

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP.HCM**  
**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA**

\_\_\_\_\_o0o\_\_\_\_\_



# **LUẬN ÁN THẠC SỸ**

***NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI***

**ĐỀ TÀI**

## **XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN NHÚNG TUYẾN TÍNH HOÁ VÀO RA CHO HỆ XE CON LẮC NGƯỢC**

**CHUYÊN NGÀNH: TỰ ĐỘNG HÓA**

**MSHV:09150035**

**Tp. Hồ Chí Minh, ngày 25 tháng 06 năm 2011**

LUẬN VĂN ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA  
ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP.HỒ CHÍ MINH

Cán bộ hướng dẫn :.....

(ghi rõ họ tên, học hàm, học vị và chữ ký)

Cán bộ chấm nhận xét 1:.....

(ghi rõ họ tên, học hàm, học vị và chữ ký)

Cán bộ chấm nhận xét 2:.....

(ghi rõ họ tên, học hàm, học vị và chữ ký)

Luận văn Thạc Sĩ được bảo vệ tại HỘI ĐỒNG CHẤM BẢO VỆ LUẬN  
VĂN THẠC SĨ

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA, ngày ....tháng 7 năm 2011.

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HCM  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

CỘNG HOÀ XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc Lập - Tự Do - Hạnh Phúc

-----  
Tp. HCM, ngày . . . . . tháng . . . . . năm 2011

## NHIỆM VỤ LUẬN VĂN THẠC SĨ

Họ và tên học viên: *NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI* Giới tính : Nam  
Ngày, tháng, năm sinh : 01-01-1986 Nơi sinh : SÓC TRĂNG  
Chuyên ngành : ĐIỀU KHIỂN TỰ ĐỘNG  
Khoá (Năm trúng tuyển) : 2009

### 1- TÊN ĐỀ TÀI:

**XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN NHÚNG TUYẾN TÍNH HOÁ VÀO RA  
HỆ XE CON LẮC NGƯỢC**

### 2- NHIỆM VỤ LUẬN VĂN:

- Xây dựng phần cơ khí và điện tử mô hình xe con lắc ngược.
- Xây dựng bộ điều khiển thời gian thực trên DSP để dựng ngược và giữ cân bằng con lắc.

3- NGÀY GIAO NHIỆM VỤ : .....

4- NGÀY HOÀN THÀNH NHIỆM VỤ : .....

5- HỌ VÀ TÊN CÁN BỘ HƯỚNG DẪN (Ghi đầy đủ học hàm, học vị ) : .....

.....  
Nội dung và đề cương Luận văn Thạc Sĩ đã được Hội Đồng Chuyên Ngành thông qua.

**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**  
(Họ tên và chữ ký)

**CHỦ NHIỆM BỘ MÔN**  
**QUẢN LÝ CHUYÊN NGÀNH**  
(Họ tên và chữ ký)

## Lời cảm ơn.

Trước tiên, tôi xin chân thành cảm ơn **Thầy Dương Hoài Nghĩa**, người đã tận tình hướng dẫn và truyền đạt kiến thức giúp tôi hoàn thành luận án này. Và quan trọng hơn hết, thầy là người đã gợi mở cho tác giả một hướng nghiên cứu mà tôi cảm thấy quan tâm và mong muốn theo đuổi.

Bên cạnh đó tôi xin chân thành cảm ơn đến quý thầy cô trong bộ môn Điều Khiển Tự Động: thầy **Huỳnh Thái Hoàng**, thầy Nguyễn Đức Thành, thầy Nguyễn Vĩnh Hảo, thầy Nguyễn Thiện Thành ....đã định hướng và hỗ trợ một số phần quan trọng cho việc học tập, nghiên cứu và phát triển đề tài.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn thầy Phan Vinh Hiếu đã chỉ dẫn, hỗ trợ tôi rất nhiều về kiến thức, kinh nghiệm. Ngoài ra, bạn Quốc Hùng, anh Đăng Nguyên, bạn Minh Hùng, bạn Huỳnh Bảo và các bạn cao học **khóa 2009** đã đồng viên giúp đỡ tôi trong suốt khóa học.

Cuối cùng, tôi xin chân thành cảm ơn sự quan tâm, hỗ trợ, tạo điều kiện và đồng viên về vật chất lẫn tinh thần của các thành viên trong gia đình, đặc biệt là mẹ tôi trong suốt thời gian qua.

Tp.HCM, ngày....tháng 7 năm 2011

Tác giả

**NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI**

## NHẬN XÉT CỦA CÁN BỘ HƯỚNG DẪN

Cán bộ hướng dẫn : PGS.TS DƯƠNG HOÀI NGHĨA

Họ và tên học viên : NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI Khóa : 2009

Tên đề tài : **XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN NHÚNG TUYẾN  
TÍNH HOÁ VÀO RA CHO HỆ XE CON LẮC  
NGƯỢC**

Nhận xét : .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Đánh giá :

*Tp.HCM, ngày tháng năm*  
Cán bộ hướng dẫn  
(Ký tên, ghi rõ họ tên)

## NHẬN XÉT CỦA CÁN BỘ PHẢN BIỆN 1

Cán bộ phản biện 1 :

Họ và tên học viên : **NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI** Khóa : **2009**

Tên đề tài : **XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN NHÚNG TUYẾN  
TÍNH HOÁ VÀO RA CHO HỆ XE CON LẮC  
NGƯỢC**

Nhận xét : .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Đánh giá :

*Tp.HCM, ngày tháng 7 năm 2011*

Cán bộ phản biện 1

(Ký tên, ghi rõ họ tên)

## NHẬN XÉT CỦA CÁN BỘ PHẢN BIỆN 2

Cán bộ phản biện 2 :

Họ và tên học viên : NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI Khóa : 2009

Tên đề tài : **XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN NHÚNG TUYẾN  
TÍNH HOÁ VÀO RA CHO HỆ XE CON LẮC  
NGƯỢC**

Nhận xét : .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Đánh giá :

*Tp.HCM, ngày tháng 7 năm 2011*

Cán bộ phản biện 2

(Ký tên, ghi rõ họ tên)

## Mục lục

<u>Đề mục</u>	<u>trang</u>
CHƯƠNG I: Tổng quan.....	11
1.1. Đặt vấn đề.....	11
1.2. Tổng quan.....	11
1.2.1. Xây dựng mô hình - thuật toán điều khiển.....	11
1.2.2. Tóm tắt nội dung các chương.....	13
CHƯƠNG II: Nhiệm vụ luận văn.....	15
CHƯƠNG III: Giới thiệu mô hình.....	16
3.1. Phần cơ khí.....	16
3.2. Phần mạch điện.....	18
3.2.1. Phần điều khiển.....	18
3.2.2. Phần công suất.....	19
3.3. Phần chương trình.....	19
CHƯƠNG IV: Mô hình hoá và ước lượng tham số.....	20
4.1. Mô hình hoá hệ thống con lắc ngược.....	20
4.2. Mô hình toán học của hệ thống con lắc ngược.....	26
4.3. Ước lượng các thông số còn thiếu của hệ thống.....	27
CHƯƠNG V: Thiết kế bộ điều khiển.....	31
5.1. Giới thiệu.....	31
5.2. Điều khiển cân bằng.....	33
5.2.1. Tuyến tính hoá vào – ra hệ phi tuyến.....	33



5.2.1.1.	Lý thuyết tổng quát.....	33
5.2.1.2.	Ứng dụng cho mô hình xe con lắc ngược .....	34
5.2.2.	Thiết kế bộ điều khiển LQR.....	38
5.2.3.	Điều khiển LQR rời rạc.....	39
5.2.4.	Tinh điều khiển được.....	40
5.3.	Điều khiển Swing-up.....	41
CHƯƠNG VI: Mô phỏng hoạt động điều khiển.....		43
6.1.	Xây dựng chương trình mô phỏng bộ điều khiển trên Simulink.....	43
6.2.	Điều khiển xe về vị trí 0.....	45
6.2.1.	Khi thay đổi thông số tuyến tính hoá.....	45
6.2.1.1.	Khi bienso1=2; bienso2=1.....	46
6.2.1.2.	Khi bienso1=3; bienso2=1(chuẩn).....	48
6.2.1.3.	Khi bienso1=5; bienso2=1.....	51
6.2.1.4.	Nhận xét.....	53
6.2.2.	Khi thay đổi thông số điều khiển.....	53
6.2.2.1.	Khi R=0.1(chuẩn).....	54
6.2.2.2.	Khi R=100.....	56
6.2.2.3.	Khi R=0.001.....	59
6.2.2.4.	Nhận xét.....	61
CHƯƠNG VII: Đáp ứng thực tế khi điều khiển.....		62
7.1.	Xây dựng chương trình điều khiển trên Simulink.....	62
7.2.	Đáp ứng ngõ ra thực tế.....	65
7.2.1.	Với thông số chuẩn.....	65
7.2.2.	Khi thay đổi thông số tuyến tính hoá.....	67
7.2.2.1.	Khi tăng bienso1.....	67
7.2.2.2.	Khi giảm bienso1.....	70
7.2.3.	Khi thay đổi thông số điều khiển.....	72

7.2.3.1.	Khi tăng R.....	72
7.2.3.2.	Khi giảm R.....	75
7.3	Nhận xét.....	78
CHƯƠNG VIII: Tổng kết.....		79
Tài liệu tham khảo.....		81

## **CHƯƠNG I: TỔNG QUAN**

### **1.1 Đặt vấn đề**

Điều khiển LQR có ưu điểm là đơn giản, dễ thực hiện và làm cho hệ thống nhanh chóng về vị trí cân bằng rất tốt. Tuy nhiên, hệ thống còn tồn tại một khuyết điểm là chỉ cân bằng tốt khi ở lân cận điểm làm việc. Học viên khi thực hiện đề tài này có mong muốn sẽ mở rộng được khoảng làm việc của hệ thống. Việc này sẽ hạn chế khuyết điểm khi sử dụng điều khiển bằng LQR.

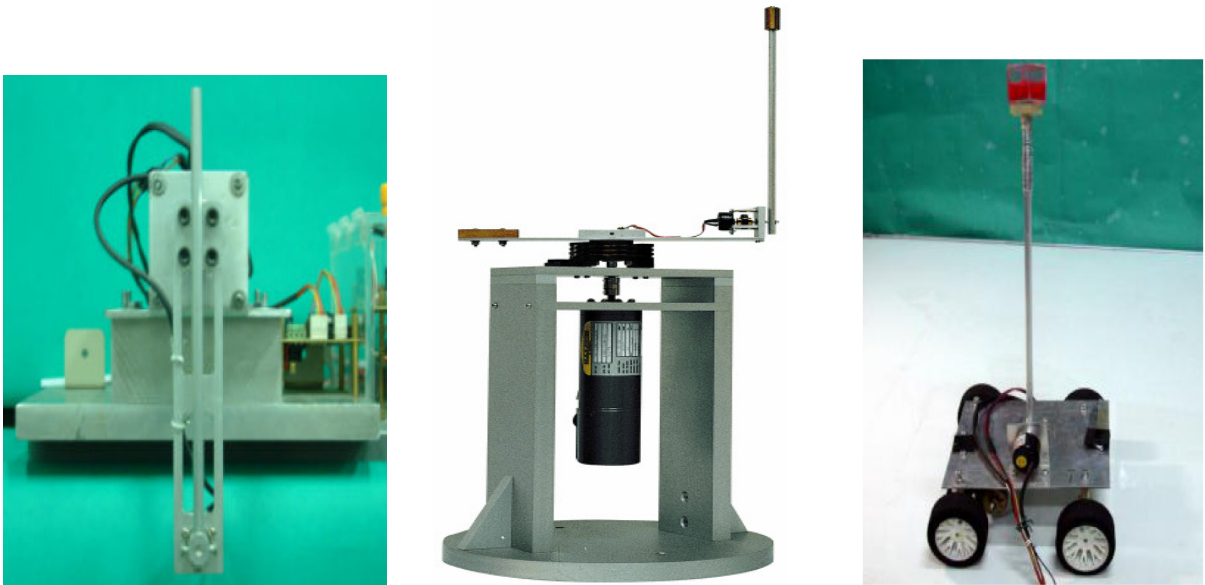
Học viên chọn việc xây dựng hệ thống nhúng dùng vì mong muốn sẽ ứng dụng hệ thống nhúng cho các hệ thống khác, góp phần đưa các giải thuật điều khiển ra ứng dụng thực tế.

Đó chính là mục đích của luận văn cao học ***“Thiết kế bộ điều khiển nhúng tuyến tính hoá vào ra cho hệ xe con lắc ngược”***

### **1.2 Tổng quan:**

#### **1.2.1 Xây dựng mô hình – Thuật toán điều khiển:**

Con lắc ngược là một đối tượng đại diện cho một lớp các đối tượng có độ phi tuyến cao và không ổn định.



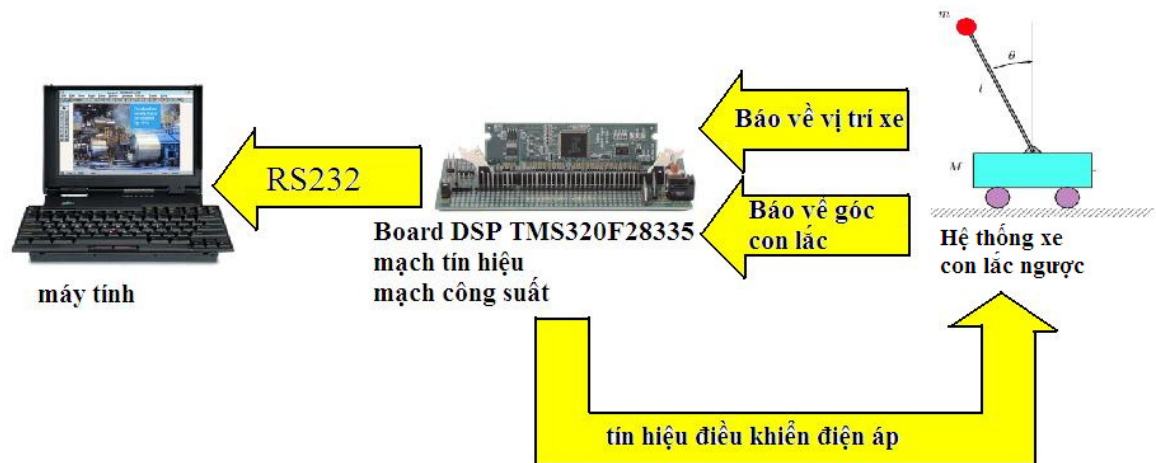
**Hình 1.1:** Một số mô hình hệ con lắc ngược được sử dụng trước đây

Hệ xe con lắc ngược được sử dụng nhiều trong các phòng thí nghiệm để cho học viên cao học và sinh viên nghiên cứu các giải thuật điều khiển.

Hệ xe con lắc ngược 1 bậc bao gồm 3 phần chính:

- **Phần cơ khí:** gồm 1 que kim loại (con lắc) quay quanh 1 trục thẳng đứng. Que kim loại được gắn gián tiếp vào một xe thông qua một encoder để đo góc. Trên chiếc xe có 1 encoder để đo góc, xác định được vị trí chiếc xe. Do trong quá trình vận hành chiếc xe sẽ chạy tới lui với tốc độ cao để lấy mẫu nên phần cơ khí cần phải được tính toán thiết kế chính xác, chắc chắn nhằm tránh rung gây nhiễu và hư hỏng trong quá trình vận hành.
- **Điện tử:** gồm 3 phần nhỏ là: cảm biến đo vị trí xe và góc con lắc, mạch khuếch đại công suất và mạch điều khiển. Nhiều loại cảm biến được sử dụng để đo góc, trong đề tài này tác giả sử dụng *Bộ mã hóa vòng quay* (Rotary Encoder) có độ phân giải cao. Tín hiệu từ *Bộ mã hóa vòng quay* sẽ được khuếch đại, lọc nhiễu rồi kết nối vào module ngoại vi *eQEP* (Enhanced Quadrature Encoder Pulse) của *DSP*. Tùy thuộc vào tín hiệu từ các *Bộ mã hóa vòng quay* (Rotary Encoder) mà *DSP* được lập trình để xuất tín hiệu ngõ ra điều khiển động cơ DC Servo qua một mạch khuếch đại công suất.
- **Chương trình:** Chương trình điều khiển con lắc tác giả không viết trực tiếp trên *Code Composer Studio* mà kết hợp với *Matlab2009a* thông qua thư viện *Target Support Package TC2* để tận dụng các hàm tính toán mạnh có sẵn trong Matlab. Ưu điểm của cách viết này là đơn giản, tiết kiệm thời gian và nhược điểm là chương trình sẽ nặng và không tối ưu.

Mục tiêu của đề tài là biến đổi hệ thống từ dạng phi tuyến sang dạng tuyến tính. Tuy nhiên việc làm này không phải thực hiện việc tuyến tính hoá quanh điểm cân bằng. Học viên sẽ đặt biến ngõ ra để hệ thống có dạng tuyến tính nhưng vẫn giữ những đặc trưng phi tuyến. Luật điều khiển sẽ được xây dựng trên nền *DSP* xử lý dấu chấm động TMS320F28335.



Hình 1.2: Sơ đồ khối hệ thống xe con lắc ngược được thực hiện ở luận văn

### **1.2.2 Tóm tắt nội dung các chương:**

Nhiệm vụ của Chương 2 là trình bày các công việc cần thực hiện để hoàn tất đề tài. Mục tiêu của Chương 3 là trình bày cách thành lập mô hình toán và giới thiệu phương pháp bình phương cực tiểu để ước lượng các tham số của mô hình con lắc. Ở Chương 4, thuật toán Lật ngược và Giữ cân bằng con lắc dựa trên phương pháp tích lũy năng lượng và đặt cực cũng như LQR sẽ được tác giả trình bày chi tiết.

Các chương sẽ được trình bày theo thứ tự sau:

#### **CHƯƠNG I: Tổng quát**

- Đặt vấn đề chọn đề tài, giới thiệu tổng quan đề tài, các nghiên cứu liên quan.

#### **CHƯƠNG II: Nhiệm vụ luận văn**

- Nêu các công việc phải thực hiện

#### **CHƯƠNG III: Giới thiệu mô hình**

- Trình bày phần cơ khí, điện, chương trình mà học viên thực hiện.

#### **CHƯƠNG IV: Mô hình hoá và ước lượng tham số**

- Phân tích mô hình toán học của hệ thống
- Xác định các thông số có được (từ đo đạc và nhà sản xuất) và phân tích cách tìm thông số còn thiếu.

#### CHƯƠNG V: Nêu ra cách thiết kế bộ điều khiển:

- Điều khiển cân bằng: trình bày kỹ hơn về lý thuyết tuyến hoá hệ thống, cách thành lập bộ điều khiển.
- Điều khiển Swing\_up

#### CHƯƠNG VI: Mô phỏng hoạt động bộ điều khiển

- Phân tích đáp ứng ngõ ra khi các thông số xấp xỉ tuyến tính hoá thay đổi (bienso1, bienso2)
- Phân tích đáp ứng ngõ ra khi các thông số điều khiển thay đổi (ma trận Q, R)
- Nhận xét kết luận.

#### CHƯƠNG VII: Đáp ứng thực tế của bộ điều khiển

- Phân tích đáp ứng ngõ ra khi các thông số xấp xỉ tuyến tính hoá thay đổi (bienso1, bienso2)
- Phân tích đáp ứng ngõ ra khi các thông số điều khiển thay đổi (ma trận Q, R)
- Nhận xét kết luận

#### CHƯƠNG VIII: Tổng kết

## **CHƯƠNG II: *NHIỆM VỤ LUẬN VĂN***

Nhiệm vụ học viên khi thực hiện luận văn này:

- Thiết kế-thi công mới toàn bộ hệ thống xe con lắc ngược.
- Nghiên cứu chip DSP *TMS320F28335*.
- Thiết kế giải thuật điều khiển thông qua việc tuyến tính hoá vào ra, tiến hành mô phỏng và áp dụng lên hệ thực.
- Tiến hành chạy thử và phân tích đáp ứng của hệ thống.
- Nêu những nhận xét rút ra được khi sử dụng tuyến tính hoá vào ra.

\

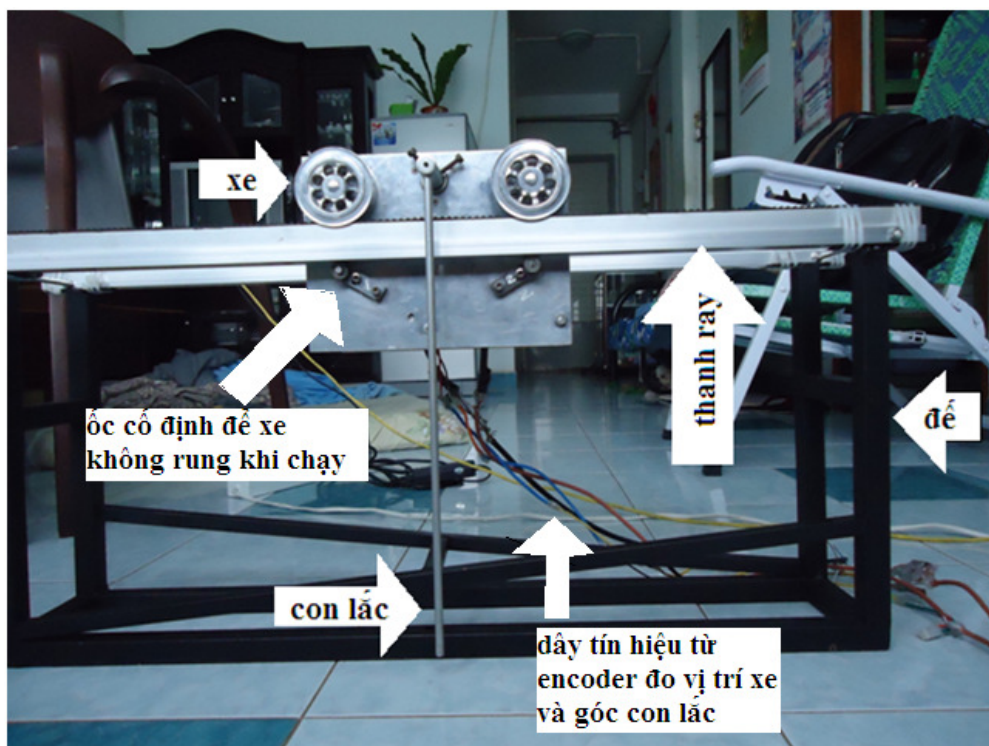
## **CHƯƠNG III:** **GIỚI THIỆU MÔ HÌNH PHẦN CỨNG**

### **3.1. Phần cơ khí:**

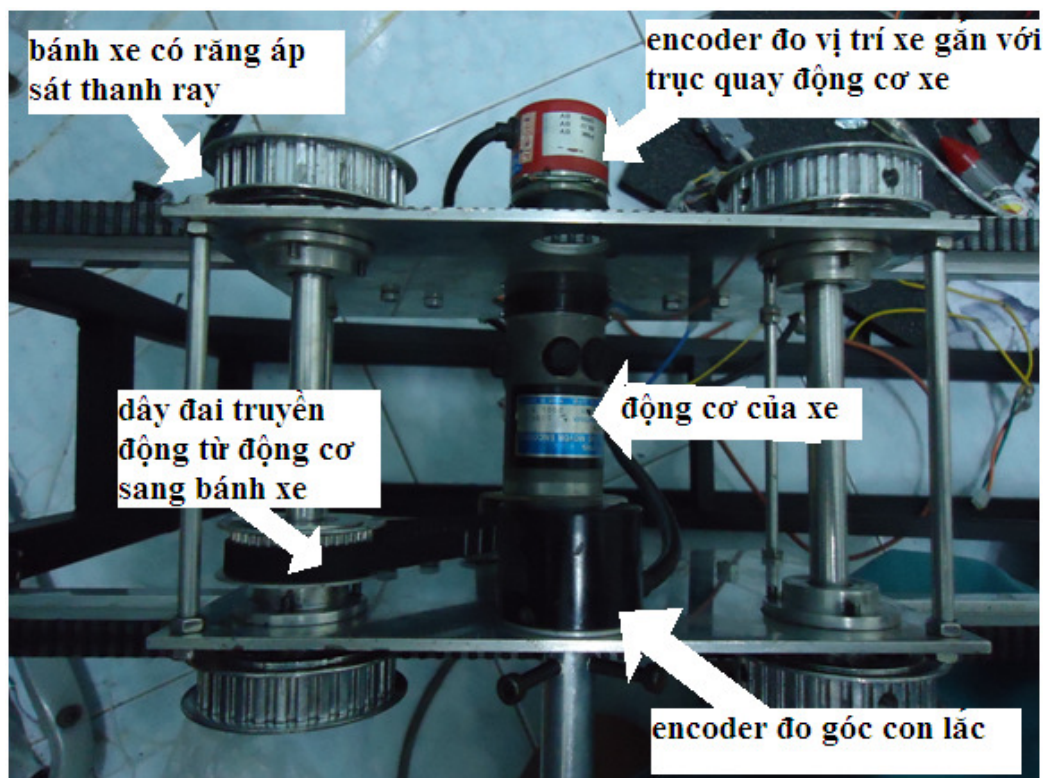
Hệ xe con lắc ngược được tác giả xây dựng gồm:

- 1 thanh ngang dài 0.8m có dạng ray ăn khớp với ray trên bánh xe để tránh xe bị trượt khi di chuyển.
- Thanh ray được buộc chặt với đế bằng dây rút (để đảm bảo cố định tốt nhưng vẫn có thể tháo lắp mô hình).
- Con lắc là một thanh nhôm đồng chất dài 36cm gắn vuông góc với trục encoder đo góc.
- Ốc cố định được gắn phía dưới xe để tránh xe bị rung khi đảo chiều điều khiển liên tục( Nếu để xe rung nhiều thì bánh xe sẽ trượt trên ray → đo không chính xác).
- Đế bằng sắt nặng để tránh rung cho mô hình.
- Encoder dùng cho con lắc là encoder 1000 xung/vòng (trên encoder không có tên hãng hay thông tin gì nên học viên sử dụng phép đo thực tế để xác định số xung/vòng của encoder)
- Động cơ dùng để điều khiển xe là động cơ DC SERVO MOTOR của Tamagawa (loại 30W). Từ đó, ta có thể tham khảo được các thông số của động cơ thông qua trang web nhà sản xuất.
- Động cơ Tamagawa có gắn encoder đồng trục động cơ. Tuy nhiên, encoder đi kèm với động cơ bị hư. Do đó, học viên đã gắn 1 encoder khác thay thế, có thông số là 600 xung/vòng (đo được thông số trên nhờ đo thực tế).





Hình 3.1: Mô hình cơ khí khi nhìn từ phía trước



Hình 3.2: Mô hình xe khi nhìn từ trên xuống

### **3.2. Phần mạch điện:**

#### **3.2.1. Phần điều khiển:**

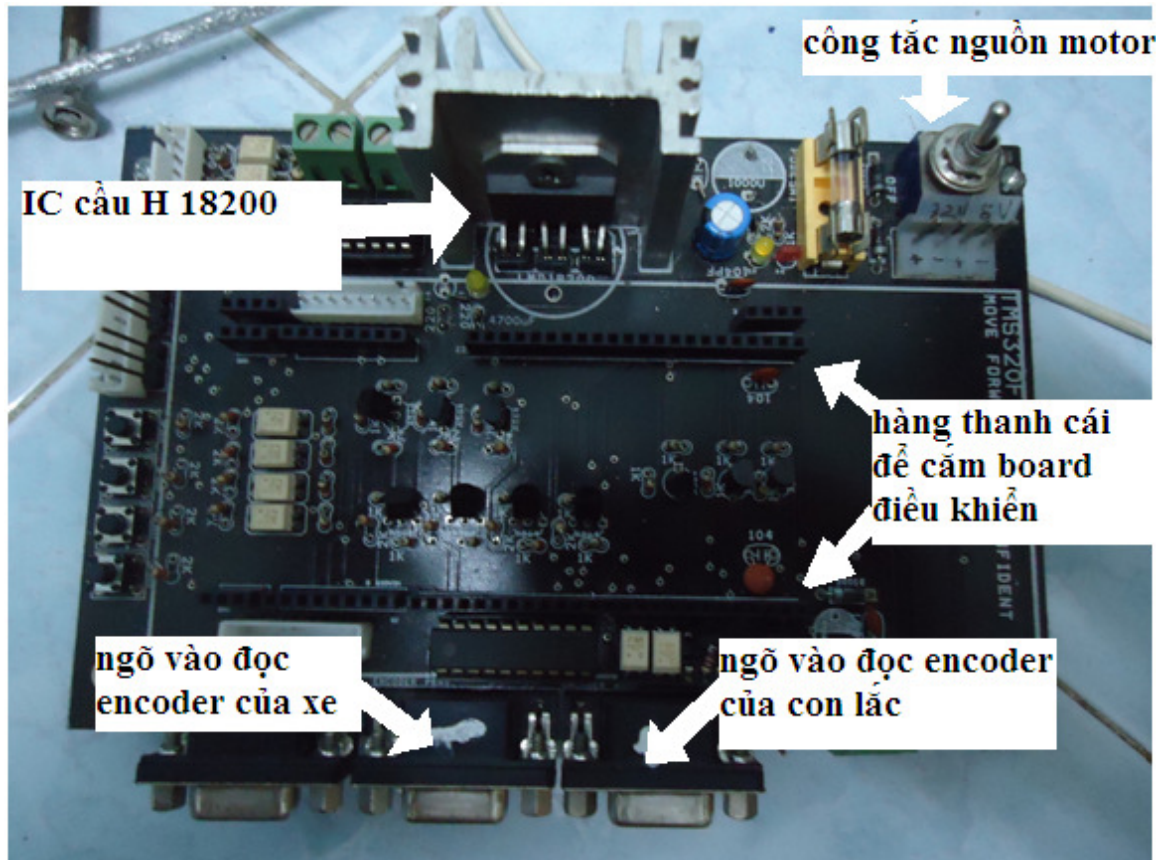


Board DSP được sử dụng là board

TMDSDOCK320F28335 của Texas Instrument. Có cổng kết nối (đồng thời cấp nguồn nếu cần thiết) với máy tính thông qua cổng USB. Tuy nhiên, khi cấp nguồn bằng nguồn của chính máy tính thì sự kết nối thực tế là không ổn định. Do đó, học viên lấy nguồn 5V ngoài để nuôi

Hình 3.3: Board TMDSDOCK320F28335 được sử dụng ở luận văn

### 3.2.2. Phần công suất:



Hình 3.4: Board công suất và thu dữ liệu từ DSP

### 3.3. Phần chương trình:

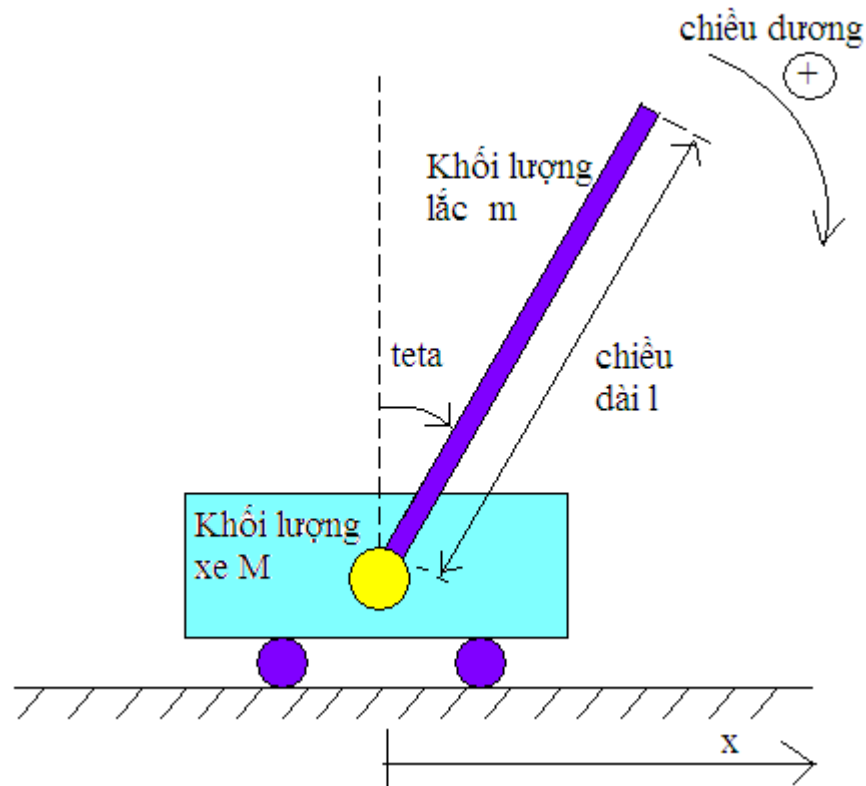
Tác giả lập trình bằng khối Simulink trong Matlab. Sau đó, liên kết với CCS để chuyển sang file C tương ứng. Từ file C sẽ compile để cho ra file .out để nạp cho DSP. Việc nạp này thực hiện trên RAM của DSP nên khi ngắt nguồn nuôi thì chương trình sẽ không được lưu giữ.

Lập trình DSP thông qua Matlab sẽ giúp việc thực hiện chương trình rất dễ dàng. Đồng thời chương trình viết ra cũng thân thiện, dễ hiểu. Người đọc, kiểm tra sẽ dễ dàng kế thừa và phát triển.

Loại jtag đi kèm với board là jtag 100USB emulator.

## **CHƯƠNG IV:** ***MÔ HÌNH HOÁ VÀ ƯỚC LƯỢNG*** ***THAM SỐ***

### **4.1. Mô hình hoá hệ thống xe con lắc ngược :**



**Hình 4.1:** Hệ trục tọa độ của con lắc

Con lắc có thể quay tròn xung quanh trọng tâm xe góc  $360^\circ$ . Vì vậy có thể chia con lắc điều khiển thành 2 vùng điều khiển như sau: điều khiển swing-up và điều khiển cân bằng. Ban đầu thì con lắc nằm đứng, ta tiến hành điều khiển Swing-up để đưa con lắc lên vị trí  $\theta[-10^\circ, 10^\circ]$ . Tại vị trí này, con lắc không ổn định, nó luôn ngã xuống. Để con lắc không bị ngã, ta tiếp tục điều khiển cân bằng.



Theo phương trình Euler-Lagrange, ta có:

$$\frac{d\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right)}{dt} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \text{ và } L = T - V \quad (4.1)$$

$L$  = hàm Lagrange.

$T$  = động năng.

$V$  = thế năng.

$Q$  = tổng ngoại lực.

$$\text{Đặt } q = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix}; Q = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Tổng động năng của hệ thống: } T = T_{pole} + T_{cart} \quad (4.2)$$

$$\text{Với động năng con lắc: } T_{pole} = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}^2 \quad (4.3)$$

$$\text{và động năng xe: } T_{cart} = \frac{1}{2}Mv_2^2 \quad (4.4)$$

$$\text{Trong đó, bình phương vận tốc con lắc ngược: } v_1^2 = \dot{r}_{1x}^2 + \dot{r}_{1y}^2 \quad (4.5)$$

$$\text{và bình phương vận tốc xe: } v_2^2 = \dot{x}^2 \quad (4.6)$$

Vận tốc con lắc ngược theo phương x và phương y là:

$$\begin{cases} \dot{r}_{1x} = C_1 \sin \theta + \dot{x} \\ \dot{r}_{1y} = C_1 \cos \theta \end{cases} \quad (4.7)$$

$$\quad (4.8)$$

→ Vận tốc con lắc theo phương x và phương y là:

$$\begin{cases} \dot{r}_{1x} = C_1 \dot{\theta} \cos \theta + \dot{x} \\ \dot{r}_{1y} = -C_1 \dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\quad (4.10)$$

Từ (4.2) đến (4.10), ta suy ra động năng và thế năng của hệ thống xe con lắc ngược và có dạng sau:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2}m(\dot{r}_{1x}^2 + \dot{r}_{1y}^2) + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}M\dot{x}^2 \\ &= \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2C_1\dot{\theta}\dot{x}\cos\theta + C_1^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}M\dot{x}^2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\text{Và } V = mr_{1y}g = mC_1g \cos \theta \quad (4.12)$$

Từ (4.1) → Hàm Euler-Lagrange có dạng sau:

$$L = T - V = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + 2C_1\dot{\theta}^2\dot{x}\cos\theta + C_1^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}J_1\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}M\dot{x}^2 \quad (4.13)$$

Hệ phương trình Euler-Lagrange của hệ xe con lắc ngược:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = (m + M)\dot{x} + mC_1\dot{\theta}\cos\theta \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}}\right) = (m + M)\ddot{x} + mC_1\ddot{\theta}\cos\theta - mC_1\dot{\theta}^2\sin\theta \\ \frac{\partial L}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mC_1\dot{x}\cos\theta + (J_1 + mC_1^2)\dot{\theta} \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) = mC_1\ddot{x}\cos\theta - mC_1\dot{\theta}\dot{x}\sin\theta + (J_1 + mC_1^2)\ddot{\theta} \\ \frac{\partial L}{\partial \theta} = -mC_1\dot{\theta}\dot{x}\sin\theta + mC_1g\sin\theta \end{array} \right. \quad (4.14)$$

→ Phương trình trạng thái hệ thống với ngõ vào là lực F tác động lên chiếc xe:

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + M)\ddot{x} + mC_1\ddot{\theta}\cos\theta - mC_1\dot{\theta}^2\sin\theta = F \\ mC_1\ddot{x}\cos\theta + (J_1 + mC_1^2)\ddot{\theta} - mC_1g\sin\theta = 0 \end{array} \right. \quad (4.15)$$

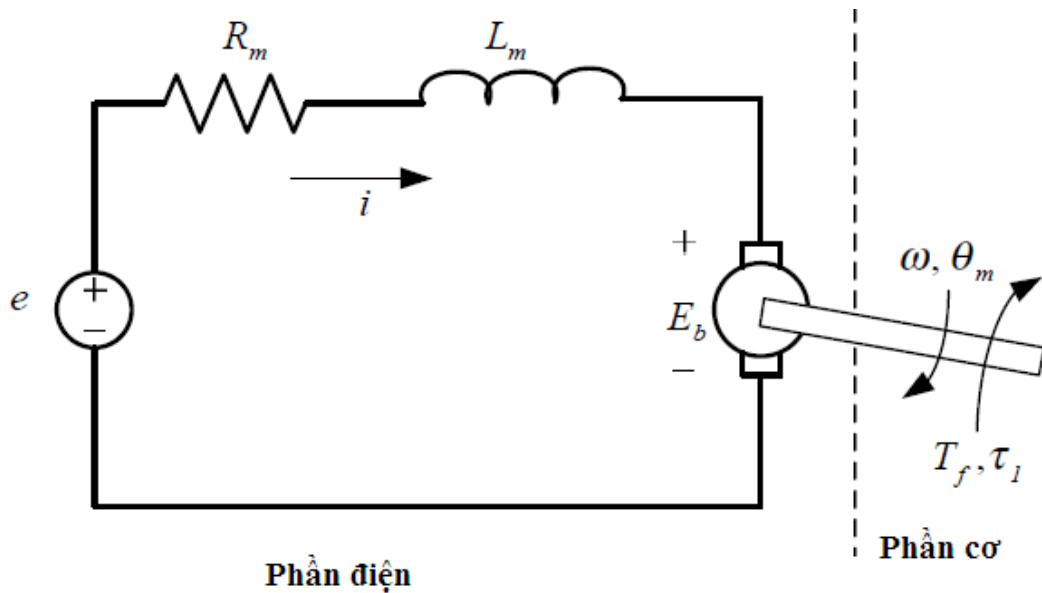
Đặt theo dạng ma trận:

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q}) + G(q) = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\text{Với } \left\{ \begin{array}{l} M(q) = \begin{bmatrix} m + M & mC_1\cos\theta \\ mC_1\cos\theta & J_1 + mC_1^2 \end{bmatrix} \\ V_m(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -mC_1\dot{\theta}^2\sin\theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ G(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ -mC_1g\sin\theta \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (4.17)$$

Ngõ vào điều khiển ở đây đang là lực tác dụng lên xe (cart). Tuy nhiên lực này thì sẽ gây khó khăn cho ta khi điều chỉnh động cơ. Do đó, học viên sẽ tìm cách quy đổi để ngõ vào là áp cấp cho động cơ.

Theo đúng cấu trúc thật sự, ta cần chia động cơ thành 2 phần: “điện” và “cơ” như hình sau:



Hình 4.2: khối động cơ DC

$R_m$ : điện trở động cơ (ohm) (nhà sản xuất cung cấp)

$L_m$ : hệ số điện kháng (H) (nhà sản xuất cung cấp)

$K_b$ : hằng số phản điện (V/(rad/sec)) (nhà sản xuất cung cấp)

$K_t$ : hằng số momen (Nm/A) (nhà sản xuất cung cấp)

$J_m$ : momen quán tính của rôto (kgm<sup>2</sup>) (nhà sản xuất cung cấp)

$C_m$ : hệ số ma sát nhớt (Nm/(rad/sec)) (phải tính toán)

$T_f$ : momen ma sát (Nm) (nhà sản xuất cung cấp)

$\tau_l$ : momen xoắn cản (Nm)

$\omega$ : vận tốc motor (rad/s)

$\tau_m$ : mô men xoắn nội (Nm)

$\theta_m$ : góc xoay trục động cơ (rad)

Phần điện:

$$\begin{aligned} e &= L_m \frac{di}{dt} + R_m i + E_b \quad (\text{với } E_b = K_b \omega) \\ &= L_m \frac{di}{dt} + R_m i + K_b \omega \end{aligned} \quad (4.18)$$

Phần cơ:

$$\begin{aligned} J_m \frac{d\omega}{dt} &= \tau_m - T_f - C_m \omega - \tau_1 \quad (\text{với } \tau_m = K_t i) \\ &= K_t i - T_f - C_m \omega - \tau_1 \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\text{Công suất điện: } P_e = E_b i \quad (\text{W}) \quad (4.20)$$

$$\text{Công suất cơ: } P_m = \tau_m \omega \quad (\text{W}) \quad (4.21)$$

Theo định luật bảo toàn năng lượng:  $P_e = P_m \rightarrow E_b i = \tau_m \omega$

$$K_b \omega i = K_t i \omega \rightarrow K_b = K_t \quad (4.22)$$

Nếu  $K_b$  và  $K_t$  dùng đơn vị MKS (  $K_b$  có đơn vị V/rad/sec và  $K_t$  có đơn vị Nm/A). Khi đó,  $K_b = K_t$

(4.18) và (4.19) biến đổi Laplace có dạng sau:

$$\left\{ \begin{aligned} (L_m s + R_m) I(s) + K_b \Omega(s) &= E(s) \end{aligned} \right. \quad (4.23)$$

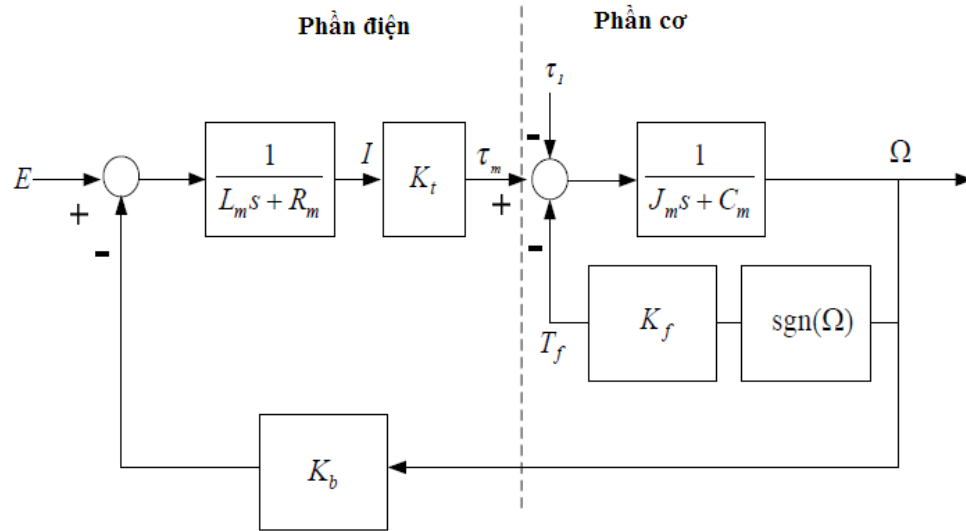
$$\left\{ \begin{aligned} K_t I(s) - (J_m s + C_m) \Omega(s) &= T_f(s) + \tau_1(s) \end{aligned} \right. \quad (4.24)$$

Ta giả thiết  $T_f$  là hằng số và  $T_f = K_f \text{sgn}(\Omega)$

$$K_f \text{ là hằng số và } \text{sgn}(\Omega) = \begin{cases} 1 & \Omega > 0 \\ 0 & \Omega = 0 \\ -1 & \Omega < 0 \end{cases} \quad (4.25)$$

Khối động cơ DC được miêu tả ở hình sau:





Hình 4.3: Khối động cơ DC sau khi phân tích thành hàm truyền

Mô hình toán toàn hệ thống:

Bởi vì tốc độ điện nhanh hơn tốc độ cơ khí:

$$e \gg L_m \frac{di}{dt} \rightarrow \text{có thể bỏ qua } L_m \frac{di}{dt} \rightarrow e = R_m i + K_b \omega \rightarrow i = \frac{e - K_b \omega}{R_m}$$

$$\tau_m = K_t i = \frac{K_t}{R_m} (e - K_b \omega) = \frac{K_t}{R_m} e - \left( \frac{K_t K_b}{R_m} \right) \omega \quad (4.26)$$

$$\text{Ta có: } x = \frac{R \theta_m}{d_l} \quad (4.27)$$

Với R là bán kính bánh xe

$d_l$  là hệ số tỉ lệ bánh răng truyền động

$$\dot{x} = \frac{R \omega}{d_l} \text{ thay vào (4.26)} \rightarrow \tau_m = \frac{K_t}{R_m} e - \frac{K_b K_t}{R_m R} \dot{x} \quad (4.28)$$

Thay (4.28) vào (4.21) (xem như bỏ qua  $T_f$ )

$$\tau_l = -\frac{J_m d_l}{R} \ddot{x} - d_l \left( \frac{C_m}{R} + \frac{K_b K_t}{R_m R} \right) \dot{x} + \frac{K_t}{R_m} e \quad (4.29)$$

Lực tác dụng lên xe:

$$F = \frac{d_l \tau_l}{R} = \frac{d_l}{R} \left[ \frac{K_t}{R_m} e - d_l \left( \frac{K_b K_t}{R_m R} + \frac{C_m}{R} \right) \dot{x} - \frac{J_m d_l}{R} \ddot{x} \right] \quad (4.30)$$

$$\text{Đặt } k_1 = \frac{d_l K_t}{R_m R} \quad (4.31)$$

$$k_2 = \frac{d_l^2 K_t K_b}{R^2 R_m} + \frac{d_l^2 C_m}{R^2} \quad (4.32)$$

$$k_3 = \frac{d_l^2 J_m}{R^2} \quad (4.33)$$

$$\rightarrow F = k_1 e - k_2 \dot{x} - k_3 \ddot{x} \quad (4.34)$$

Kết hợp các phương trình (4.15), (4.30), (4.34), ta được hệ phương trình động lực học hệ xe con lắc:

$$M_f(q)\ddot{q} + V_{mf}(q, \dot{q})\dot{q} + G_f(q) = \begin{bmatrix} k_1 e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\text{Trong đó: } \begin{cases} M_f(q) = \begin{bmatrix} m + M + k_3 & mC_1 \cos \theta \\ mC_1 \cos \theta & J_1 + mC_1^2 \end{bmatrix} \\ V_{mf} = \begin{bmatrix} k_2 & -mC_1 \dot{\theta}^2 \sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ G_f = \begin{bmatrix} 0 \\ -mC_1 g \sin \theta \end{bmatrix} \end{cases}$$

## **4.2. Mô hình toán học của hệ thống xe con lắc ngược:**

Đặt biến trạng thái hệ thống như sau:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T \quad (4.36)$$

Như vậy, theo (4.35), hệ phương trình trạng thái hệ xe con lắc ngược có dạng

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (4.37)$$

$$\text{Với } f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{-\alpha_3 \sin x_3 \cos x_3 - k_2 x_2 + \alpha_4 x_4^2 \sin x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ x_4 \\ \left[ \frac{\alpha_5}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \cos^2 x_3 + \alpha_6 \right] \sin x_3 + \frac{\alpha_7 x_2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_2 \\ x_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ 0 \\ \frac{-\alpha_8 \cos x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ 0 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

Với các thông số hệ thống được xác định như sau:

$$g = 9.81(m/s^2) \quad R_m = 2.7(\Omega) \quad d_1 = 40/25 \quad R = 57.2958 \times 10^{-3} \quad K_b = K_t = 5.3 \times 10^{-3}$$

$$C_m = 5 \times 10^{-4}(N.m.s/rad) \quad L_m = 1.4 \times 10^{-3}(H) \quad K_f = 7.8 \times 10^{-3}(Nm)$$

$$J_m = 0.049 \times 10^{-4}(kg.m^2)$$

$$M = 1.68(kg) \quad m = 0.027(kg) \quad J_1 = 1.1664 \times 10^{-3}(kg.m^2) \quad C_1 = 0.36(m)$$

$$\alpha_1 = M + m + k_3 \quad \alpha_2 = \frac{m^2 C_1^2}{h_1} \quad \alpha_3 = \frac{m^2 g C_1^2}{h_1} \quad \alpha_4 = m C_1 \quad \alpha_5 = \frac{m^3 C_1^3 g}{h_1^2} \quad \alpha_6 = \frac{m C_1 g}{h_1}$$

$$\alpha_7 = \frac{m C_1 k_2}{h_1} \quad \alpha_8 = \frac{m C_1}{h_1}$$

### 4.3. Ước lượng thông số còn thiếu của hệ thống:

Qua phần trên, ta nhận thấy còn 1 thông số hệ thống còn thiếu. Đó là  $C_m$ .

Trước hết, ta xấp xỉ các đạo hàm như sau:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} \approx \frac{\omega(t_{n+1}) - \omega(t_n)}{\Delta t} \quad (4.40)$$

Từ (4.26), sau khi xấp xỉ như trên ta được:

$$K_t i(t_n) = J_m \frac{\omega(t_{n+1}) - \omega(t_n)}{\Delta t} + C_m \omega(t_n) + K_f \text{sgn}(\omega)$$

$$\Leftrightarrow \omega(t_{n+1}) = \frac{J_m - C_m \Delta t}{J_m} \omega(t_n) + \frac{K_b \Delta t}{J_m} i(t_n) - \frac{K_f \text{sgn}(\omega) \Delta t}{J_m} \quad (4.41)$$

Do ở đây tác giả dùng DSP xử lí rời rạc với chu kì lấy mẫu là 0.01s nên  $\Delta t = 0.01(s)$

$$\text{Đặt } b_1 = \frac{K_b \Delta t}{J_m} = 108.1633;$$

$$b_2 = \frac{J_m - C_m \Delta t}{J_m};$$

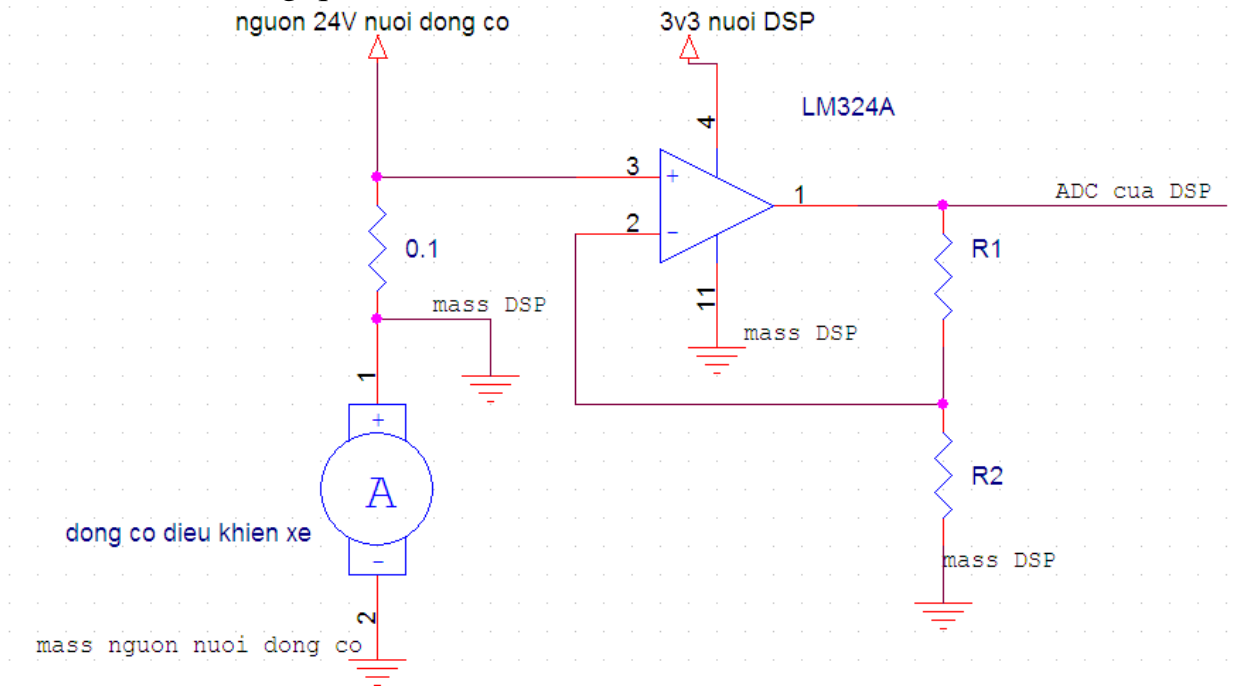
$$b_3 = \frac{-K_f \Delta t}{J_m} = -2.8571$$

thì phương trình phía trên tương đương với:

$$\omega(n+1) = b_1 i(n) + b_2 \omega(n) + b_3 \text{sgn}(\omega(n))$$

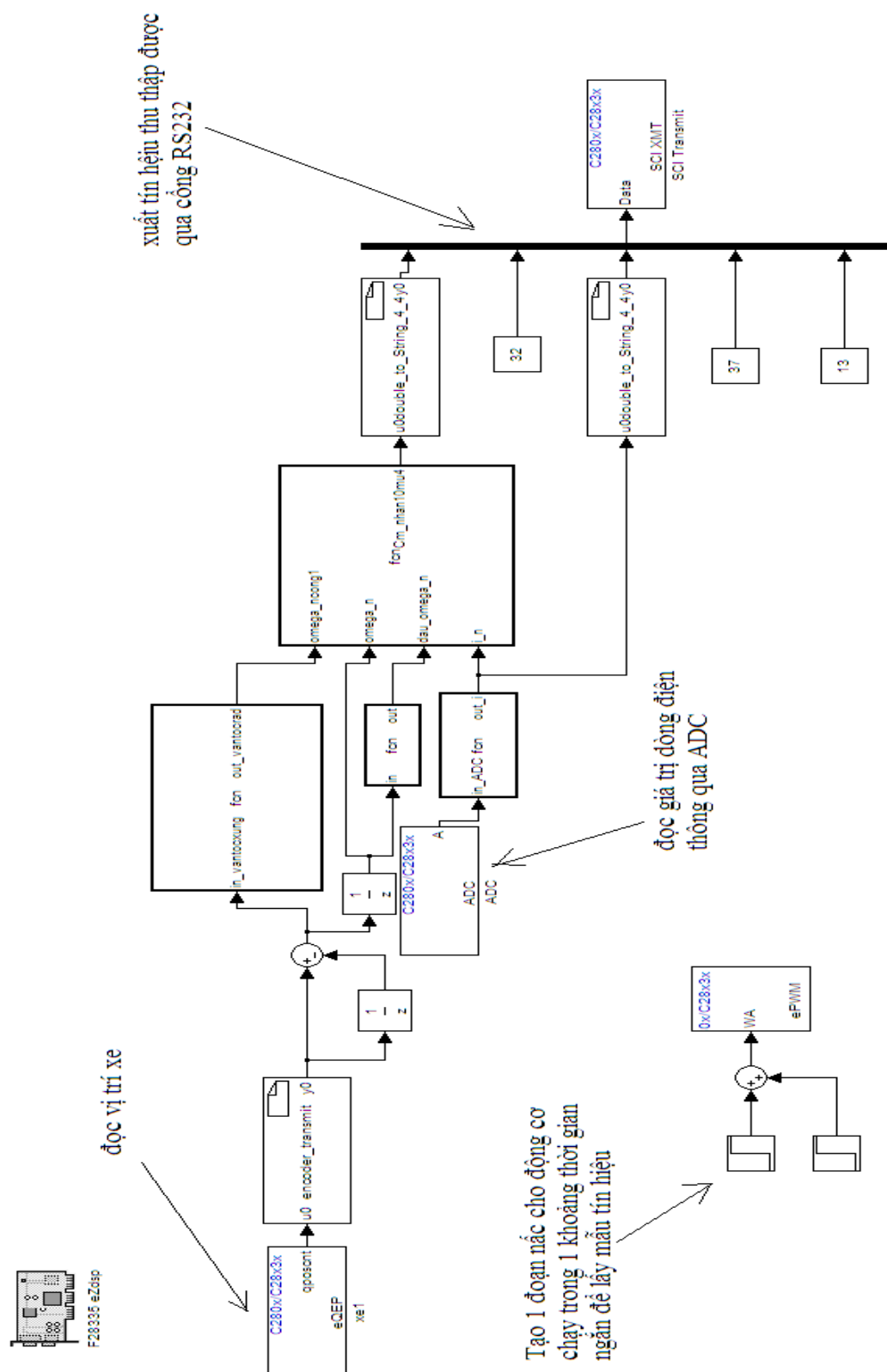
$$\rightarrow \text{ và } \boxed{C_m = \frac{J_m - J_m b_2}{\Delta t}} \quad (4.42)$$

Như vậy, có 2 đại lượng ta cần thu thập là  $\omega$  và  $i$ . Trong đó,  $\omega$  được thu thập bằng cách đo như sau: từ encoder đo vị trí xe, ta sẽ biết được quãng đường xe đi được trong 0.01s. Từ vận tốc dài, ta suy ra vận tốc góc  $\omega$  thông qua việc biết trước bán kính bánh xe. Đồng thời, dòng điện động cơ tiêu thụ được thu được thông qua mạch sau:



**Hình 4.3:** Sơ đồ mạch điện để thu thập giá trị dòng điện đi qua động cơ

Học viên tiếp tục xây dựng chương trình thu thập dữ liệu như sau:



Thông qua các số liệu thu thập được thông qua thực nghiệm, học viên nhận thấy: khi khởi đầu cấp điện áp cho chiếc xe càng lớn thì  $C_m$  ban đầu càng lớn. Nhưng khi xe đã có vận tốc thì  $C_m$  giảm dần. Học viên chọn  $C_m$  lớn nhất có thể có là  $5 \times 10^{-4}$ .

## **CHƯƠNG V: THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN**

### **5.1. Giới thiệu:**

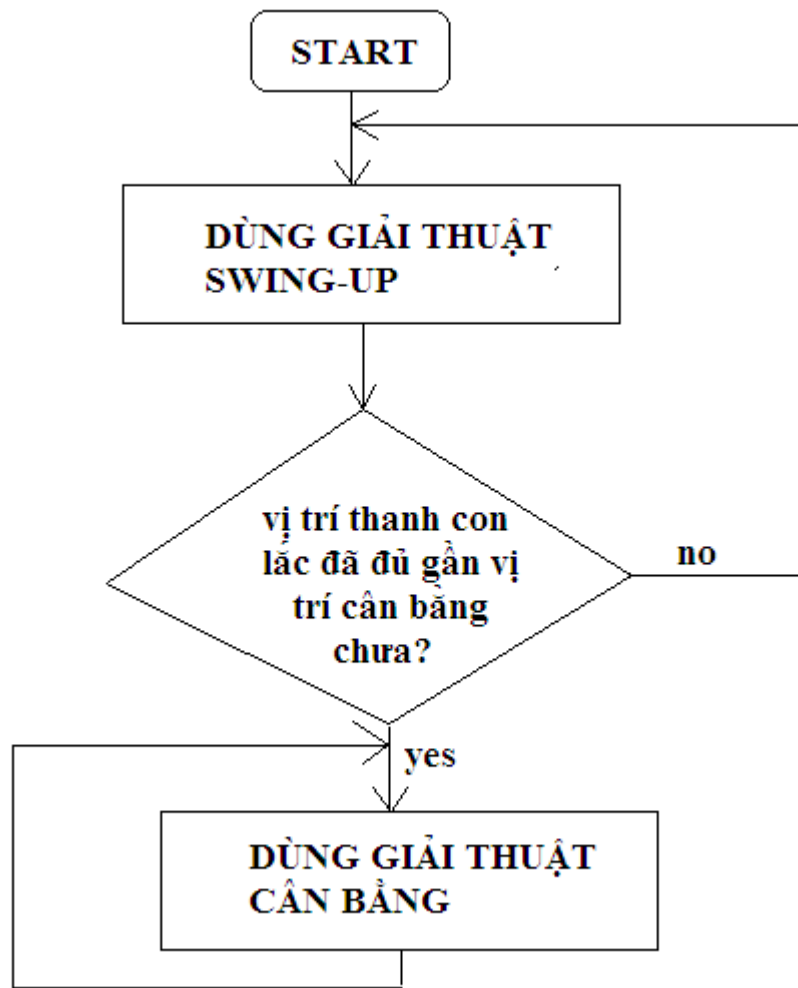
Nội dung chương này tác giả sẽ trình bày lý thuyết của bộ điều khiển cân bằng con lắc.

Ta có thể điều khiển con lắc bằng nhiều giải thuật toán khác như Đặt Cục, Thích nghi, Fuzzy, Neural. Trong phạm vi luận văn này, theo như đăng kí tên đề tài, tác giả sử dụng cách đặt tuyến tính hoá vào-ra để biến đổi hệ phi tuyến. Sau khi có hệ gần tuyến tính ấy, ta có thể dùng các bộ điều khiển khác nhau để điều khiển hệ thống. Ở đây, tác giả dùng giải thuật LQR để điều khiển.

Trước tiên, con lắc sẽ được thuật swing\_up đưa đến lân cận vị trí mong muốn (vị trí cân bằng). Sau đó, thuật điều khiển cân bằng (tuyến tính hoá vào ra và LQR) sẽ giữ cân bằng con lắc tại vị trí mong muốn. Theo như mô phỏng, do được điều khiển phi tuyến chứ không phải điều khiển tuyến tính nên con lắc sẽ vẫn về được vị trí cân bằng dù khá xa so với vị trí cân bằng. Tuy nhiên, do chiều dài thanh ngang là có giới hạn nên để xe di chuyển về được vị trí  $x=0$  mà xe chỉ di chuyển trong khoảng không gian nhỏ (thanh ray ngang bị giới hạn), thuật swing up phải tốt, đưa con lắc về sát vị trí cân bằng trong khi xe không dịch chuyển quá xa vị trí 0.



Bộ điều khiển hoạt động một cách sơ lược như sau:



Hình 5.1: Sơ đồ khối giải thuật điều khiển hệ xe con lắc ngược

## 5.2. Điều khiển cân bằng

### 5.2.1. Tuyến tính hoá vào-ra hệ phi tuyến:

#### 5.2.1.1. Lý thuyết tổng quát:

Xét đối tượng điều khiển:  $H: \begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases}$

$x, f(x), g(x)$  là các vector  $n \times 1$   
 $h(x)$  là 1 hàm vô hướng của vector  $x$

Xác định luật điều khiển  $u = \alpha(x) + \beta(x)v$  và phép biến đổi trạng thái  
 $\xi = T(x)$  sao cho hệ thống mới  $H'$  tuyến tính

$$H' = \begin{cases} \dot{z} = Az + Bv \\ y = Cz \end{cases}$$

**Định nghĩa:** Đạo hàm Lie theo phương  $f(x)$  của hàm vô hướng  $h(x)$  là một vô hướng, kí hiệu  $L_f h(x)$ , được định nghĩa như sau:

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x)$$

Đạo hàm Lie bậc  $n$  được định nghĩa 1 cách đệ quy như sau:

$$L_f^{(n)} h(x) = \frac{\partial (L_f^{(n-1)} h(x))}{\partial x} f(x) \quad \text{với } L_f^0 h(x) = h(x)$$

Ta cũng có:

$$L_f L_g h(x) = \frac{\partial (L_g h(x))}{\partial x} f(x)$$

Theo luật điều khiển hồi tiếp tuyến tính hoá. Ta có:

$$\dot{y} = L_f h(x) + L_g h(x)u$$

$$\text{Nếu } L_g h(x) = 0 \rightarrow \dot{y} = L_f h(x) \rightarrow \ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u$$

$$\text{Nếu } L_g L_f h(x) = 0 \rightarrow \ddot{y} = L_f^2 h(x)$$

$$\rightarrow \ddot{y} = L_f^3 h(x) + L_g L_f^2 h(x)u$$

$$\text{Nếu } L_g L_f^2 h(x) = 0 \rightarrow \ddot{y} = L_f^3 h(x)$$

**Định nghĩa:** hệ thống  $H$  có bậc tương đối là  $p$  nếu và chỉ nếu hai điều kiện sau được thoả mãn:

$$\begin{cases} L_g h(x) = L_g L_f h(x) = L_g L_f^2 h(x) = \dots = L_g L_f^{(p-2)} h(x) = 0 \\ L_g L_f^{(p-1)} h(x) \neq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

Nếu (5.1) thỏa mãn, ta có:

$$y^{(p)} = L_f^{(p)} h(x) + L_g L_f^{(p-1)} h(x) u$$

Luật điều khiển tuyến tính hoá hệ thống được xác định bởi:

$$u = (L_g L_f^{(p-1)} h(x))^{-1} [v - L_f^{(p-1)} h(x)] \quad (5.2)$$

### **Luật điều khiển tuyến tính:**

Định nghĩa tín hiệu sai lệch  $e(t) = r(t) - y(t)$

Đề tín hiệu ra bám tín hiệu đặt  $r(t)$  xác định luật điều khiển  $v(t)$  sao cho phương trình vi phân sau có phương trình đặc trưng Hurwitz:

$$e^{(p)} + a_1 e^{(p-1)} + a_2 e^{(p-2)} + \dots + a_{p-1} e = 0$$

Thay  $e(t) = r(t) - y(t)$  và  $y^{(p)} = v$

$$\rightarrow v = r^{(p)} + a_1 e^{(p-1)} + a_2 e^{(p-2)} + \dots + a_{p-1} e \quad (5.3)$$

Thay (5.3) vào (5.2) ta được luật điều khiển tổng hợp như sau:

$$u = (L_g L_f^{(p-1)} h(x))^{-1} [r^{(p)} + a_1 e^{(p-1)} + a_2 e^{(p-2)} + \dots + a_{p-1} e - L_f^{(p-1)} h(x)]$$

Theo như định nghĩa này thì  $v$  được tìm thấy chính là nhờ phương pháp đặt cực vì việc chọn các hệ số  $a_1, a_2, \dots, a_n$  tương ứng với việc chọn cực sao cho đa thức là Hurwitz. Từ suy nghĩ ấy, học viên có thể mở rộng việc tìm  $v$  thông qua giải thuật khác như LQR. Trong khuôn khổ luận văn này, học viên sử dụng phương pháp LQR sau khi đã tuyến tính hoá hệ thống.

### **5.2.1.2. Ứng dụng cho mô hình xe con lắc ngược:**

Với

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T \quad (5.4)$$

Từ (4.38) và (5.4)  $\rightarrow$  ta có:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{-\alpha_3 \sin x_3 \cos x_3 - k_2 x_2 + \alpha_4 x_4^2 \sin x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} + \frac{k_1 u}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \left[ \frac{\alpha_5}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \cos^2 x_3 + \alpha_6 \right] \sin x_3 + \frac{\alpha_7 x_2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} - \frac{\alpha_8 \cos x_3 u}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{array} \right. \quad (5.5)$$

Thiết kế bộ điều khiển:

Như vậy, phương trình trạng thái hệ xe-lắc có dạng  $\dot{x} = f(x) + g(x)u$

$$\text{Với } f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{-\alpha_3 \sin x_3 \cos x_3 - k_2 x_2 + \alpha_4 x_4^2 \sin x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ x_4 \\ \dot{x} \left[ \frac{\alpha_5}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \cos^2 x_3 + \alpha_6 \right] \sin x_3 + \frac{\alpha_7 x_2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \\ 0 \\ \frac{-\alpha_8 \cos x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ 0 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Với

$$g = 9.81(m/s^2) \quad K_b = K_t = 5.3 \times 10^{-3} \quad d_1 = 40/25 \quad R = 57.2958 \times 10^{-3} \quad R_m = 2.7(\Omega)$$

$$C_m = 5 \times 10^{-4}(N.m.s/rad) \quad L_m = 1.4 \times 10^{-3}(H) \quad C_1 = 0.36(m) \quad K_f = 7.8 \times 10^{-3}(Nm)$$

$$J_m = 0.049 \times 10^{-4}(kg.m^2) \quad M = 2(kg) \quad m = 0.027(kg) \quad J_1 = 1.1664 \times 10^{-3}(kg.m^2)$$

Từ đó suy ra tiếp:

$$\alpha_1 = M + m + k_3 \quad \alpha_2 = \frac{m^2 C_1^2}{h_1} \quad \alpha_3 = \frac{m^2 g C_1^2}{h_1} \quad \alpha_4 = m C_1 \quad \alpha_5 = \frac{m^3 C_1^3 g}{h_1^2} \quad \alpha_6 = \frac{m C_1 g}{h_1}$$

$$\alpha_7 = \frac{m C_1 k_2}{h_1} \quad \alpha_8 = \frac{m C_1 k_1}{h_1}$$

Ta cần điều khiển hệ xe con lắc về vị trí ổn định (  $x = 0$  và  $\theta = 0$  ). Vậy biến ta quan tâm là  $x_1$  và  $x_3$ . Vì hệ xe con lắc ngược là hệ một vào nhiều ra, mặt khác phương pháp tuyến tính hoá lại áp dụng cho hệ có số đầu vào bằng số

đầu ra., vì vậy, ta cần ngõ ra là hàm tổ hợp các biến ngõ ra. Chọn ngõ ra  $y = h(x)$  là 1 hàm chỉ theo  $x_1$  và  $x_3$  tức theo vị trí và góc lệch (theo 1.53) (tức không phụ thuộc  $x_2$  và  $x_4$ ). Do  $x_2$  và  $x_4$  là đạo hàm của  $x_1$  và  $x_3$  nên nếu ta làm  $x_1$  và  $x_3$  và 0 thì  $x_2$  và  $x_4$  cũng dần về 0. Hệ phương trình trạng thái trên sẽ tương đương hệ phương trình trạng thái sau đây:

(Ta có thể phân tích kĩ:

$$\dot{y} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} = \frac{\partial h}{\partial x} (f(x) + g(x)u) = \left[ \frac{\partial h}{\partial x} f(x) \right] + \left[ \frac{\partial h}{\partial x} g(x) \right] u = L_f h(x) + L_g h(x).u \quad (5.8)$$

Tương tự với các biểu thức còn lại)

$$\text{Tiếp tục đặt } \begin{cases} \dot{\xi}_1 = y \\ \dot{\xi}_2 = \dot{y} \\ \dot{\xi}_3 = \ddot{y} \\ \dot{\xi}_4 = \ddot{\ddot{y}} \end{cases}$$

Hệ phương trình trạng thái ban đầu sẽ tiếp tục tương đương với hệ :

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = h(x) = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = L_f h(x) + L_g h(x).u = \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = L_f^2 h(x) + L_f L_g h(x).u = \xi_4 \\ \dot{\xi}_4 = L_f^3 h(x) + L_f^2 L_g h(x).u \end{cases} \quad (5.9)$$

Điều ta mong muốn là:  $L_g h(x) = L_f^2 L_g h(x) = 0$  để đưa hệ về dạng:

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_4 \\ \dot{\xi}_4 = L_f^4 h(x) + L_f^3 L_g h(x).u \end{cases} \quad (5.10)$$

Với

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad v = L_f^4 h(x) + L_f^3 L_g h(x).u; \quad u = \frac{1}{L_g L_f^3 h(x)} [-L_f^4 h(x) + v]$$

Ta nhận thấy:

$$L_g h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} g(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x_1} & \frac{\partial h}{\partial x_2} & \frac{\partial h}{\partial x_3} & \frac{\partial h}{\partial x_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ g_2 \\ 0 \\ g_4 \end{bmatrix} = \frac{\partial h}{\partial x_2} g_2 + \frac{\partial h}{\partial x_4} g_4$$

$$\text{Do } h(x) \text{ độc lập với } x_2, x_4 \rightarrow \boxed{L_g h(x) = 0 \forall h(x)} \quad (5.11)$$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) = \frac{\partial h}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial h}{\partial x_3} x_4$$

$$L_f L_g h(x) = \frac{\partial(L_f h(x))}{\partial x} g(x) = \frac{\partial h}{\partial x_1} \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} + \frac{\partial h}{\partial x_3} \left( \frac{-\alpha_8 \cos x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \right)$$

$$\boxed{L_f L_g h(x) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial h}{\partial x_1} = \frac{\partial h}{\partial x_3} \alpha_8 \cos x_3} \quad (5.12)$$

$$L_f^2 h(x) = \frac{\partial(L_f h(x))}{\partial x} f(x)$$

$$= \frac{\partial^2 h}{\partial x_1^2} x_2^2 + 2 \frac{\partial^2 h}{\partial x_1 \partial x_3} x_2 x_4 + \frac{\partial h}{\partial x_1} f_2 + \frac{\partial^2 h}{\partial x_3^2} x_4^2 + \frac{\partial h}{\partial x_3} f_4$$

$$L_g L_f^2 h(x) = \frac{\partial(L_f^2 h(x))}{\partial x_2} g_2 + \frac{\partial(L_f^2 h(x))}{\partial x_4} g_4$$

$$= \frac{1}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \left[ 2 \frac{\partial^2 h}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x_1 \partial x_2} x_4 - \frac{k_2}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} + \frac{\partial^2 h}{\partial x_1 \partial x_3} x_4 + \frac{\alpha_7}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \right] + \dots$$

$$\dots + \frac{-\alpha_8 \cos x_3}{\alpha_1 - \alpha_2 \cos^2 x_3} \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x_1 \partial x_3} x_2 + \frac{2\alpha_4 x_4 \sin x_3}{\alpha_1 - \alpha_4 \cos^2 x_3} + \frac{\partial^2 h}{\partial x_1 \partial x_3} x_2 + 2 \frac{\partial^2 h}{\partial x_3^2} x_4 \right]$$

$$\text{Ta nhận thấy: } \boxed{L_g L_f^2 h(x) \neq 0 \forall h(x)}$$

Như vậy, công việc của ta là chọn hàm  $h(x)$  sao cho (5.12) thỏa và  $L_g L_f^2 h(x) \approx 0$

Học viên chọn dạng tương tự như sau (theo trang 6, tài liệu tham khảo [7]):

$$h(x) = \text{bienso1} \times x_1 + \text{bienso2} \times \ln \left( \frac{1 + \sin x_3}{\cos x_3} \right) \quad (5.13)$$

Như vậy, cùng với việc chọn được  $y=h(x)$  thỏa sự xấp xỉ trên, ta có thể xem như hệ phương trình của hệ xe con lắc ngược (miêu tả ở (5.5)) là hệ thống bậc 4 và cả 4 biến đều quan sát được vì thỏa:

$$L_g h(x) = L_g L_f h(x) = L_g L_f^2 h(x) = 0$$

$$(\text{ tương đương } L_g h(x) = L_g L_f h(x) = L_g L_f^{p-2} h(x) = 0 \text{ với } p=4)$$

$$\text{và } L_g L_f^3 h(x) \neq 0$$

Vậy, ta được áp dụng luật điều khiển (theo tài liệu tham khảo [2]) :

$$u = (L_g L_f^{(p-1)} h(x))^{-1} [v - L_f^{(p-1)} h(x)] \quad (5.14)$$

### 5.2.2. Thiết kế bộ điều khiển LQR :

Sau đó ta áp dụng luật điều khiển  $u = (L_g L_f^{(p-1)} h(x))^{-1} [v - L_f^{(p-1)} h(x)]$  ở (5.11)

$$\text{với } v = -K_1 \xi_1 - K_2 \xi_2 - K_3 \xi_3 - K_4 \xi_4 \quad (5.15)$$

Trong đó,  $K = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4]$  được xác định bằng phương pháp LQR với

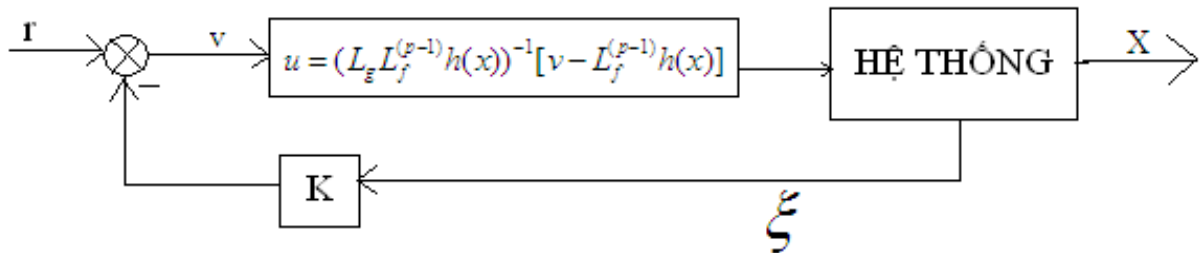
$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ và ma trận } Q, R \text{ là tùy chọn lựa.} \quad (5.16)$$

Một hệ điều khiển được thiết kế ở chế độ làm việc tốt nhất là hệ luôn ở trạng thái tối ưu theo một tiêu chuẩn chất lượng nào đó ( đạt được giá trị cực trị ) . Trạng thái tối ưu có đạt được hay không tùy thuộc vào yêu cầu chất lượng đặt ra , vào sự hiểu biết về đối tượng và các tác động lên đối tượng , vào điều kiện làm việc của hệ điều khiển

Xét hệ thống có tác động ngoài ( $u \neq 0$ ):

$$\dot{\xi} = A\xi + Bv \quad \text{từ (5.10)}$$

Sơ đồ điều khiển cần thiết kế:



Hình 5.1: Sơ đồ bộ điều khiển LQR.

Bước quan trọng trong việc thành lập một hệ tối ưu là xác định chỉ tiêu chất lượng  $J$  . Nhiệm vụ cơ bản ở đây là bảo đảm cực trị của chỉ tiêu chất lượng  $J$  . Ví dụ như khi xây dựng hệ tối ưu tác động nhanh thì yêu cầu đối với hệ là nhanh chóng chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác với thời gian quá độ nhỏ nhất , nghĩa là cực tiểu hóa thời gian quá độ

Chỉ tiêu chất lượng  $J$  phụ thuộc vào tín hiệu ra  $x(t)$  , tín hiệu điều khiển  $u(t)$  và thời gian  $t$  . Bài toán điều khiển tối ưu là xác định tín hiệu điều khiển  $u(t)$  làm cho chỉ tiêu chất lượng  $J$  đạt cực trị với những điều kiện hạn chế nhất định của  $u$  và  $x$  .

Chỉ tiêu chất lượng  $J$  thường có dạng sau :

$$J = \int_0^T L[\xi(t), v(t), t] dt \quad (5.17)$$

Trong đó  $L$  là một phiếm hàm đối với tín hiệu  $x$ , tín hiệu điều khiển  $u$  và thời gian  $t$ . Trong luận văn này, tác giả chọn hàm chỉ tiêu chất lượng

$$J = \int_0^\infty (\xi^T Q \xi + v^T R v) dt \quad (5.18)$$

Trong đó  $Q$  là ma trận xác định dương ( hoặc bán xác định dương ),  $R$  là ma trận xác định dương. Trong đó,  $Q, R$  là các ma trận trọng lượng tương ứng với biến trạng thái và tín hiệu ngõ vào. Nếu muốn thành phần nào được ưu tiên đạt tối ưu khi điều khiển, ta chọn ma trận trọng lượng tương ứng thành phần đó có giá trị lớn.

Chúng ta cần tìm ma trận  $K$  của vector điều khiển tối ưu :

$$v(t) = -K\xi(t) \quad (5.19)$$

thỏa mãn chỉ tiêu chất lượng  $J$  đạt giá trị cực tiểu.

Ma trận hồi tiếp trạng thái tương ứng  $K$  được tính thông qua Matlab khi ta đã biết ma trận tuyến tính  $A, B$  của hệ thống cũng như đã chọn được  $R$  và  $Q$  tương ứng.

### **5.2.3. Điều khiển LQR rời rạc**

Tuy rằng hệ thống xe con lắc ngược là hệ phi tuyến liên tục, ta vẫn phải rời rạc hoá hệ trên để áp dụng cho hệ thống nhúng. Trước tiên, ta xấp xỉ:

$$\dot{x} = \frac{x(k) - x(k-1)}{\Delta t}; \quad \dot{\theta} = \frac{\theta(k) - \theta(k-1)}{\Delta t} \text{ để đưa hệ liên tục về hệ rời rạc xấp xỉ.}$$

Sau đó, học viên thiết kế bộ điều khiển rời rạc để điều khiển hệ thống.

Xét hệ rời rạc :

$$\xi_{k+1} = A_k \xi_k + B_k v_k \quad \text{với } \xi_k \in R^n \text{ và } v_k \in R^m. \quad (5.20)$$

Nếu hệ ban đầu là hệ liên tục thì công việc của ta là rời rạc hoá hệ liên tục đó để có thể sử dụng phương pháp điều khiển LQR rời rạc.

Từ (5.16), ta có ma trận tuyến tính liên tục xác định như sau:



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ và } B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ta tiến hành rời rạc hoá A, B với chu kỳ lấy mẫu là 0.01s, được  $A_d$ ;  $B_d$ .

Khi đó, luật điều khiển tối ưu của tín hiệu điều khiển có dạng :

$$v_k = -K_k \xi_k \quad (5.21)$$

Với  $K_k$  được tính bằng Matlab khi đã có  $A_d$ ;  $B_d$  cũng như các ma trận Q, R được chọn lựa phù hợp.

#### 5.2.4. Tính điều khiển được:

Từ (5.10), ta có hệ phương trình xe con lắc ngược có phương trình như sau::

$$\begin{cases} \dot{\xi}_1 = \xi_2 \\ \dot{\xi}_2 = \xi_3 \\ \dot{\xi}_3 = \xi_4 \\ \dot{\xi}_4 = L_f^4 h(x) + L_f^3 L_g h(x).u \end{cases}$$

Với

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; v = L_f^4 h(x) + L_f^3 L_g h(x).u; u = \frac{1}{L_g L_f^3 h(x)} [-L_f^4 h(x) + v]$$

Và từ (5.12), ta có được  $v = -K_1 \xi_1 - K_2 \xi_2 - K_3 \xi_3 - K_4 \xi_4$

Và K được tính theo LQR rời rạc.

Hệ thống của ta sau khi rời rạc hoá với thời gian lấy mẫu là 0.01s thì ta có:

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0.01 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 1 & 0.01 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 1 & 0.01 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.0001 \\ 0.01 \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Bây giờ ta xét tính điều khiển được của hệ thống:

Một hệ thống rời rạc bậc n được xem là điều khiển được khi và chỉ khi ma trận  $S_{ct} = [A_d, A_d B_d, A_d^2 B_d, \dots, A_d^{n-1} B_d]$  có rank là n. (5.23)

Đối với hệ thống xe con lắc ngược sau khi ta đã tuyến tính hoá thì :

$$S_{ct} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0001 & 0.0002 & 0.0003 & 0.0004 \\ 0.01 & 0.01 & 0.01 & 0.01 \end{bmatrix}; \text{rank}(S_{ct}) = 2. \quad (5.24)$$

Do đó, theo (5.23) thì hệ không điều khiển được..

Hệ vẫn có thể được điều khiển về vị trí cân bằng nếu thỏa yêu cầu là: các biến không điều khiển được sẽ ổn định về vị trí 0.

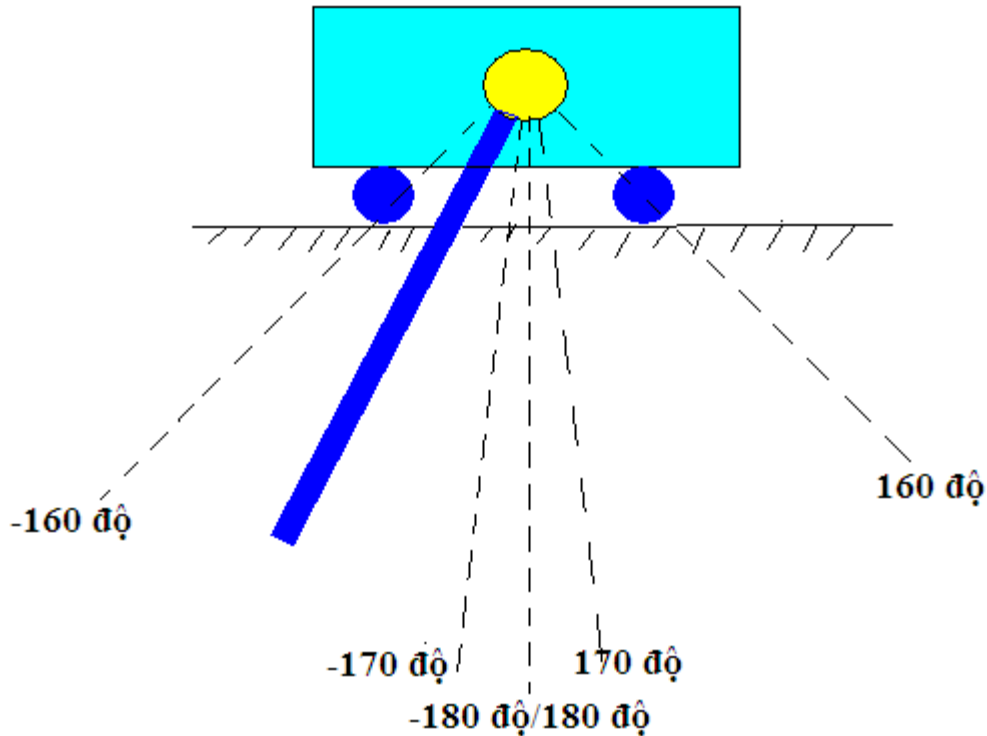
$$\text{Từ (5.10)} \rightarrow \xi_4 = v = -K_1\xi_1 - K_2\xi_2 - K_3\xi_3 - K_4\xi_4 \rightarrow \ddot{\xi}_1 = -K_1\xi_1 - K_2\xi_2 - K_3\xi_3 - K_4\xi_4$$

$$\rightarrow s^4\xi_1 = -K_1\xi_1 - K_2.s\xi_1 - K_3.s^2\xi_1 - K_4.s^3\xi_1$$

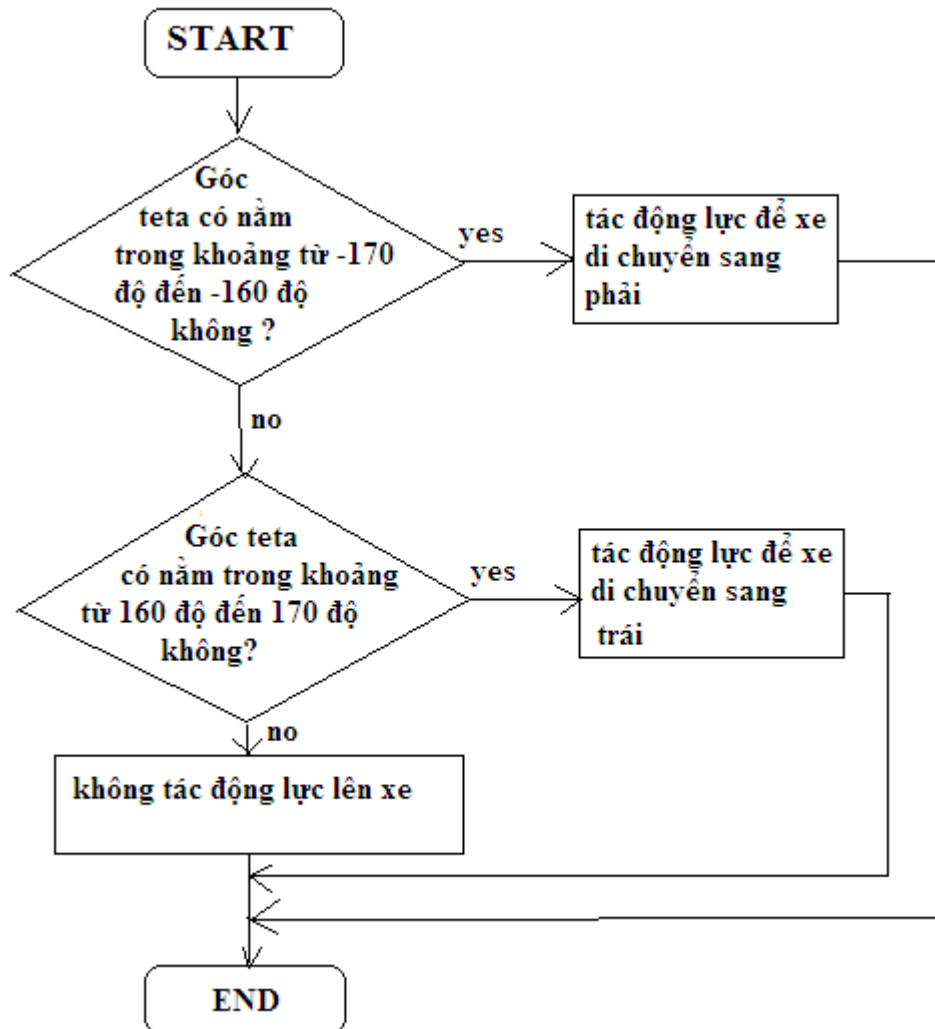
$$\rightarrow s^4 + K_4s^3 + K_3s^2 + K_2s + K_1 = 0 \quad (5.25)$$

Vậy, nếu ta chọn ma trận K sao cho (5.16) Hurwitz thì biến  $\xi_1$  sẽ ổn định và dần về 0. Khi đó,  $\xi_2 = \dot{\xi}_1$ ,  $\xi_3 = \ddot{\xi}_1$ ,  $\xi_4 = \dddot{\xi}_1$  cũng sẽ ổn định và tiến về 0.

### 5.3. Điều khiển Swing-up:



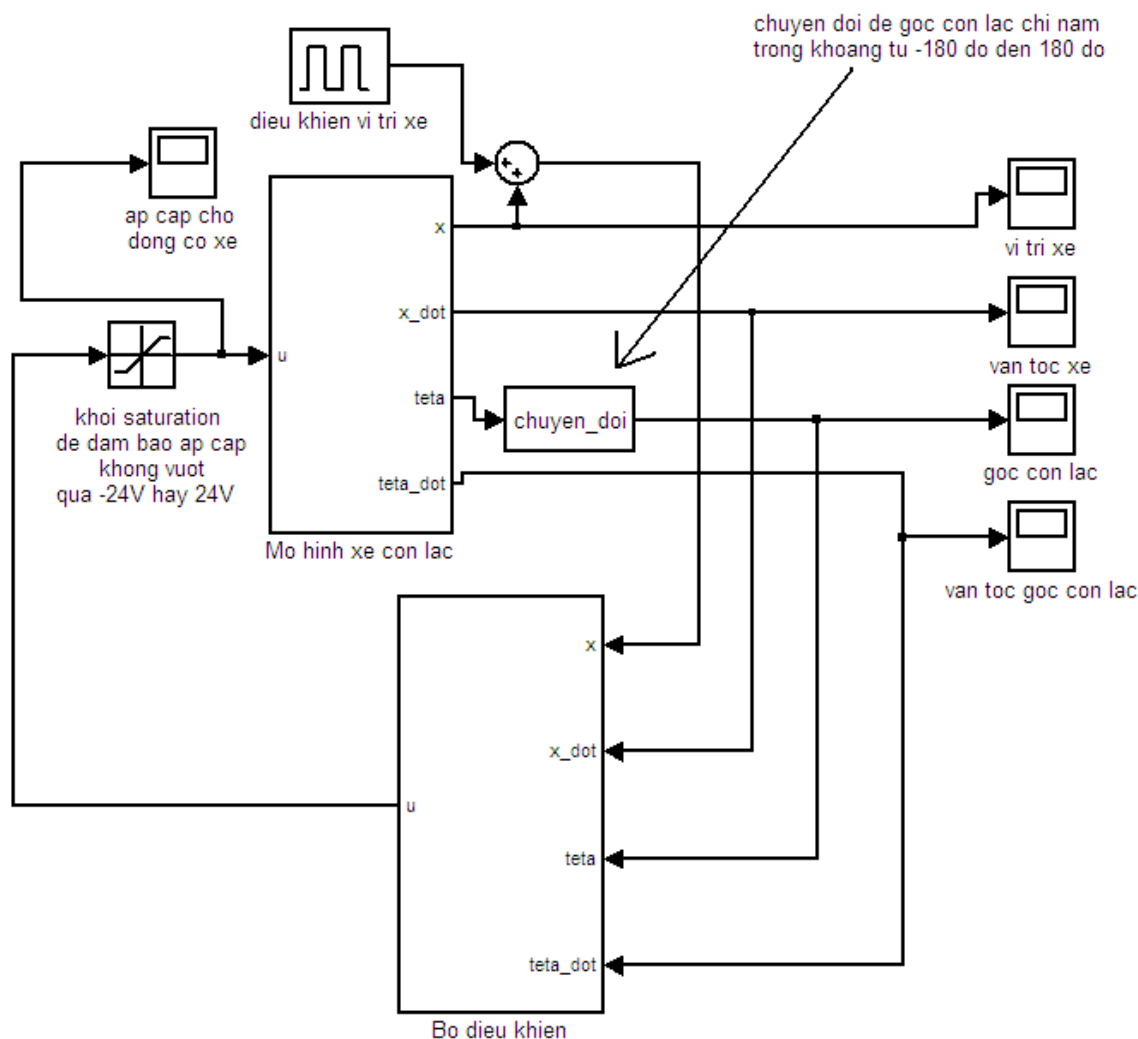
Hình 5.2: Khoảng chia vùng điều khiển Swing- up



Hình 5.3: Sơ đồ khối giải thuật điều khiển Swing-up

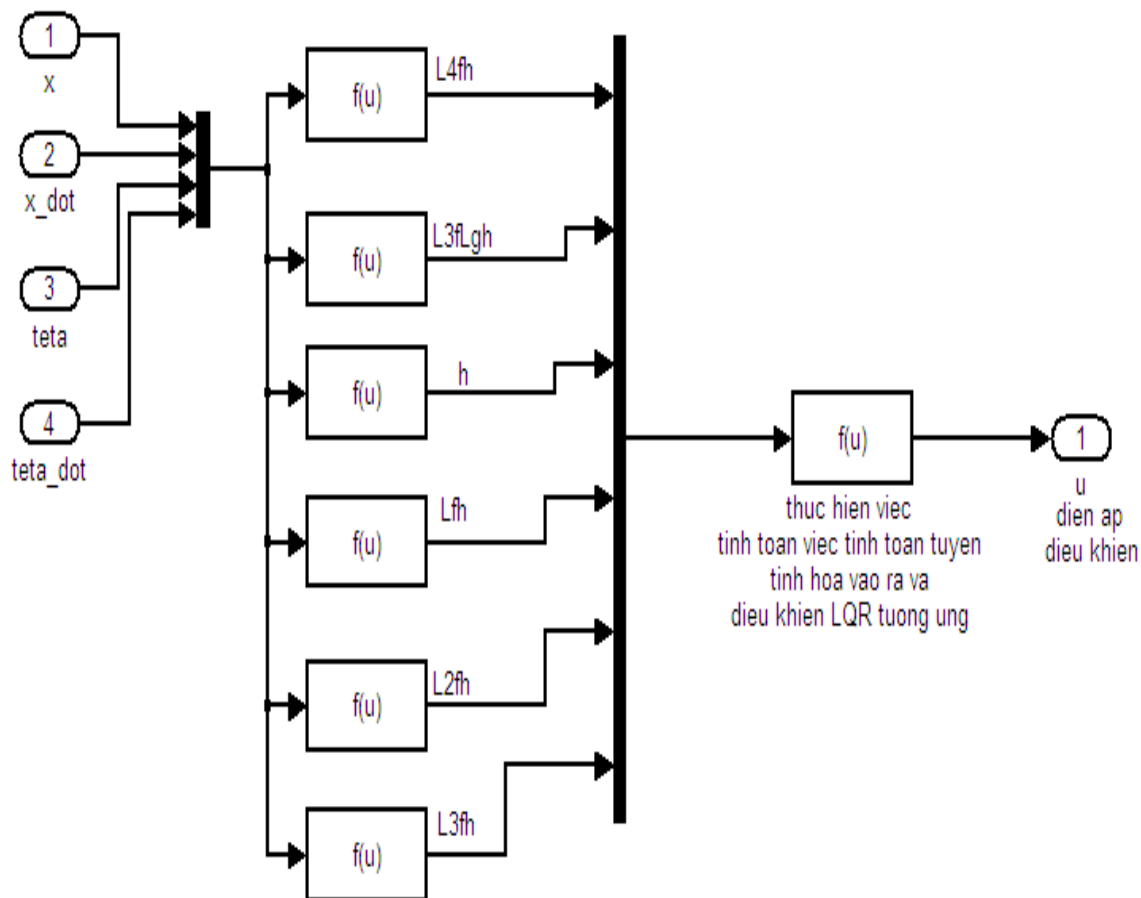
## **CHƯƠNG VI:** **MÔ PHỎNG HOẠT ĐỘNG BỘ ĐIỀU KHIỂN**

### **6.1. Mô phỏng bộ điều khiển trên Simulink:**



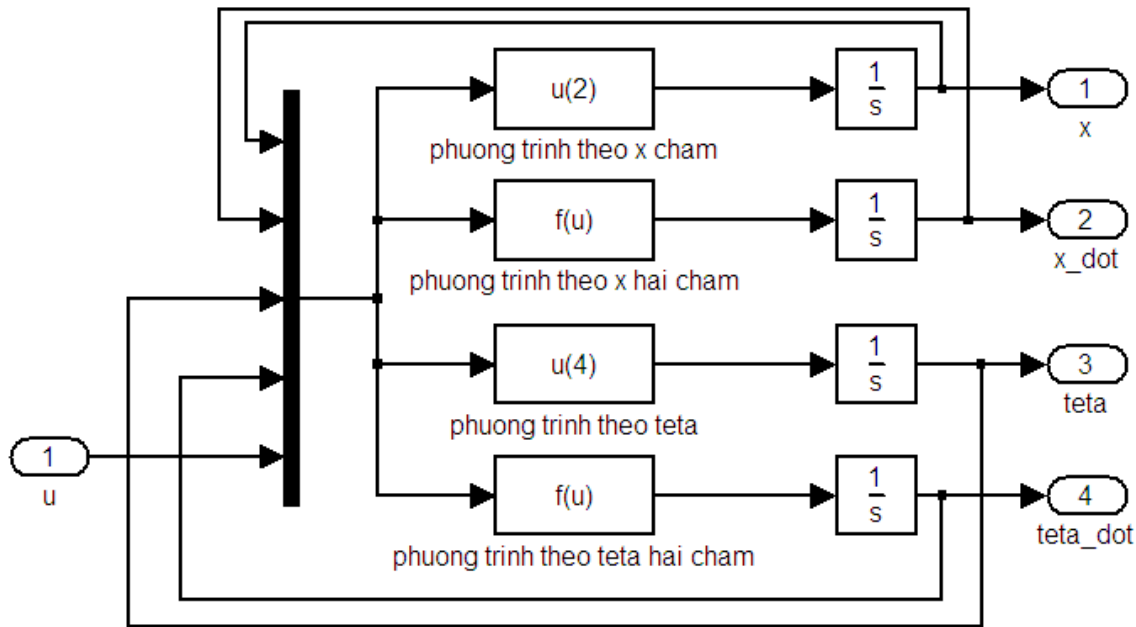
**Hình 6.1:** Mô hình Simulink mô phỏng hệ thống xe con lắc ngược

Bên trong khối “**Bo điều khiển**” có các khối như sau:



Hình 6.2: Sơ đồ khối Simulink giải thuật điều khiển tạo ra tín hiệu điều khiển từ phương pháp tuyến tính hoá

Bên trong khối “**Mô hình xe con lắc**” là phương trình trạng thái mô phỏng hệ con lắc.



Hình 6.3: sơ đồ khối Simulink mô tả hệ thống xe con lắc ngược

## 6.2. Điều khiển xe về vị trí 0:

**6.2.1. Khi thay đổi thông số tuyến tính hoá vào ra:** (thay đổi bienso1, bienso2)

Theo như ở (5.13) ở chương V, ta có:

$$h(x) = bienso1.x_1 + bienso2.\ln\left(\frac{1 + \sin x_3}{\cos x_3}\right)$$

Ta gọi các thành phần bienso1, bienso2 lần lượt là các thông số khi tuyến tính hoá, các thành phần ma trận Q, R là các thông số điều khiển.

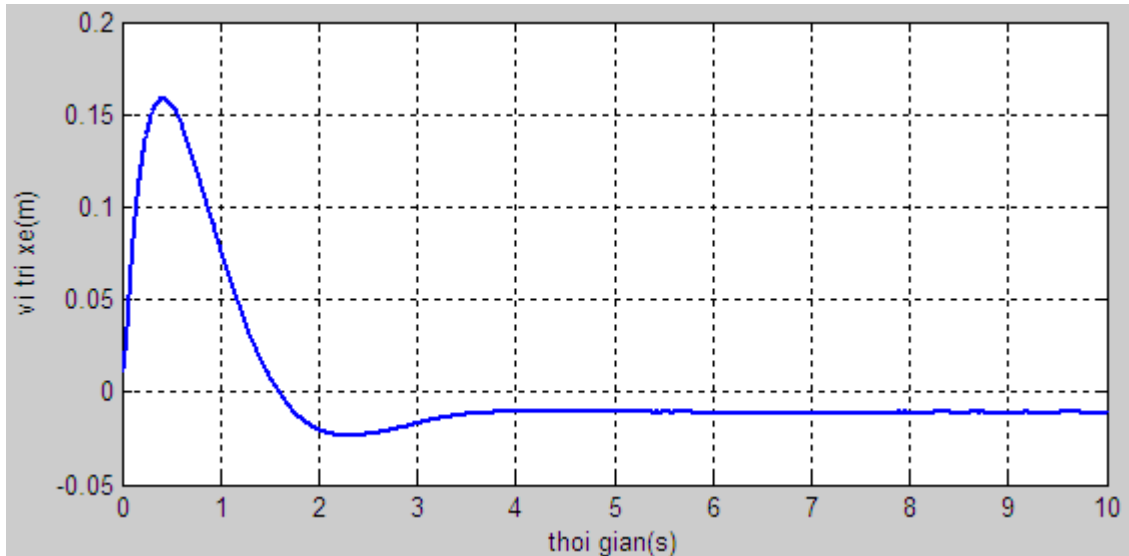
Sau khi tuyến tính hoá, nhiệm vụ điều khiển của ta là làm sao cho  $h(x)$  tiến về 0. Do đó, để thành phần nào ( góc teta (  $x_3$  ) hay vị trí xe (  $x_1$  ) ) được gần vị trí cân bằng nhanh nhất thì ta tăng thông số tuyến tính hoá ứng với thành phần đó. Tuy nhiên ở đây phải có sự thoả hiệp vì nếu tăng tất cả các thành phần bienso1, bienso2 cùng lúc thì việc tăng không còn ý nghĩa nữa.

Do độ lớn của các thông số tuyến tính hoá là tương đối với nhau. Do đó, học viên sẽ giữ nguyên 1 thông số ( bien so 2), giữ nguyên thông số điều khiển (

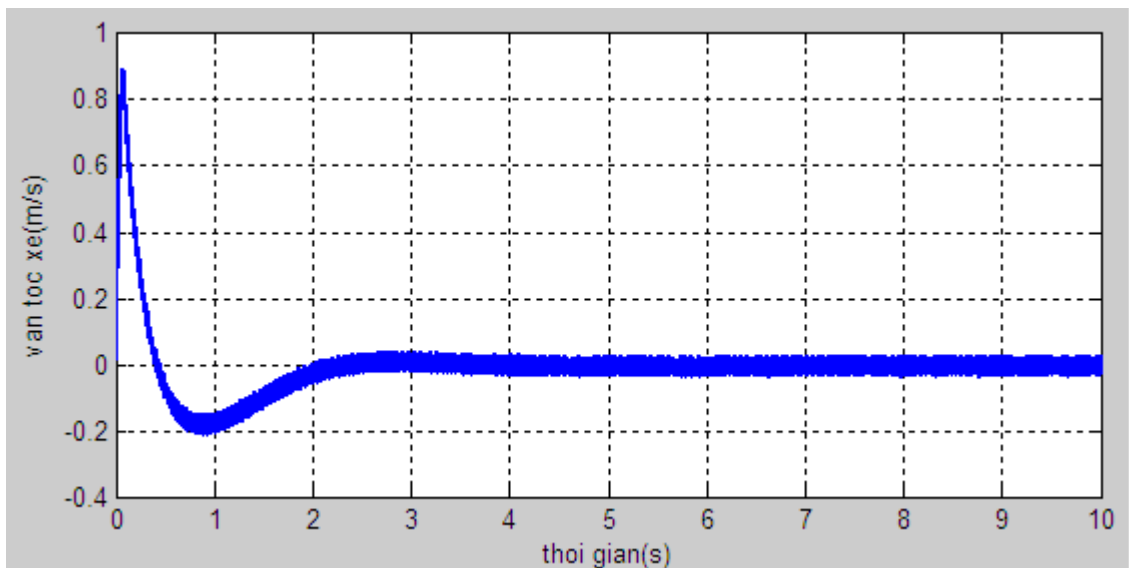
$$Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}; R=0.1) \text{ và thay đổi thông số còn lại ( bienso1 ) để}$$

kiểm tra.

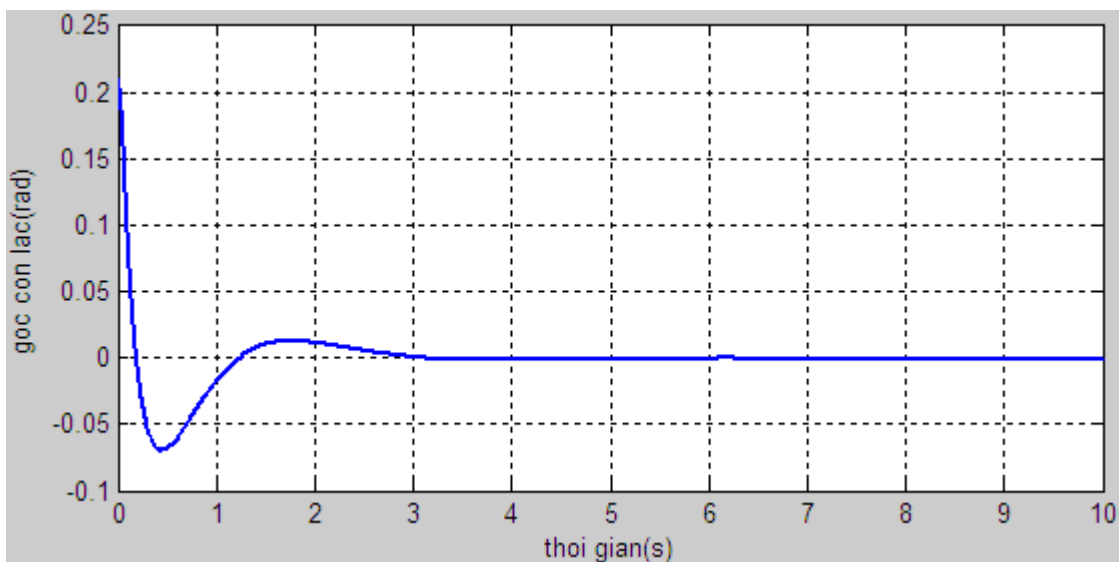
**6.2.1.1. Khi bienso1= 2, bienso2=1:** (giữ nguyên ma trận Q, R và bienso2 ứng với thông số chuẩn, tiến hành giảm bienso1)



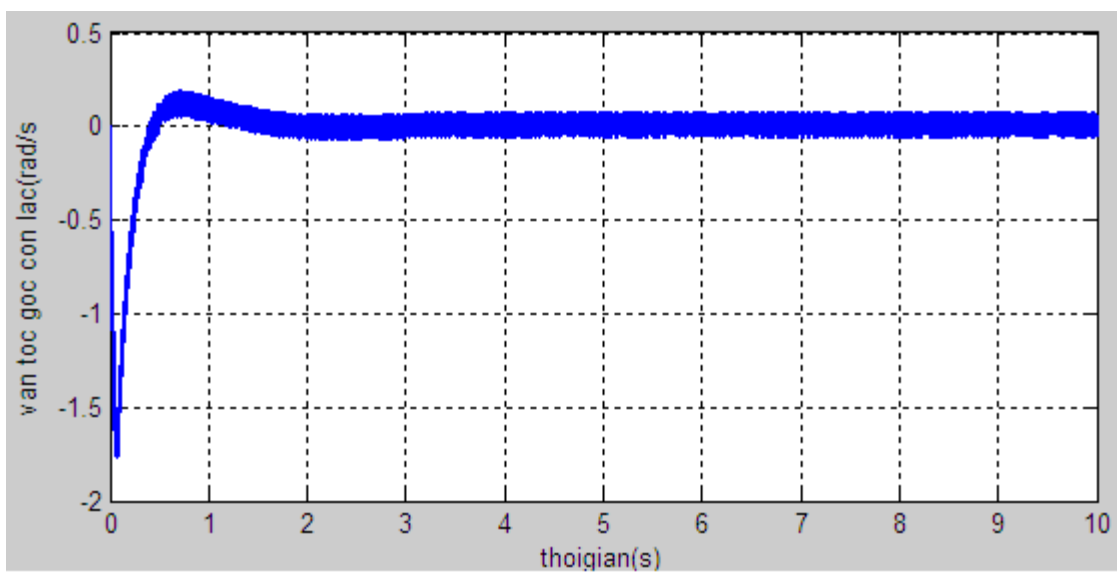
**Hình 6.4:** Vị trí xe trong 10s khi bienso1=2(giảm)



**Hình 6.5:** Vận tốc xe trong 10s khi bienso1=2(giảm)

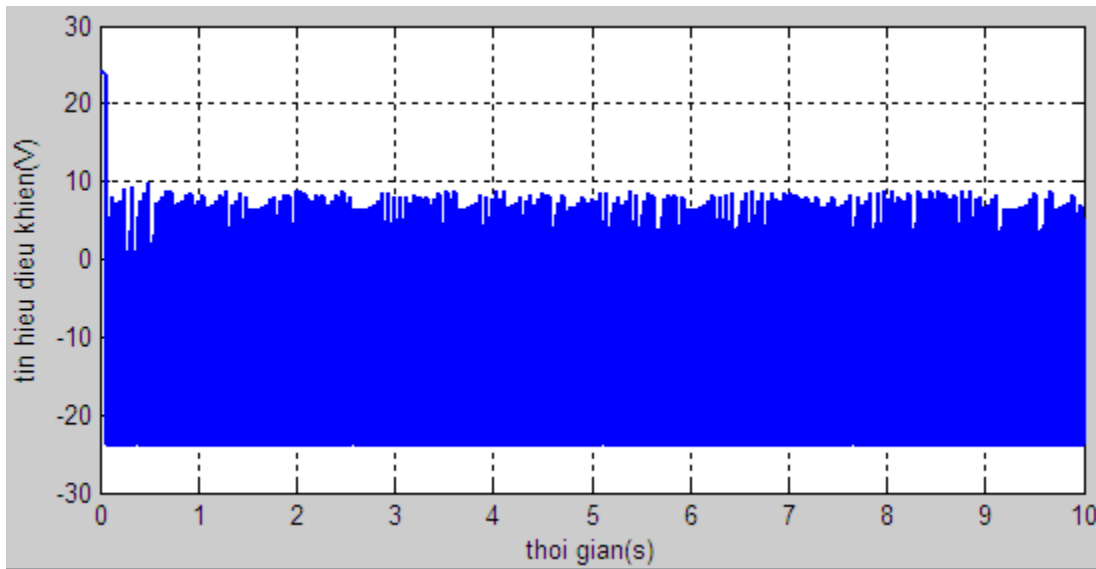


Hình 6.6: Góc con lắc trong 10s khi bienso1=2(giảm)



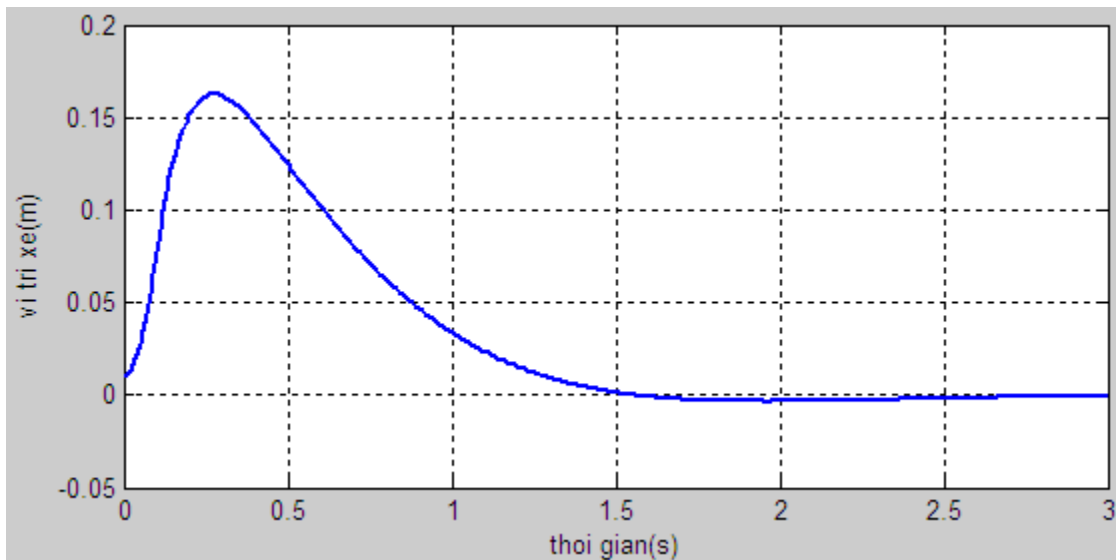
Hình 6.7: Vận tốc góc con lắc trong 10s khi bienso1=2(giảm)



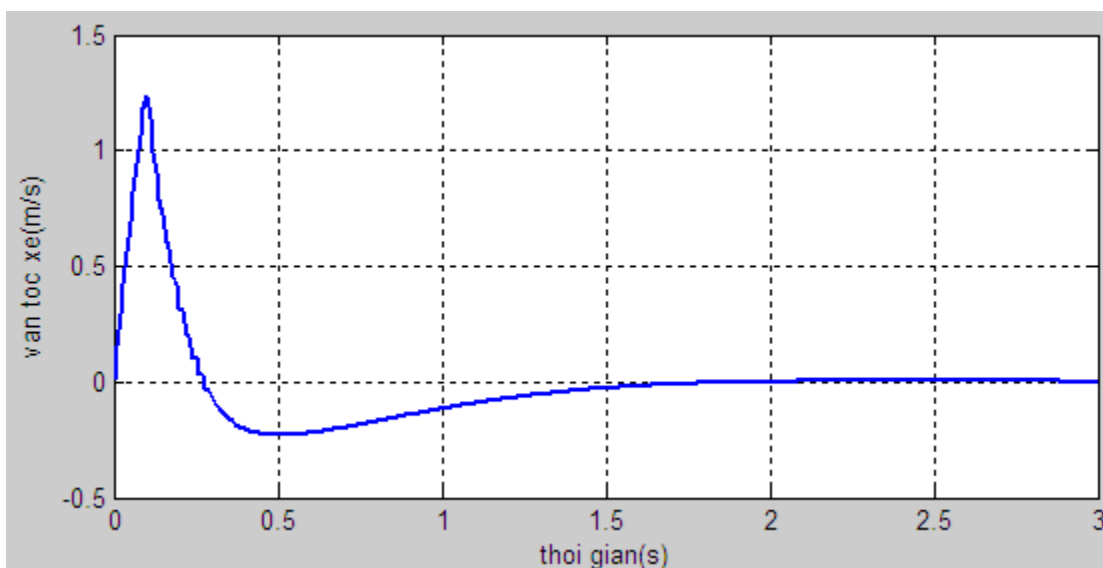


Hình 6.8: Điện áp điều khiển trong 10 s khi bienso1=2(giảm)

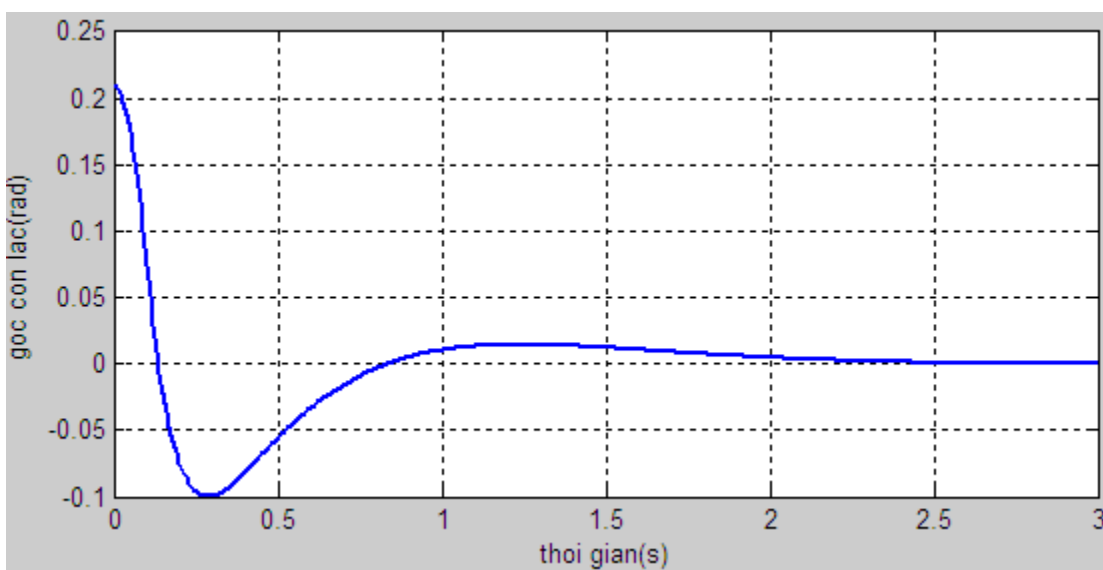
**6.2.1.2. Khi bienso1=3; bienso2=1:** (thông số chuẩn)



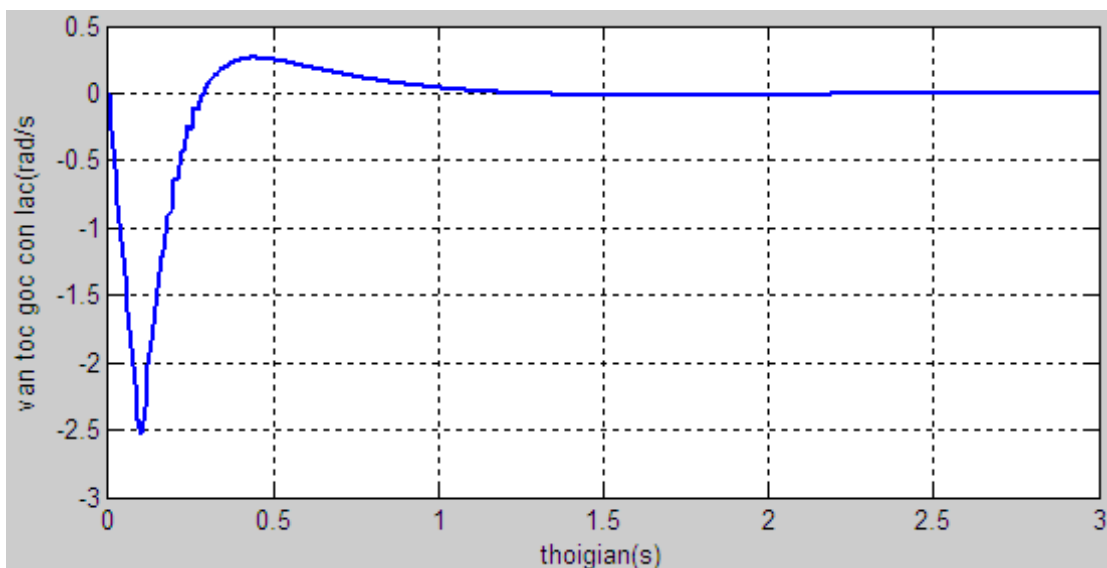
Hình 6.9: Vị trí xe trong 3 s khi bienso1=3(chuẩn)



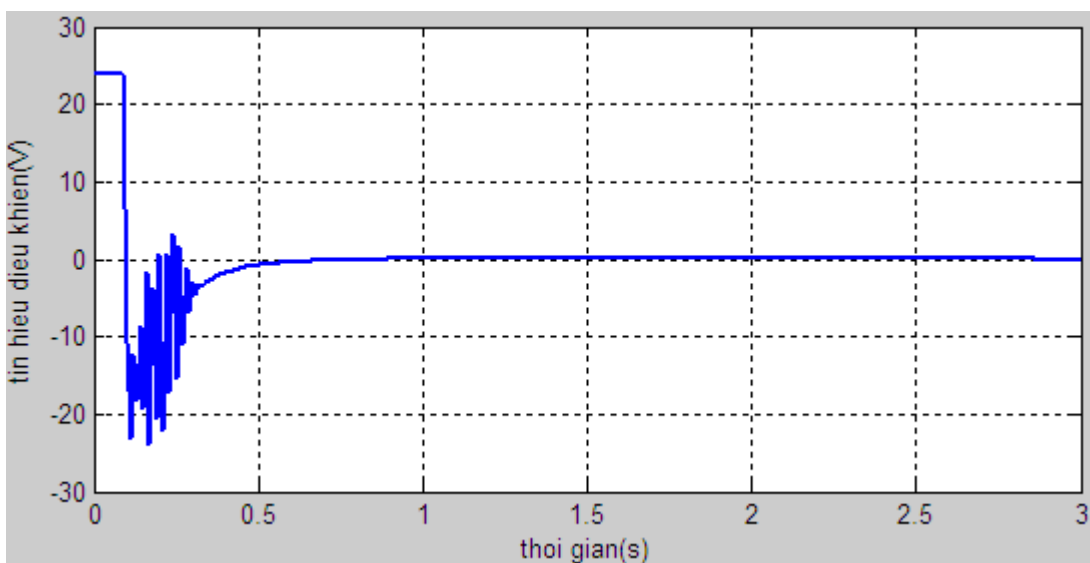
Hình 6.10: Vận tốc xe trong 3 s với  $\text{bienso1}=3(\text{chuẩn})$



Hình 6.11: Góc con lắc trong 3s với  $\text{bienso1}=3(\text{chuẩn})$

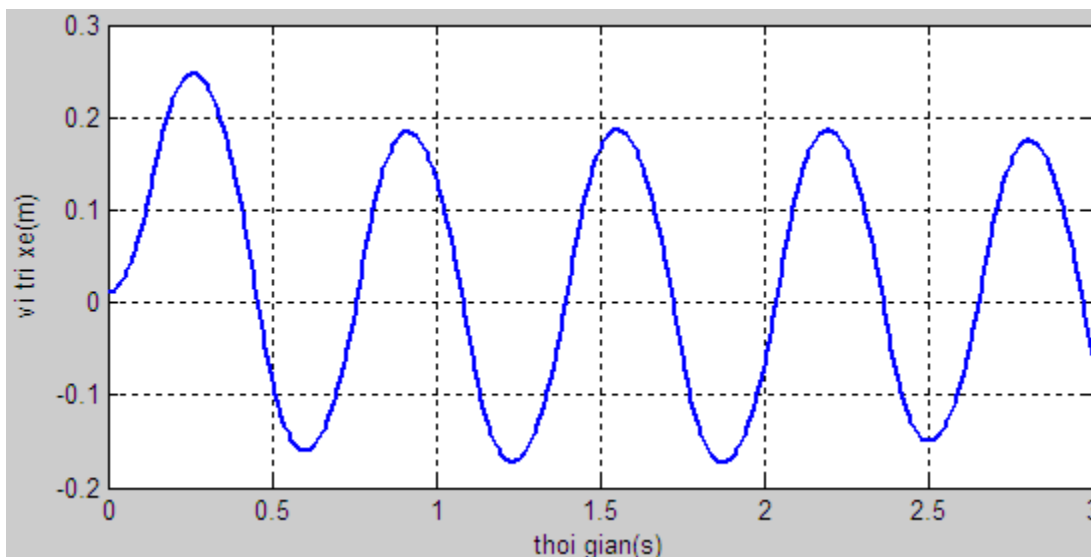


Hình 6.12: Vận tốc góc con lắc trong 3 s khi bienso1=3(chuẩn)

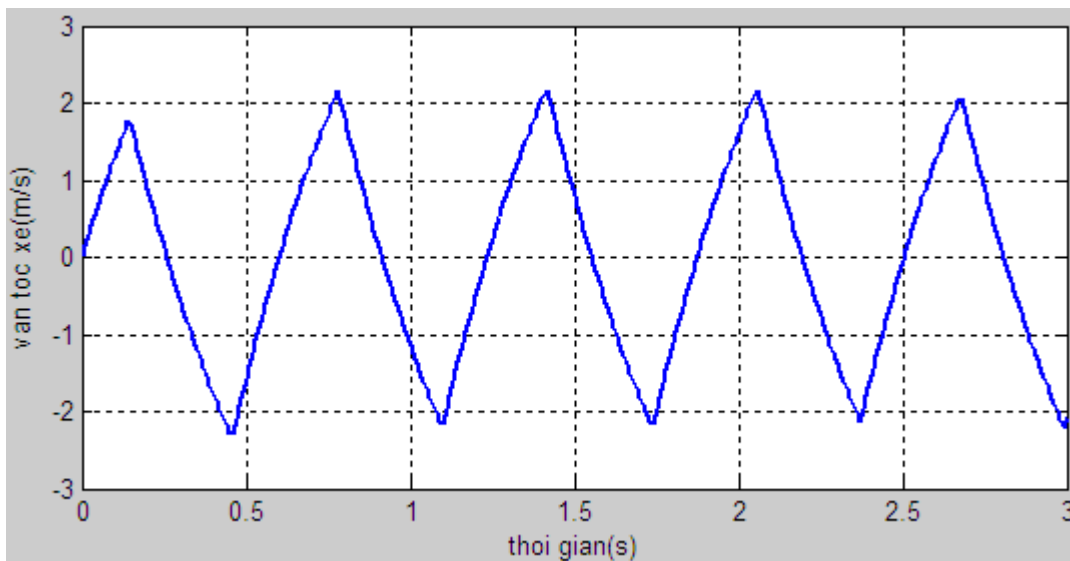


Hình 6.13: điện áp điều khiển trong 3 s khi bienso1=3(chuẩn)

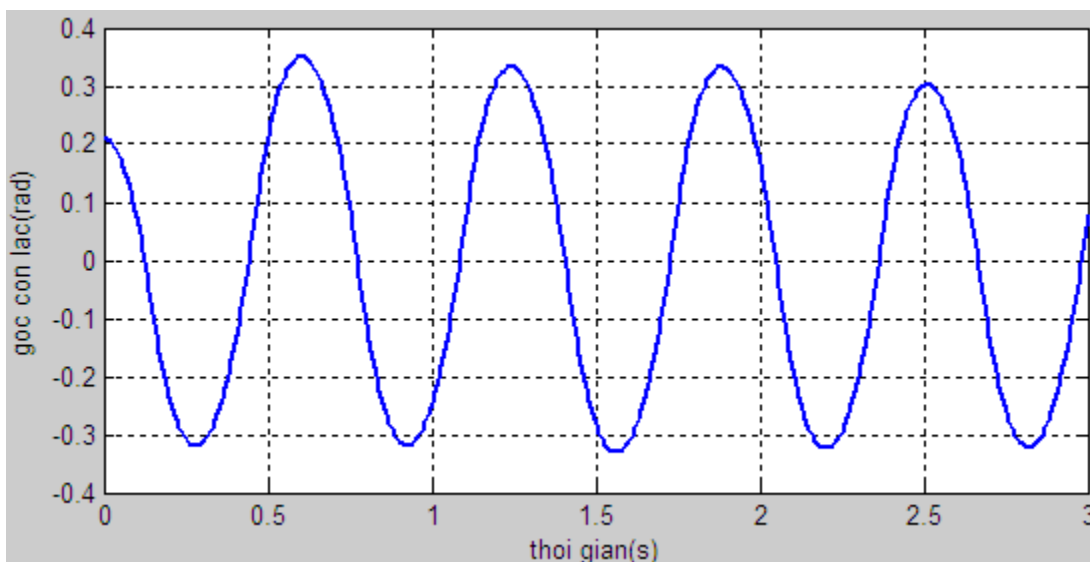
**6.2.1.3. Khi bienso1=5; bienso2=1:** (tăng bienso1 so với thông số chuẩn)



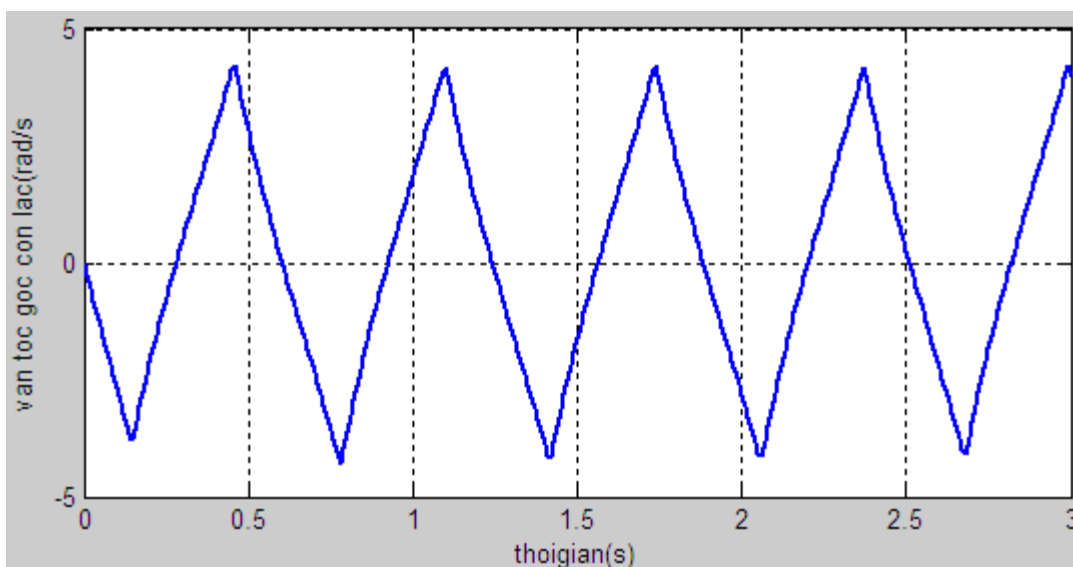
**Hình 6.14:** Vị trí xe trong 3 s khi bienso1=5(tăng)



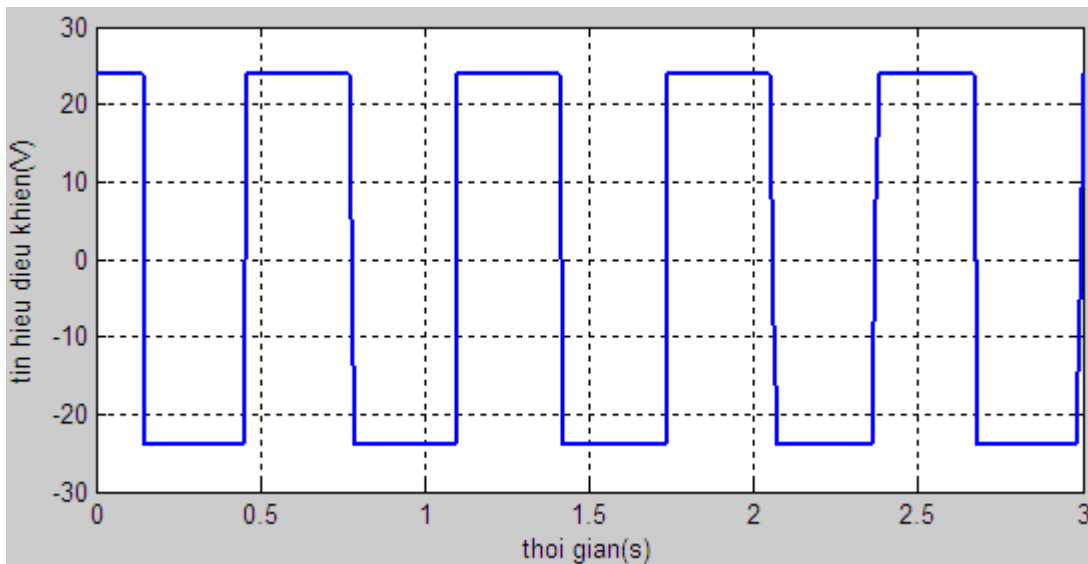
**Hình 6.15:** Vận tốc xe trong 3s khi bienso1=5(tăng)



Hình 6.16: Góc con lắc trong 3s khi bienso1=5(tăng)



Hình 6.17: Vận tốc góc con lắc trong 3s khi bienso1=5(tăng)



Hình 6.18: Điện áp điều khiển trong 3s khi bienso1=5(tăng)

#### 6.2.1.4. Nhận xét:

Nếu xem như việc chọn bienso1=3 là chuẩn, qua các đáp ứng mô phỏng như ở trên, học viên có nhận xét như sau:

Khi chọn bienso1, bienso2 không tốt ( nếu xem như bienso2 là giữ nguyên giá trị tương đối so với bienso1) thì việc tăng bienso1 so với giá trị chuẩn sẽ làm hệ thống không còn giữ được sự ổn định tại vị trí điểm làm việc mong muốn, các biến ngõ ra sẽ dao động quanh vị trí cân bằng. Nếu bienso1 tăng quá 1 giá trị nào đó thì hệ thống sẽ không ổn định nữa. Điều này tương ứng với khi ta chọn Q,R phù hợp ( tức chọn K phù hợp) thì việc tăng bienso1 sẽ làm cho hệ thống sau khi tuyến tính hoá không còn có nghiệm Hurwitz thoả mãn với K đó nữa. Đồng thời việc tăng bienso1 giúp làm giảm sai số xác lập của xe so với vị trí cân bằng. Tuy nhiên việc tăng bienso1 quá mức sẽ làm xe dao động mạnh quanh vị trí cân bằng.

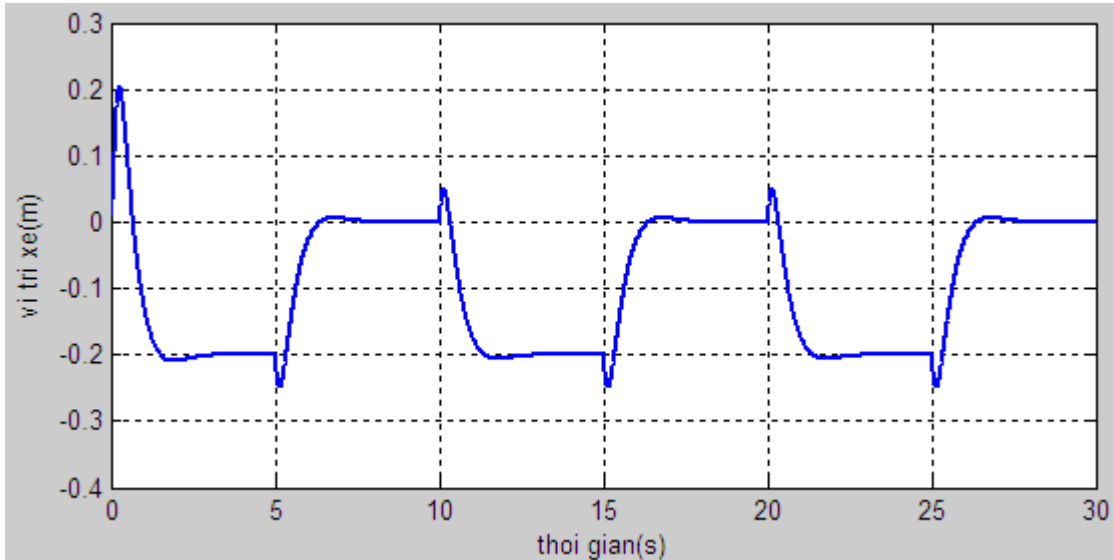
Nếu giảm bienso1 tương đối so với bienso2 thì vị trí xe và con lắc đều quy về trạng thái ổn định nhưng giá trị xác lập của vị trí xe không phải ở điểm 0. Mặt khác, dựa vào đồ thị vận tốc góc con lắc, vị trí lắc và u điều khiển, ta thấy hệ dao động liên tục nên thực tế chưa đạt được trạng thái cân bằng cần thiết.

#### 6.2.2. Khi thay đổi thông số điều khiển:

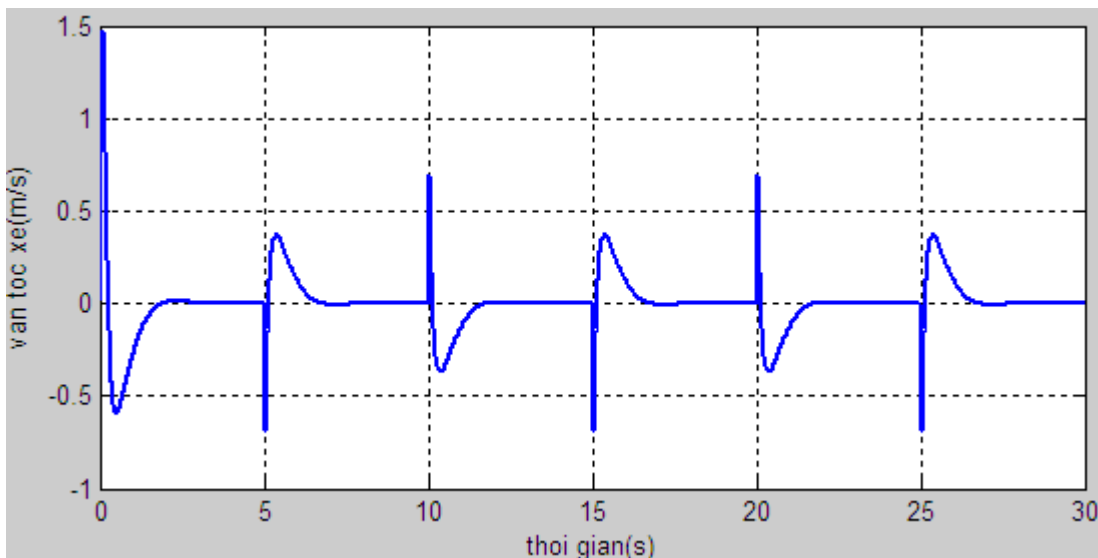
Để nhận thấy rõ sự thay đổi của ngõ ra khi thay đổi các thông số điều khiển là Q,R thì ta xét khi xe thay đổi vị trí theo hàm xung vuông ( vì phần lớn Q,

R được chọn thì hệ thống đều cân bằng. Để kiểm tra thêm thời gian xác lập, ... thì ta nên xét khi xe thay đổi vị trí đặt)

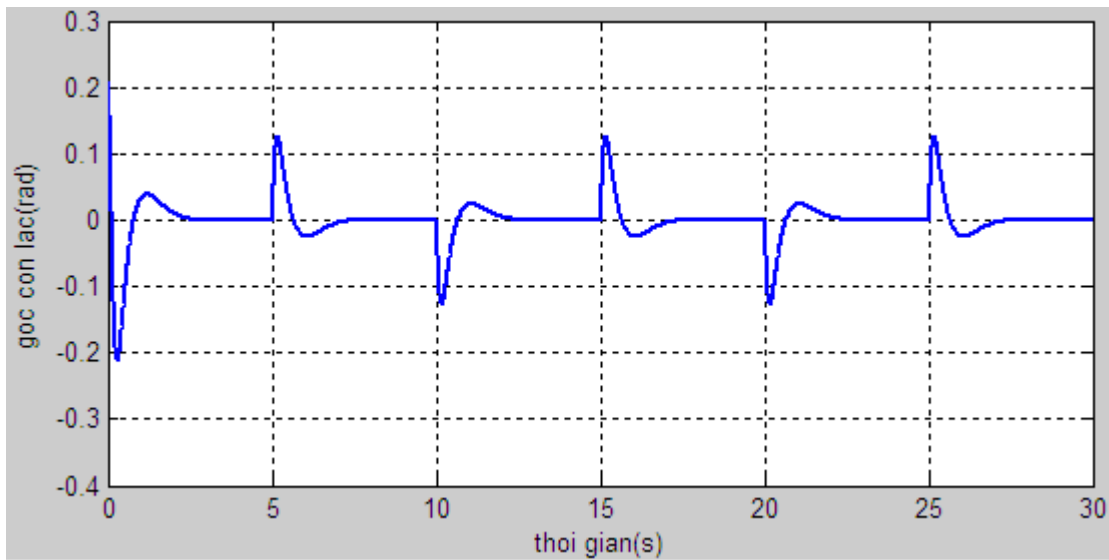
**6.2.2.1. Khi  $R=0.1$  và  $Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$**  (thông số chuẩn)



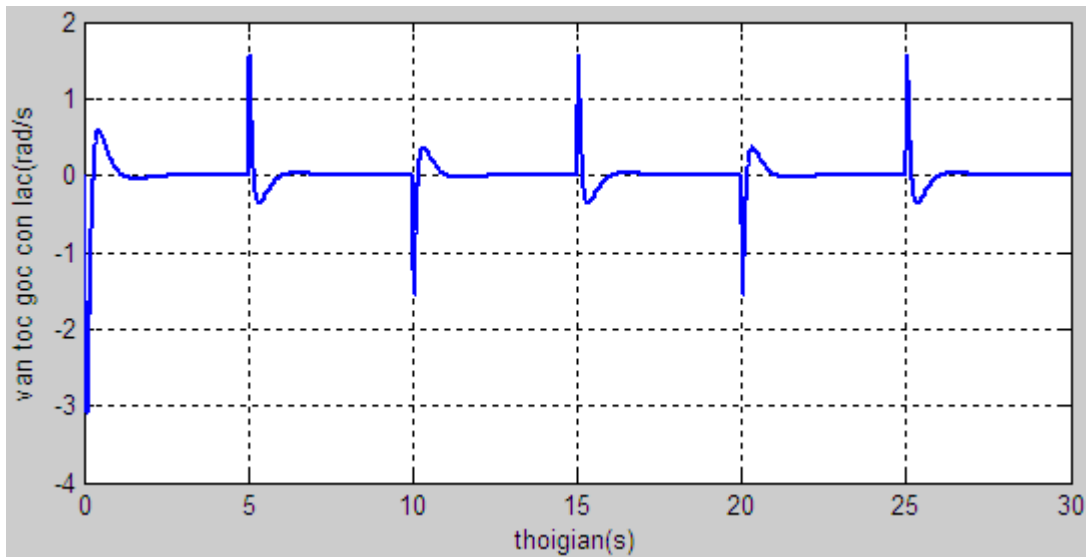
**Hình 6.19:** Vị trí xe khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=0.1$ (chuẩn)



**Hình 6.20:** Vận tốc xe khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=0.1$ (chuẩn)

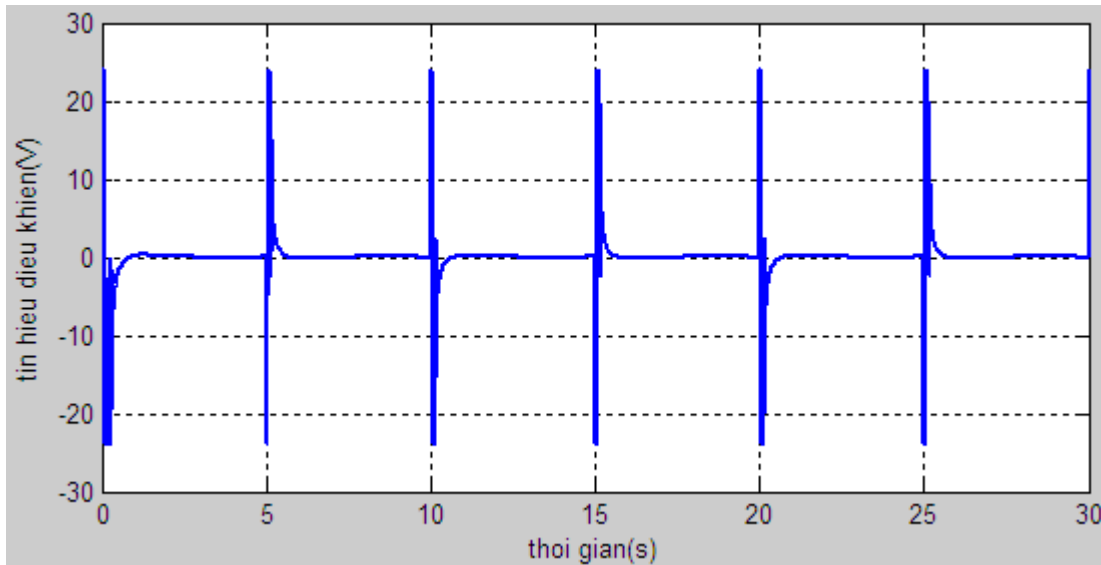


Hình 6.21: Góc con lắc khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=0.1$ (chuẩn)



Hình 6.22: Vận tốc góc con lắc khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=0.1$ (chuẩn)

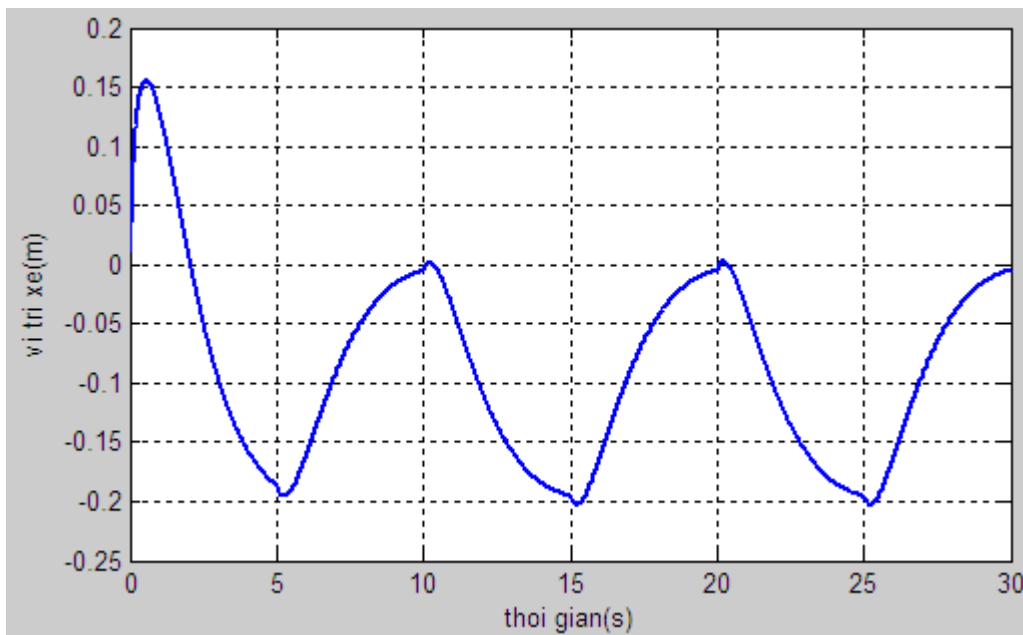




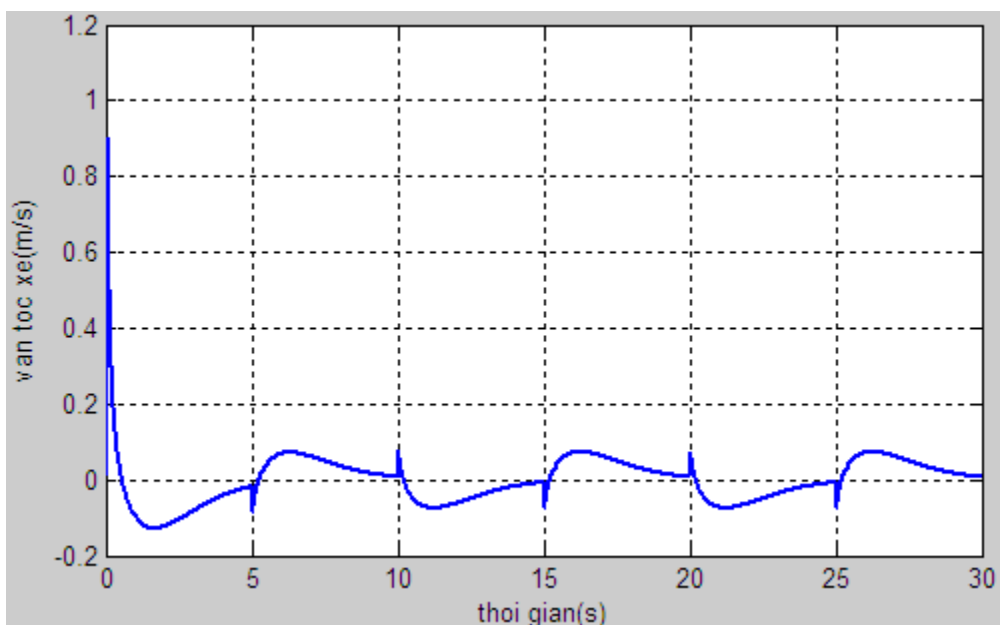
**Hình 6.23:** điện áp điều khiển khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=0.1$ (chuẩn)

**6.2.2.2. Khi  $R=100$  ;**  $Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$   **$\text{Bienso1}=3; \text{bienso2}=1$ :(tăng R**

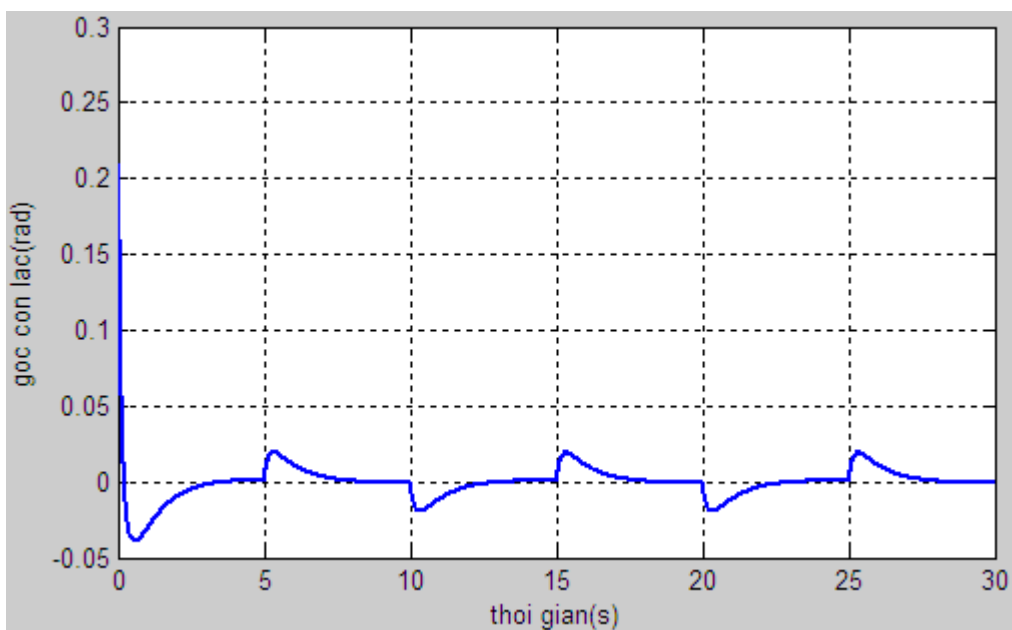
lên gấp 1000 lần so với ban đầu). (các giá trị cho kết quả phù hợp nhất trong các trường hợp thay đổi thông số tuyến tính hoá)



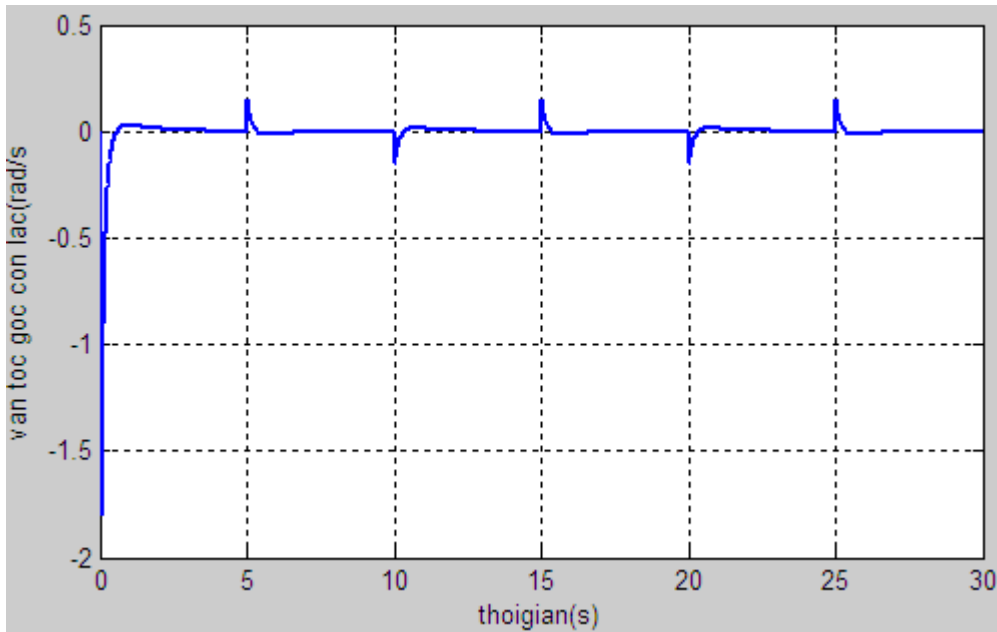
**Hình 6.24:** Vị trí xe khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=100$ (tăng)



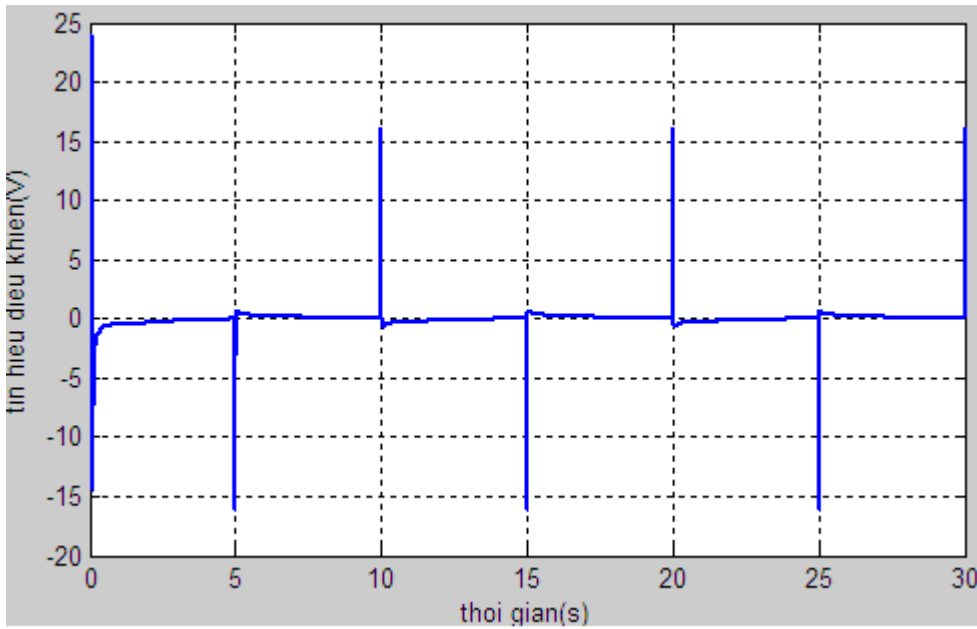
Hình 6.25: Vận tốc xe khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=100$ (tăng)



Hình 6.26: Góc con lắc khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=100$ (tăng)



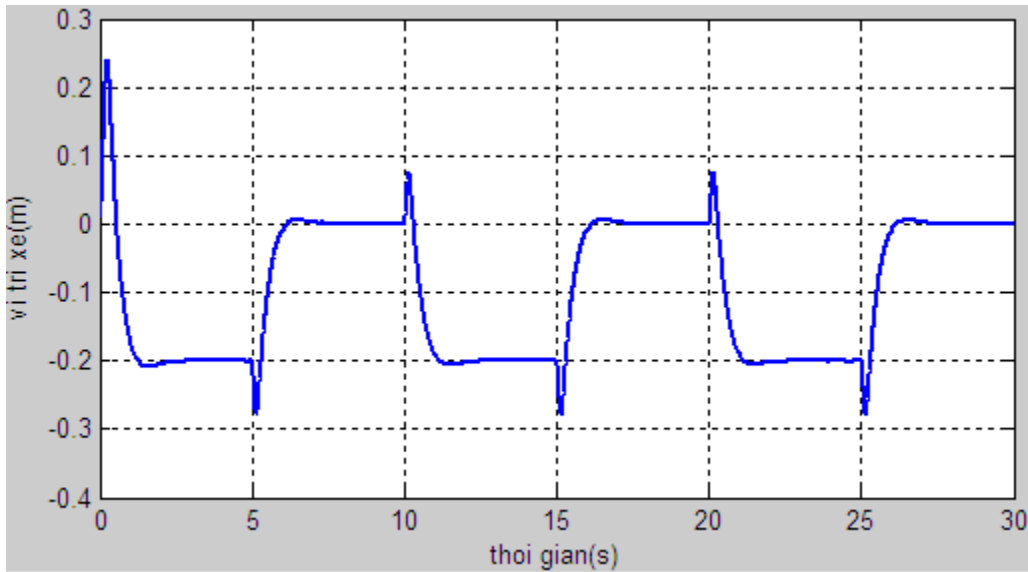
Hình 6.27: Vận tốc góc con lắc khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=100$ (tăng)



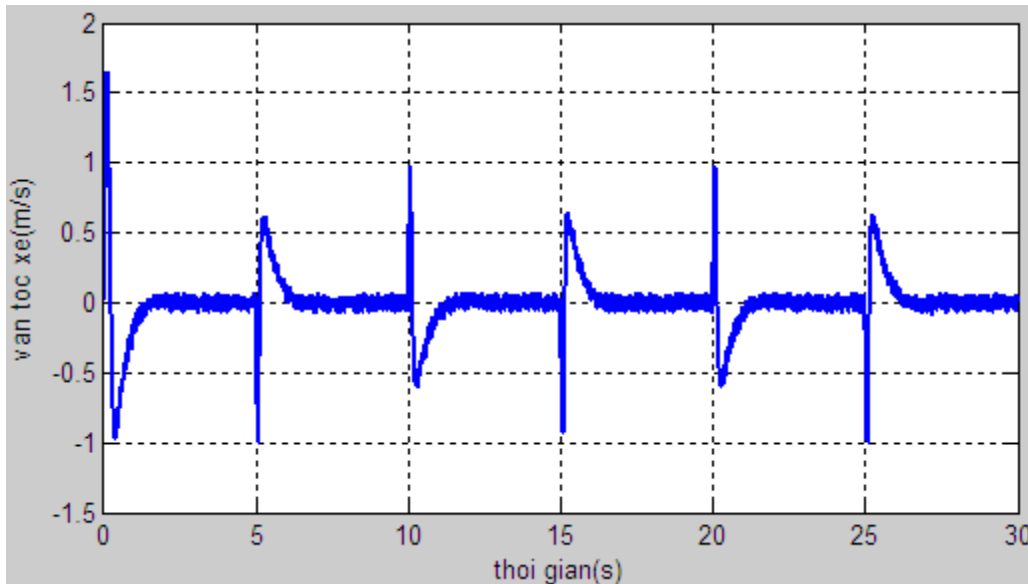
Hình 6.28: Điện áp điều khiển khi điều khiển vị trí xe qua lại với  $R=100$ (tăng)

**6.2.2.3. Khi R=0.001;**  $Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$

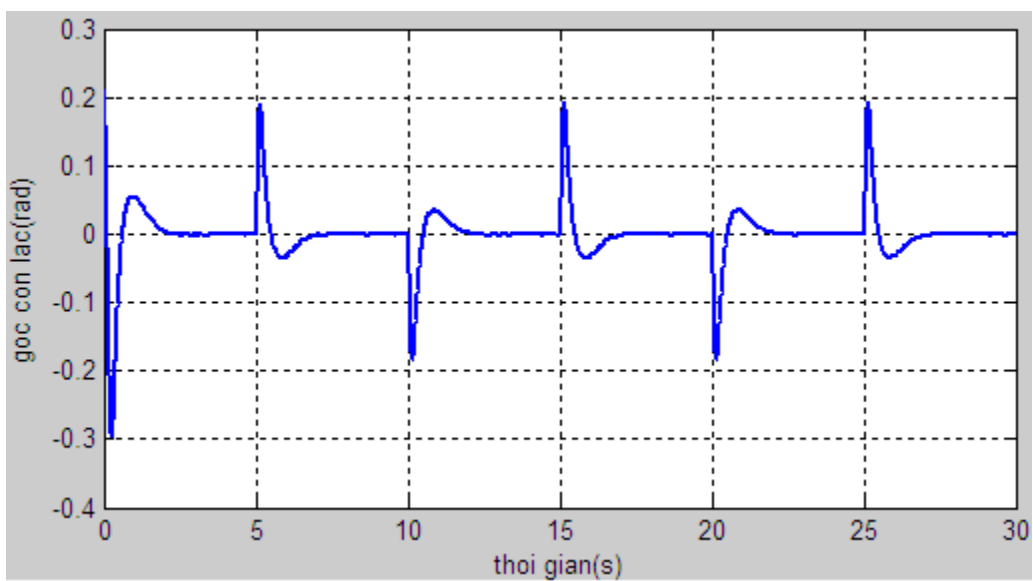
(Ma trận R được giảm 100 lần so với giá trị chuẩn ban đầu là R=0.1)



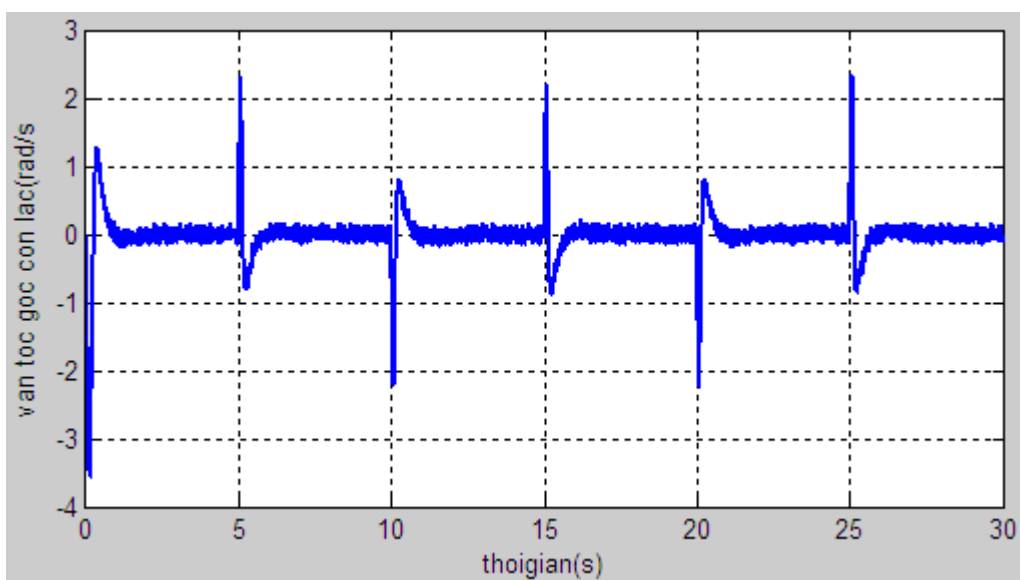
Hình 6.29: Vị trí xe khi điều khiển xe qua lại với R=0.001(giảm)



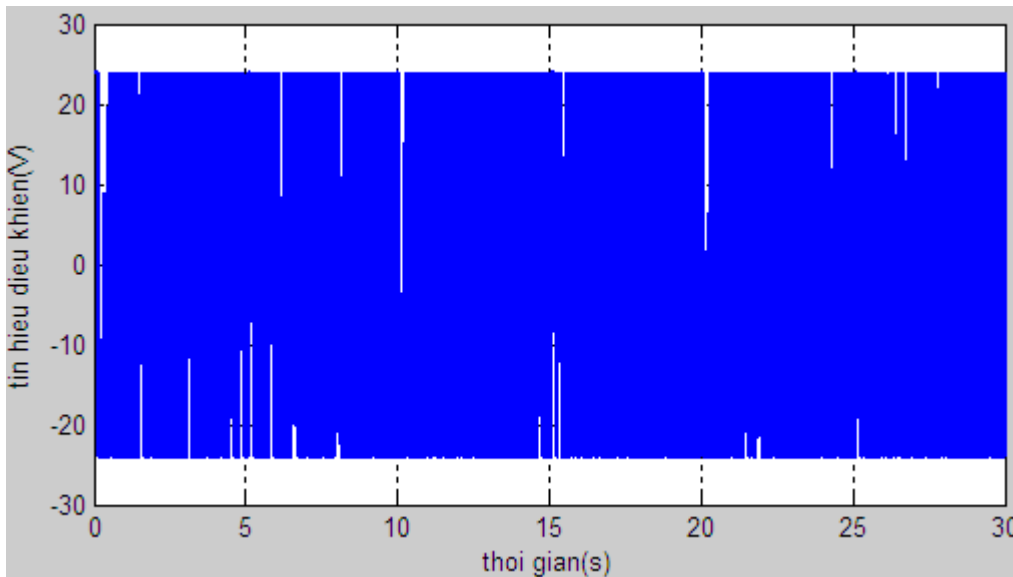
Hình 6.30: Vận tốc xe khi điều khiển xe qua lại với R=0.001(giảm)



Góc con lắc



Vận tốc góc con lắc



Hình 6.31: Tín hiệu điều khiển khi điều khiển xe qua lại với  $R=0.001$ (giảm)

#### **6.2.2.4. Nhận xét:**

Khi  $R$  nhỏ quá thì trọng số năng lượng cung cấp là nhỏ  $\rightarrow$  hệ thống lâu đạt được trạng thái cân bằng hơn

Khi  $R$  quá lớn thì hệ thống nhanh đạt trạng thái cân bằng nhưng đồng thời cũng bị hiện tượng chattering: hệ thống bị dao động nhanh và bị rung (có thể xem tín hiệu điều khiển ngõ ra để nhận thấy: khi chọn  $R$  chuẩn thì hệ thống cũng bị chattering nhưng biên độ  $u$  không cao. Còn khi  $R$  lớn quá thì  $u$  thay đổi liên tục nhưng biên độ  $u$  lại quá lớn).

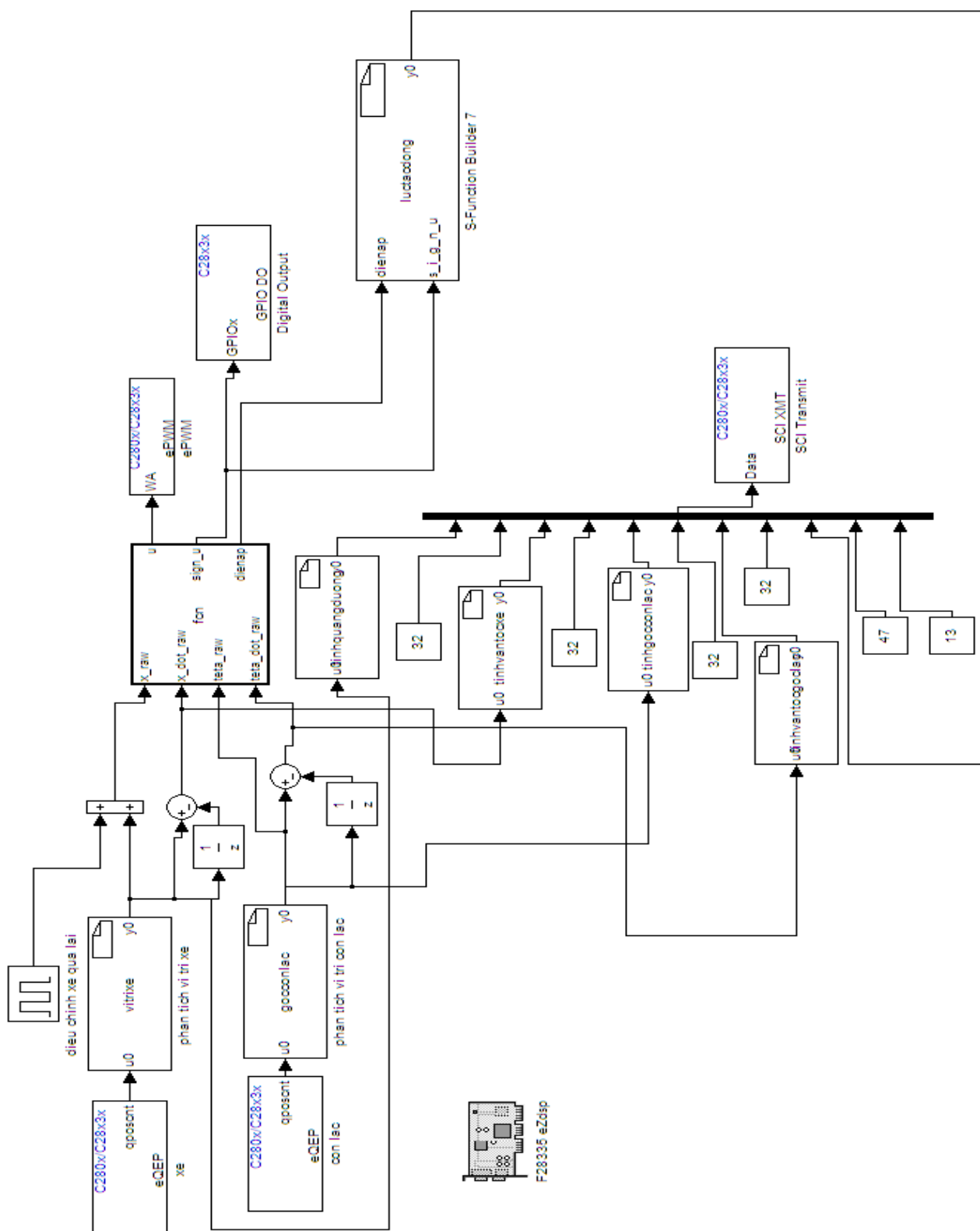
Tương tự với  $Q$ , ta muốn trọng số nào lớn thì ta tăng giá trị trên đường chéo của  $Q$  ứng với biến tương ứng đó. Tuy nhiên, trong trường hợp này ta rất khó xác định phải ổn định biến nào vì biến ngõ ra bây giờ là  $\xi$  chứ không còn là  $x_1$ ;  $x_2$ ;  $x_3$ ;  $x_4$  nên rất khó kiểm tra trường hợp khi thay đổi thông số  $Q$ .

## **CHƯƠNG VII:**

### ***ĐÁP ỨNG THỰC TẾ KHI ĐIỀU KHIỂN***

#### **7.1. Xây dựng chương trình điều khiển trên Simulink:**

Sử dụng mô hình hệ thống đã rời rạc hoá:



Hình 7.1: Chương trình Matlab lập trình điều khiển



Giải thích các khối trên Simulink:

- Khối eQEP có tên là “**xe**” có tác dụng đọc encoder gắn trên xe. Do encoder đọc từ giá trị 0 đến giá trị trần nào đó rồi lại quay về đọc vị trí 0 ( không ra được giá trị  $<0$  để ta biết được chiều của xe) nên ta phải biến đổi giá trị encoder đọc về đó sao cho khi xe chạy thuận thì xung đọc về đếm từ 0 đếm lên và khi chạy nghịch thì xung đếm về sẽ giảm dần, về 0 rồi về số âm. Việc biến đổi này được thực hiện trong khối “phân tích vị trí xe”
- Khối eQEP có tên “phân tích vị trí con lắc” có tác dụng đọc encoder gắn với con lắc. Do encoder đọc về từ giá trị 0 đến 4095 rồi lại đọc về 0( không ra được giá trị âm để ta biết được vị trí con lắc theo chiều thông thường) nên ta phải biến đổi giá trị encoder đọc về đó sao cho khi con lắc quay theo chiều thuận so với vị trí 0 thì encoder đếm từ 0 đến 2048 và khi con lắc chạy nghịch kể từ vị trí 0 thì encoder đếm từ 0 đến -2047.
- Khối Embedded Matlab có tác dụng là chứa chương trình giải thuật để thực hiện việc điều khiển khi có các tín hiệu ngõ vào tương ứng. Các tín hiệu ra của khối Embedded Matlab là
  1. Ngõ ra “u”: giá trị độ lớn điều xung để xe chạy nhanh hay chậm
  2. Ngõ ra “sign\_u”: giá trị chiều chạy của xe. Nếu sign\_u = 0 thì xe chạy sang trái (chạy nghịch). Nếu sign\_u = 1 thì xe chạy sang phải (chạy thuận)
  3. Ngõ ra “dienap”: để cung cấp giá trị điện áp
- Khối SCI Transmit có tác dụng đưa các giá trị vị trí xe(tính theo m), vận tốc xe(tính theo m/s), góc con lắc(tính theo độ) và vận tốc góc con lắc(tính theo độ/s) để thu thập dữ liệu thông qua cổng COM (các giá trị thu thập trên được đưa vào cổng MUX trước khi cho vào khối SCI).
- Khối “điều khiển xe qua lại” là 1 khối tạo xung. Việc này có tác dụng dờn giúp ta thay đổi vị trí x điều khiển để xe có thể di chuyển qua lại. Tất nhiên, nếu ta cho khối này là hàm xung vuông thì xe sẽ di chuyển qua lại với vị trí xe tuân theo quỹ đạo xung vuông. Nếu ta cho khối

này là hàm sin thì xe sẽ di chuyển qua lại với vị trí xe tuân theo quỹ đạo hình sin.

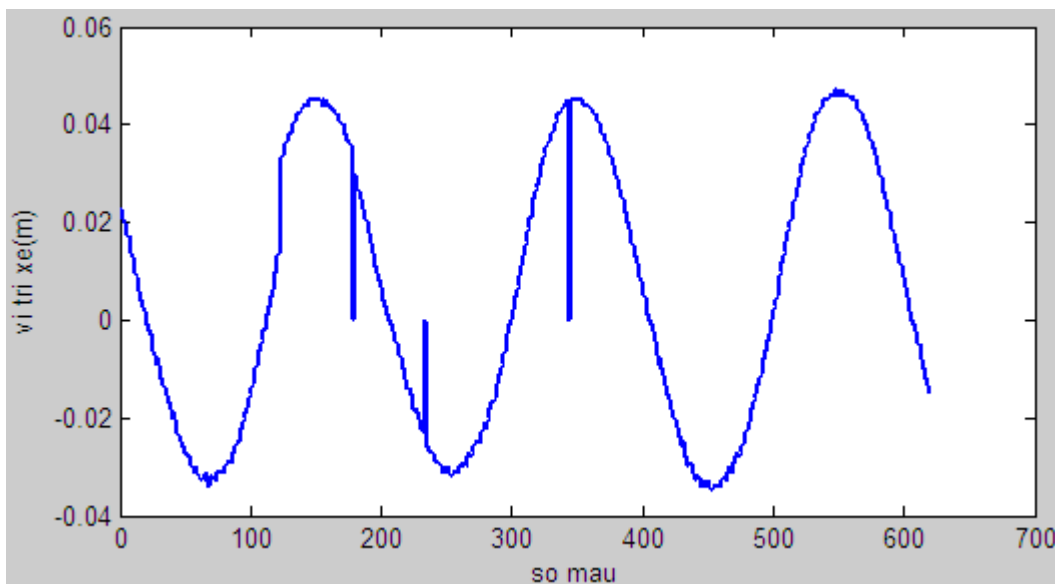
## 7.2 Đáp ứng ngõ ra thực tế:

7.2.1. Với thông số chuẩn :  $R=0.1$ ;  $Q =$

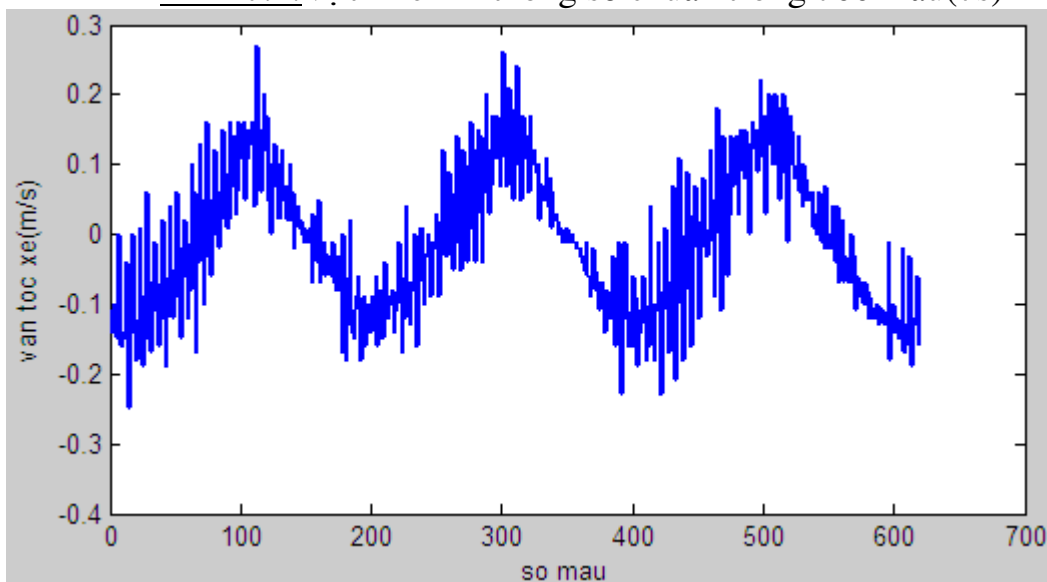
$$Q = \begin{bmatrix} 10^5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

;  $\text{bienso1}=3$ ;

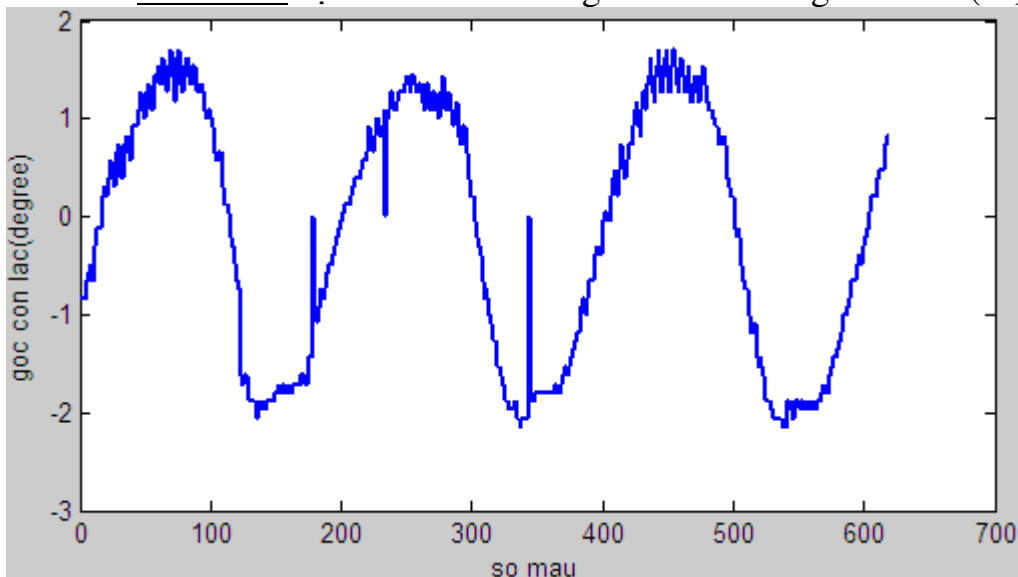
$\text{bienso2}=1$ ;



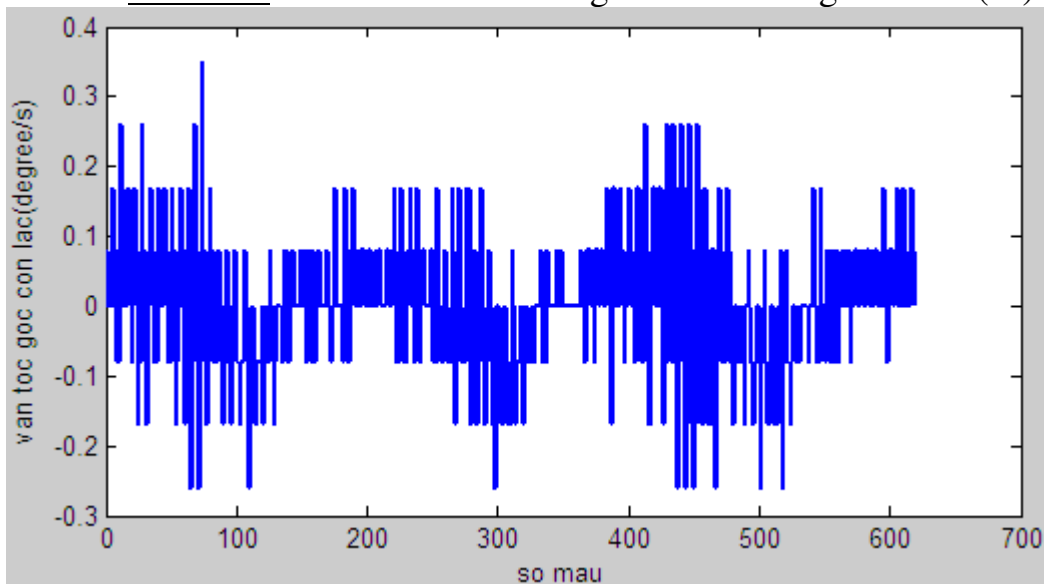
Hình 7.2: Vị trí xe khi thông số chuẩn trong 700 mẫu(7s)



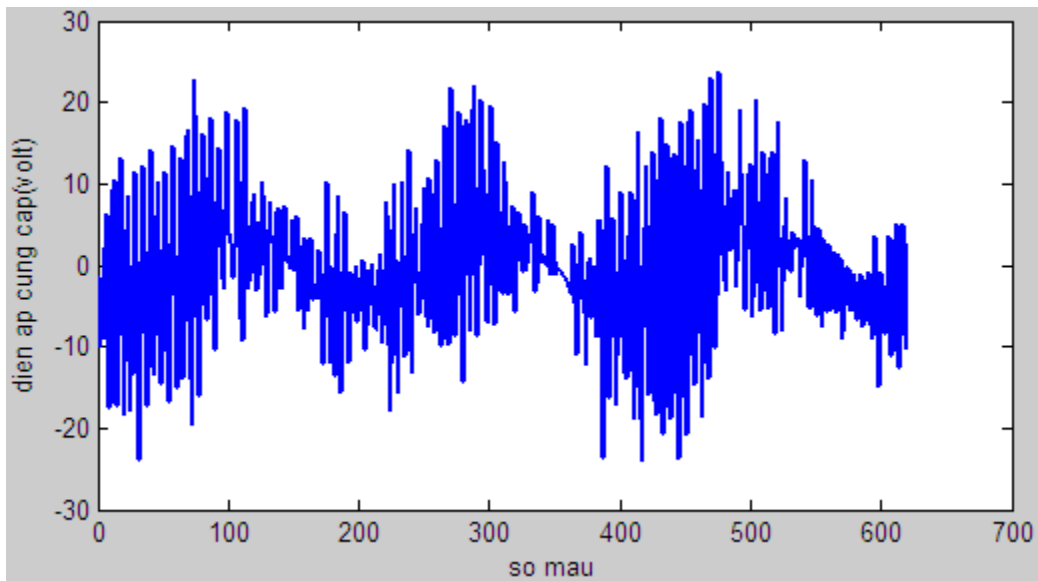
Hình 7.3: Vận tốc xe khi thông số chuẩn trong 700 mẫu(7s)



Hình 7.3: Góc con lắc khi thông số chuẩn trong 700 mẫu(7s)



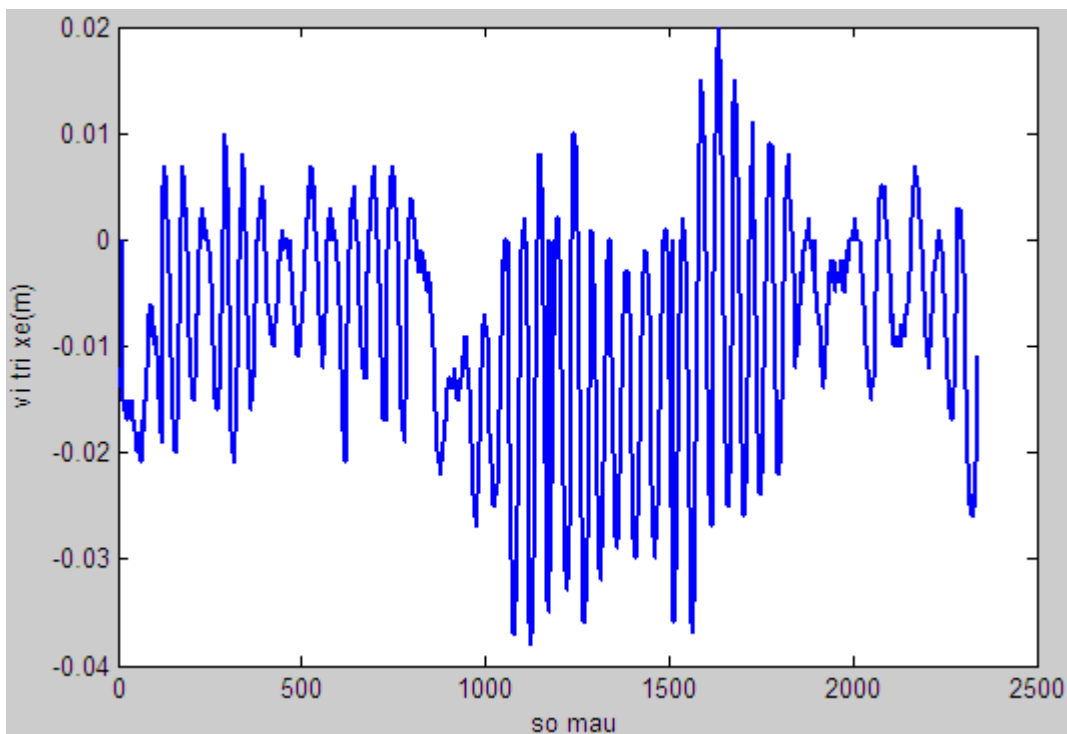
Hình 7.4: Vận tốc góc con lắc khi thông số chuẩn trong 700 mẫu(7s)



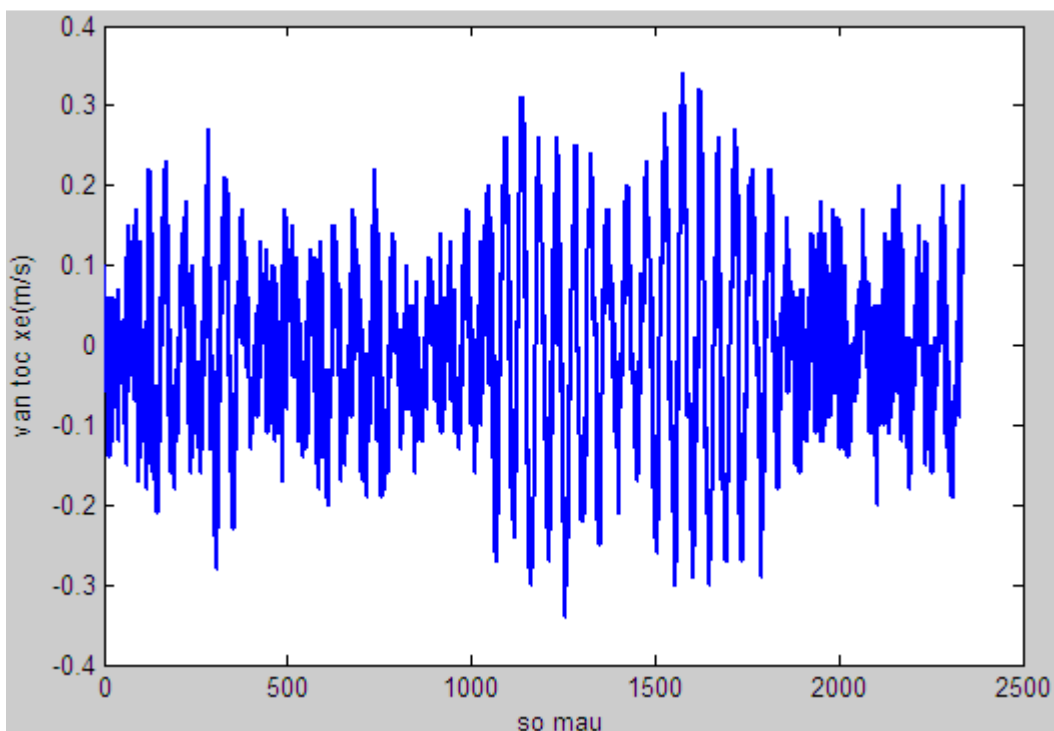
Hình 7.5: Điện áp điều khiển khi thông số chuẩn trong 700 mẫu(7s)

### **7.2.2. Khi thay đổi thông số tuyến tính hoá:**

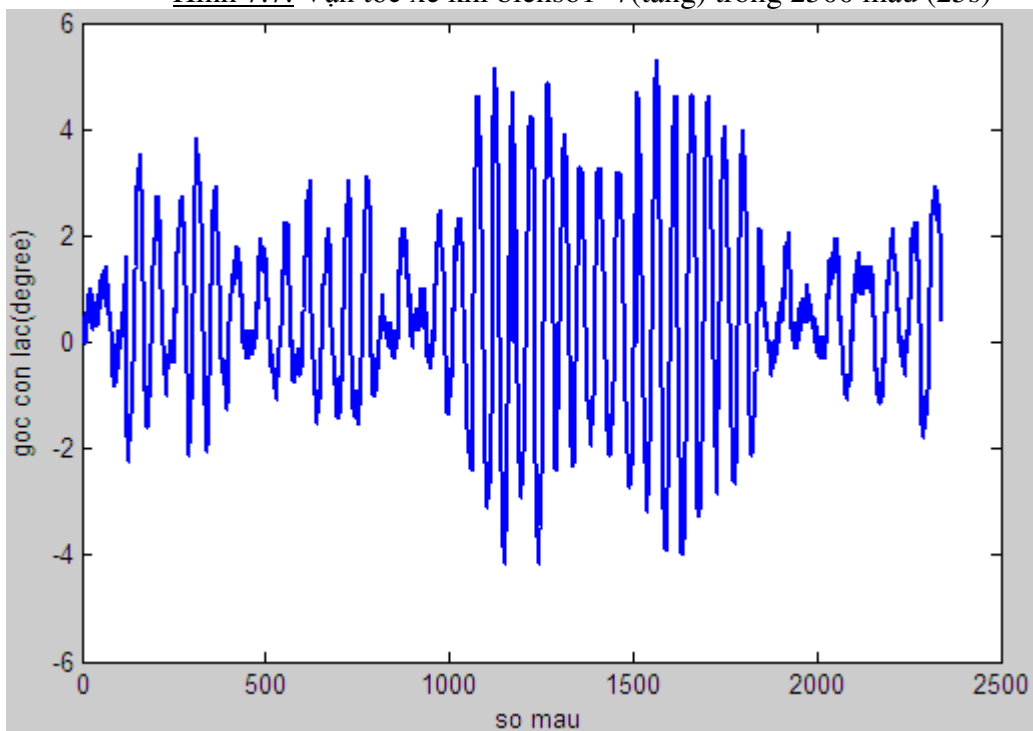
#### **7.2.2.1. Khi tăng bienso1 so với thông số chuẩn: chọn bienso1=7**



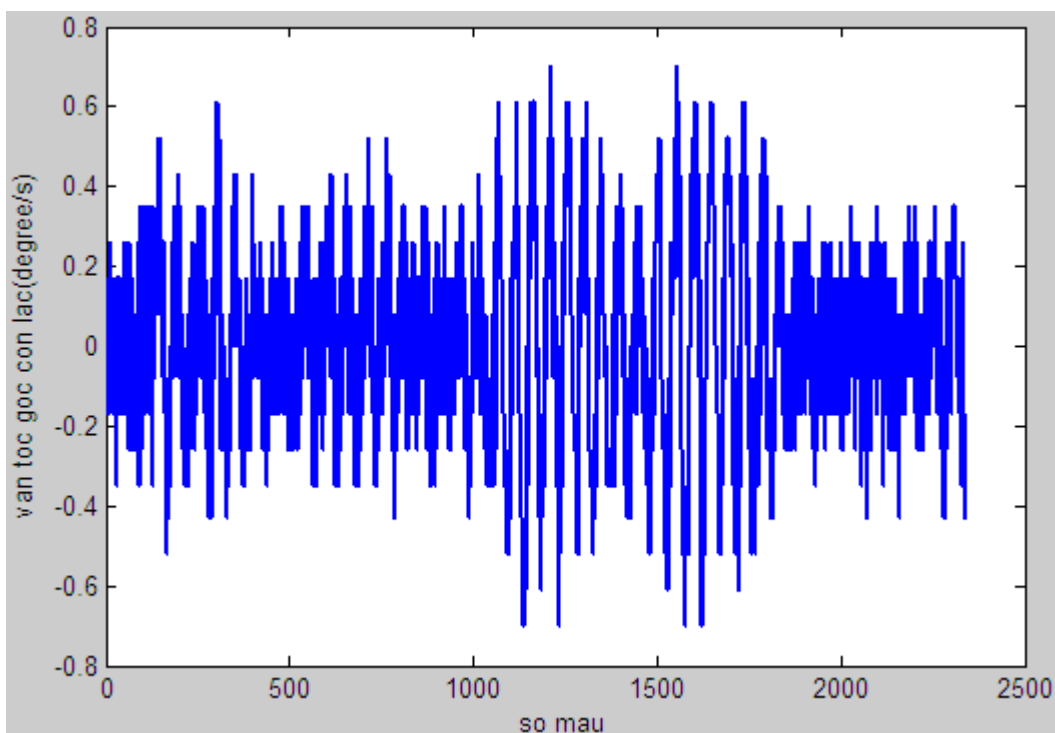
Hình 7.6: Vị trí xe khi bienso1=7(tăng) trong 2500 mẫu (25s)



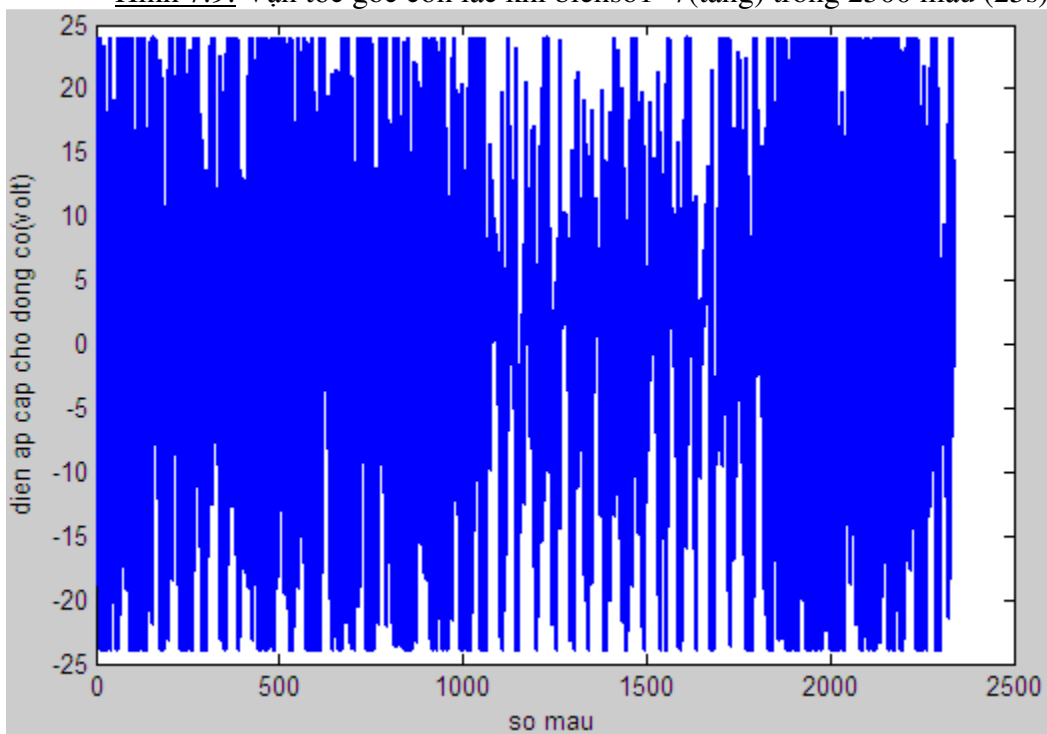
Hình 7.7: Vận tốc xe khi bienso1=7(tăng) trong 2500 mẫu (25s)



Hình 7.8: Góc con lắc khi bienso1=7(tăng) trong 2500 mẫu (25s)

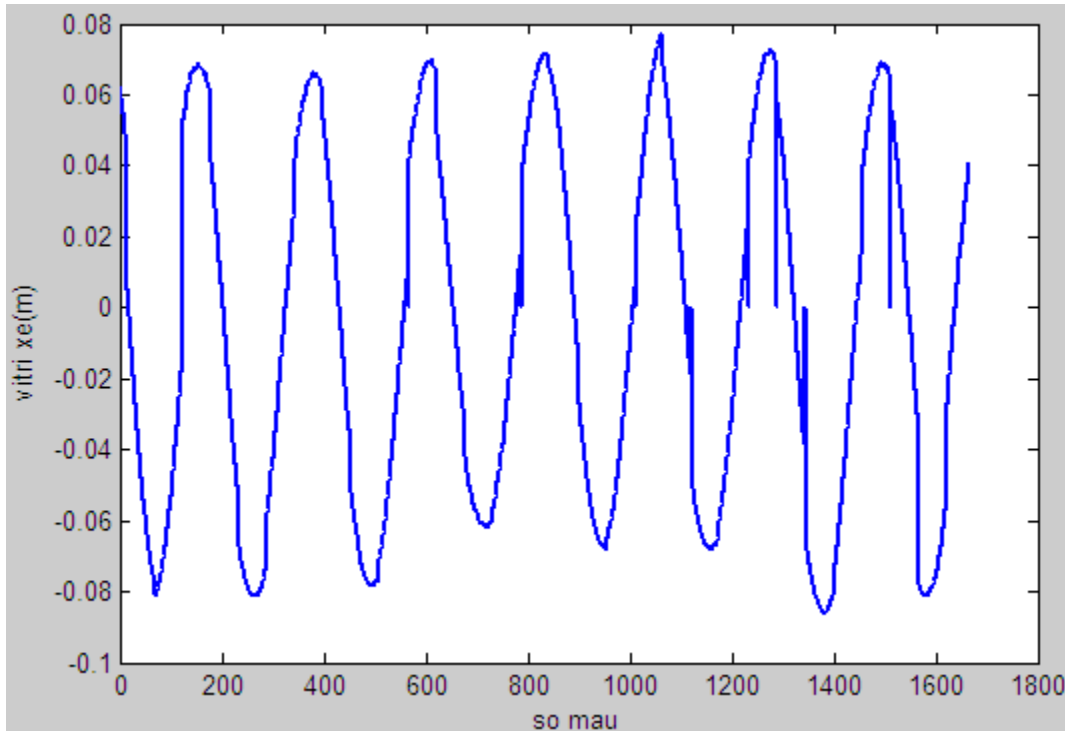


Hình 7.9: Vận tốc góc con lắc khi bienso1=7(tăng) trong 2500 mẫu (25s)

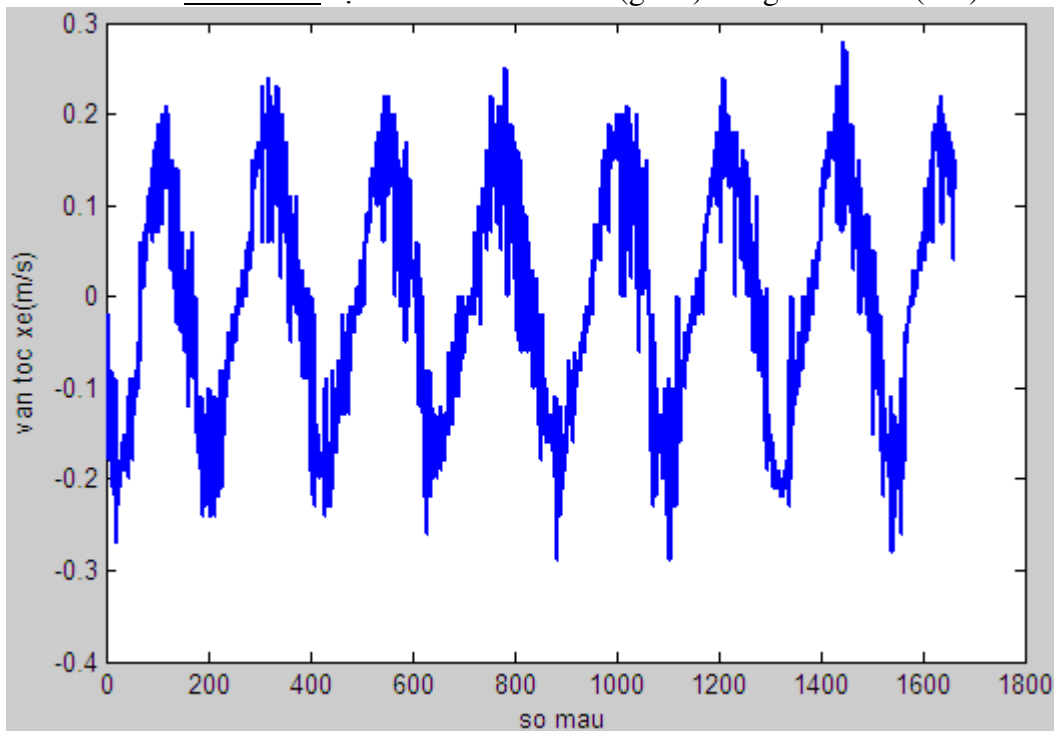


Hình 7.10: điện áp điều khiển khi bienso1=7(tăng) trong 2500 mẫu(25s)

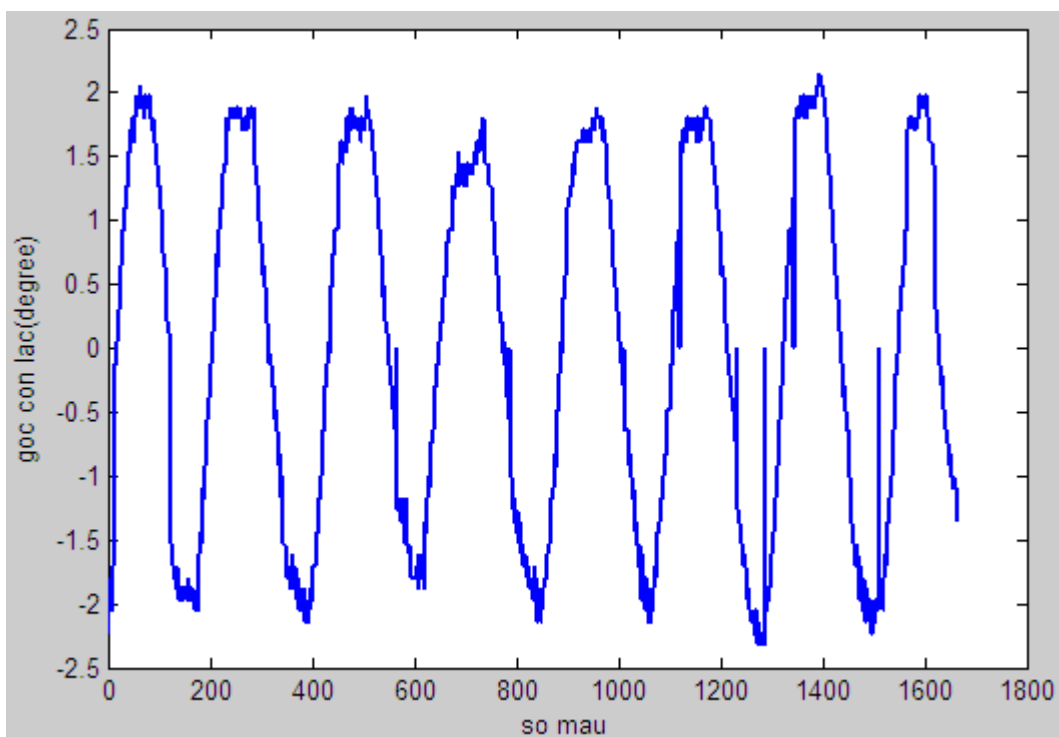
**7.2.2.2. Khi giảm bienso1 so với thông số chuẩn: chọn bienso1 mới là 2(so với ban đầu là 1):**



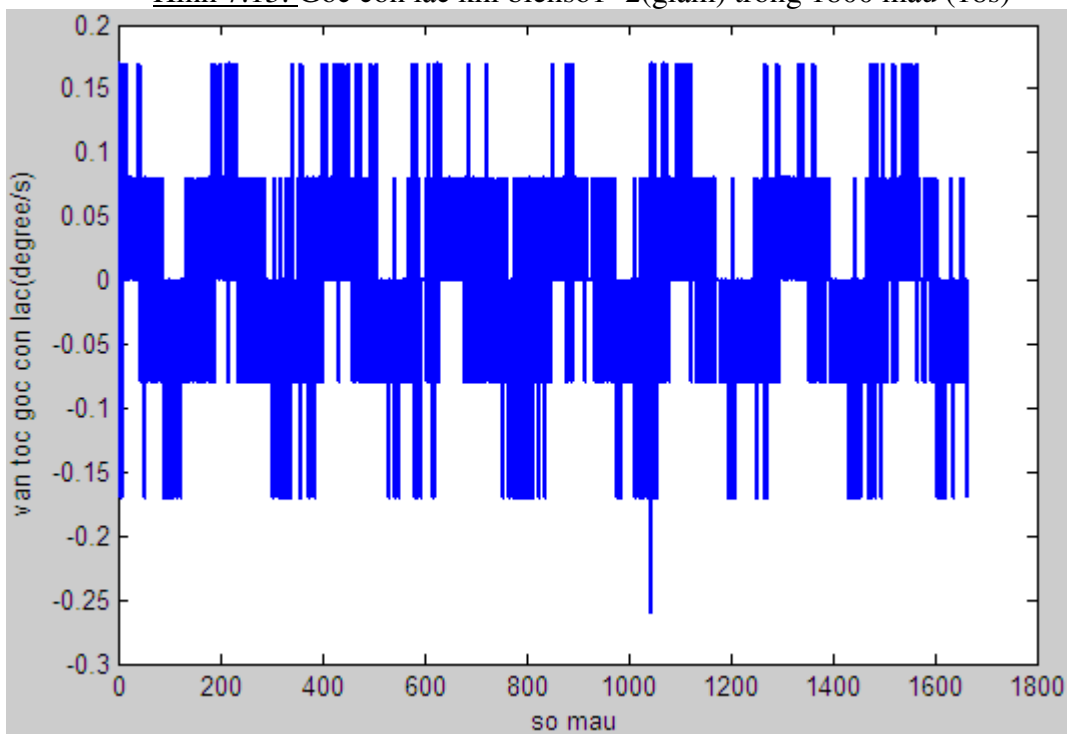
Hình 7.11: Vị trí xe khi bienso1=2(giảm) trong 1800 mẫu(18s)



Hình 7.12: Vận tốc xe khi bienso1=2(giảm) trong 1800 mẫu(18s)

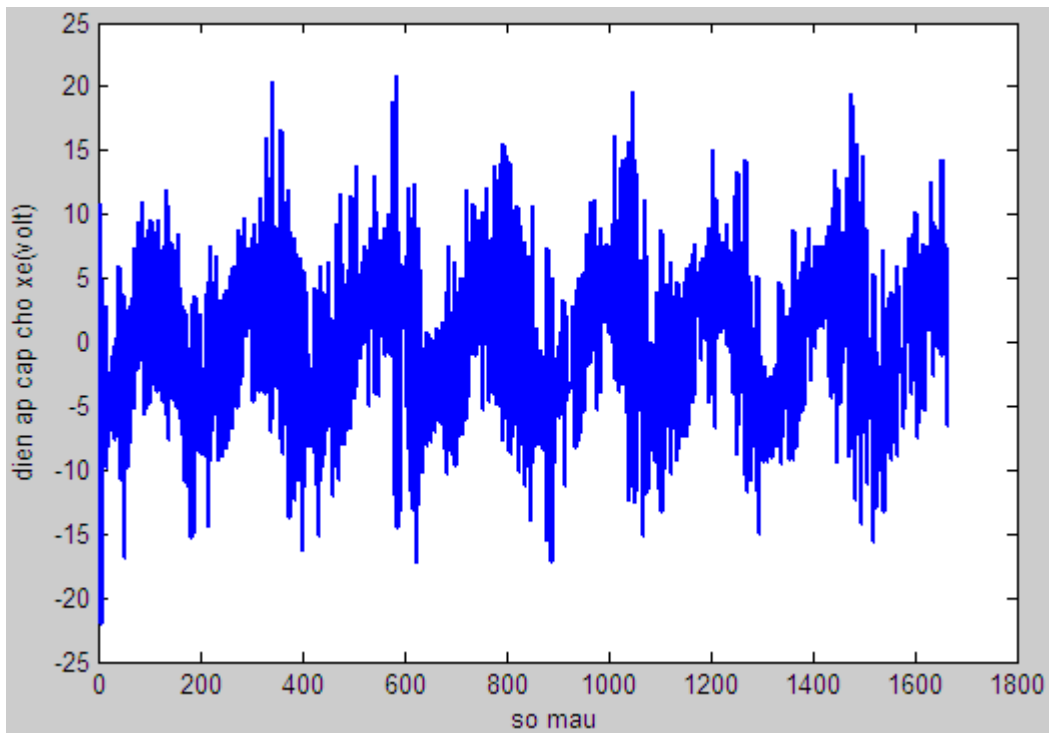


Hình 7.13: Góc con lắc khi bienso1=2(giảm) trong 1800 mẫu (18s)



Hình 7.14: Vận tốc góc con lắc khi bienso1=2(giảm) trong 1800 mẫu (18s)

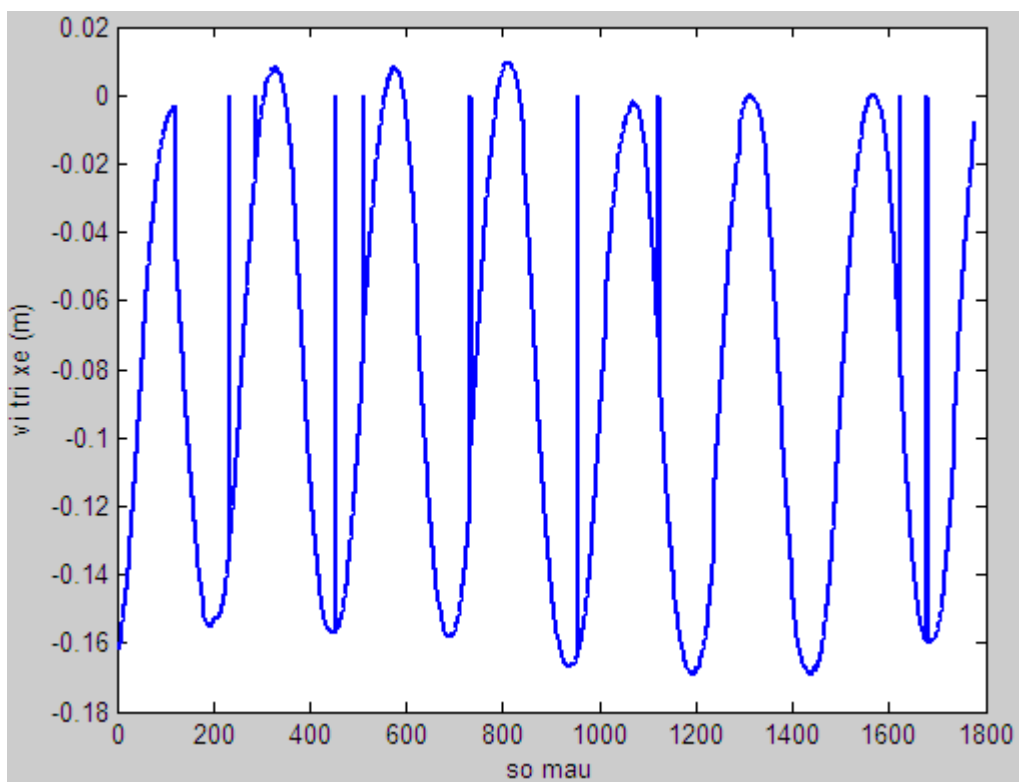




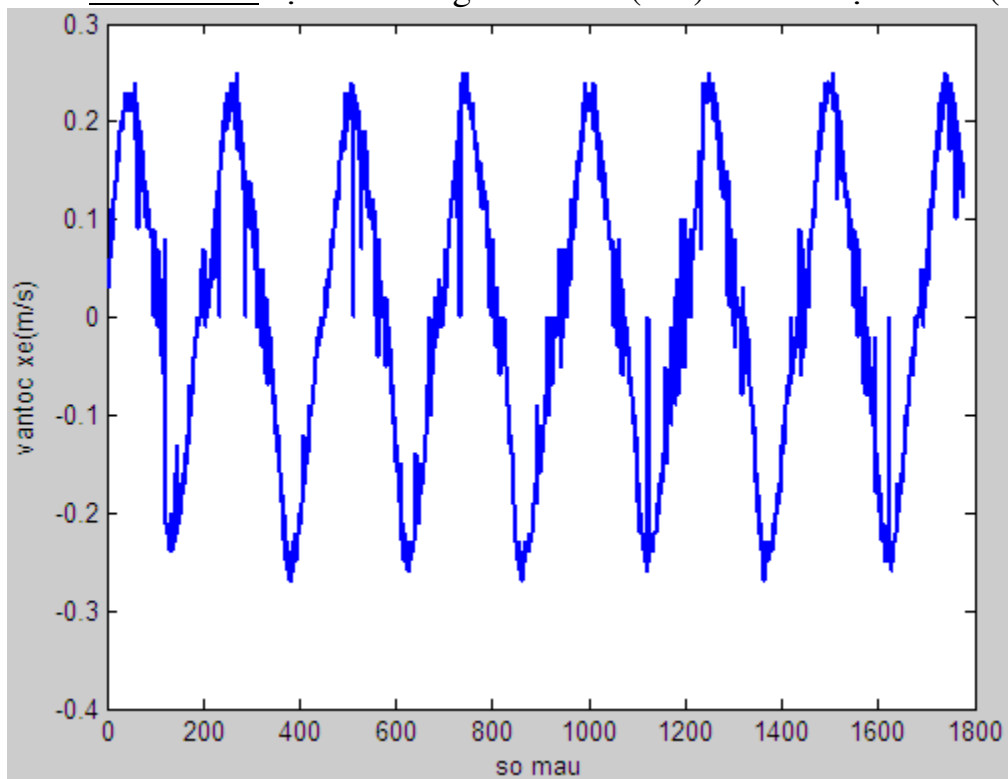
Hình 7.15: điện áp điều khiển khi bienso1=2(giảm) trong 1800 mẫu(18s)

### **7.2.3. Khi thay đổi thông số điều khiển:**

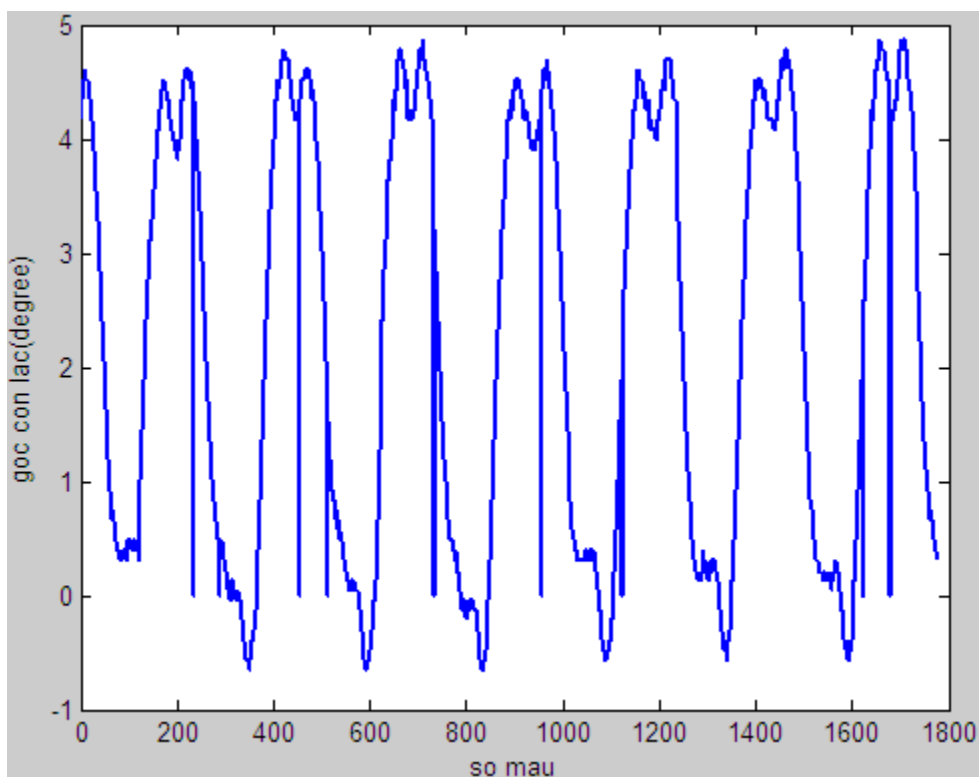
#### **7.2.3.1. Khi tăng R: chọn $R=0.5$ (lớn gấp 5 lần so với R chuẩn)**



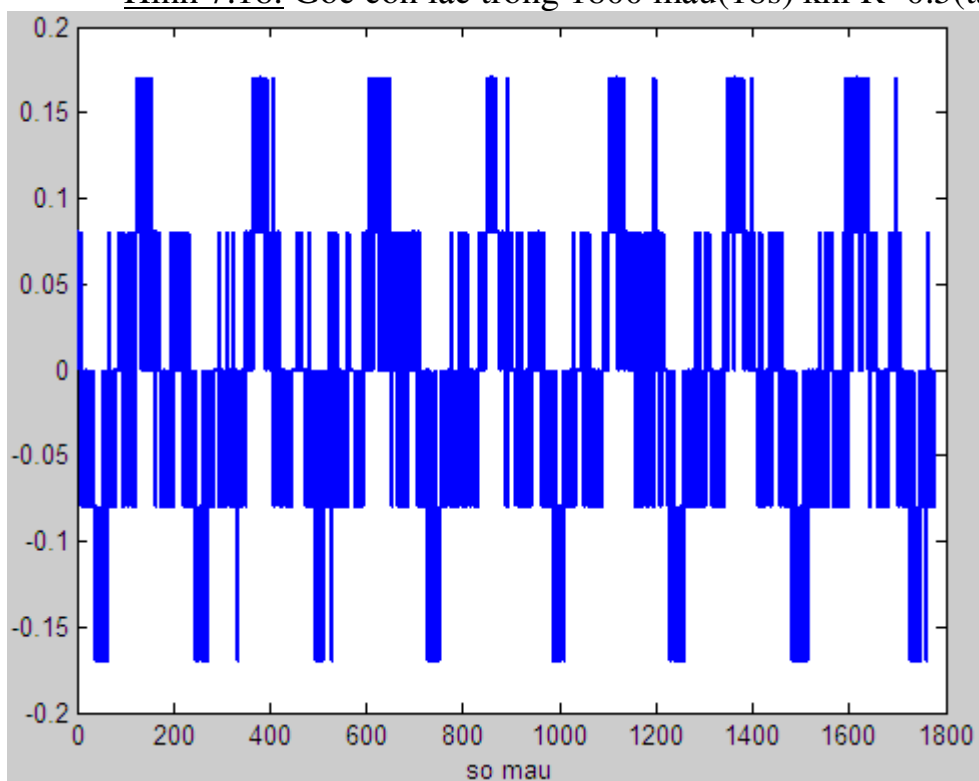
Hình 7.16: Vị trí xe trong 1800 mẫu(18s) khi ma trận  $R=0.5$ (tăng)



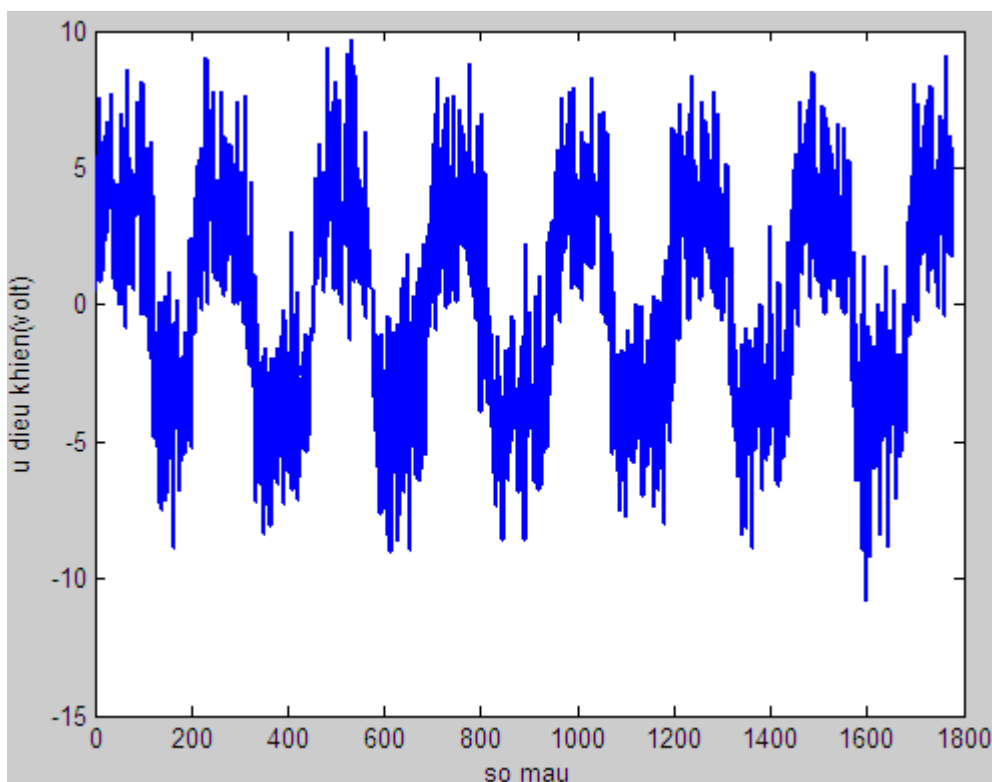
Hình 7.17: Vận tốc xe trong 1800 mẫu(18s) khi ma trận  $R=0.5$ (tăng)



Hình 7.18: Góc con lắc trong 1800 mẫu(18s) khi  $R=0.5$ (tăng)

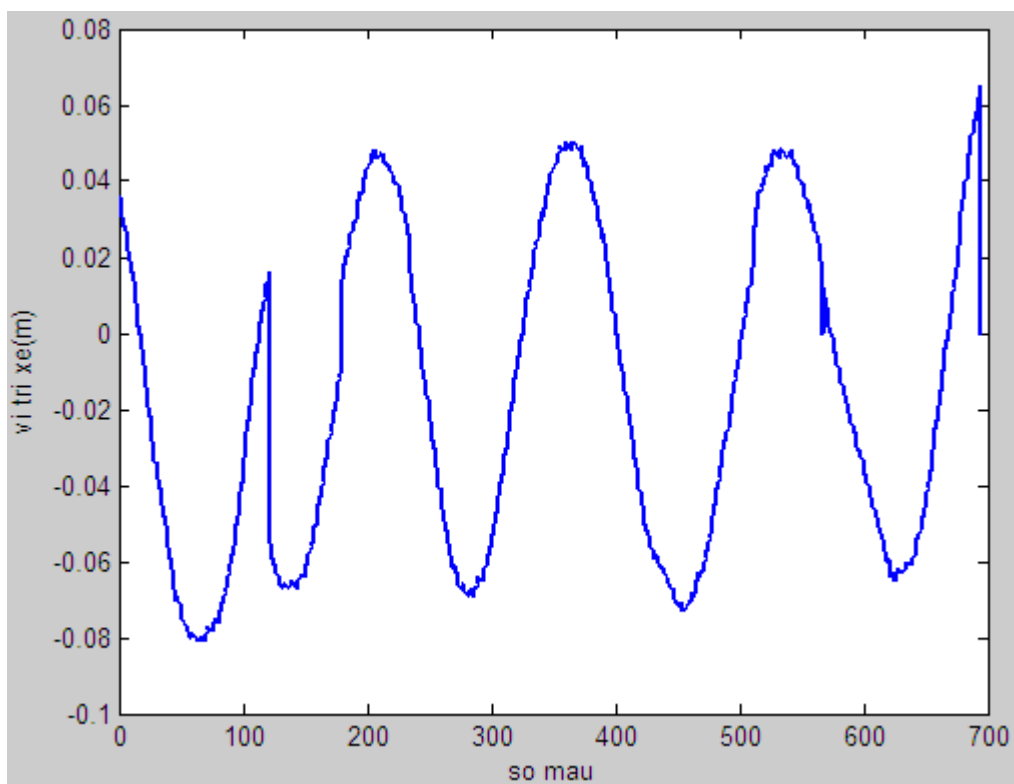


Hình 7.19: Vận tốc góc con lắc (degree/s) trong 1800 mẫu (18s) khi  $R=0.5$ (tăng)

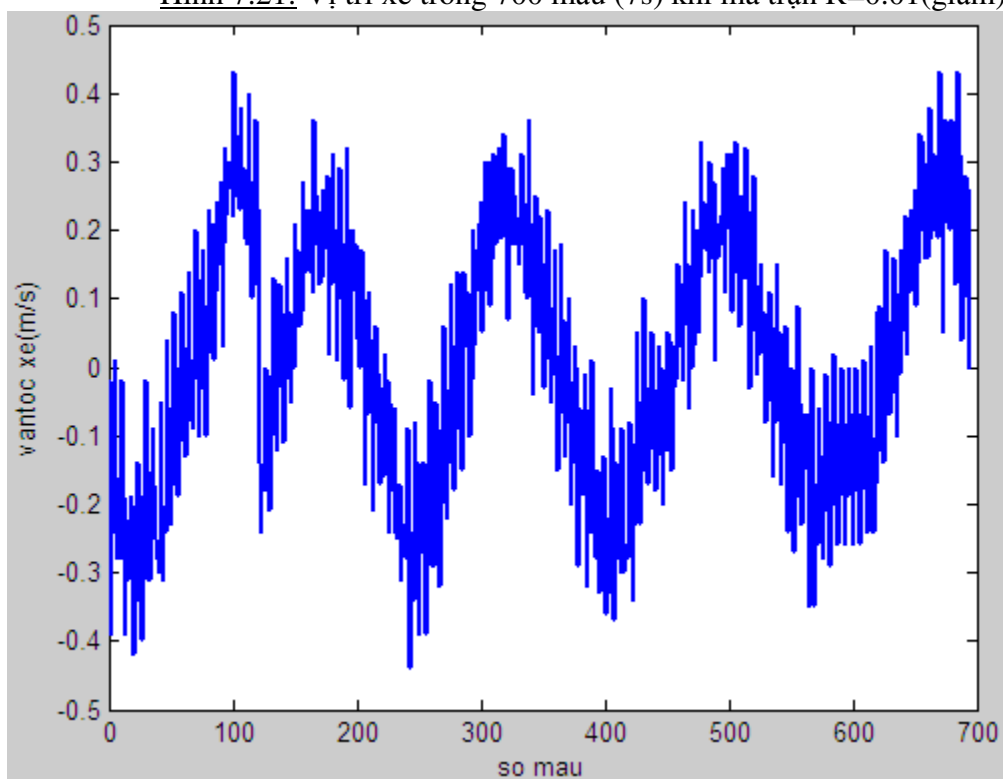


Hình 7.20: Điện áp điều khiển trong 1800 mẫu(18s) khi  $R=0.5$ (tăng)

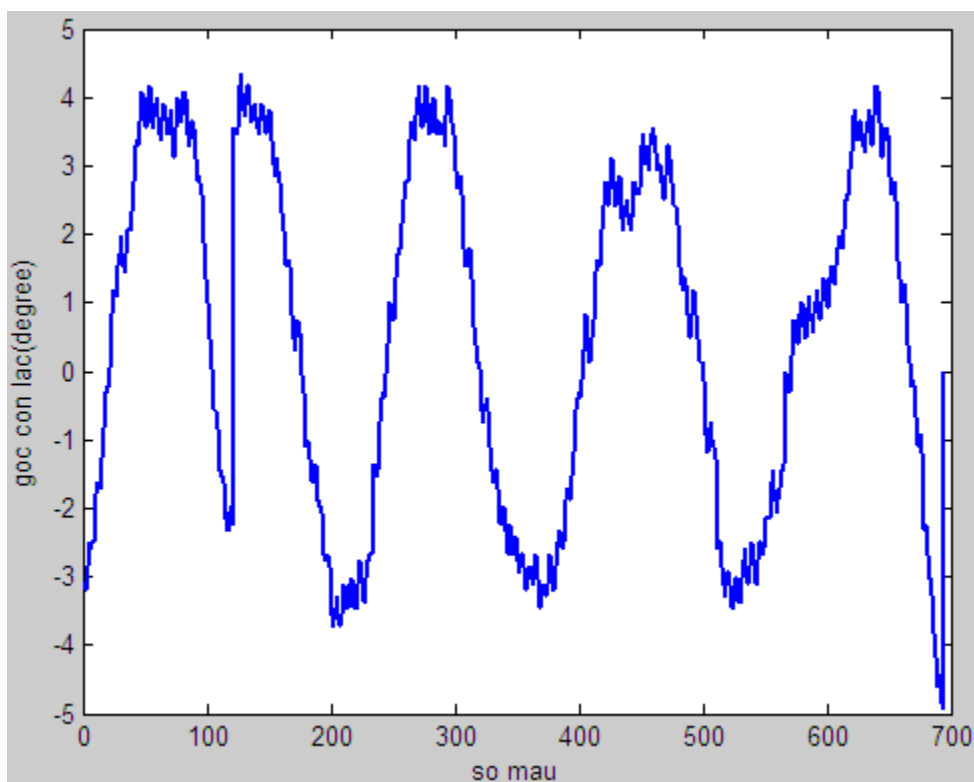
**7.2.3.2. Khi giảm R: chọn  $R=0.01$ (nhỏ hơn 10 lần so với R chuẩn)**



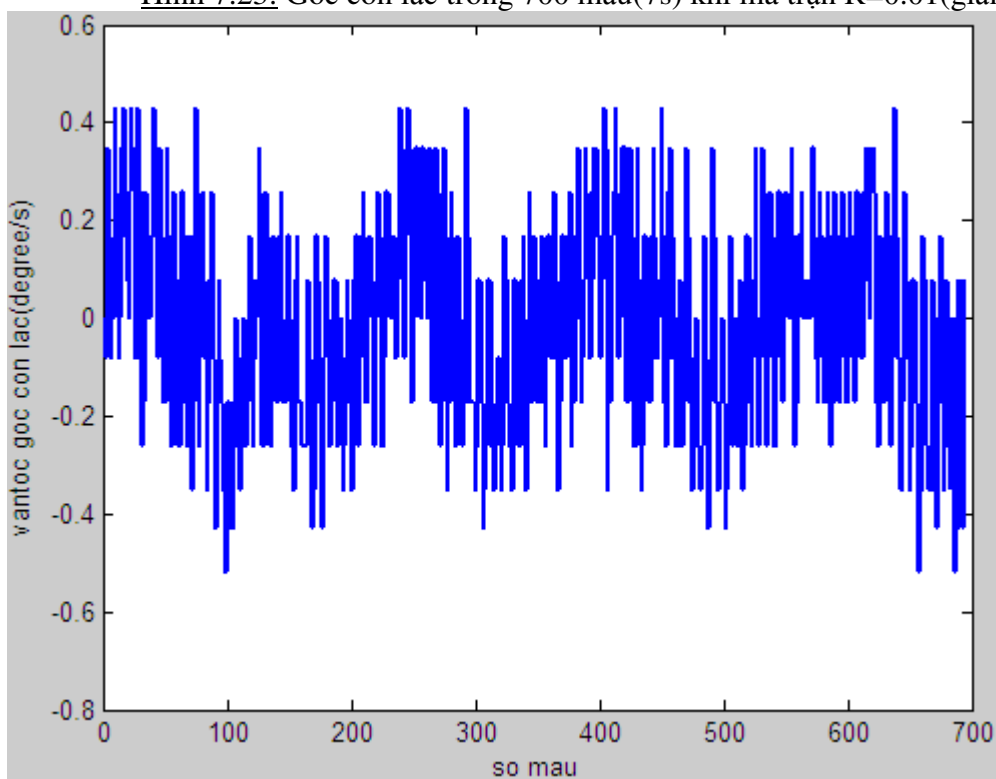
Hình 7.21: Vị trí xe trong 700 mẫu (7s) khi ma trận  $R=0.01$ (giảm)



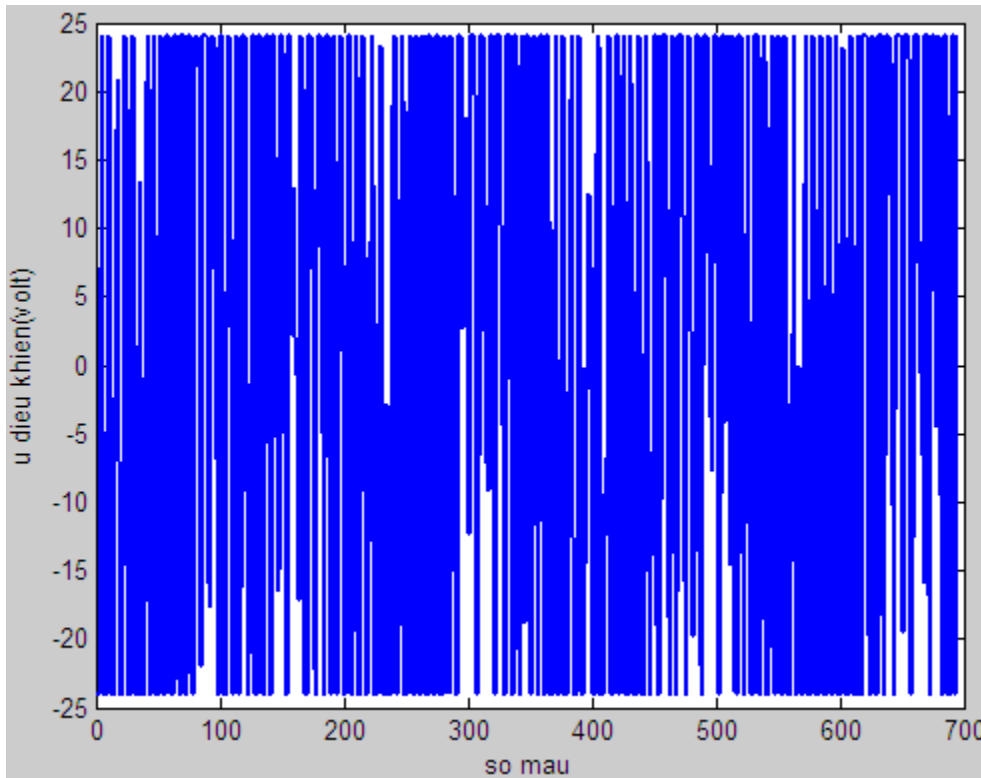
Hình 7.22: Vận tốc xe trong 700 mẫu(7s) khi ma trận  $R=0.01$ (giảm)



Hình 7.23: Góc con lắc trong 700 mẫu(7s) khi ma trận  $R=0.01$ (giảm)



Hình 7.24: Vận tốc góc con lắc trong 700 mẫu(7s) khi ma trận  $R=0.01$ (giảm)



Hình 7.25: Điện áp điều khiển trong 700 mẫu(7s) khi ma trận  $R=0.01$ (giảm)

### 7.3. Nhận xét:

Khi tăng bienso1 so với bienso2 thì xe bớt dao động hơn. Tuy nhiên, hệ thống sẽ kém cân bằng hơn.

Khi giảm bienso1 so với bienso2 thì xe sẽ dao động nhiều hơn. Trong 1 chừng mực giảm nào đó thì xe sẽ ổn định hơn. Tuy nhiên, do mô hình thanh ngang của ta bị giới hạn nên nếu xe dao động vượt quá giới hạn thì ta có thể xem như hệ không ổn định được

Tương tự, việc giảm  $R$  khiến việc điều khiển khó khăn ở chỗ xe chạy êm nhưng vị trí xe, góc con lắc ko được đảm bảo mà bị dao động nhiều(tuy rằng chậm). Việc tăng  $R$  làm mô hình rung  $\rightarrow$  không ổn định.

## CHƯƠNG VIII: TỔNG KẾT

Qua việc mô phỏng cũng như chạy thực tế mô hình thì ta nhận thấy:

- Việc tuyến tính hoá vào-ra đối với hệ thống vẫn giữ nguyên các đặc trưng phi tuyến của hệ thống. Do đó, khoảng ổn định cân bằng của hệ thống rộng hơn nhiều so với chỉ đơn thuần tuyến tính hoá hệ thống quanh điểm làm việc rồi điều khiển LQR.
- Tuy nhiên, việc chọn thông số sẽ trở nên phức tạp hơn vì không phải đơn thuần ta chọn ma trận  $R$ ,  $Q$  cho phù hợp nữa mà ta phải tìm thêm thông số tuyến tính hoá  $bienso1$ ,  $bienso2$ . Đồng thời, ma trận  $Q$  khi chọn sẽ mang tính thử sai cao hơn. Đó là vì ma trận  $Q$  bây giờ không mang trọng số các biến  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$  nữa mà mang trọng số của các biến  $\xi_1$ ;  $\xi_2$ ;  $\xi_3$ ;  $\xi_4$ . Đó là những biến kết hợp giữa  $x_1$ ,  $x_3$ .
- Hệ thống đạt độ ổn định trong khoảng rộng. Tuy nhiên, khi sử dụng LQR, nếu đạt được thông số gần phù hợp tới phù hợp thì ta biết chắc hệ thống sẽ đi về ổn định. Còn ở phương pháp tuyến tính hoá vào ra rồi sử dụng LQR thì trừ phi chọn được thông số rất tốt ta mới đảm bảo hệ thống đứng im tại điểm cân bằng. Ngược lại, hệ thống sẽ dao động nhẹ quanh điểm cân bằng.
- Việc tính toán giải thuật tuyến tính hoá vào-ra là nặng nề nên phức tạp hơn so với các giải thuật LQR hay đặt cực. Tuy nhiên, tốc độ tính toán nhanh với dấu chấm động của DSP đã giúp ta không lo lắng nhiều về việc này.
- Hướng mở rộng đề tài:
  - ✓ Phần cứng: xây dựng con lắc đôi (con lắc đã cho sẽ được gắn thêm 1 con lắc tự do nữa).
  - ✓ Phần điều khiển: Thực hiện việc điều khiển con lắc giữ thẳng bằng thi thanh ray nằm nghiêng, nghiên cứu giải thuật điều khiển swing-up cho phù hợp hơn. Sử dụng các phương pháp nhận dạng bằng neuron để nhận dạng các hàm  $f$ ,  $g$  của hệ thống



phi tuyến. Từ đó, ta sẽ có nền để thực hiện việc tuyến tính hoá vào-ra và điều khiển cho những hệ phức tạp hơn.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Sách tham khảo chính:

[1] “Điều khiển hệ thống đa biến” – tác giả Dương Hoài Nghĩa.

### Sách tham khảo thêm

[2] “Lý thuyết điều khiển phi tuyến” – tác giả Nguyễn Doãn Phước, Phan Xuân Minh, Hán Thành Trung.

[3] “Lý thuyết điều khiển tự động”- tác giả Nguyễn Thị Phương Hà, Huỳnh Thái Hoàng.

[4] “Điều khiển mờ hệ con lắc ngược dùng vi điều khiển LPC2148” – luận văn tốt nghiệp của sinh viên Thái Ngọc Vũ

[5] “Xây dựng bộ điều khiển nhúng cho hệ con lắc ngược quay” – luận văn tốt nghiệp của học viên cao học Phan Vinh Hiếu.

### Bài báo khoa học ứng dụng chính trong luận văn:

[6] Cesar Aguilar, Dr. RnHirschorn- Approximate Feedback Linearization and Sliding Mode Control for the Single Inverted Pendulum — 2002.

[7] Balance Control of a Car – pole Inverted Pendulum System – nhóm tác giả Trung Quốc(gửi kèm theo CD)

### Bài báo khoa học tham khảo thêm:

[8] Alan Bradshaw and Jindi Shao – Swing-up control of inverted pendulum systems- Robotica (1996) volume 14. Ppt 397-405-Cambridge University Press-1996

[9] Selcuk Kizir, Zafer Bingul, and Cuneyt Oysu-Fuzzy Control of Realtime Inverted Pendulum System

[10] Nenad Muskinja, Boris Tovornik - Controlling of Real Inverted Pendulum by Fuzzy Logic – Smetanova 17-2000.

[11] Mojtaba Ahmadi Khansar- Sliding Mode Control of Rotary Inverted Pendulum – Proceeding of the 16<sup>th</sup> Mediterranean Conference on Control & Automation – 2009.

## LÝ LỊCH TRÍCH NGANG

Họ và tên : **NGUYỄN VĂN ĐÔNG HẢI**      Phái : **Nam**  
Ngày sinh : **01-01-1986**      Nơi sinh : **SÓC TRĂNG**  
Địa chỉ liên lạc : 291 Trần Hưng Đạo, khóm 8 phường 3, thành phố Sóc  
Trăng, tỉnh Sóc Trăng.  
Điện thoại : **01644135849**

### QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO

2001-2004: là học sinh trường PTTH chuyên Nguyễn Thị Minh Khai, tỉnh Sóc Trăng.

2004-2009: là sinh viên trường Đại Học Bách Khoa TPHCM, chuyên ngành ***Điều khiển tự động***.

2009-2011: là học viên cao học trường Đại Học Bách Khoa TPHCM, chuyên ngành ***Điều khiển tự động***.

### QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC

*Từ 10-2010 đến nay* :Giảng viên Khoa Điện-Điện Tử - bộ môn Tự Động Điều Khiển thuộc trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật TPHCM.