

ĐẠI HỌC QUỐC GIA THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

KHOA CƠ KHÍ  
BỘ MÔN CƠ ĐIỆN TỬ



Bài tập lớn  
Động lực học và Điều khiển (ME3011)

*Giảng viên hướng dẫn* TS. Phạm Phương Tùng  
*Lớp* DT01  
*Thành viên nhóm*

| Họ và tên         | MSSV    | Nhiệm vụ chính            |
|-------------------|---------|---------------------------|
| Nguyễn Đức Đạt    | 2111009 |                           |
| Trần Quang Đạo    | 2210647 |                           |
| Thành viên bí mật | XXXXXX2 | Cung cấp chữ số cuối MSSV |

TP.HCM, 22/08/2025

# Mục lục

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Tổng quan</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Mô hình hóa</b>  | <b>3</b>  |
| 2.1      | Phân tích lực và xây dựng phương trình vi phân mô tả hệ . . . . . | 3         |
| 2.2      | Tuyến tính hóa hệ thống và xây dựng hàm truyền . . . . .          | 4         |
| 2.3      | Phương trình không gian trạng thái của hệ . . . . .               | 5         |
| 2.4      | Sơ đồ khối của không gian trạng thái . . . . .                    | 6         |
| <b>3</b> | <b>Phân tích hệ thống</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1      | Yêu cầu đề bài . . . . .  | 7         |
| 3.2      | Sơ đồ MATLAB/Simulink . . . . .                                   | 7         |
| 3.3      | Phân tích và đánh giá kết quả mô phỏng . . . . .                  | 10        |
| 3.3.1    | Đầu vào hàm Dirac . . . . .                                       | 10        |
| 3.3.2    | Đầu vào hàm nấc đơn vị . . . . .                                  | 10        |
| 3.3.3    | Đầu vào hàm (23) . . . . .  | 11        |
| <b>4</b> | <b>Thiết kế hệ thống điều khiển</b>                               | <b>12</b> |
| 4.1      | Thiết kế bộ điều khiển PID cho góc con lắc . . . . .              | 12        |
| 4.1.1    | Yêu cầu thiết kế . . . . .  | 12        |
| 4.1.2    | Thiết kế bộ điều khiển . . . . .                                  | 12        |
| 4.1.3    | Mô phỏng bằng MATLAB/Simulink . . . . .                           | 13        |
| 4.1.4    | Đánh giá, nhận xét . . . . .                                      | 13        |
| 4.2      | Thiết kế bộ điều khiển PID cho vị trí xe đẩy . . . . .            | 13        |
| 4.2.1    | Yêu cầu thiết kế . . . . .  | 13        |
| 4.2.2    | Thiết kế bộ điều khiển . . . . .                                  | 14        |
| 4.2.3    | Mô phỏng bằng MATLAB/Simulink . . . . .                           | 15        |
| 4.2.4    | Đánh giá, nhận xét . . . . .                                      | 16        |
| 4.3      | Thiết kế bộ điều khiển không gian trạng thái . . . . .            | 16        |
| 4.3.1    | Yêu cầu thiết kế . . . . .  | 16        |
| 4.3.2    | Thiết kế bộ điều khiển . . . . .                                  | 17        |

# 1 Tổng quan

Bài tập lớn tập trung vào việc mô hình hóa động lực học và điều khiển cần cầu tháp. Hệ thống có thể mô hình hóa đơn giản như hệ thống con lắc gắn trên xe đẩy. Sinh viên sẽ xây dựng mô hình, thiết kế bộ điều khiển và thực hiện mô phỏng để đạt được các yêu cầu về ổn định con lắc và vị trí xe đẩy.

Với hệ thống con lắc trên xe đẩy, giả sử các thông số sau:

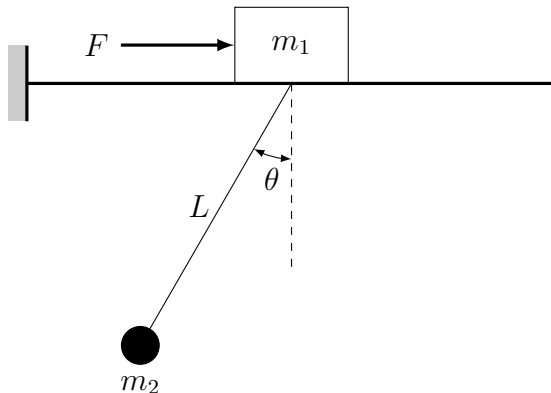
| Thông số                      | Giá trị  |
|-------------------------------|--|
| Khối lượng của xe đẩy $m_1$   | $\frac{9 + 7 + 2}{10} = 1.8 \text{ kg}$            |
| Khối lượng của con lắc $m_2$  | $\frac{2 + 7}{20} = 0.45 \text{ kg}$               |
| Chiều dài dây cáp $L$         | $\frac{7 + 2}{20} = 0.45 \text{ m}$                |
| Hệ số ma sát của xe đẩy $B$   | $\frac{9 + 2}{10 \times 7} = 0.15714 \text{ Ns/m}$ |
| Hệ số tắt dần của con lắc $b$ | $\frac{9 + 7}{10 \times 2} = 0.8 \text{ Ns/m}$     |

Bảng 1: Bảng thông số hệ thống

## 2 Mô hình hóa

### 2.1 Phân tích lực và xây dựng phương trình vi phân mô tả hệ

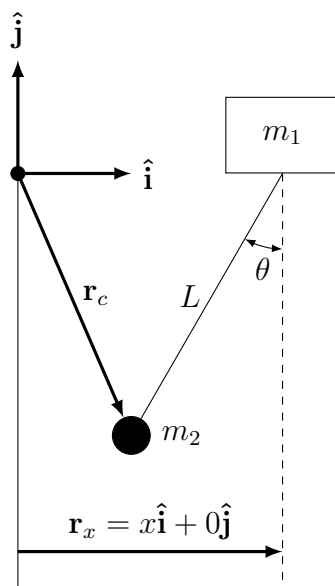
Hệ thống con lắc và xe đẩy có sơ đồ như sau:



Hình 1: Sơ đồ hệ con lắc và xe đẩy

Gọi  $\mathbf{r}_x$  và  $\mathbf{r}_c$  lần lượt là vector vị trí của xe và con lắc đơn. Ta sẽ biểu diễn  $\mathbf{r}_x$  và  $\mathbf{r}_c$  theo 2 vector đơn vị  $\hat{\mathbf{i}}$  và  $\hat{\mathbf{j}}$  dựa vào hình dưới như sau:

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_x &= x\hat{\mathbf{i}} + 0\hat{\mathbf{j}} \\ \mathbf{r}_c &= (x - L \sin \theta)\hat{\mathbf{i}} - L \cos \theta \hat{\mathbf{j}}\end{aligned}\tag{1}$$



Hình 2: Biểu diễn vector vị trí theo hai vector  $\hat{\mathbf{i}}$  và  $\hat{\mathbf{j}}$

Đạo hàm theo thời gian hai vector  $\mathbf{r}_x$  và  $\mathbf{r}_c$  ta có:

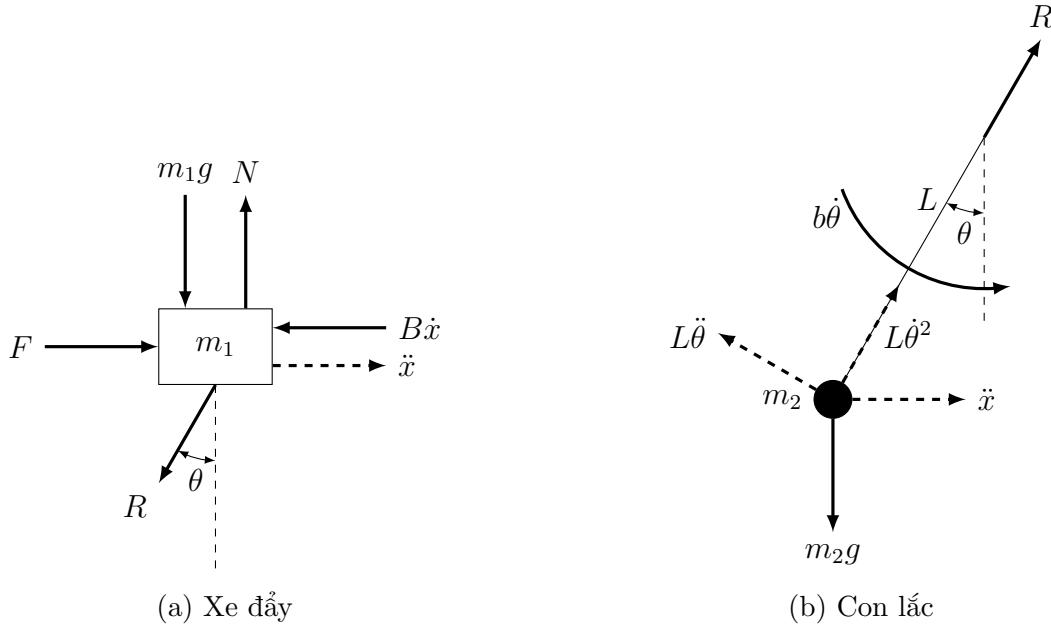
$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{r}}_x &= \dot{x}\hat{\mathbf{i}} + 0\hat{\mathbf{j}} \\ \dot{\mathbf{r}}_c &= (\dot{x} - L\dot{\theta} \cos \theta)\hat{\mathbf{i}} + L\dot{\theta} \sin \theta \hat{\mathbf{j}}\end{aligned}\tag{2}$$

Tiếp tục đạo hàm theo thời gian hai vector  $\dot{\mathbf{r}}_x$  và  $\dot{\mathbf{r}}_c$  để thu được hai vector gia tốc:

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{r}}_x &= \ddot{x}\hat{\mathbf{i}} + 0\hat{\mathbf{j}} \\ \ddot{\mathbf{r}}_c &= (\ddot{x} + L\dot{\theta}^2 \sin \theta - L\ddot{\theta} \cos \theta)\hat{\mathbf{i}} + (L\dot{\theta}^2 \cos \theta + L\ddot{\theta} \sin \theta)\hat{\mathbf{j}} = \ddot{x}\hat{\mathbf{i}} + L\dot{\theta}^2(\sin \theta \hat{\mathbf{i}} + \cos \theta \hat{\mathbf{j}}) + L\ddot{\theta}(-\cos \theta \hat{\mathbf{i}} + \sin \theta \hat{\mathbf{j}})\end{aligned}\tag{3}$$

Hệ có 2 bậc tự do là  $x$  và  $\theta$  nên hệ sẽ có hai phương trình mô tả chuyển động, gồm một phương trình chuyển động tịnh tiến của xe đẩy và một phương trình chuyển động quay của con lắc.

Từ sơ đồ tổng thể trong hình 1 và 2, ta tách thành hai sơ đồ vật tự do (free body diagram) để phân tích lực tác dụng lên từng thành phần của hệ dựa vào các gia tốc mà ở phương trình (3).



Hình 3: Sơ đồ vật tự do của con lắc và xe đẩy với  $R$  là phản lực tác dụng từ con lắc lên xe đẩy. Phương, chiều của các gia tốc (nét đứt) được xác định dựa trên phương trình (3)

Với xe đẩy, theo định luật II Newton, ta có:

$$m_1 \ddot{x} = F - B\dot{x} - R \sin \theta \quad (4)$$

Với con lắc, theo định luật II Newton, ta có:

$$m_2(\ddot{x} - L\ddot{\theta} \cos \theta + L\dot{\theta}^2 \sin \theta) = R \sin \theta \quad (5)$$

Ngoài ra, theo định luật II Newton cho hệ quay quanh tâm quay con lắc, ta có:

$$m_2 L(L\ddot{\theta} - \ddot{x} \cos \theta) = -m_2 L g \sin \theta - b\dot{\theta} \quad (6)$$

Kết hợp các phương trình (4), (5) và (6), thu được

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{x} + B\dot{x} - m_2 L\ddot{\theta} \cos \theta + m_2 L\dot{\theta}^2 \sin \theta &= F \\ m_2 L^2\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + m_2 L g \sin \theta - m_2 L\ddot{x} \cos \theta &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

## 2.2 Tuyến tính hóa hệ thống và xây dựng hàm truyền

Khi góc  $\theta$  trở nên rất nhỏ ( $\theta \rightarrow 0$ ), ta có thể xấp xỉ  $\sin \theta \approx \theta$ ,  $\cos \theta \approx 1$  và  $\dot{\theta}^2 \approx 0$ . Do đó, ta có thể tuyến tính hóa hệ phương trình (7) như sau:

$$\begin{aligned} (m_1 + m_2)\ddot{x} + B\dot{x} - m_2 L\ddot{\theta} &= F \\ m_2 L^2\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + m_2 L g \theta - m_2 L\ddot{x} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Biến đổi Laplace hệ phương trình (8) với điều kiện đầu bằng không, ta có:

$$\begin{aligned} [(m_1 + m_2)s^2 + Bs]X(s) - m_2Ls^2\Theta(s) &= F(s) \\ -m_2Ls^2X(s) + (m_2L^2s^2 + bs + m_2Lg)\Theta(s) &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Giải hệ phương trình (9) thu được các hàm truyền:

1. Thể hiện mối quan hệ giữa vị trí xe đẩy và lực đầu vào

$$G_1(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{m_2L^2s^2 + bs + m_2Lg}{m_1m_2L^2s^4 + [(m_1 + m_2)b + Bm_2L^2]s^3 + [(m_1 + m_2)m_2gL + Bb]s^2 + Bm_2gLs} \quad (10)$$

2. Thể hiện mối quan hệ giữa góc lắc và lực đầu vào

$$G_2(s) = \frac{\Theta(s)}{F(s)} = \frac{m_2Ls}{m_1m_2L^2s^3 + [(m_1 + m_2)b + Bm_2L^2]s^2 + [(m_1 + m_2)m_2gL + Bb]s + Bm_2gL} \quad (11)$$

## 2.3 Phương trình không gian trạng thái của hệ

Giải hệ phương trình (8) theo hai biến  $\ddot{x}$  và  $\ddot{\theta}$ , ta thu được:

$$\ddot{x} = -\frac{B\dot{x}}{m_1} - \frac{m_2g\theta}{m_1} - \frac{b\dot{\theta}}{m_1L} + \frac{F}{m_1} \quad (12)$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{B\dot{x}}{m_1L} - \frac{(m_1 + m_2)g\theta}{m_1L} - \frac{(m_1 + m_2)b\dot{\theta}}{m_1m_2L^2} + \frac{F}{m_1L} \quad (13)$$

Chọn các biến  $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$  làm biến trạng thái. Kết hợp với hai phương trình (12) và (13), ta có phương trình trạng thái của hệ với đầu ra là  $x$  và  $\theta$ :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{m_1} & -\frac{m_2g}{m_1} & -\frac{b}{m_1L} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B}{m_1L} & -\frac{(m_1 + m_2)g}{m_1L} & -\frac{(m_1 + m_2)b}{m_1m_2L^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_1} \\ 0 \\ \frac{1}{m_1L} \end{bmatrix} F \quad (14)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

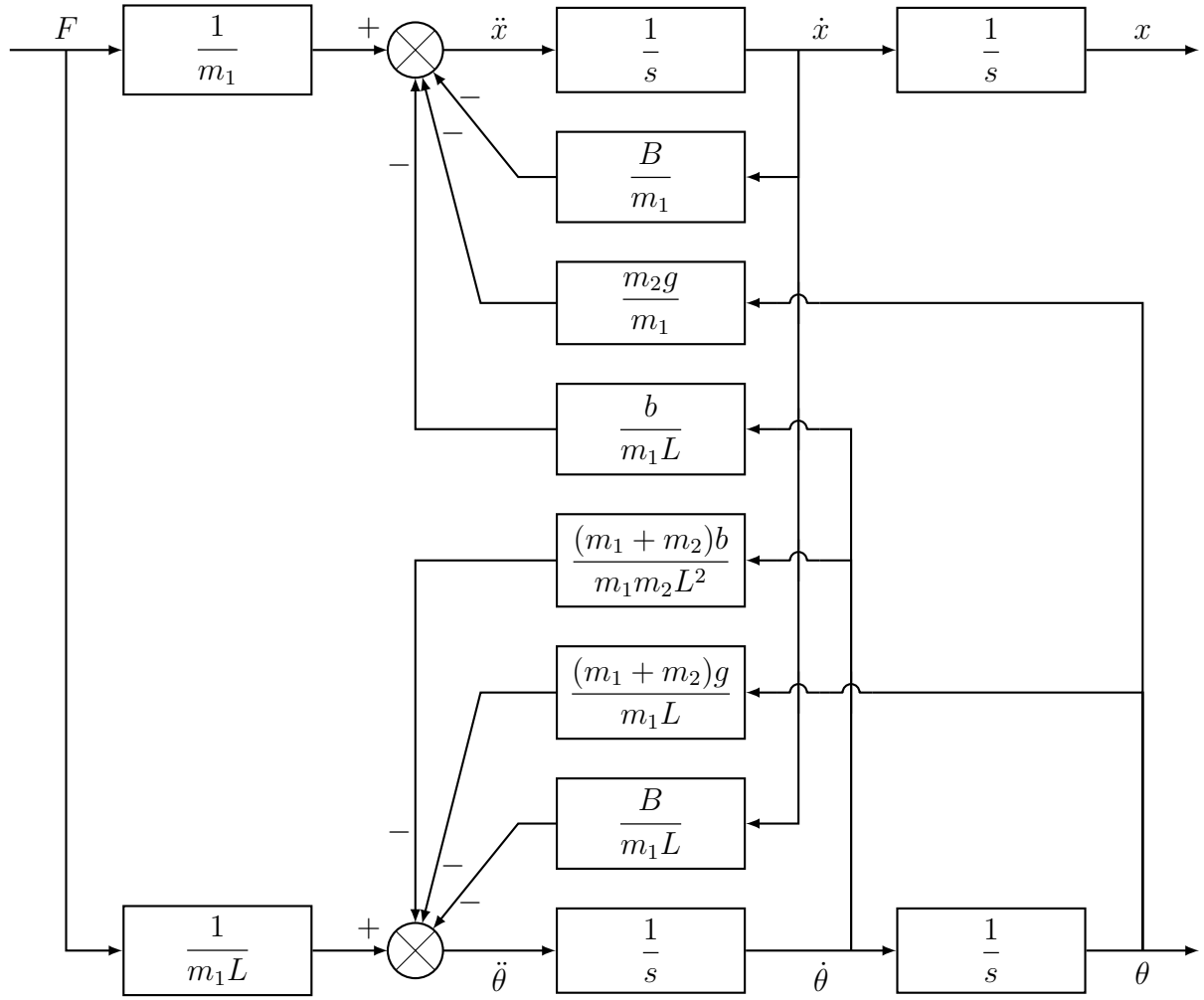
Hay viết lại dưới dạng ký hiệu:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{BF} \quad (16)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad (17)$$

## 2.4 Sơ đồ khối của không gian trạng thái

Từ hệ phương trình trạng thái (14) và (15), ta xây dựng được sơ đồ khối như sau:



Hình 4: Sơ đồ khối của hệ thống xe đẩy-con lắc

### 3 Phân tích hệ thống

Từ các thông số ở bảng 1, các ma trận của hệ thống (16) và (17) được xác định như sau:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0873 & -2.453 & -0.9877 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.194 & -27.25 & -10.97 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.5556 \\ 0 \\ 1.235 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Sử dụng hàm `ss2tf` để chuyển đổi từ dạng không gian trạng thái sang dạng hàm truyền, thu được

$$G_1(s) = \frac{0.5556s^2 + 4.877s + 12.11}{s^4 + 11.06s^3 + 28.02s^2 + 1.903s} \quad (21)$$

$$G_2(s) = \frac{1.235s}{s^3 + 11.06s^2 + 28.02s + 1.903} \quad (22)$$

#### 3.1 Yêu cầu đề bài

Mô phỏng đáp ứng hệ thống sử dụng mô hình sơ đồ khối trên MATLAB/Simulink. Phân tích và đánh giá đáp ứng hệ thống

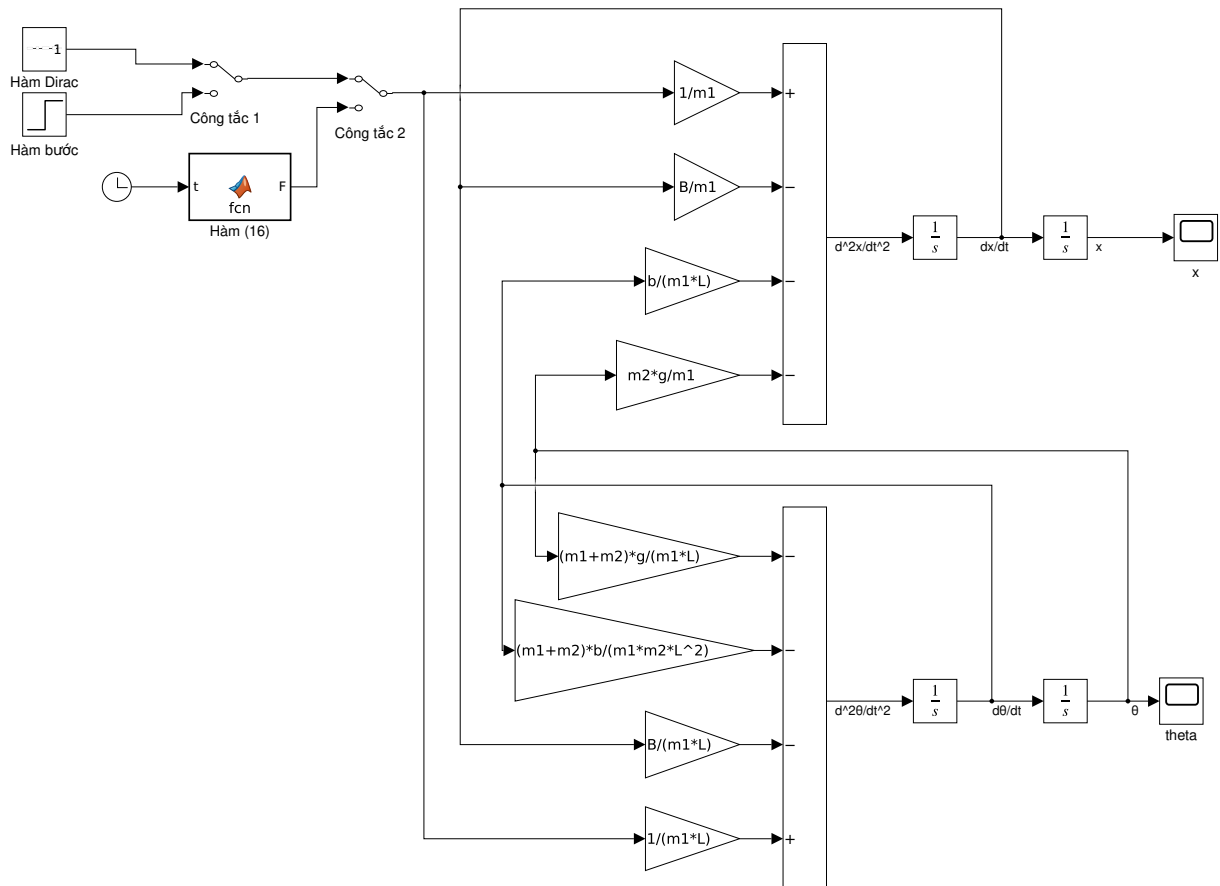
1. Với đầu vào  $F(t)$  là hàm xung diract (impulse).
2. Với đầu vào  $F(t)$  là hàm nấc đơn vị (unit step).
3. Với đầu vào là như sau:

$$F(t) = \begin{cases} 10 \text{ N}, & 0 \leq t < 5 \text{ giây} \\ 0 \text{ N}, & t \geq 5 \text{ giây} \end{cases} \quad (23)$$

#### 3.2 Sơ đồ MATLAB/Simulink

Dựa vào sơ đồ khối ở hình 4, ta xây dựng được sơ đồ MATLAB/Simulink được cho như hình dưới:

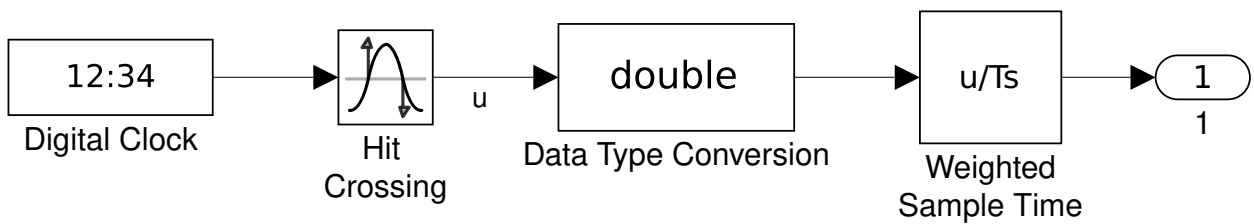




Hình 5: Sơ đồ MATLAB/Simulink để phân tích hệ thống

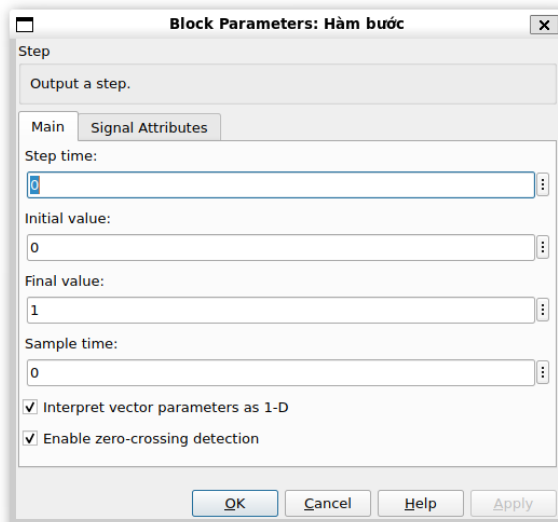
Trong sơ đồ MATLAB/Simulink hình 5, các hàm  $F(t)$  đầu vào được khai báo như sau:

1. Hàm Dirac được khai báo bằng khối **Hàm Dirac**. Khối này là một hệ con (subsystem) được xây dựng dựa vào một bài blog của MATLAB tại địa chỉ <https://tinyurl.com/yrh28h2j>.



Hình 6: Nội dung khối **Hàm Dirac**

2. Hàm nấc đơn vị, sử dụng khối **Step** được khai báo như hình dưới



Hình 7: Khai báo khối **Step** đối với hàm nấc đơn vị

3. Đối với hàm (23), ta xây dựng bằng hàm **MATLAB function** như sau:

Listing 1: Khai báo hàm (23)

```

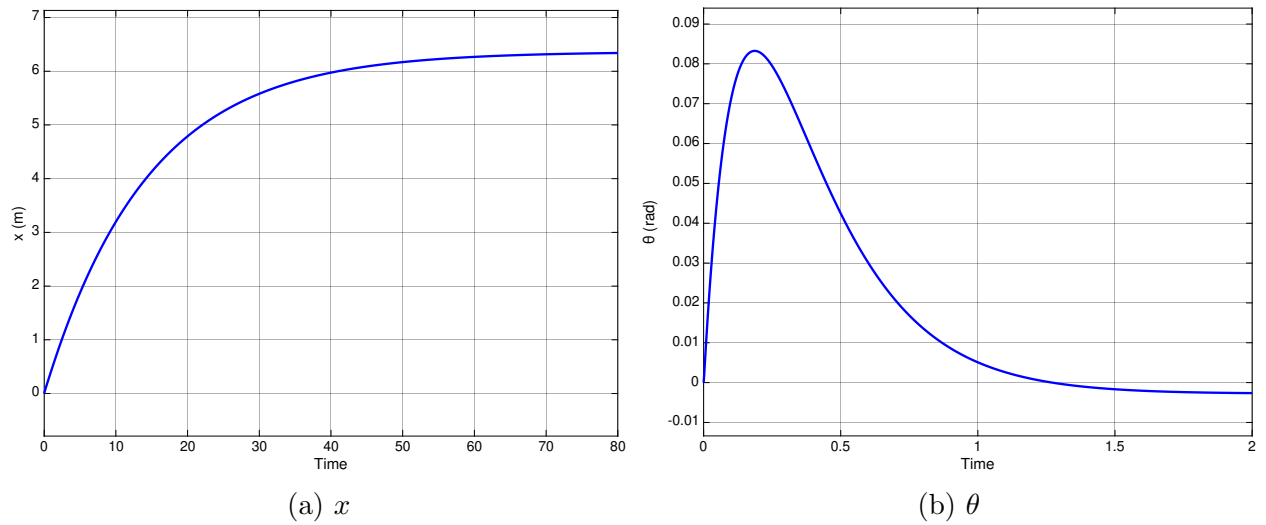
1 function F = fcn(t)
2     if t >= 0 && t <= 5
3         F = 10;
4     else
5         F = 0;
6     end
7 end

```

### 3.3 Phân tích và đánh giá kết quả mô phỏng

#### 3.3.1 Đầu vào hàm Dirac

- Kết quả mô phỏng



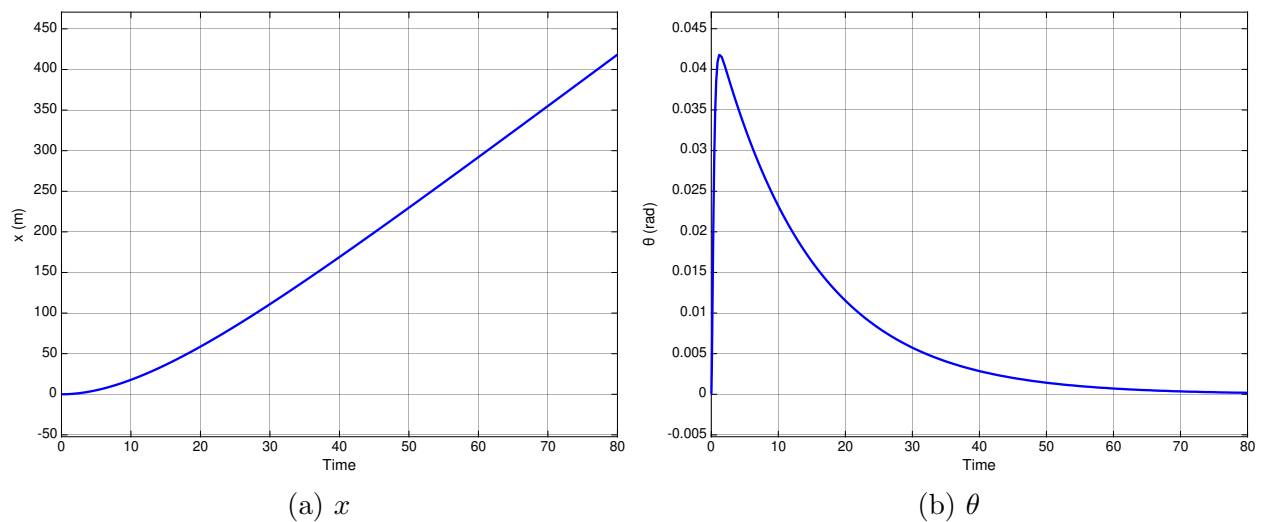
Hình 8: Kết quả mô phỏng với đầu vào là hàm Dirac

- Phân tích, nhận xét

—

#### 3.3.2 Đầu vào hàm nấc đơn vị

- Kết quả mô phỏng



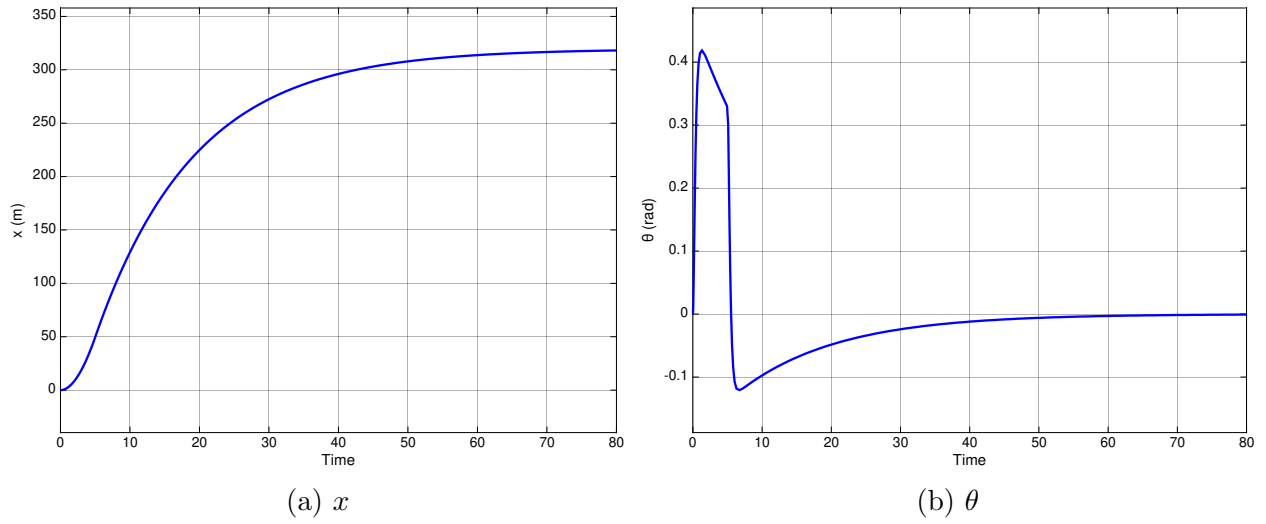
Hình 9: Kết quả mô phỏng với đầu vào là hàm nấc đơn vị

- Phân tích, nhận xét

—

### 3.3.3 Đầu vào hàm (23)

- Kết quả mô phỏng



Hình 10: Kết quả mô phỏng với đầu vào là hàm (23)

- Phân tích, nhận xét

—

## 4 Thiết kế hệ thống điều khiển

### 4.1 Thiết kế bộ điều khiển PID cho góc con lắc

#### 4.1.1 Yêu cầu thiết kế

Đề bài

- Giữ cho con lắc ở vị trí thẳng đứng sau khi bị xô lệch.

Yêu cầu thiết kế

- Thời gian xác lập của góc lệch  $\theta$  phải nhỏ hơn 5 giây.
- Góc lệch của con lắc không được vượt quá 0.05 radian so với vị trí thẳng đứng.

Phương pháp thực hiện

- Sử dụng phương pháp quỹ đạo nghiệm số để xác định các thông số của bộ điều khiển PID.
- Mô phỏng tác động của một xung đơn vị vào xe đẩy, sau đó quan sát quá trình con lắc quay trở lại vị trí thẳng đứng.
- Đưa ra nhận xét và đánh giá đáp ứng của góc lắc.

#### 4.1.2 Thiết kế bộ điều khiển

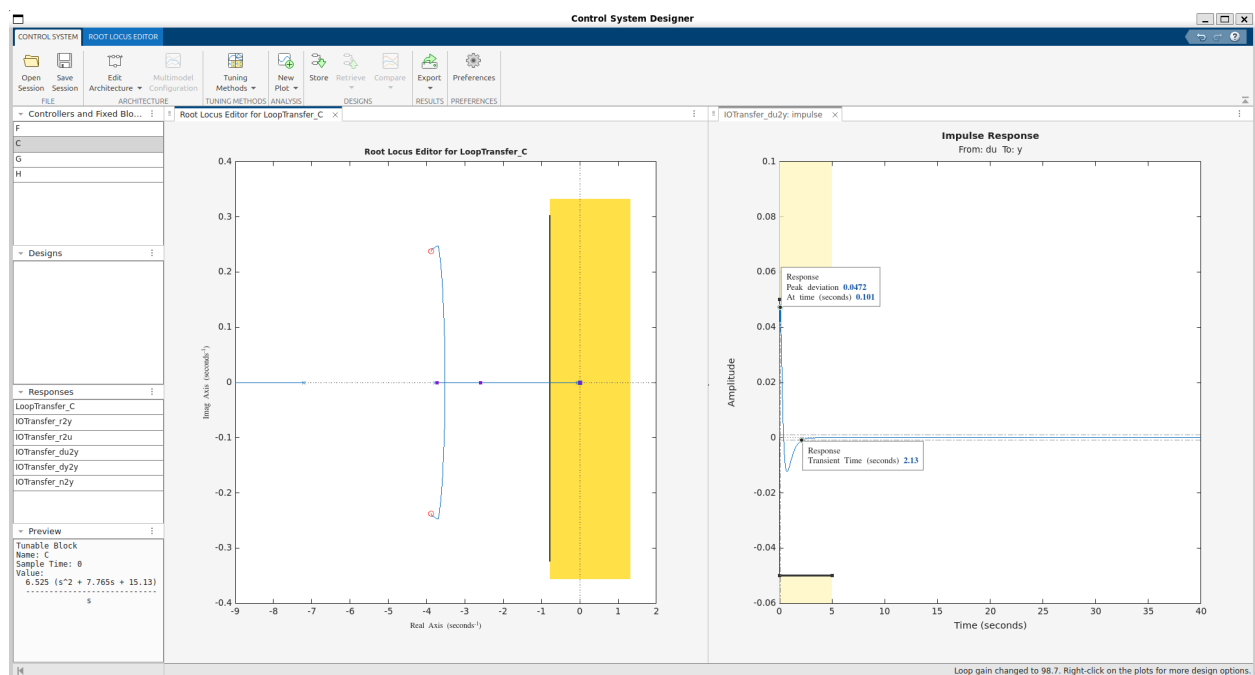
Sử dụng công cụ **Control System Designer** của MATLAB để thiết kế bộ điều khiển.

Listing 2: Thiết kế bộ điều khiển PID cho hàm truyền  $G_2(s)$

```
1 controlSystemDesigner('rlocus', G2);
```

Do bộ điều khiển PID có một cực tại  $s = 0$  và 2 zero nên trong cửa sổ **Control System Designer**, nhóm chọn 2 zero phức (complex zero).

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (24)$$



Hình 11: Thiết kế bộ điều khiển PID cho góc lắc  $\theta$  con lắc

Vùng màu vàng trong **Root Locus Editor for LoopTransfer\_C** và **Impulse Response** là các vùng mà không thỏa mãn yêu cầu đề bài. Bằng cách kéo thả cặp zero phức của bộ điều khiển và các cực của hệ kín (hình vuông màu tím) ở bên cửa sổ **Root Locus Editor for LoopTransfer\_C** vào vùng màu trắng, nhóm tìm được hàm truyền của bộ điều khiển PID cho góc lắc  $\theta$  của con lắc.

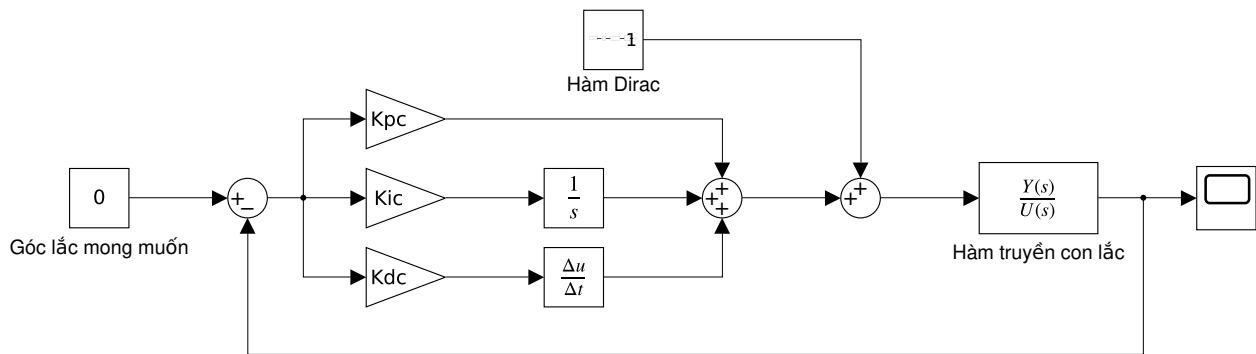
$$C_{\text{PID con lắc}} = \frac{6.525(s^2 + 7.765s + 15.13)}{s} \quad (25)$$

Các hệ số của bộ điều khiển PID con lắc là

- $K_p = 50.6646$ .
- $K_i = 98.7160$ .
- $K_d = 6.5250$ .

#### 4.1.3 Mô phỏng bằng MATLAB/Simulink

Dưới đây là sơ đồ MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển con lắc:



Hình 12: Sơ đồ MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển con lắc

Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/Simulink

#### 4.1.4 Đánh giá, nhận xét

### 4.2 Thiết kế bộ điều khiển PID cho vị trí xe đẩy

#### 4.2.1 Yêu cầu thiết kế

**Đề bài**

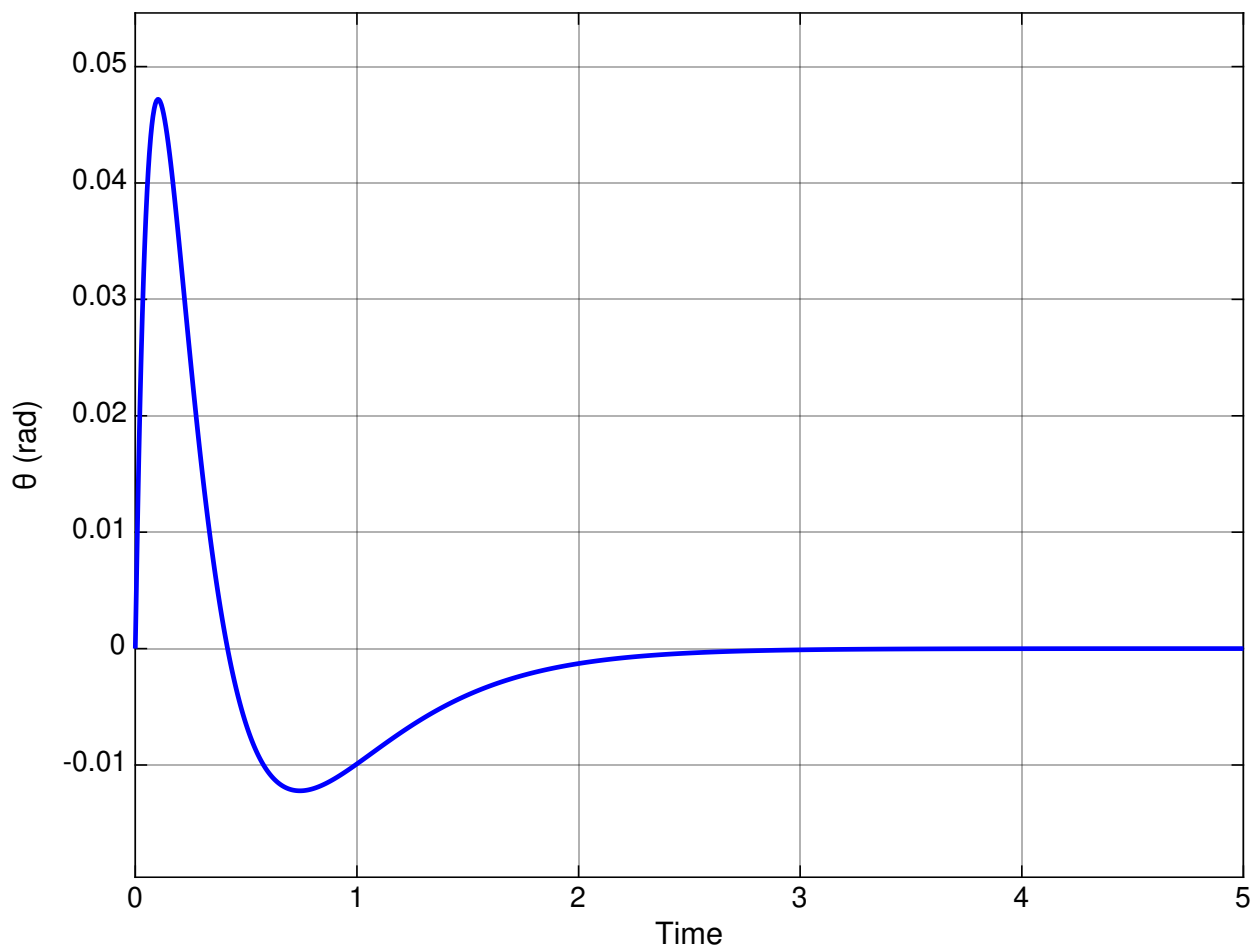
- Di chuyển xe đẩy đến vị trí mong muốn.

**Yêu cầu thiết kế**

- Thời gian xác lập cho  $x$  nhỏ hơn 3 giây.
- Độ vọt lố nhỏ 15%.

**Phương pháp thực hiện**

- Sử dụng phương pháp quỹ đạo nghiệm số để xác định thông số cho bộ điều khiển PID.
- Mô phỏng đáp ứng hệ thống với vị trí mong muốn  $x_d = 0.5$  m.
- Nhận xét và đánh giá cả đáp ứng của góc lắc và vị trí xe đẩy.



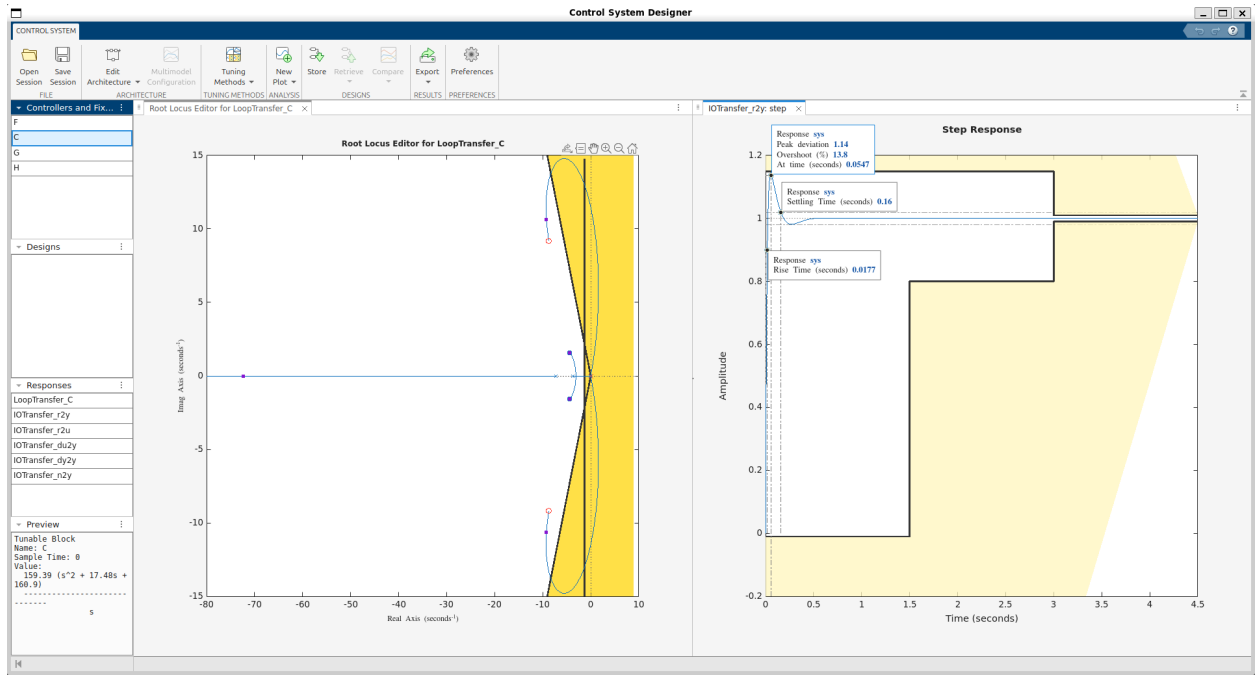
Hình 13: Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển con lắc

#### 4.2.2 Thiết kế bộ điều khiển

Sử dụng công cụ **Control System Designer** của MATLAB để thiết kế bộ điều khiển.

Listing 3: Thiết kế bộ điều khiển PID cho hàm truyền  $G_2(s)$

```
1 controlSystemDesigner('rlocus', G1);
```



Hình 14: Thiết kế bộ điều khiển PID cho vị trí  $x$  xe đẩy

Vùng màu vàng trong **Root Locus Editor for LoopTransfer\_C** và **Step Response** là các vùng mà không thỏa mãn yêu cầu đề bài. Bằng cách kéo thả cặp zero phức của bộ điều khiển và các cực của hệ kín (hình vuông màu tím) ở bên cửa sổ **Root Locus Editor for LoopTransfer\_C** vào vùng màu trắng, nhóm tìm được hàm truyền của bộ điều khiển PID cho vị trí  $x$  xe đẩy.

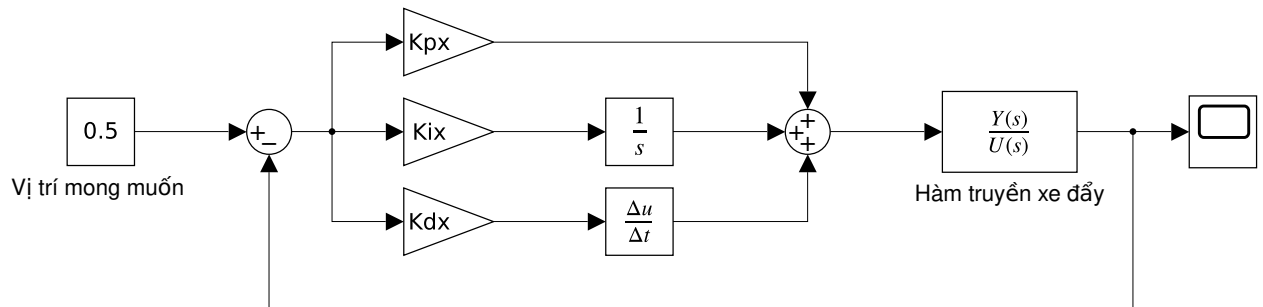
$$C_{\text{PID xe đẩy}} = \frac{159.4s^2 + 2786s + 2.564 \cdot 10^4}{s} \quad (26)$$

Các hệ số của bộ điều khiển PID xe đẩy là

- $K_p = 2786.3$ .
- $K_i = 2.5638 \cdot 10^4$ .
- $K_d = 159.3864$ .

#### 4.2.3 Mô phỏng bằng MATLAB/Simulink

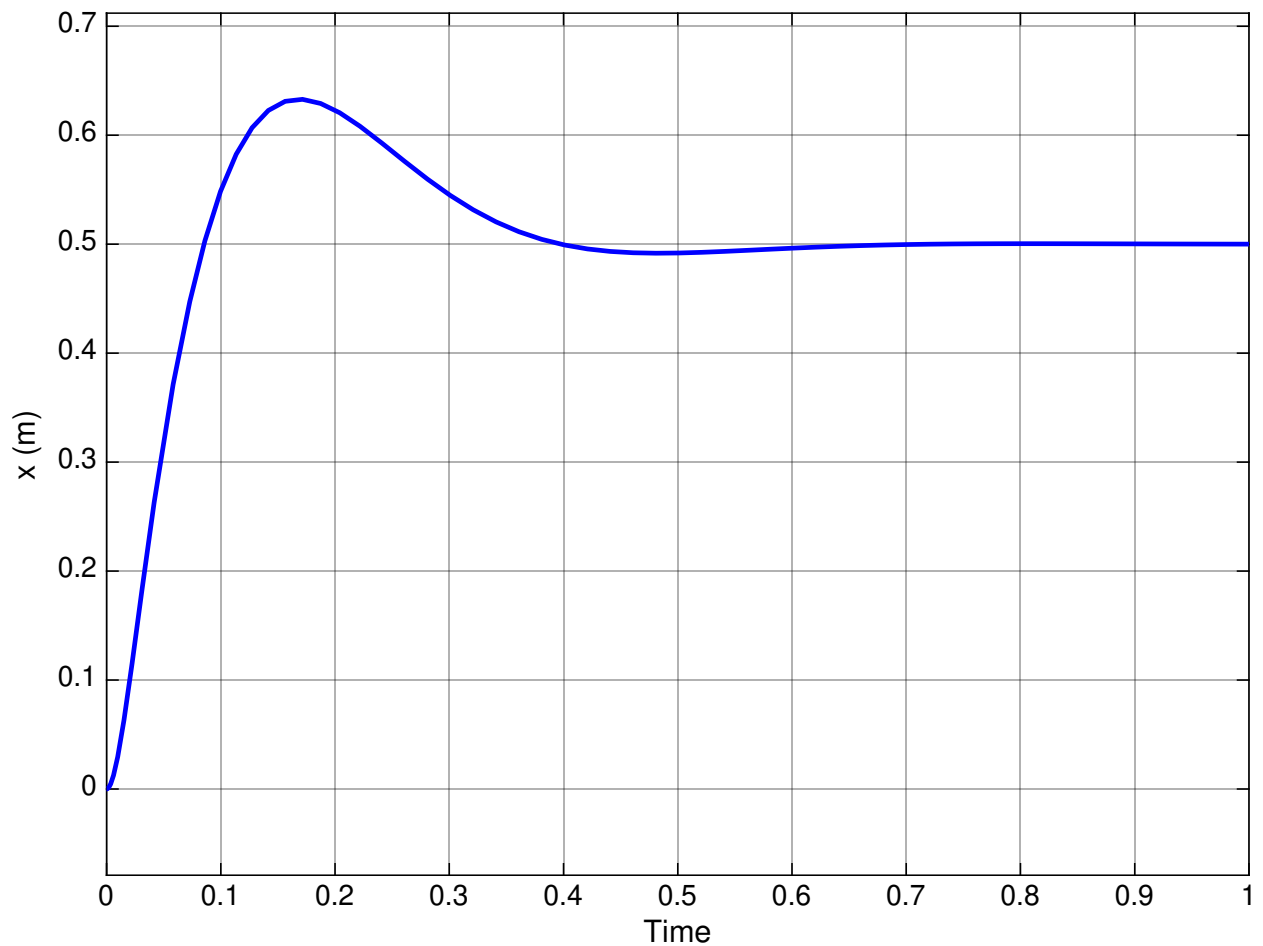
Dưới đây là sơ đồ MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển xe đẩy:



Hình 15: Sơ đồ MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển xe đẩy

Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/Simulink





Hình 16: Kết quả mô phỏng bằng MATLAB/Simulink cho hệ thống điều khiển xe đẩy

#### 4.2.4 Đánh giá, nhận xét

### 4.3 Thiết kế bộ điều khiển không gian trạng thái

#### 4.3.1 Yêu cầu thiết kế

##### Đề bài

- Điều khiển cả góc con lắc  $\theta$  và vị trí xe đẩy  $x$ .

##### Yêu cầu thiết kế

- Thời gian xác lập cho  $x$  và  $\theta$  nhỏ hơn 5 giây.
- Thời gian tăng cho  $x$  nhỏ hơn 0.5 giây.
- Độ vọt lố tối đa cho  $\theta$  nhỏ hơn 0.35 radian ( $20^\circ$ ).
- Sai số xác lập nhỏ hơn 2% cho cả  $x$  và  $\theta$ .

##### Phương pháp thực hiện

- Thiết kế bộ điều khiển không gian trạng thái theo phương pháp đặt cực để đạt được độ ổn định cho cả vị trí và góc.
- Đánh giá bộ điều khiển thông qua mô phỏng MATLAB/Simulink.

### 4.3.2 Thiết kế bộ điều khiển

Sử dụng bộ điều khiển tích phân để đảm bảo sai số xác lập nhỏ hơn 2% cho cả  $x$  và  $\theta$ . Công thức của bộ điều khiển tích phân là:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{x}}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} - \mathbf{BK} & \mathbf{BK}_e \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 2} \\ \mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \mathbf{r} \quad (27)$$

$$\mathbf{y} = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}_{2 \times 2}] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} \quad (28)$$

với  $\mathbf{x}_N = \begin{bmatrix} x_N \\ \theta_N \end{bmatrix}$  là các vector trạng thái được thêm vào,  $\mathbf{K} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]$  là vector hệ số của bộ điều khiển phản hồi,  $\mathbf{K}_e = [k_{ex} \quad k_{e\theta}]$  là vector hệ số điều khiển sai số tích phân,  $\mathbf{r} = \begin{bmatrix} x_d \\ \theta_d \end{bmatrix}$  là vector đầu vào mong muốn,  $\mathbf{I}$  là ma trận đơn vị và  $\mathbf{0}$  là các ma trận không. Kích thước của các ma trận  $\mathbf{I}$  và  $\mathbf{0}$  được ghi ở phía dưới bên phải từng ma trận.