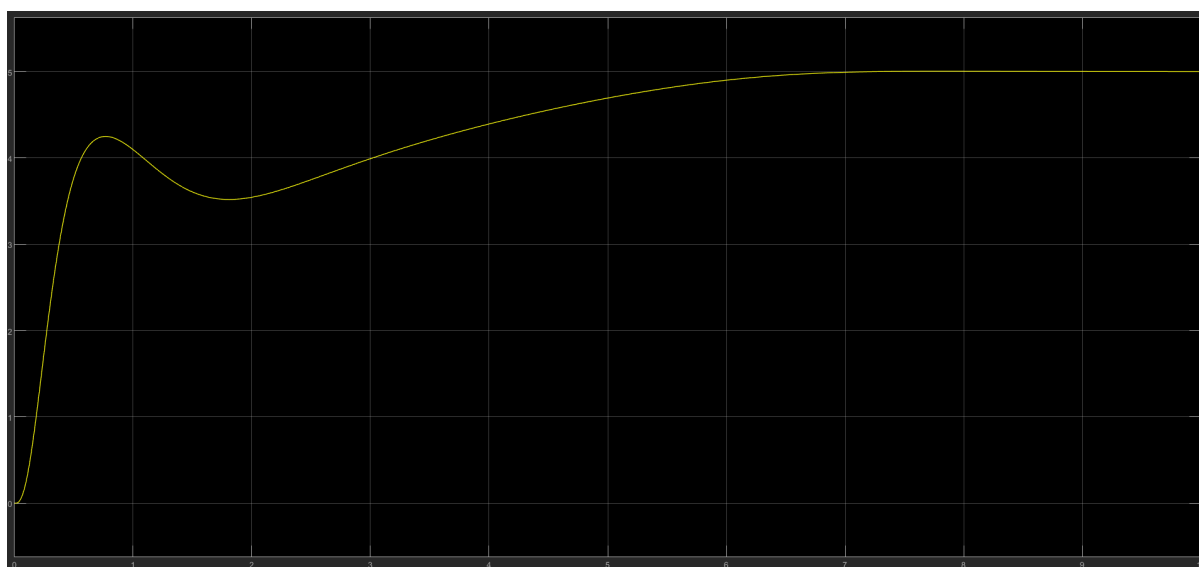
شکل ۲.۱: پاسخ حلقه باز سیستم

همچنین، لحاظ کردن ناپیچینی های این سیستم در این بخش در نظر گرفته شده است. برای اعمال این ناپیچینی ها، از تابع سینوسی متغیر با زمان برای اعمال مقادیر انحراف از مقدار واقعی استفاده شده است. در ادامه، با قرار دادن کنترلر MPC خطی به جای ورودی پله به این سیستم، آن را کنترل خواهیم کرد. برای تنظیم کنترلر پیش بین، از نرخ نمونه برداری ۰.۱ ثانیه، افق پیش بین ۱۰۰ و افق کنترلی ۲۰ استفاده شده است. نمودار تلاش کنترلی و خروجی سیستم در نمودار زیر نمایش داده شده است.



شکل ۳.۱: تلاش کنترلی و پاسخ سیستم کنترل شده با کنترلر پیش بین خطی

در نتیجه پاسخ سیستم به صورت زیر به دست می آید.

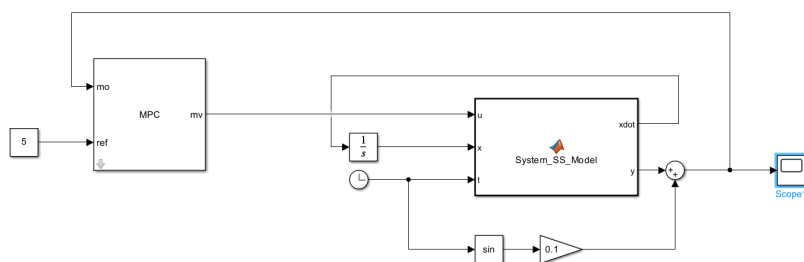


شکل ۴.۱: پاسخ سیستم با کنترلر پیش بین خطی

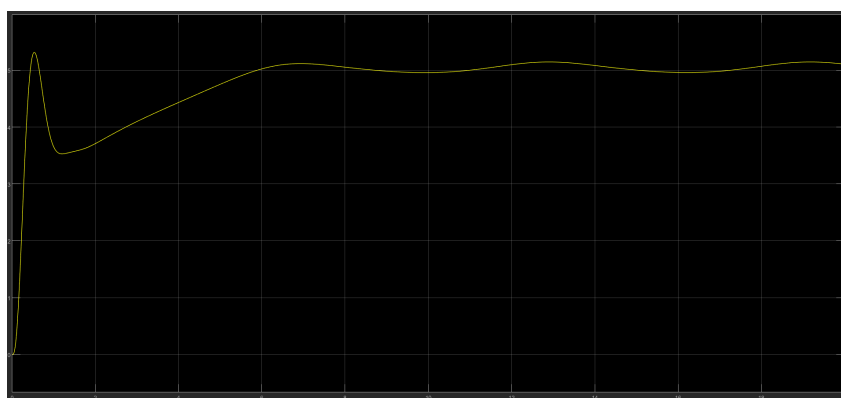
مشاهده می شود که سیستم فوق قادر است مدل را در زمان ۸ ثانیه به پایداری برساند و خطای ماندگار آن صفر شود.

سوال سوم

در این بخش، با اعمال اغتشاش سینوسی به سیستم، مجدداً کنترلی طراحی و تنظیم می شود.



شکل ۵.۱: دیاگرام سیستم همراه با اغتشاش

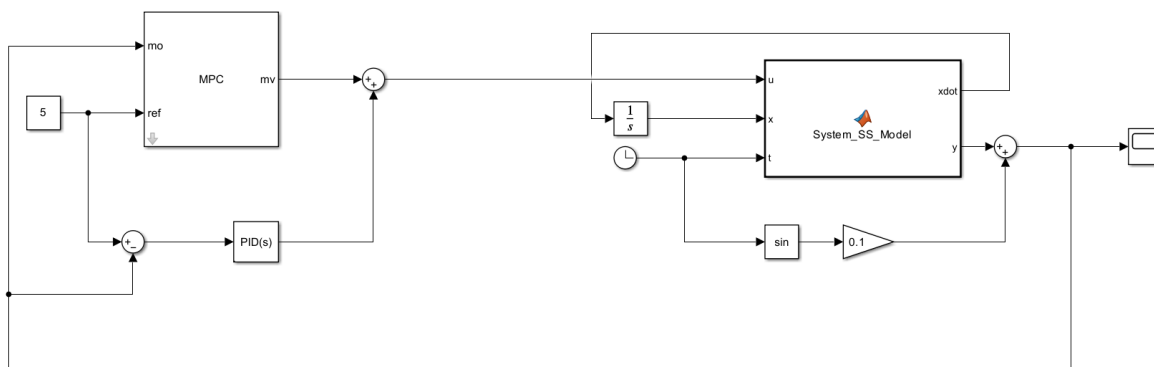


شکل ۶.۱: پاسخ سیستم همراه با اغتشاش

مشاهده می شود که با اعمال اغتشاش به کنترلر فوق، پاسخ نهایی دارای نوسان هایی خواهد بود و این اغتشاش از سیستم حذف نشده است.

سوال چهارم

در این بخش، با تغییر ساختار کنترلر به طوری که شامل یک کنترلر PID نیز باشد، سعی می کنیم تا اثر اغتشاش وارد شده به سیستم را حذف کرده و کنترلر *TubeMPC* را تشکیل دهیم. برای این منظور، با اضافه کردن یک بلوک PID به سیستم و تنظیم ضرایب آن خواهیم داشت:

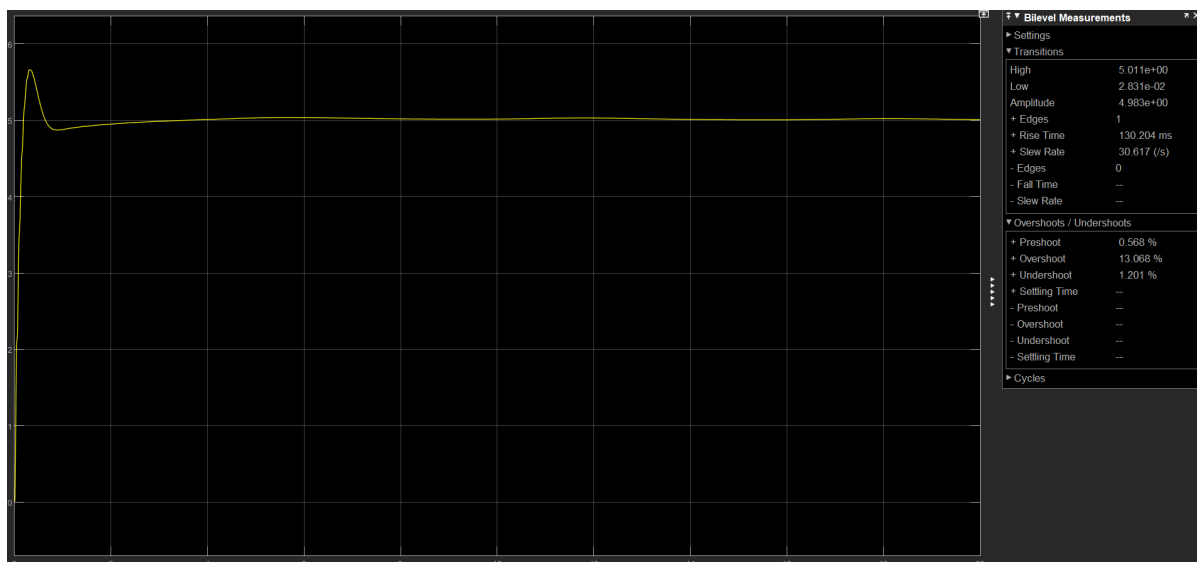


شکل ۷.۱: دیاگرام سیستم *TubeMPC*

با تنظیم ضرایب PID به طوری که کنترلر بتواند با ثابت زمانی کوتاهی به تغییرات پاسخ دهد و همچنین اورشوت کمی داشته باشد تنظیم شده است. ضرایب PID مورد استفاده در این سیستم به شرح زیر است.

$$P = 14/05, I = 1/12, D = 19/04$$

پاسخ این سیستم نسبت به ورودی قبلی به صورت زیر خواهد بود:

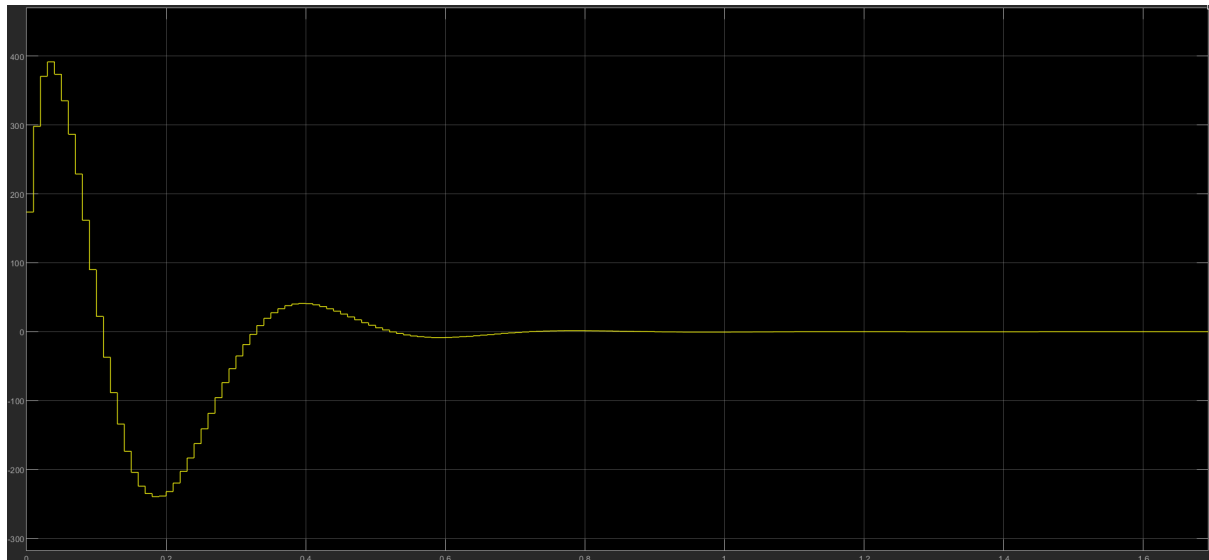


شکل ۸.۱: پاسخ *TubeMPC*

در اینجا مشاهده می شود که خطای ماندگار سیستم پس از بهینه سازی ضرایب PID همچنان زیاد است و مقداری برابر با ۱۳ درصد دارد که برای سیستم قابل تحمل نیست.

سوال پنجم

با توجه به نتایج بخش قبل، برای کاهش میزان فراجهش، لازم است در این قسمت قیدی بر روی خروجی کنترلر اعمال شود تا از اعمال ورودی های بزرگ به سیستم خودداری شود. برای تعیین این قید، ابتدا به مشاهده و ارزیابی تلاش کنترلی کنترلر در شبیه سازی قسمت قبل می پردازیم.

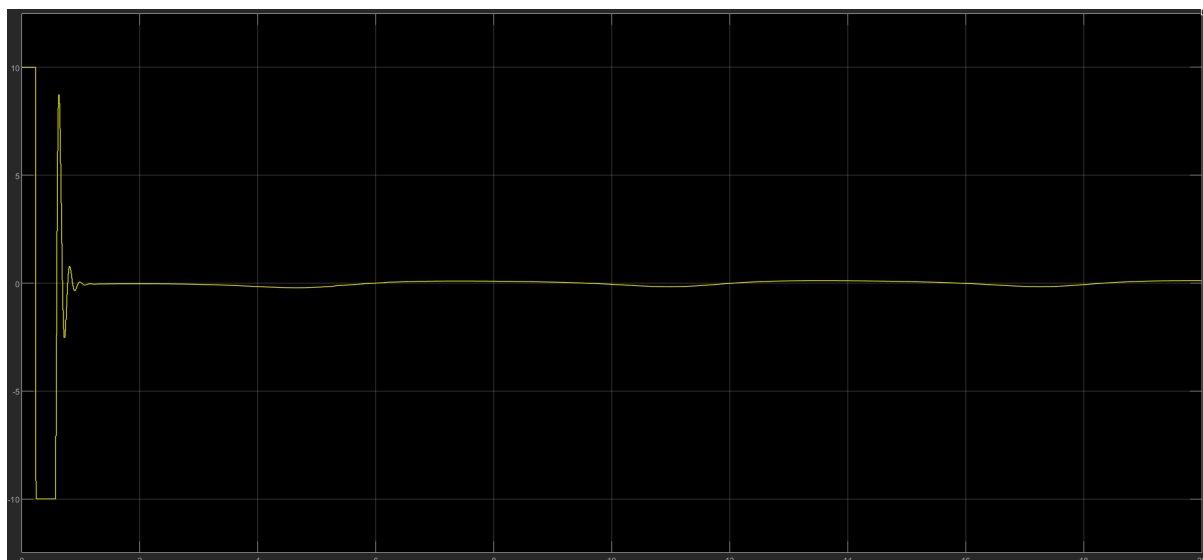


شکل ۹.۱: تلاش کنترلی $TubeMPC$

مشاهد می شود که کنترلر فرمات های کنترلی با مقدار بیشینه ی ۴۰۰ ایجاد کرده است و پس از آن، مقادیر کاهش یافته اند. با دانستن این مورد، قید هایی بر روس سیستم تنظیم شده تا بهترین نتیجه حاصل شود. با تنظیم مقدار فرمان کنترلی در بازه ی -۱۰ و ۱۰، پاسخ سیستم و تلاش کنترلی به شکل زیر به دست خواهد آمد.



شکل ۱۰.۱: تلاش کنترلی $TubeMPC$ مقید



شکل ۱۱.۱: پاسخ $TubeMPC$ مقید

پاسخ سوال ۲

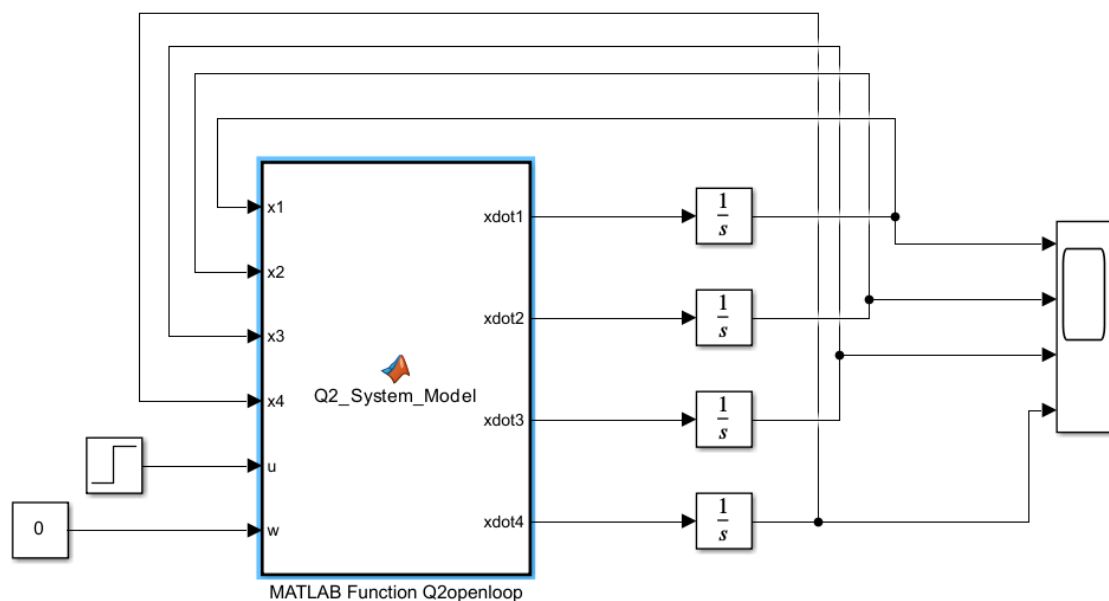
پاسخ بخش یکم

در این سوال، با وجود معادلات حالت سیستم، می توان برای شبیه سازی آن را مستقیماً به عنوان یک تابع در فضای سیمولینک تعریف کرد. برای این منظور، سیستمی به شکل زیر طراحی می شود.

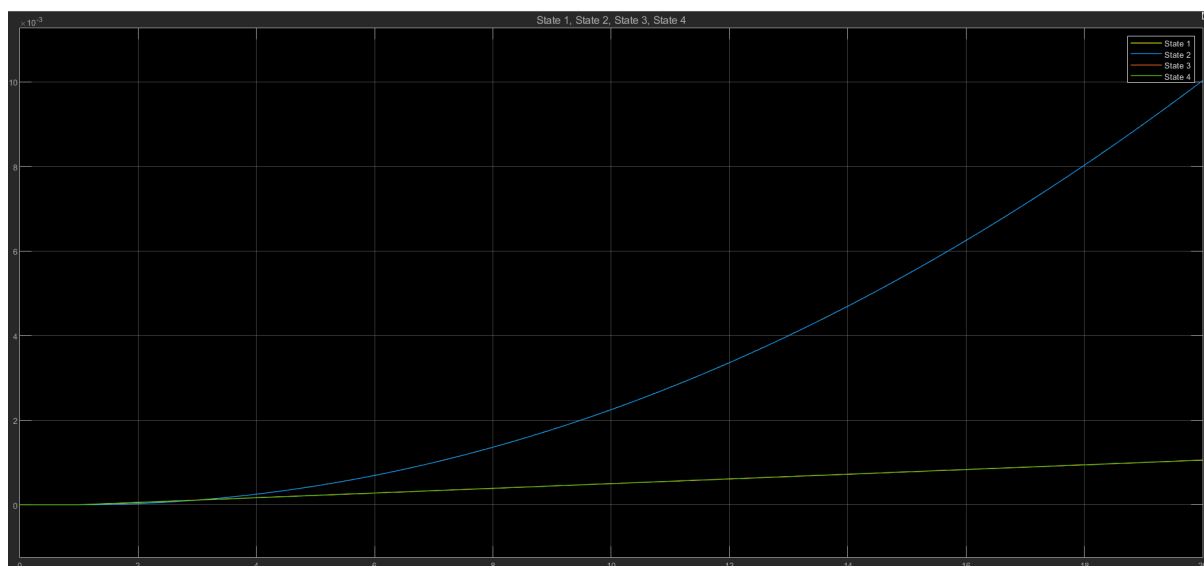
$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_3, \\ \dot{x}_2 &= x_4, \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{m_1}k(-x_1 + x_2) + c(-x_3 + x_4) + u + w, \\ \dot{x}_4 &= \frac{1}{m_2}(k(x_1 - x_2) + c(x_3 - x_4)).\end{aligned}$$

شکل ۱۲.۱: معادلات حالت سیستم

در گام اول، سیستم مورد نظر در محیط سیمولینک تعریف شده و سپس پاسخ پله ی حلقه باز آن را بررسی می کنیم.

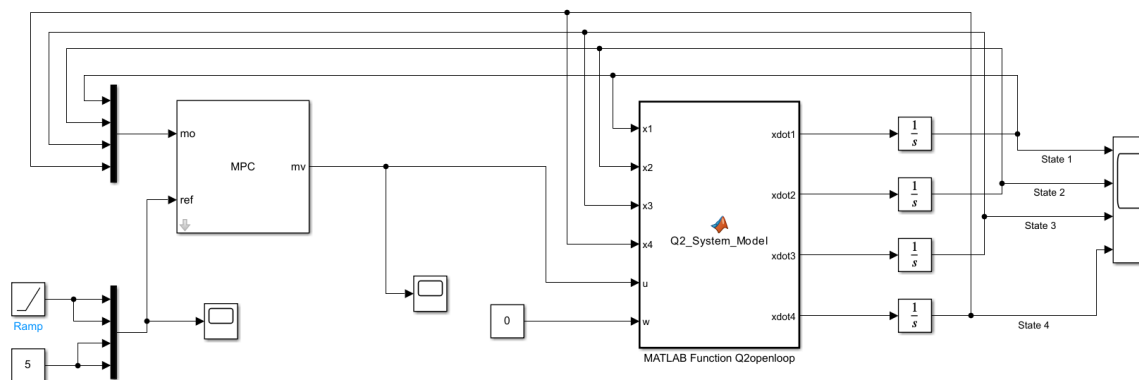


شکل ۱۳.۱: دیاگرام سیستم حلقه باز



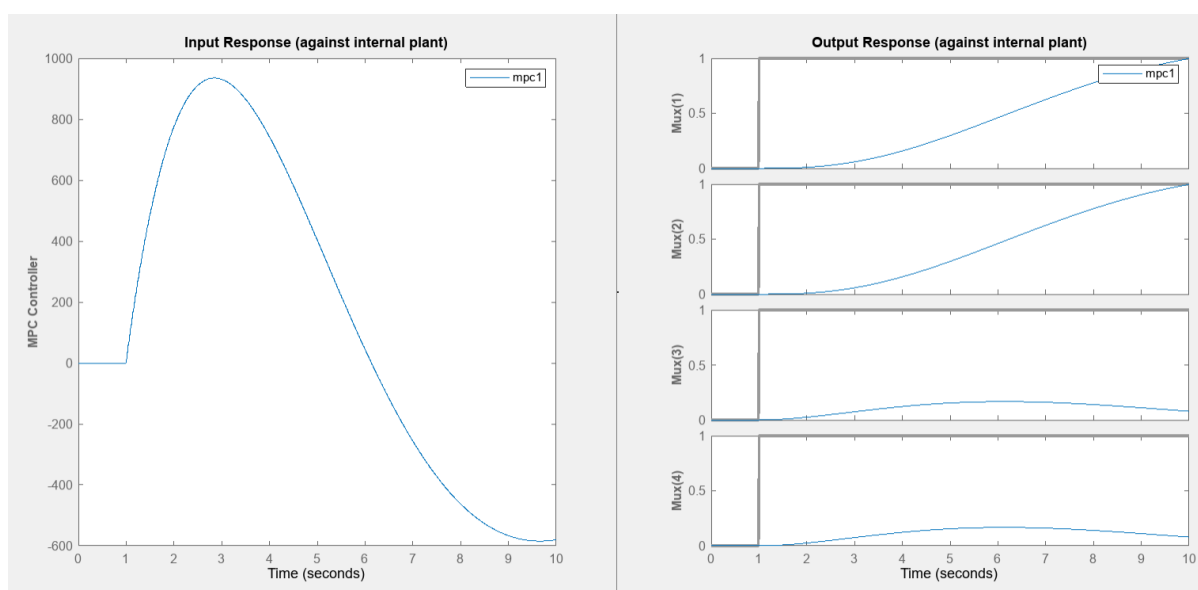
شکل ۱۴.۱: پاسخ پله ی حلقه باز

مشاهده می شود که حالت های این سیستم به طور حلقه باز پایدار نیستند. در ادامه با پیاده سازی یک کنترلر پیش بین خطی، سعی بر کنترل این سیستم خواهیم کرد. دیاگرام این سیستم به صورت زیر خواهد بود.

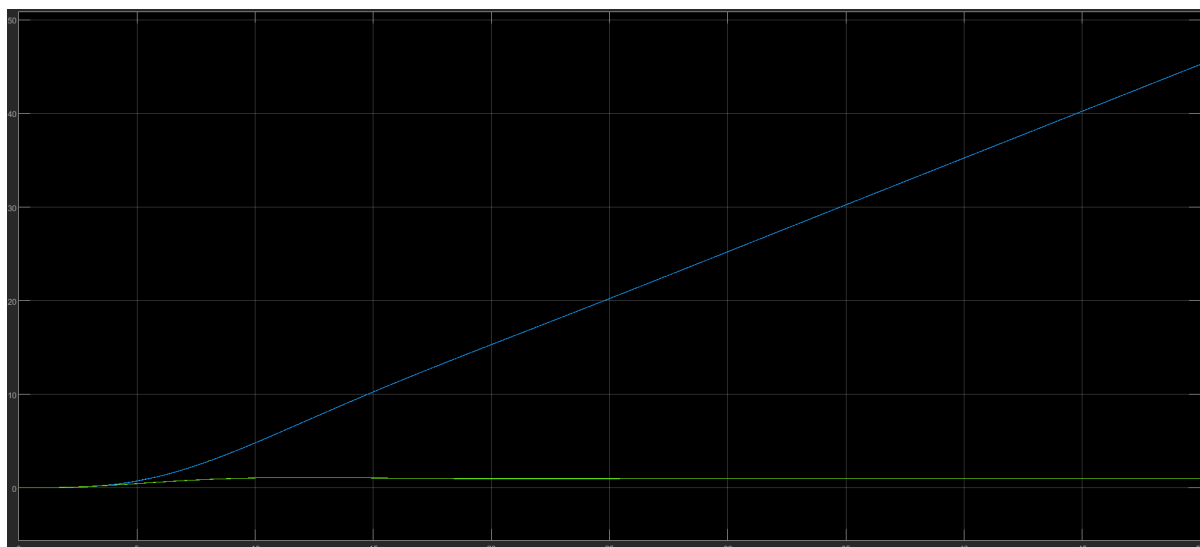


شکل ۱۵.۱: دیاگرام سیستم

برای تنظیم کنترلر پیش بین، از نرخ نمونه برداری ۱/۰ ثانیه، افق پیش بین ۶۵۰ و افق کنترلی ۱۰۰ استفاده شده است. پاسخ سیستم به ورودی های تعیین شده به صورت زیر به دست خواهد آمد

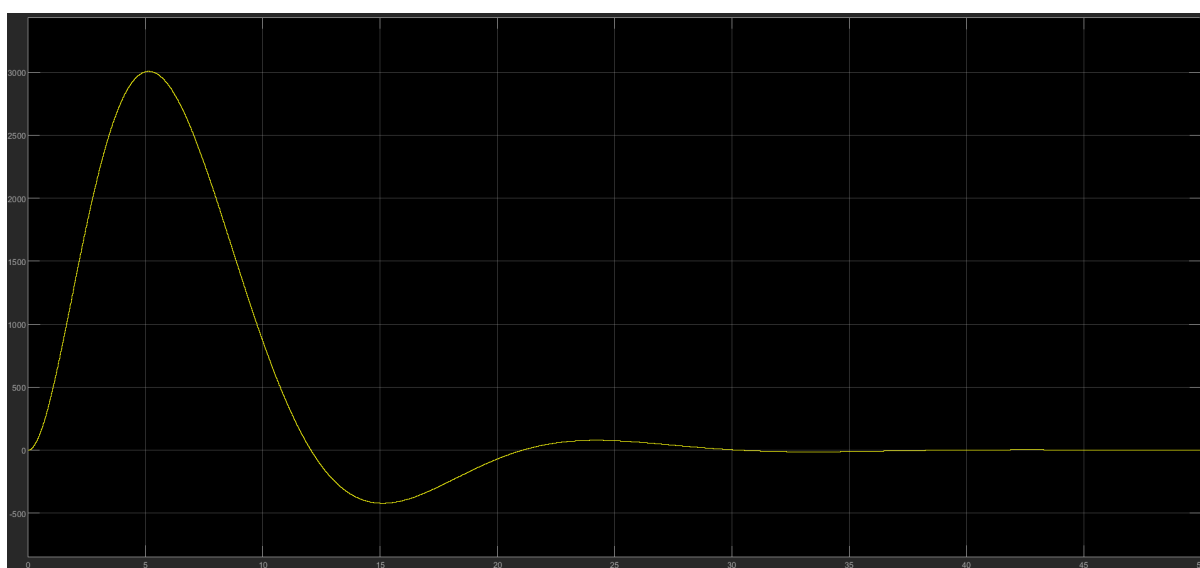


شکل ۱۶.۱: پارامترهای کنترلر MPC



شکل ۱۷.۱: پاسخ سیستم با کنترلر پیش بین خطی

با مشاهده ی پاسخ این سیستم متوجه می شویم که کنترلر حالت های اول و دوم را به خوبی کنترل کرده و خروجی، ورودی را دنبال می کند. اما برای حالت های سوم و چهارم، این اتفاق نمی افتد و مقدار خروجی با ورودی فاصله ی زیادی دارد. همچنین، نمودار خروجی کنترلر به صورت زیر است:

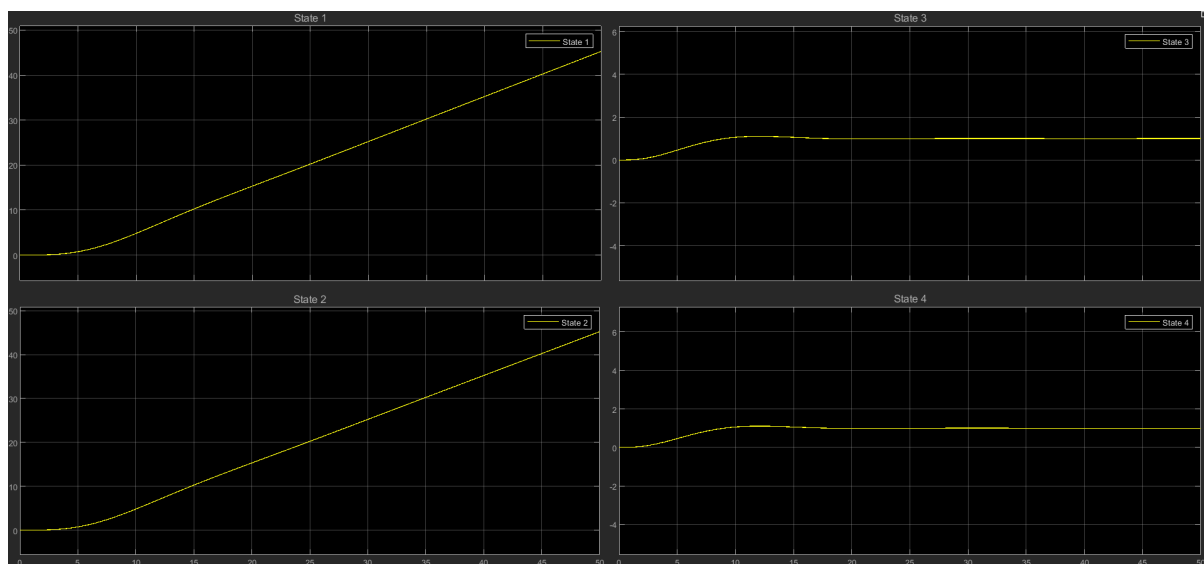


شکل ۱۸.۱: نمودار تلاش کنترلی

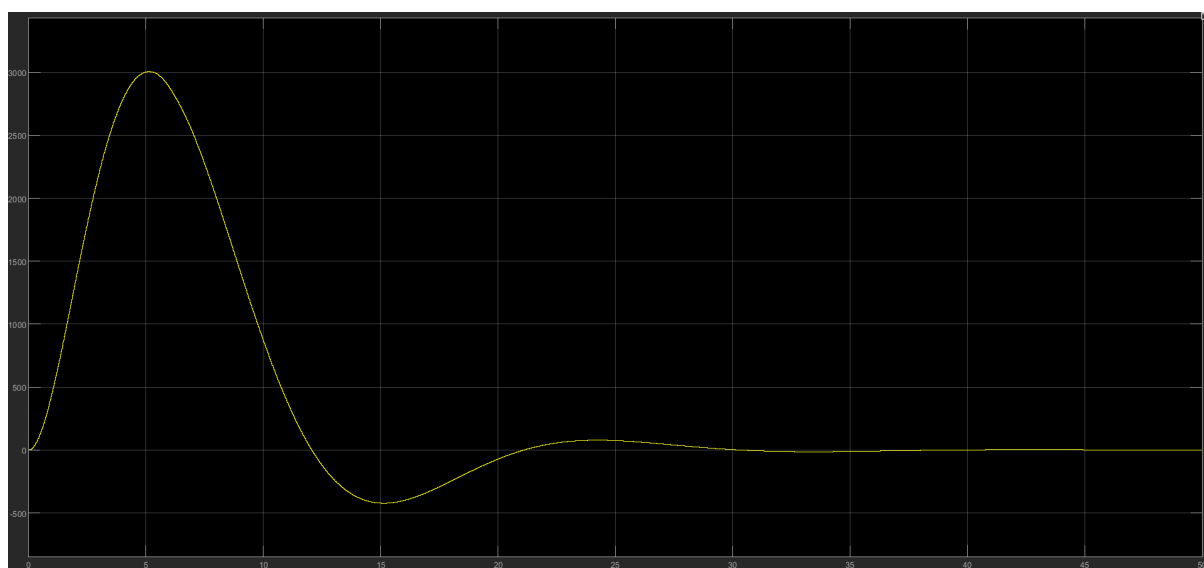
پاسخ بخش دوم

۱.۰.۰.۱ قسمت اول - قید نرم

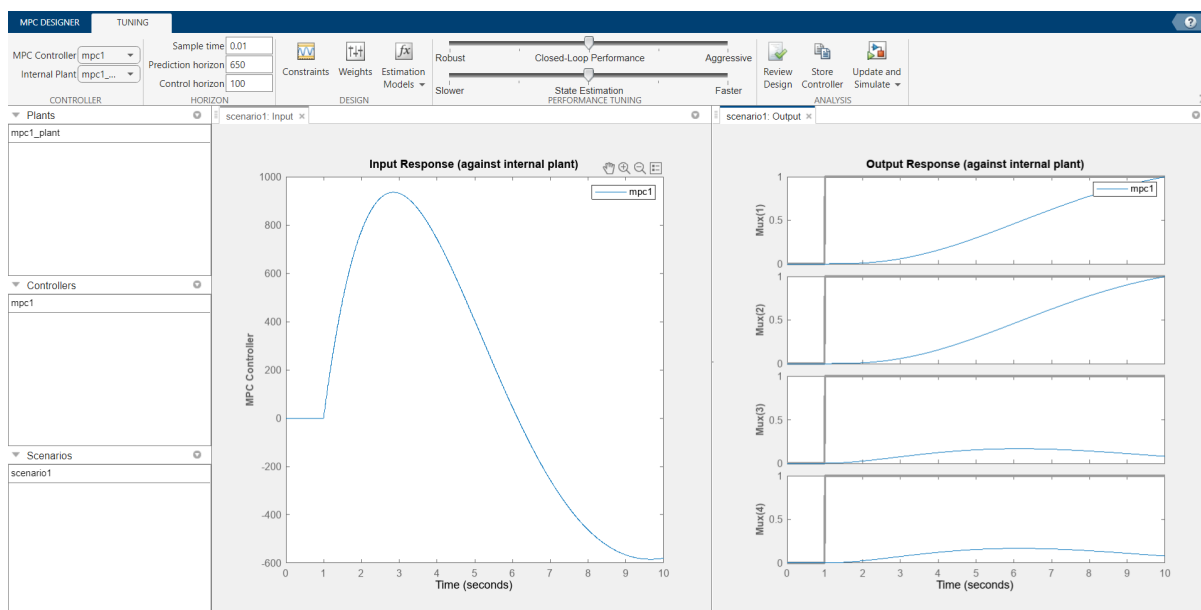
در این بخش، با اعمال یک قید نرم برای حالت چهارم، خروجی های سیستم را مجددا بررسی می کنیم.



شکل ۱۹.۱: پاسخ سیستم با قید نرم



شکل ۲۰.۱: تلاش کنترلی



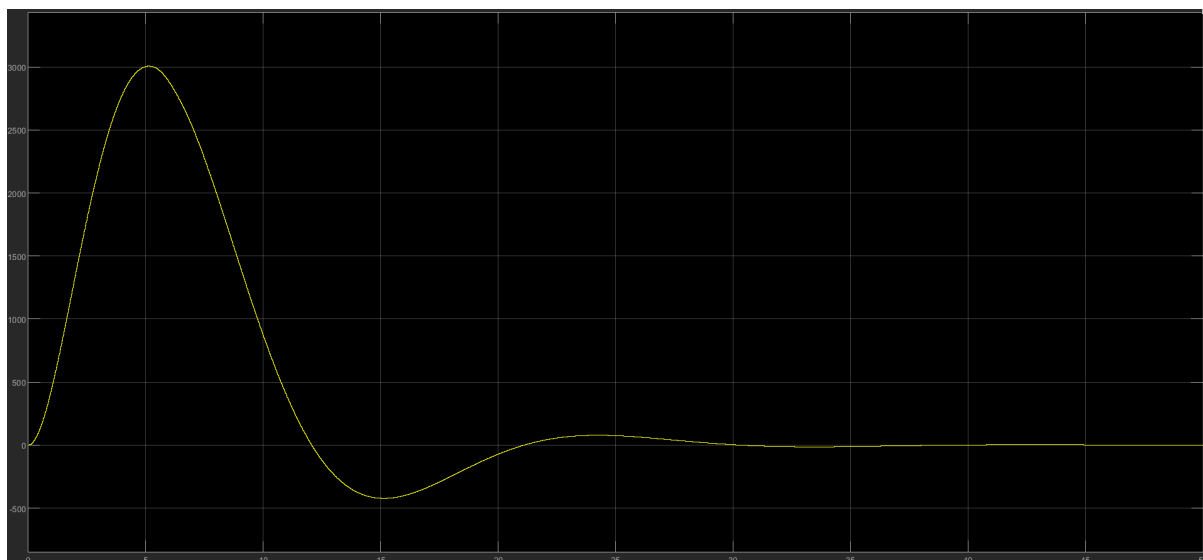
شکل ۲۱.۱: ورودی ها و خروجی ها

Input and Output Constraints					
Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
▼ Inputs					
$u(1)$	MV	-Inf	Inf	-Inf	Inf
▼ Outputs					
$y(1)$	MO	-Inf	Inf		
$y(2)$	MO	-Inf	Inf		
$y(3)$	MO	-Inf	Inf		
$y(4)$	MO	-Inf	1.5		
Equal Constraint Relaxation (ECR)					
Channel	Type	MinECR	MaxECR	RateMinECR	RateMaxECR
▼ Inputs					
$u(1)$	MV	0	0	0	0
▼ Outputs					
$y(1)$	MO	1	1		
$y(2)$	MO	1	1		
$y(3)$	MO	1	1		
$y(4)$	MO	1	1		

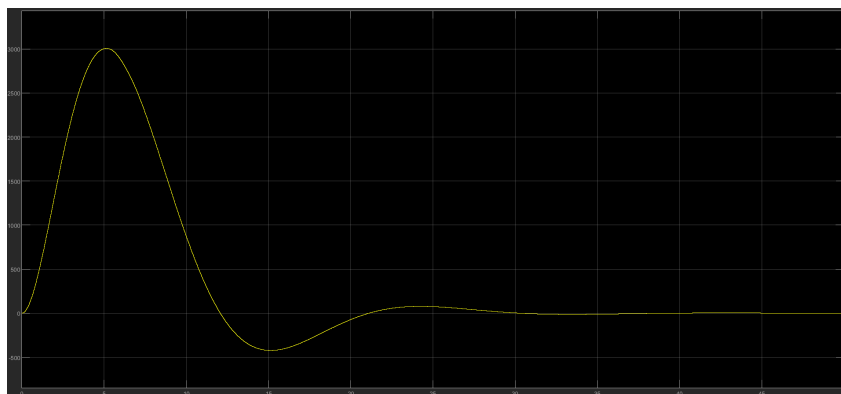
شکل ۲۲.۱: تنظیمات قید ها

قسمت دوم - قید سخت

حال در این بخش، با تغییر قید تعیین شده از حالت نرم به سخت مجدداً نتایج را بررسی می کنیم.



شکل ۲۳.۱: پاسخ سیستم



شکل ۲۴.۱

Input and Output Constraints					
Channel	Type	Min	Max	RateMin	RateMax
▼ Inputs					
$u(1)$	MV	-Inf	Inf	-Inf	Inf
▼ Outputs					
$y(1)$	MO	-Inf	Inf		
$y(2)$	MO	-Inf	Inf		
$y(3)$	MO	-Inf	Inf		
$y(4)$	MO	-Inf	1.5		

Equal Constraint Relaxation (ECR)					
Channel	Type	MinECR	MaxECR	RateMinECR	RateMaxECR
▼ Inputs					
$u(1)$	MV	0	0	0	0
▼ Outputs					
$y(1)$	MO	1	1		
$y(2)$	MO	1	1		
$y(3)$	MO	1	1		
$y(4)$	MO	1	0		

شکل ۲۵.۱

با توجه به نتایج این قسمت و بخش پیشین، مشاهده می شود که تفات چندانی میان این دو روش وجود ندارد. علت این امر آن است که کنترلر در بخش ابتدایی توانسه با حداقل تلاش کنترلی، خروجی را کنترل کند و بنابراین نیازی به اعمال ورودی های بزرگ به سیستم نبوده. بنابراین، این سیستم در حالت عادی در حیطه ی قیدها قرار می گیرد و نیازی به تلاش مضاعف کنترلر و یا محدود کردن بازه های عملکردی آن نخواهد بود.

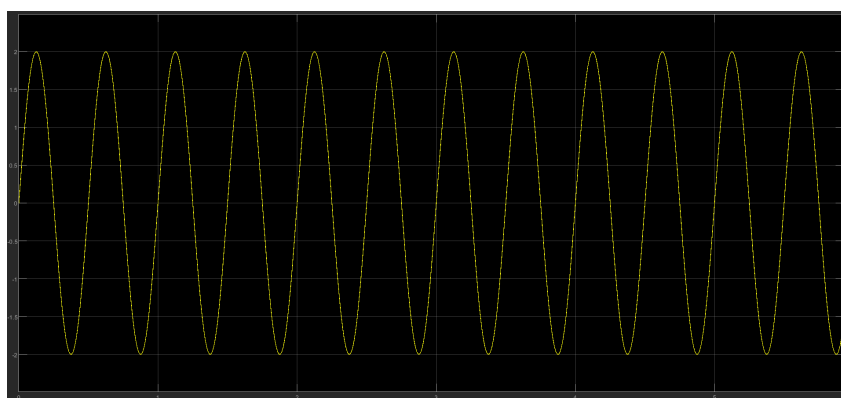
پاسخ بخش سوم

در این بخش، با اعمال یک اغتشاش سینوسی به صورت زیر، عملکرد کنترلر را مورد بررسی قرار می دهیم. برای پیاده سازی این اغتشاش در محیط سیمولینک، از یک Block Function استفاده شده است.

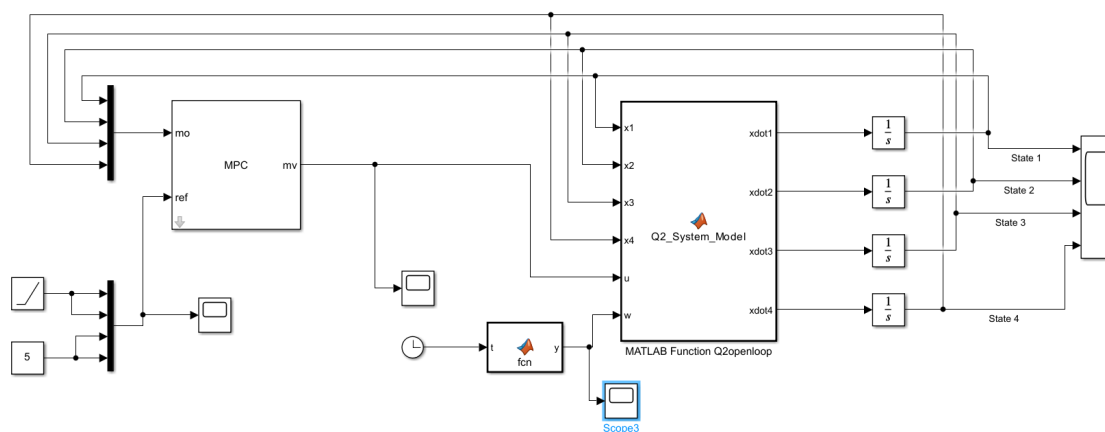

```
function y = fcn(t)
```

```
y = 2*sin(4*pi*t);
```

شکل ۲۶.۱: کد اغتشاش

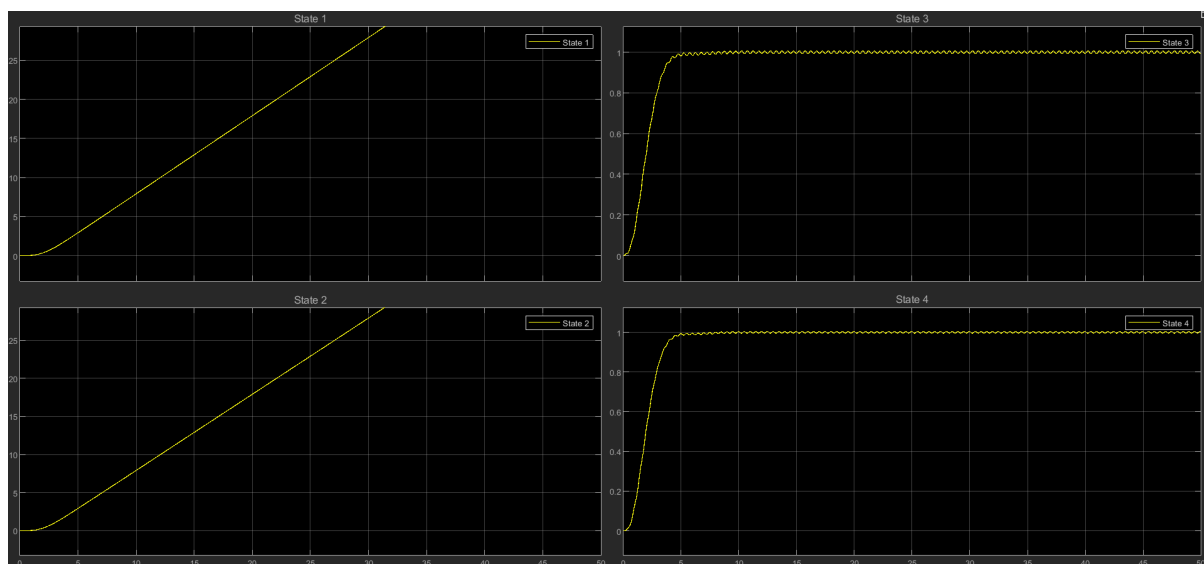


شکل ۲۷.۱: نمودار اغتشاش



شکل ۲۸.۱: دیاگرام سیستم با اغتشاش

به دلیل کوچک بودن مقدار اغتشاش ذکر شده در صورت سوال و قابل صرف نظر بودن از آن مقدار، در ادامه ی این آزمایش مقدار اغتشاش با دامنه ی ۴۰۰ در نظر گرفته شده است تا بتوان نمایش بهتری از نمودار حاصل داشت. در اینجا، خروجی سیستم را با این اغتشاش مشاهده می کنیم.

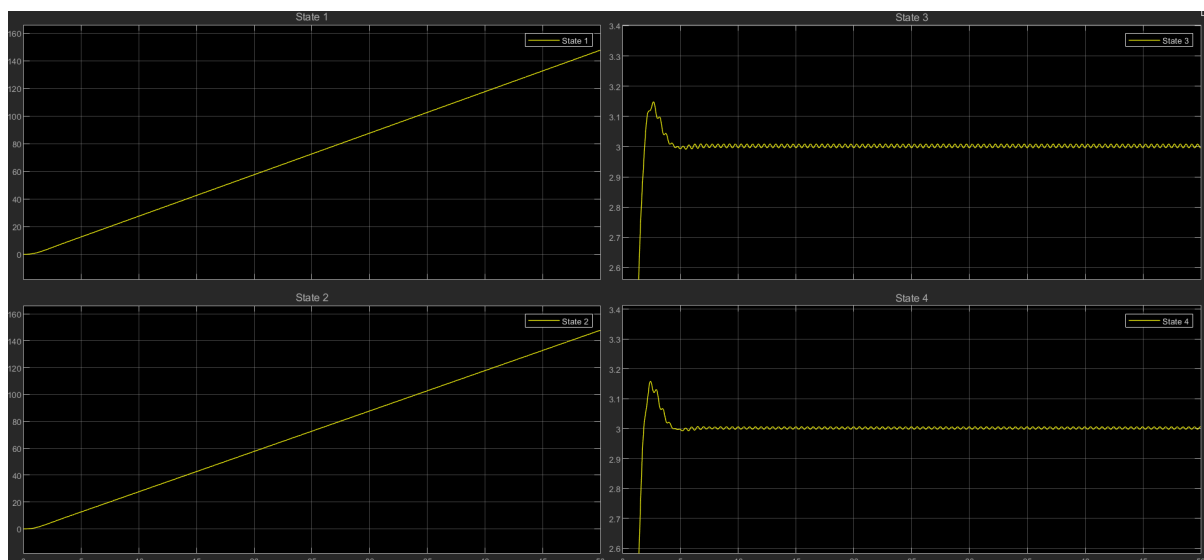


شکل ۲۹.۱: نمودار خروجی سیستم با اغتشاش



شکل ۳۰.۱: نمودار تلاش کنترلر

در این قسمت، با اضافه کردن یک بلوک کنترلر PID به سیستم، کنترلر *TubeMPC* را تشکیل داده و نتایج سیستم را مجدداً بررسی می‌کنیم. ضرایب این کنترلر به دلیل حجم زیاد محاسبات، به وسیله تنظیم‌کننده متلب قابل تنظیم نبوده و به صورت دستی بر روی ضرایب زیر تنظیم شده است.



شکل ۳۱.۱: نمودار خروجی های حالت سیستم



شکل ۳۲.۱: نمودار تلاش کنترلر

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):

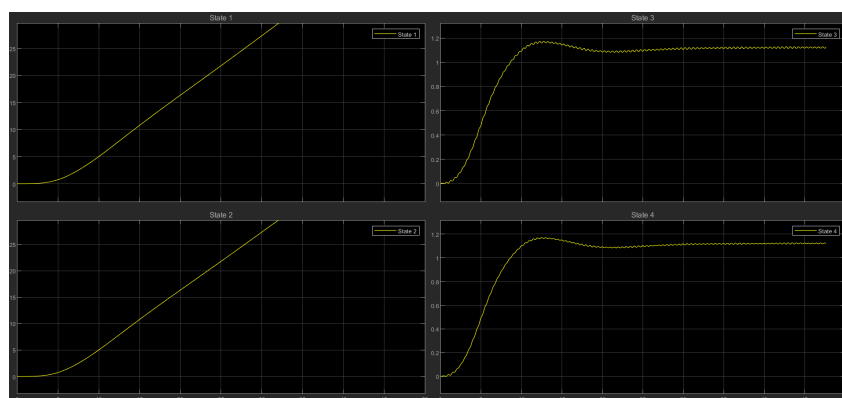
Derivative (D):

Filter coefficient (N):

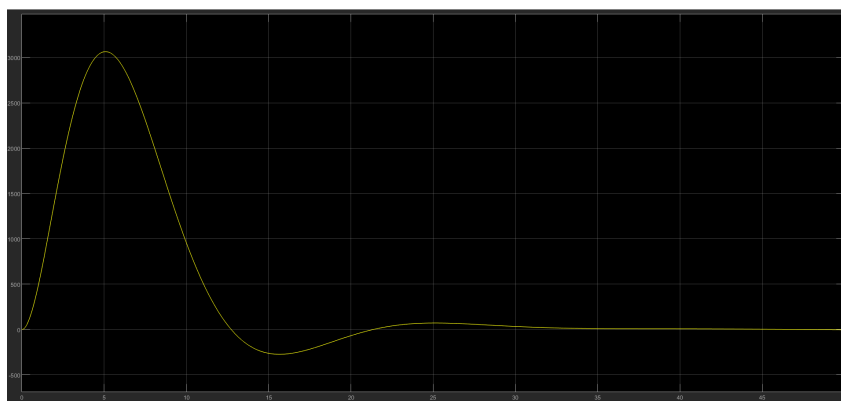
شکل ۳۳.۱: ضرایب PID

پاسخ بخش چهارم

در این بخش، با اعمال مقادیری نایقینی مطابق آنچه که در صورت سوال ذکر شده است، به سیستم اعمال می کنیم. برای این کار، به مقادیر ورودی ها، مقادیر سینوسی متغیر با زمان با میزان مشخص شده اضافه می کنیم. سپس، مقادیر خروجی را با استفاده از کنترلر $TubeMPC$ و $LinearMPC$ طراحی شده کنترل می کنیم. سیستم کنترلی پیش بین خطی مطابق سیستم زیر مورد استفاده قرار گرفته است.

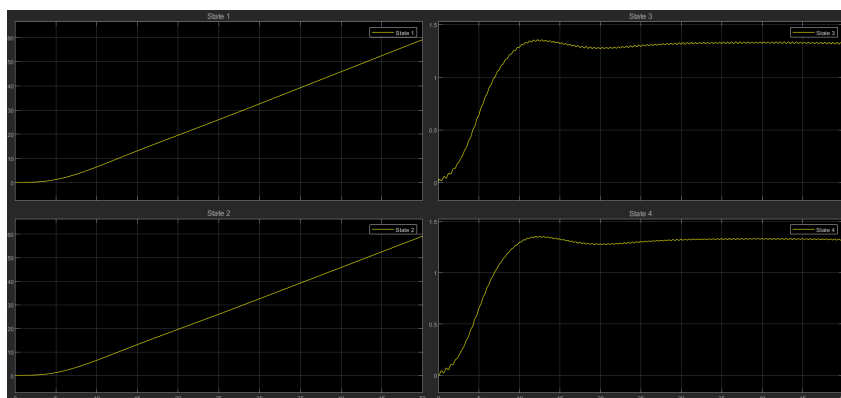


شکل ۳۴.۱: نمودار خروجی با وجود نایقینی

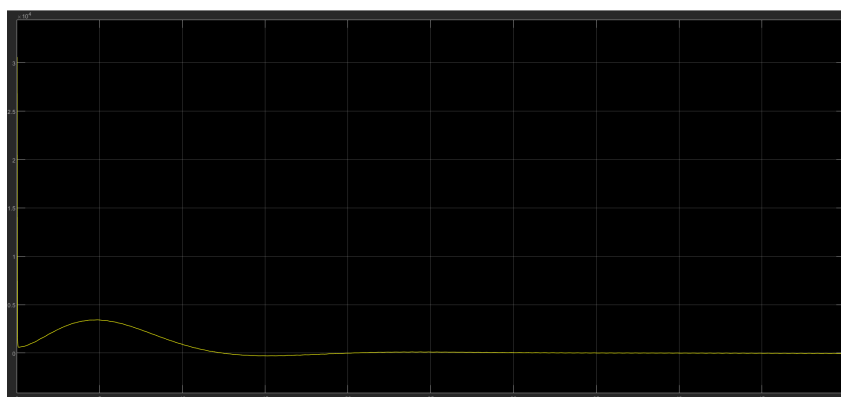


شکل ۳۵.۱: نمودار تلاش کنترلی با وجود نایقینی

در ادامه، با تغییر کنترلر به Tube، MPC، مجدداً سیگنال‌های کنترلی را بررسی می‌کنیم.



شکل ۳۶.۱: نمودار خروجی سیستم با وجود نایقینی



شکل ۳۷.۱: نمودار خروجی کنترلر بار وجود نایقینی