

Điều khiển cân bằng xe hai bánh tự cân bằng sử dụng thuật toán giám bắc mô hình**Balancing control of self-balancing two – wheeled bicycle applying model order reduction algorithm**

PGS.TS. Nguyễn Hữu Công

Đại học Thái Nguyên

e-Mail: conghn@tnu.edu.vn

Tóm tắt

Những năm gần đây, điều khiển cân bằng xe hai bánh nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học. Một khó khăn của bài toán điều khiển này là đối tượng điều khiển là khâu không ổn định và luôn bị nhiễu tác động. Để giải quyết bài toán này, các tác giả thường sử dụng thuật toán điều khiển bền vững H_∞. Tuy nhiên, bộ điều khiển bền vững xe hai bánh tự cân bằng thường phức tạp và có bậc cao nên ảnh hưởng tới chất lượng trong quá trình điều khiển thực. Bài báo giới thiệu việc ứng dụng thuật toán giám bắc mô hình để giám bắc bộ điều khiển bền vững bậc cao trong bài toán điều khiển cân bằng xe hai bánh. Các kết quả mô phỏng thể hiện tính đúng đắn của thuật toán được giới thiệu và mở ra khả năng ứng dụng vào thực tiễn.

Từ khóa: Giám bắc mô hình, điều khiển bền vững, xe hai bánh tự cân bằng.

Abstract: In recent years, balance control two-wheeled bicycle has received more attention of scientists. One difficulty of this problem is the control object is unstable and constantly impacted by noise. To solve this problem, the authors often use robust control algorithms. However, robust controller of self-balancing two-wheeled bicycle are often complex and higher order so affect to quality during real controlling. The article introduces the application model order reduction algorithms to reduce order higher order robust controller in control balancing two-wheeled bicycle problem. The simulation results show the correctness of the algorithm is introduced and gives the possibility to practical applications.

Keywords: Model order reduction, robust control, the self balancing two-wheeled bicycle

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, nghiên cứu về xe hai bánh tự cân bằng đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới quan tâm. Trong đó, một vấn đề khó khăn là nghiên cứu điều khiển cân bằng xe hai bánh. Để giải quyết vấn đề cân bằng xe hai bánh, có ba phương pháp cơ bản như sau:

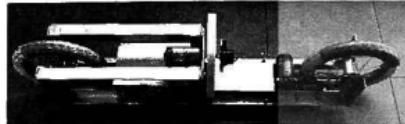
(i) điều khiển cân bằng sử dụng lực ly tâm như trong nghiên cứu của Tanaka và Murakami [6].

(ii) điều khiển cân bằng cách thay đổi tâm của trọng lực như nghiên cứu của Lee và Ham [3]

(iii) điều khiển cân bằng bằng bánh đà, như trong các nghiên cứu của Beznos [1], Gallaspy [2], và Suprapto [5].

Phương pháp thứ nhất không thể điều khiển cân bằng cho xe khi xe đứng yên. Phương pháp thứ hai cần phải thêm trọng lượng lên xe làm tăng trọng lượng của xe. Phương pháp thứ ba han chế được cả hai nhược điểm nêu trên. Do đó phương pháp điều khiển cân bằng bánh đà là phù hợp nhất cho hệ xe hai bánh tự cân bằng. Từ cơ sở này,

nhóm tác giả lựa chọn xây dựng mô hình xe hai bánh sử dụng bánh đà và kết quả thu được mô hình xe hai bánh như hình 1.



Hình 1. Mô hình xe hai bánh tự cân bằng

Các thông số của xe như sau: Xe dài 1,19m, cao 0,5m, rộng 0,4m, bánh đà có trọng lượng 3,976 Kg với đường kính là 0,26 m, đè quay bánh đà sử dụng động cơ DC 100W – 15V – 3400 vòng/phút + mạch cầu H, do tốc độ bánh đà sử dụng Encoder Sharp 100 xung, do góc nghiêng sử dụng cảm biến góc nghiêng GY-521 MPU-6050, hệ thống tiến lui xe gồm một động cơ DC + mạch cầu H và bộ điều khiển từ xa. Toàn bộ hệ thống điều khiển được kết nối với vi mạch Arduino đặt ở trên xe.

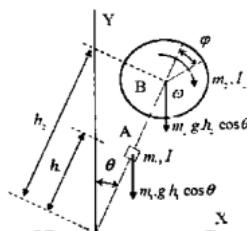
Nguyên lý cân bằng của xe như sau: Khi xe lệch khỏi vị trí cân bằng (tương ứng với θ góc nghiêng θ theo phương thẳng đứng

trọng lực của xe tạo ra một mômen làm cho xe có xu hướng đổ xuống. Để duy trì ở trạng thái cân bằng xe thì bánh đà sẽ quay tròn xung quanh trục (với góc tốc độ là $\dot{\varphi}$) và tạo ra một mômen để cân bằng với mômen do trọng lực của xe tạo ra. Để điều khiển góc tốc của bánh đà, chúng tôi điều khiển điện áp U đặt vào động cơ DC, khi này ta đưa bài toán điều khiển cân bằng xe về bài toán điều khiển góc nghiêng θ (đầu ra) bằng cách điều khiển điện áp U (đầu vào) đặt lên động cơ DC. Nhiệm vụ đặt ra là phải thiết kế một bộ điều khiển để giữ cho xe cân bằng tức là giữ cho góc θ luôn tiến tới không.

Do xe hai bánh thường phải làm việc trong các điều kiện khác nhau, tải trọng mang theo có thể thay đổi, ngoại lực tác động vào xe có thể thay đổi nên việc mô hình hóa xe hai bánh tự cân bằng gặp nhiều khó khăn và có thể coi xe hai bánh là đối tượng bất định (chi tiết trong [2]). Do tính chất bất định của mô hình xe hai bánh nên trong các thuật toán điều khiển xe hai bánh đã được đề xuất như điều khiển phi tuyến của Beznol [1], Lee và Ham [3], thiết kế bù bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận quỹ đạo gốc của Gallaspy [2], điều khiển PD của Surpatio [5], thì điều khiển bền vững như trong nghiên cứu [7] là thích hợp nhất. Tuy nhiên, bộ điều khiển thu được theo phương pháp thiết kế điều khiển bền vững H_∞ thường có bậc cao (bậc của bộ điều khiển được xác định là bậc của đa thức mău). Bậc của bộ điều khiển cao có nhiều bất lợi khi chúng ta đem thực hiện điều khiển trên xe, vì mã chương trình phức tạp, thời gian tính toán lâu nên đáp ứng của hệ thống sẽ bị chậm. Vì vậy, trong bài báo này nhóm tác giả đề xuất thiết kế bộ điều khiển cân bằng xe hai bánh theo thuật toán điều khiển bền vững có ứng dụng thuật toán giám sát mô hình - Việc giám sát này có ý nghĩa là giám thời gian đáp ứng của hệ.

2. Mô hình toán học của xe hai bánh tự cân bằng

Mô hình động học của xe hai bánh được thể hiện trong hình 2.



Hình 2. Mô hình động học của xe hai bánh tự cân bằng.

Với: m_1 là trọng lượng của xe (bao gồm cả động cơ), m_2 là trọng lượng của bánh đà, h_1 là chiều cao của tâm trọng lực của xe (không kể bánh đà), h_2 là chiều cao của tâm trọng lực của bánh đà, I_1 là mô men quán tính của xe, I_2 là mô men quán tính của bánh đà, θ là góc nghiêng của xe so với phương thẳng đứng, φ là góc quay của bánh đà

Để xây dựng mô hình động học của hệ, trong nghiên cứu [2], tác giả sử dụng phương trình Lagrange.

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right\} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

Trong đó T tổng động năng của hệ, V là tổng thế năng của hệ, Q_i là lực ngoài, q_i hệ tọa độ tổng quát.

Tổng động năng của hệ được xác định là:

$$T = \frac{1}{2} m_1 |v_A|^2 + \frac{1}{2} m_2 |v_B|^2 + \frac{1}{2} I_1 \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}^2 + I_2 \dot{\varphi} \dot{\theta} \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{2} (m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2) \dot{\theta}^2 \quad (3)$$

$$\Rightarrow + \frac{1}{2} I_2 \dot{\varphi}^2 + I_2 \dot{\varphi} \dot{\theta}$$

Tổng thế năng của hệ là:

$$V = g \cos \theta (m_1 h_1 + m_2 h_2) \quad (4)$$

Với $q_i = \theta$, sử dụng công thức (1) – (4), ta thu được công thức sau:

$$(m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2) \ddot{\theta} + I_2 \ddot{\varphi} - g \sin \theta (m_1 h_1 + m_2 h_2) = 0 \quad (5)$$

Với $q_i = \varphi$, sử dụng công thức (1) – (4), ta thu được công thức sau:

$$I_2\ddot{\varphi} + I_1\ddot{\theta} = T_m. \quad (6)$$

Với T_m là mô men xoắn của trục động cơ.

Mô men xoắn của động cơ DC truyền động cho bánh đà là:

$$T_m = aK_m i = aK_m \left[\frac{U - K_e \varphi}{R} \right], \quad (7)$$

Với K_m là hằng số mômen của động cơ,

K_e là hằng số sức điện động của động cơ,

R là điện trở của động cơ

Thay (7) vào (6) ta có:

$$I_2\ddot{\varphi} + I_1\ddot{\theta} = T_m = aK_m \left[\frac{U - K_e \dot{\varphi}}{R} \right]. \quad (8)$$

Phương trình (5) và (8) chính là hệ phương trình động học của hệ Rõ ràng với các phương trình động lực học trên thì **hệ là phi tuyến**.

Tuyển tính hóa mô hình và chuyển về dạng mô hình không gian trạng thái

Giả thiết rằng khi xe hoạt động thì góc nghiêng của xe rất nhỏ ($\theta < 10^\circ$), ta tuyển tính hóa phương trình (5) quanh điểm cân bằng ($\theta = \varphi = 0$, $\sin \theta = \theta$) thu được hệ phương trình sau:

$$\begin{aligned} (m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2)\theta + I_2\ddot{\varphi} \\ - g\theta.(m_1 h_1 + m_2 h_2) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$I_2\ddot{\varphi} + I_1\ddot{\theta} = T_m = aK_m \left[\frac{U - K_e \dot{\varphi}}{R} \right] \quad (10)$$

Đặt $A_1 = (m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2)$;

$$B_1 = (m_1 h_1 + m_2 h_2); x = \begin{bmatrix} \theta = x_1 \\ \dot{\theta} = x_2 \\ \dot{\varphi} = x_3 \end{bmatrix} \text{ là biến trạng}$$

thái, $y = \theta$, $u = U$

Từ đây ta có hệ phương trình trạng thái mô tả hệ như sau:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (11)$$

Với thông số của hệ như sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{B_1 g}{(A_1 - I_2)} & 0 & \frac{aK_m K_e}{R(A_1 - I_2)} \\ -\frac{B_1 g}{(A_1 - I_2)} & 0 & -aK_m K_e \frac{A_1}{I_2 R(A_1 - I_2)} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{aK_m}{R(A_1 - I_2)} \\ aK_m \frac{A_1}{I_2 R(A_1 - I_2)} \end{bmatrix}; C = [1 \ 0 \ 0], D = [0].$$

Các thông số danh định của xe hai bánh như sau: $I_1 = 0,1105 \text{ kg.m}^2$; $h_1 = 0,105 \text{ m}$; $a = 1$;

$$I_2 = 0,03289 \text{ Kg.m}^2; h_2 = 0,205 \text{ m},$$

$$m_1 = 10,024 \text{ kg}; m_2 = 3,976 \text{ kg};$$

$$K_e = 0,045 \text{ V.s/Rad}; K_m = 0,045 \text{ Nm/A},$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Thay số vào hệ phương trình (11) và chuyên mô hình xe sang dạng hàm truyền đạt ta có kết quả

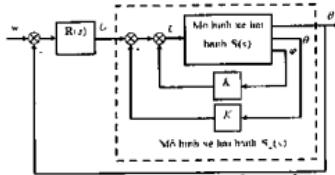
$$S(s) = \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{-0,223s}{s^3 + 0,1284s^2 - 47,2s - 5,589} \quad (12)$$

Nhận xét về mô hình xe hai bánh

Mô hình hóa xe hai bánh tự cân bằng cho thấy có một số tham số của xe hai bánh tự cân bằng là bất định như: khối lượng tải thay đổi dẫn tới chiều cao trọng tâm xe thay đổi, mô men quán tính của xe của biến đổi, động thời khi hoạt động xe hai bánh có thể chịu ảnh hưởng của các yếu tố bất định từ bên ngoài như: ngoại lực, nhiễu bất định do sự thay đổi của địa hình chuyển động, ... do đó mô hình xe hai bánh thực chất là một đối tượng bất định. Trong đó, nhóm tác giả quan tâm nhiều nhất đến tính bất định do sự biến đổi của khối lượng tải.

3. Thiết kế tối ưu RH_∞ cho bài toán cân bằng xe hai bánh

Để thiết kế hệ thống điều khiển bền vững cho xe hai bánh tự cân bằng, tác giả thực hiện theo sơ đồ cấu trúc điều khiển theo hình 3 như sau.



Hình 3 Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển bền vững xe hai bánh tự cân bằng

(*) Xây dựng mô hình xe hai bánh $S_m(s)$

Giả thiết rằng khi xe hoạt động thì góc nghiêng của xe rất nhỏ, ta tuyển tính hóa

phương trình (5) quanh điểm cân bằng ($\theta = \varphi = 0$, $\sin \theta = \theta$) thu được hệ phương trình sau:

$$(m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2) \ddot{\theta} + I_2 \varphi \quad (13)$$

$$-g \cdot \theta \cdot (m_1 h_1 + m_2 h_2) = 0$$

$$I_1 \ddot{\varphi} + I_2 \ddot{\theta} = T_m$$

$$= aK_m \left[\frac{U' - (K_e + K_i)\dot{\varphi} + K_2 \dot{\theta}}{R} \right] \quad (14)$$

$$\text{Đặt } A_1 = (m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2 + I_1 + I_2);$$

$$B_1 = (m_1 h_1 + m_2 h_2); x = \begin{bmatrix} \theta = x_1 \\ \dot{\theta} = x_2 \\ \dot{\varphi} = x_3 \end{bmatrix} \text{ là biến trạng}$$

thái, $y = \theta$, $u = U'$

Từ đây ta có hệ phương trình trạng thái mô tả hệ như sau:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (15)$$

$$y = Cx + Du$$

Với thông số của hệ như sau:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{B_1 g}{(A_1 - I_2)} & \frac{aK_m K_2}{R(A_1 - I_2)} & \frac{aK_m(K_e + K_i)}{R(A_1 - I_2)} \\ \frac{B_1 g}{(A_1 - I_2)} & -aK_m K_2 \frac{A_1}{I_2 R(A_1 - I_2)} & -aK_m(K_e + K_i) \frac{A_1}{I_2 R(A_1 - I_2)} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{aK_m}{R(A_1 - I_2)} \\ aK_m \frac{A_1}{I_2 R(A_1 - I_2)} \end{bmatrix}, C = [1 \ 0 \ 0], D = [0].$$

Lựa chọn thông số $K_1 = 2$, $K_2 = 5$ và thay các tham số trong bảng 1 vào hệ phương trình (15), sau đó chuyển mô hình xe sang dạng hÌnh truyền đạt ta có kết quả

$$S_u(s) = \frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{-0.223s}{s^3 + 4.722s^2 - 47.2s - 254} \quad (16)$$

Để thiết kế bộ điều khiển bền vững cho xe hai bánh tự cân bằng tác giả thực hiện theo các bước thiết kế bộ điều khiển bền vững RH₄ theo [4], kết quả thu được bộ điều khiển bền vững như sau:

$$R(s) = \frac{H(s)}{D(s)} \quad (17)$$

với

$$\begin{aligned} H(s) = & -2.23 \cdot 10^{-5} s^{10} - 4.67 \cdot 10^{-4} s^{29} - 0.266 s^{28} \\ & - 22.96 s^{27} - 1006 s^{26} - 2.853 \cdot 10^4 s^{25} - 5.837 \cdot 10^4 s^{24} \\ & - 9.144 \cdot 10^6 s^{23} - 1.139 \cdot 10^8 s^{22} - 1.158 \cdot 10^9 s^{21} \\ & - 9.776 \cdot 10^9 s^{20} - 6.949 \cdot 10^{10} s^{19} - 4.199 \cdot 10^{11} s^{18} \\ & - 2.172 \cdot 10^{12} s^{17} - 9.663 \cdot 10^{12} s^{16} - 3.71 \cdot 10^{13} s^{15} \\ & - 1.231 \cdot 10^{14} s^{14} - 3.53 \cdot 10^{14} s^{13} - 8.74 \cdot 10^{14} s^{12} \\ & - 1.862 \cdot 10^{15} s^{11} - 3.398 \cdot 10^{15} s^{10} - 5.276 \cdot 10^{15} s^9 \\ & - 6.903 \cdot 10^{15} s^8 - 7.511 \cdot 10^{15} s^7 - 6.676 \cdot 10^{15} s^6 \\ & - 4.721 \cdot 10^{15} s^5 - 2.556 \cdot 10^{14} s^4 - 9.953 \cdot 10^{14} s^3 \\ & - 2.482 \cdot 10^{14} s^2 - 2.977 \cdot 10^{13} s - 0.00439 \\ D(s) = & 4.971 \cdot 10^{-14} s^{30} + 2.032 \cdot 10^{-10} s^{29} \\ & + 2.663 \cdot 10^{-7} s^{28} + 1.221 \cdot 10^{-4} s^{27} + 9.72 \cdot 10^{-3} s^{26} \\ & + 0.3918 s^{25} + 10.14 s^{24} + 187.1 s^{23} + 2612 s^{22} \\ & + 2.862 \cdot 10^4 s^{21} + 1.088 \cdot 10^5 s^{18} + 2.523 \cdot 10^5 s^{20} \\ & + 1.82 \cdot 10^6 s^{19} + 5.428 \cdot 10^7 s^{17} + 2.273 \cdot 10^8 s^{16} \\ & + 8.005 \cdot 10^8 s^{15} + 2.372 \cdot 10^9 s^{14} + 5.9 \cdot 10^9 s^{13} \\ & + 1.225 \cdot 10^{10} s^{12} + 2.107 \cdot 10^{10} s^{11} + 2.962 \cdot 10^{10} s^{10} \\ & + 3.341 \cdot 10^{10} s^9 + 2.941 \cdot 10^{10} s^8 + 1.931 \cdot 10^{10} s^7 \\ & + 8.743 \cdot 10^9 s^6 + 2.286 \cdot 10^9 s^5 + 1.519 \cdot 10^8 s^4 \\ & - 5.226 \cdot 10^7 s^3 + 3.6 \cdot 10^{-8} s^2 + 5.32 \cdot 10^{-22} s \end{aligned}$$

Bộ điều khiển dù bậc có bậc 30 sẽ dẫn tới nhiều bất lợi khi chúng ta để thực hiện điều khiển cân bằng xe vì mã chương trình phức tạp làm thời gian xử lý sé tăng lên, tốc độ đáp ứng của hệ thống điều khiển bị chậm và không đáp ứng tốt yêu cầu về thời gian thực của bộ điều khiển và có thể làm hệ thống cân bằng mất ổn định. Chính vì vậy để nâng cao chất lượng bộ điều khiển này cần phải thực hiện giảm bậc bộ điều khiển để mã chương trình trở lên đơn giản hơn, giảm thời gian xử lý, tăng tốc độ đáp ứng mà vẫn thoả mãn được yêu cầu ổn định bền vững của hệ thống.

4. Thuật toán chặt cân bằng mở rộng

Hầu hết các thuật toán giảm bậc mô hình được công bố trên thế giới đều chỉ áp dụng cho các mô hình tuyến tính bậc cao ổn định (tức là các nghiệm của đa thức đặc trưng luôn có phần thực âm). Tuy nhiên trong thực tế, rất nhiều mô hình toán học bậc cao là mô hình không ổn định, như mô hình bộ điều khiển bậc cao trong mục 3 của bài báo này, vì thế thuật toán giảm bậc cần giám bậc được cho cả hệ tuyến tính không ổn định để có thể áp dụng thuật toán giám bậc cho mọi đối tượng của bài toán giám bậc (mô hình tuyến tính ổn định hoặc không ổn định).

Để thực hiện giảm bậc cho hệ không ổn định thì có hai phương pháp cơ bản: Phương pháp giảm bậc gián tiếp và phương pháp giảm bậc trực tiếp. Trong nội dung bài báo này, tác giả giới thiệu thuật toán chặt cân bằng mở rộng [8], đây là một thuật toán giám bậc áp dụng cho hệ không ổn định theo phương pháp giảm bậc trực tiếp. Nội dung cu thể của thuật toán như sau:

Đầu vào: Hệ (A, B, C) không ổn định được mô tả trong (15) có biểu diễn dạng hàm truyền là $G(s) := C(sI - A)^{-1}B$.

Bước 1: Xác định điểm cực α không ổn định lớn nhất của hệ (15). Đặt $\beta = \text{real}(\alpha) + \delta$, trong đó $\delta \in \mathbb{R}$ nhỏ tùy ý và $\delta > 0$.

Bước 2: Chuyển đổi hệ (A, B, C) thành hệ $G_\beta(s)$ ổn định theo hệ phương trình sau:

$$A_\beta = A - \beta I$$

$$B_\beta = B$$

$$C_\beta = C$$

Bước 3: Tính Grammian quan sát Q_β và Grammian điều khiển được P_β của hệ thống $(A_\beta, B_\beta, C_\beta)$ bằng cách giải hai phương trình Lyapunov sau: $A_\beta P_\beta + P_\beta A_\beta^\top = -B_\beta B_\beta^\top$, $A_\beta^\top Q_\beta + Q_\beta A_\beta = -C_\beta^\top C_\beta$.

Bước 4: Phân tích Cholesky ma trận $P_\beta = R_{\beta p} R_{\beta p}^\top$, với $R_{\beta p}$ là ma trận tam giác trên.

Bước 5: Phân tích Cholesky ma trận $Q_\beta = R_{\beta q} R_{\beta q}^\top$, với $R_{\beta q}$ là ma trận tam giác trên.

Bước 6: Phân tích SVD ma trận $R_{\beta p} R_{\beta p}^\top = U_\beta \Lambda_\beta V_\beta^\top$.

Bước 7: Tính ma trận T_β không suy biến

$$T_\beta^{-1} = R_{\beta p} V_\beta \Lambda_\beta^{-1/2}$$

Bước 8: Tính

$$(\hat{A}_\beta, \hat{B}_\beta, \hat{C}_\beta) = (T_\beta^{-1} A, T_\beta, T_\beta^{-1} B, C, T_\beta)$$

Bước 9: Chọn số bậc cần rút gọn r sao cho $r < n$.

Bước 10: Biểu diễn $(\hat{A}_\beta, \hat{B}_\beta, \hat{C}_\beta)$ ở dạng khối như sau:

$$\hat{A}_\beta = \begin{bmatrix} \hat{A}_{11,\beta} & \hat{A}_{12,\beta} \\ \hat{A}_{21,\beta} & \hat{A}_{22,\beta} \end{bmatrix}, \hat{B}_\beta = \begin{bmatrix} \hat{B}_{1,\beta} \\ \hat{B}_{2,\beta} \end{bmatrix}, \hat{C}_\beta = \begin{bmatrix} \hat{C}_{1,\beta} & \hat{C}_{2,\beta} \end{bmatrix},$$

trong đó $\hat{A}_{11,\beta} \in \mathbb{R}^{r \times r}$, $\hat{B}_{1,\beta} \in \mathbb{R}^{r \times p}$, $\hat{C}_{1,\beta} \in \mathbb{R}^{p \times 1}$

Ta thu được hệ giám bậc $(\hat{A}_1, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$ ổn định.

Bước 11: Chuyển đổi hệ $(\hat{A}_1, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$ ổn định về hệ ổn định $-\beta$ $(\hat{A}_1, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$ theo hệ phương trình sau.

$$\hat{A}_1 = \hat{A}_{11,\beta} - \beta I,$$

$$\hat{B}_1 = \hat{B}_{1,\beta},$$

$$\hat{C}_1 = \hat{C}_{1,\beta}.$$

Đầu ra: Hệ giám bậc $(\hat{A}_1, \hat{B}_1, \hat{C}_1)$

5. Ứng dụng thuật toán chặt cân bằng mở rộng cho bài toán điều khiển cân bằng xe hai bánh

5.1 Kết quả giám bậc bộ điều khiển cân bằng xe hai bánh

Bộ điều khiển H_2 dù bậc được thiết kế như (17), đó là bộ điều khiển bậc 30. Thực hiện giám bậc bộ điều khiển H_2 dù bậc theo thuật toán chặt cân bằng mở rộng trong mục 4, ta được kết quả theo bảng sau:

Bảng 1. Kết quả giám bậc bộ điều khiển bền vững bậc 30

Bậc	Mô hình hàm truyền $-R_1(s)$
5	$-4.485 \cdot 10^4 s^5 - 6.804 \cdot 10^3 s^4 - 4.123 \cdot 10^2 s^3 - 1.235 \cdot 10^1 s^2 - 1.816 \cdot 10^{-1} s - 1.99 \cdot 10^0$ $s^4 + 2000 s^3 - 1.833 \cdot 10^4 s^2 - (913 s^1 + 8.644 \cdot 10^{-2} s_0) \cdot 8.44 \cdot 10^{-1}$
4	$-4.485 \cdot 10^4 s^4 - 2.655 \cdot 10^3 s^3 - 1.191 \cdot 10^2 s^2 - 1.811 \cdot 10^1 s^1 - 1.182 \cdot 10^0$ $s^3 + 2000 s^2 - 203 \cdot 10^{-1} s - 0.1231 \times 0.003463$

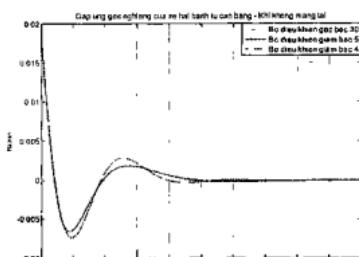
5.2 Sử dụng bộ điều khiển giám bậc 4, bậc 5 điều khiển cân bằng xe hai bánh

Sử dụng bộ điều khiển giám bậc 5 ở bảng 1 để điều khiển hệ thống cân bằng cho xe hai bánh có mô hình đối tượng điều khiển như (16). Sơ đồ mô phỏng hệ thống điều khiển xe hai bánh sử dụng bộ điều khiển gốc và các bộ điều khiển giám bậc được thể hiện trong hình 4 như sau:

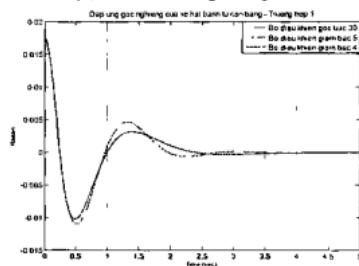


Hình 4. Sơ đồ Simulink hệ thống điều khiển xe hai bánh tư cân bằng.

Kết quả mô phỏng hệ thống điều khiển xe hai bánh tự cân bằng khi xe không mang tải và khi xe mang tải $m = 5 \text{ kg}$; ban đầu xe lệch khỏi phương thẳng đứng một góc $\theta = \frac{\pi}{180} (\text{rad})$ được thể hiện trong hình 5 như sau:



(a) Khi xe không mang tải



(b) Khi xe mang tải

Hình 5. Đáp ứng đầu ra của hệ thống điều khiển cân bằng xe hai bánh.

Nhận xét kết quả

Sử dụng bộ điều khiển giảm bậc 5, 4 theo thuật toán chất cân bằng mở rộng có thể điều khiển cân bằng cho mô hình xe hai bánh, trong đó đáp ứng đầu ra của bộ điều khiển giảm bậc 5 hoàn toàn trùng khớp với đáp ứng đầu ra của bộ điều khiển góc, đáp ứng đầu ra của bộ điều khiển giảm bậc 4 có sự sai khác so với đáp ứng của bộ điều khiển góc.

6. Kết luận

Bài báo đã xây dựng, mô hình hóa mô hình xe hai bánh tự cân bằng và thiết kế bộ điều khiển bền vững để điều khiển cân bằng xe hai bánh. Đồng thời, bài báo cũng giới thiệu thuật toán chất cân bằng mở rộng và áp dụng thành công thuật toán này để giảm bậc bộ điều khiển bền vững bậc cao trong bài toán điều khiển cân

bằng xe hai bánh, cụ thể là, thay thế bộ điều khiển bền vững bậc 30 bằng bộ điều khiển giảm bậc 5, bậc 4 mà chất lượng hệ thống điều khiển vẫn được đảm bảo. Sử dụng bộ điều khiển giảm bậc 5, bậc 4 sẽ giúp mã chương trình đơn giản hơn, tăng tốc độ tính toán, thời gian xử lý nhanh hơn và đảm bảo tính thời gian thực của hệ thống điều khiển xe hai bánh tự cân bằng. Các kết quả mô phỏng thể hiện tính đúng đắn của thuật toán giảm bậc và thuật toán điều khiển bền vững xe hai bánh tự cân bằng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Beznos A.V., Formalsky A.M., Gurinskij E.V., Jicharev D.N., Lensky A.V., Savitsky K.V., et al., *Control of autonomous motion of two-wheel bicycle with gyroscopic stabilization*, In: Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation 1998, p. 2670-5, 1998
- [2] Gallaspy J.M., *Gyroscopic stabilization of an unmanned bicycle*, M.S. Thesis, Auburn University, 1999.
- [3] Lee S, Ham W., *Self-stabilizing strategy in tracking control of unmanned electric bicycle with mass balance*, IEEE international conference on intelligent robots and systems 2002, p. 2200-5, 2002.
- [4] Nguyễn Doãn Phuoc, *Lý thuyết điều khiển nâng cao*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2009
- [5] Suprapto S., *Development of a gyroscopic unmanned bicycle*, M.Eng Thesis, Asian Institute of Technology, Thailand, 2006
- [6] Tanaka Y., Murakami T., *Self sustaining bicycle robot with steering controller*, In: Proceedings of international workshop on advanced motion control 2004, p. 193-7, 2004.
- [7] Thanh B.T, and Manukid Parnichkun, *Balancing control of Bicyrbo by particle swarm optimization based structure-specified mixed H_2/H_∞ control*, International Journal of Advanced Xeic Systems 2008; 5(4): 395- 402, 2008
- [8] Zilochian A., *Balanced Structures and Model Reduction of Unstable Systems*, IEEE Proceedings of Southcon '91, Vol 2, pp 1198 – 1201, 1991