

ỨNG DỤNG BỘ LỌC KALMAN MỞ RỘNG TRONG THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO PHẢN HỒI ĐẦU RA CHO ĐỐI TƯỢNG CON LẮC NGƯỢC QUAY (ROTARY INVERTED PENDULUM)

Hoàng Đức Quỳnh^{1*}, Nguyễn Văn Chí², Nguyễn Như Hiền², Nguyễn Doãn Phước³
¹Trường Cao đẳng Công nghệ và Kinh tế Công nghiệp
²Đại học Kỹ thuật Công nghiệp - ĐH Thái Nguyên
³Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Bài báo này giới thiệu phương pháp thiết kế bộ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách trong đó ứng dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) để quan sát trạng thái cho đối tượng con lắc ngược quay. Bộ điều khiển này được xây dựng thông qua cực tiểu hóa sai lệch giữa giá trị đặt và giá trị thực. Sự ảnh hưởng của các thành phần nhiễu tần số cao lên chất lượng điều khiển được giảm thiểu nhỏ nhất nhờ bộ lọc Kalman mở rộng. Mô hình phi tuyến của hệ con lắc ngược quay được sử dụng. Sau đó, các kết quả mô phỏng được đưa ra để minh họa cho bộ điều khiển đề xuất. Thí nghiệm trên hệ thống thực cũng được tiến hành để kiểm chứng và khẳng định chất lượng bám bền vững cao với nhiễu tần số cao (ồn trắng) của bộ điều khiển trong thực tế.

Từ khóa: Điều khiển dự báo phản hồi đầu ra, Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF), Con lắc ngược quay

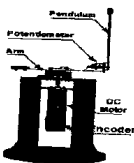
ĐẶT VẤN ĐỀ

Các phương pháp điều khiển dự báo phản hồi đầu ra được áp dụng nhiều trong thực tế vẫn chỉ dừng lại là điều khiển dự báo tuyến tính [3] lý do là vì phần lớn các kết quả nghiên cứu về điều khiển dự báo phi tuyến chỉ tập trung vào phản hồi trạng thái [5],[6]. Bởi vậy, việc ứng dụng trực tiếp vào những quá trình công nghiệp mà ở đó nhiều biến trạng thái không đo được là không thể.

Để có thể chuyển đổi được các bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái thành bộ điều khiển phản hồi đầu ra, một xu hướng rất tự nhiên là sử dụng thêm bộ quan sát trạng thái nhằm xác định xấp xỉ trạng thái của đối tượng điều khiển từ những giá trị tín hiệu đo được khác mà ở đây chính là các tín hiệu vào ra của đối tượng. Bài báo sẽ trình bày kết quả nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển dự báo phi tuyến phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách [2],[7] trong đó sử dụng bộ lọc Kalman làm bộ quan sát trạng thái hệ phi tuyến. Mô hình phi tuyến hệ thống con lắc ngược quay sẽ được sử dụng để thiết kế điều khiển cho đối tượng này.

MÔ HÌNH TOÁN HỆ THỐNG CON LẮC NGƯỢC QUAY

Mô hình vật lý hệ con lắc ngược quay được giới thiệu trên hình 1:



Hình 1. Mô hình vật lý hệ con lắc ngược quay

Hệ thống này bao gồm:

Cánh tay (Arm): gắn vào trục động cơ một chiều (DC motor) quay quanh trục thẳng đứng. Con lắc (Pendulum): là khớp quay tự do gắn vào trục của cảm biến góc quay (Potentiometer) ở đầu cánh tay, tự do trong mặt phẳng vuông góc với cánh tay. Con lắc không ổn định, nó luôn đổ xuống, trừ khi có lực tác động thích hợp vào cánh tay.

Hình 2 là sơ đồ vật lý tương đương của con lắc ngược quay. Từ mô hình vật lý này, người ta đã xây dựng được mô hình toán của nó có dạng như sau [8],[9]:

*Tel. 0982 235309, Email: hoangducquynh@gmail.com

$$\begin{pmatrix} J_0 - m_1 L_0^2 + m_1 l_1^2 \sin^2 \beta & m_1 L_0 l_1 \cos \beta \\ -(m_1 L_0 l_1 \cos \beta) & J_1 + m_1 l_1^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} C_0 - \frac{K_t K_b}{R_a} + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \beta \sin 2\beta & m_1 L_0 l_1 \beta \sin \beta + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \alpha \sin 2\beta \\ -(\frac{1}{2} m_1 l_1^2 \alpha \sin 2\beta) & C_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -m_1 g l_1 \sin \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_t K_u \\ R_a \\ 0 \end{pmatrix} u \quad (2)$$

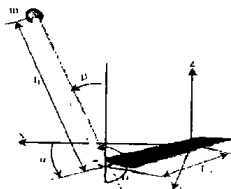
trong đó:

α (rad). Góc giữa cánh tay và trục x

β (rad) Góc quay của con lắc hướng lên,

u (PWM): Tín hiệu điều khiển động cơ.

Các tham số khác của mô hình giống như đã giới thiệu trong [8] và [9].



Hình 2: Mô hình tương đương hệ con lắc ngược quay

Đã biến trạng thái:

$$\underline{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [\alpha, \beta, \dot{\alpha}, \dot{\beta}]^T$$

Biến đổi mô hình (2) về dạng song tuyến (bilinear):

$$\begin{cases} \frac{d\underline{x}}{dt} = \tilde{A}(\underline{x})\underline{x} + \tilde{B}(\underline{x})u \\ \underline{y} = \tau_3 = \tilde{C}(\underline{x})\underline{x} + \tilde{D}(\underline{x})u \end{cases} \quad (3)$$

Với:

$$k_1 = (J_0 + m_1 L_0^2 + m_1 l_1^2 \sin^2 x_3), k_2 = (m_1 L_0 l_1 \cos x_3),$$

$$k_3 = (C_0 + \frac{K_t K_b}{R_a} + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 x_4 \sin 2x_3),$$

$$k_4 = (m_1 L_0 l_1 x_4 \sin x_3 + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 x_2 \sin 2x_3),$$

$$k_5 = \frac{K_t K_u}{R_a}, k_6 = (J_1 + m_1 l_1^2), k_7 = (\frac{1}{2} m_1 l_1^2 x_2 \sin 2x_3),$$

$$k_8 = C_1, k_9 = m_1 g l_1 \sin x_3$$

$$K_1 = \frac{k_2 k_7 - k_6 k_3}{(k_1 k_6 - k_2^2)}, K_2 = \frac{k_2 k_8 + k_6 k_4}{(k_1 k_6 - k_2^2)}, K_3 = -\frac{k_2 k_9}{(k_1 k_6 - k_2^2)},$$

$$K_4 = -\frac{k_6 k_5}{(k_1 k_6 - k_2^2)}, K_5 = \frac{k_2 (k_2 k_7 - k_6 k_3) + k_7 (k_1 k_6 - k_2^2)}{k_6 (k_1 k_6 - k_2^2)},$$

$$K_6 = \frac{k_2 (k_2 k_8 + k_6 k_4) + k_8 (k_1 k_6 - k_2^2)}{k_6 (k_1 k_6 - k_2^2)},$$

$$K_7 = \frac{k_2^2 k_9 + k_9 (k_1 k_6 - k_2^2)}{k_6 (k_1 k_6 - k_2^2)}, K_8 = \frac{k_2 k_6 k_5}{k_6 (k_1 k_6 - k_2^2)}$$

$$\tilde{A}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & K_1 + K_3/x_2 & -K_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_5 + K_7/x_2 & -K_6 & 0 \end{pmatrix}, \tilde{B}(\underline{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ K_4 \\ 0 \\ K_8 \end{pmatrix}$$

$$\tilde{C}(\underline{x}) = (0 \quad 0), \tilde{D}(\underline{x}) = 0$$

Đầu ra ở đây được chọn là vị trí góc lắc β

Lương tử hóa mô hình liên tục trên theo thời gian với chu kỳ trích mẫu T_a chọn trước, ta sẽ được mô hình không liên tục tương ứng:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + D(\underline{x}_k)\underline{u}_k \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{với: } A(\underline{x}_k) = I + T_a \tilde{A}(\underline{x}_k), B(\underline{x}_k, \underline{u}_k) = T_a \tilde{B}(\underline{x}_k), C(\underline{x}_k) = \tilde{C}(\underline{x}_k)$$

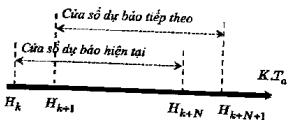
Với mô hình toán đã được biến đổi về dạng song tuyến theo trạng thái dạng không liên tục như (4), tiếp theo, ta sẽ tiến hành thiết kế bộ điều khiển phản hồi đầu ra cho đối tượng con lắc ngược quay

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Thiết kế bộ điều khiển phản hồi trạng thái

Ở phương pháp thiết kế điều khiển dự báo để xuất này, ta không sử dụng trực tiếp mô hình phi tuyến (hay song tuyến) của đối tượng làm mô hình dự báo mà sẽ thực hiện tuyến tính

hóa từng đoạn hệ phi tuyến (hay song tuyến) dọc theo trục thời gian và sẽ được thực hiện đồng thời cùng với bước dịch chuyển của cửa sổ dự báo có độ rộng hữu hạn như minh họa ở hình H3, trong đó H_k là các mô hình tuyến tính được sử dụng để dự báo tín hiệu đầu ra \underline{y}_{k+i} , cho hệ phi tuyến thuộc cửa sổ dự báo hiện tại $[k, k+N]$, tức là với $0 \leq i \leq N$.



Hình 3. Nguyên lý điều khiển dự báo phản hồi trạng thái phi tuyến trên cơ sở tuyến tính hóa từng đoạn mô hình dự báo

Với bài toán điều khiển phản hồi trạng thái, tức là với giả thiết trạng thái \underline{x}_k ở thời điểm $t = kT_0$ là đã biết, hệ (4) cũng ở thời điểm đó sẽ trở thành:

$$H_k: \begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k \underline{x}_k + B_k \underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C_k \underline{x}_k + D_k \underline{u}_k \end{cases} \quad (5)$$

trong đó:

$$\begin{aligned} A_k &= A(\underline{x}_k, k), \quad B_k = B(\underline{x}_k, k), \\ C_k &= C(\underline{x}_k, k), \quad D_k = D(\underline{x}_k, k) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

lúc này trở thành các ma trận hằng. Ta sẽ sử dụng mô hình tuyến tính (5) này để dự báo các tín hiệu ra \underline{y}_{k+i} thuộc cửa sổ dự báo hiện tại.

$$\begin{aligned} \underline{x}_{k+i} &= A_k^i \underline{x}_k + A_k^{i-1} B_k \underline{u}_k + \dots + A_k B_k \underline{u}_{k+i-2} + B_k \underline{u}_{k+i-1} \\ \underline{y}_{k+i} &= C_k A_k^i \underline{x}_k + C_k A_k^{i-1} B_k \underline{u}_k + \dots + \\ & C_k A_k B_k \underline{u}_{k+i-2} + C_k B_k \underline{u}_{k+i-1} + D_k \underline{u}_{k+i} \end{aligned}$$

$$\text{Ký hiệu: } \underline{p} = \text{col}(\underline{u}_k, \underline{u}_{k+1}, \dots, \underline{u}_{k+N}) \quad (7)$$

thì toàn bộ giá trị đầu ra dự báo \underline{y}_{k+i} , $0 \leq i \leq N$ sẽ được viết chung lại thành:

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} \underline{y}_k \\ \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_k \\ C_k A_k \\ \vdots \\ C_k A_k^N \end{pmatrix} \underline{x}_k +$$

$$+ \begin{pmatrix} D_k & \Theta & \dots & \Theta & \Theta \\ C_k B_k & D_k & \dots & \Theta & \Theta \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_k A_k^{N-1} B_k & C_k A_k^{N-2} B_k & \dots & C_k B_k & D_k \end{pmatrix} \underline{p} = E \underline{x}_k + F \underline{p} \quad (8)$$

trong đó Θ là ký hiệu của ma trận có tất cả các phần tử bằng 0.

Do \underline{x}_k là đã biết nên \underline{y} trong (8) chỉ còn là hàm phụ thuộc \underline{p} trong đó chứa \underline{u}_k . Để xác định tín hiệu đầu vào \underline{u}_k ở thời điểm hiện tại $t = kT_0$ sao cho hệ bám theo được tín hiệu ra mẫu $\{\underline{w}_k\}$, ta xây dựng hàm sai lệch bám trong toàn bộ cửa sổ dự báo hiện tại như sau:

$$\underline{e} = \begin{pmatrix} \underline{w}_k \\ \underline{w}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} \end{pmatrix} - \underline{y} = \begin{pmatrix} \underline{w}_k \\ \underline{w}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} \end{pmatrix} - E \underline{x}_k - F \underline{p} = \underline{z} - F \underline{p}$$

$$\text{với } \underline{z} = \begin{pmatrix} \underline{w}_k \\ \underline{w}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{w}_{k+N} \end{pmatrix} - E \underline{x}_k \quad (9)$$

là một vector đã biết.

Từ đây, với mục đích cực tiểu hóa hàm mục tiêu về sai lệch dự báo:

$$\begin{aligned} J(\underline{p}) &= \underline{e}^T \Lambda_k \underline{e} + \underline{p}^T L_k \underline{p} \\ &= (\underline{z} - F \underline{p})^T \Lambda_k (\underline{z} - F \underline{p}) + \underline{p}^T L_k \underline{p} \\ &= \underline{z}^T \Lambda_k \underline{z} - 2 \underline{z}^T \Lambda_k F \underline{p} + \\ & \quad \underline{p}^T (F^T \Lambda_k F + L_k) \underline{p} \rightarrow \min \end{aligned}$$

$$J'(\underline{p}) = -2 \underline{z}^T \Lambda_k F \underline{p} + \underline{p}^T (F^T \Lambda_k F + L_k) \underline{p} \rightarrow \min \underline{p}$$

có hai ma trận trọng số Λ_k , L_k đối xứng xác định dương là tùy chọn, ta sẽ có được nghiệm tối ưu cho trường hợp không có ràng buộc $\underline{u}_k \in U$ như sau [1]:

$$\underline{p}^* = (F^T \Lambda_k F + I_k)^{-1} F^T \Lambda_k z$$

Suy ra tín hiệu điều khiển \underline{u}_k , cần tìm ở thời điểm hiện tại $t = kT_c$ sẽ là:

$$\underline{u}_k = (I \quad \Theta) \underline{p}^* - (I, \Theta) \left(F^T \Lambda_k F - L_k \right)^{-1} F^T \Lambda_k z \quad (10)$$

Thiết kế bộ quan sát trạng thái Kalman mở rộng (EKF)

Lọc Kalman mở rộng, viết tắt là EKF, được hiểu là những ứng dụng của lọc Kalman tuyến tính (KF) vào hệ phi tuyến không liên tục, mô tả bởi

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} & f_k(\underline{x}_k, \underline{u}_k) + \underline{\varepsilon}_k \\ \underline{y}_k & g_k(\underline{x}_k, \underline{u}_k) + \underline{z}_k, \quad k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (11)$$

Đã có nhiều tài liệu nghiên cứu để ứng dụng lọc Kalman cho hệ phi tuyến và cũng có rất nhiều phiên bản khác nhau của EKF sử dụng các phương pháp tuyến tính hóa khác nhau như tuyến tính hóa như phép đổi biến vi phân, tuyến tính hóa xung quanh quỹ đạo tiền định, tuyến tính hóa các bước tính bên trong của KF. Sau đây, bài báo sẽ giới thiệu 1 bộ quan sát EKF sử dụng phương pháp tuyến tính hóa các bước tính bên trong của KF theo các tài liệu [1], [10], [11] và được cụ thể hóa bằng các bước của thuật toán như sau:

Định nghĩa hai giá trị cân trái $\underline{x}_k(-)$ và phải $\underline{x}_k(+)$ cho giá trị thực \underline{x}_k như sau

$$\begin{aligned} \underline{x}_k(-) &= f_k(\underline{x}_{k-1}(+), \underline{u}_{k-1}) \\ \underline{x}_k(+) &= \underline{x}_k(-) + K_k \left[y_k - g_k(\underline{x}_k(-), \underline{u}_k) \right] \end{aligned}$$

$\underline{\varepsilon}_k, \underline{z}_k$ là các nhiễu phân bố chuẩn, có kỳ vọng bằng 0 (nhiều Gauss).

Sai lệch theo giá trị cân phải và trái

$$\underline{\varepsilon}_k(-) = \underline{x}_k(+) - \underline{x}_k, \quad \underline{\varepsilon}_k(+) = \underline{x}_k(-) - \underline{x}_k$$

Giá trị hỗ tương quan cân trái và phải của sai lệch.

$$P_k(+)- = V \left\{ \underline{\varepsilon}_k(+)\underline{\varepsilon}_k^T(+), P_k(-) = V \left\{ \underline{\varepsilon}_k(-)\underline{\varepsilon}_k^T(-) \right\} \right.$$

$M\{\}$ là ký hiệu phép tính lấy kỳ vọng

Thuật toán: Quan sát trạng thái hệ phi tuyến bằng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF)

1) Tùy chọn điều kiện đầu $\underline{x}_0 = \underline{x}_0(+)$ và $P_0(+)$ Gán $k=1$

2) Tính $\underline{x}_k(-) = f_k(\underline{x}_{k-1}(+), \underline{u}_{k-1})$

$$G_k = \frac{\partial y_k(\underline{x}_k, \underline{u}_k)}{\partial \underline{x}_k} \Bigg|_{\underline{x}_k = \underline{x}_k(-)}, \quad F_k = \frac{\partial f_k(\underline{x}_{k-1}, \underline{u}_{k-1})}{\partial \underline{x}_{k-1}} \Bigg|_{\underline{x}_{k-1} = \underline{x}_{k-1}(+)}$$

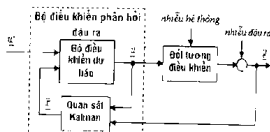
$$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + \Psi_{k-1}$$

$$K_k = P_k(-) G_k^T (G_k P_k(-) G_k^T + \Phi_k)^{-1}$$

$$P_k(+) = (I - K_k G_k) P_k(-)$$

$$\underline{x}_k(+) = \underline{x}_k(-) + K_k (y_k - G_k \underline{x}_k(-))$$

3) Xuất $\underline{x}_k = \underline{x}_k(+)$ là giá trị trạng thái quan sát được của hệ (11) ở thời điểm k Gán $k = k+1$ và quay về 2



Hình 4. Cấu trúc hệ điều khiển phản hồi đầu ra theo nguyên lý tích

Kết hợp giữa bộ điều khiển dự báo phản hồi trạng thái với bộ lọc Kalman mở rộng đã thiết kế, ta sẽ có được bộ điều khiển dự báo phản hồi đầu ra bám theo giá trị đặt như mô tả trong hình 4. Tiếp theo, ta sẽ tiến hành mô phỏng theo để đánh giá chất lượng của bộ điều khiển. Trạng thái quan sát được sẽ được đưa tới bộ điều khiển phản hồi trạng thái.

KẾT QUẢ MÔ PHỎNG CHO ĐỐI TƯỢNG CON LẮC NGƯỢC QUAY

Sử dụng bộ các tham số vật lý sau cho hệ thống (theo tài liệu [4], [9]) để thực hiện mô phỏng:

$$m_1 = 0,0319(\text{kg}), \quad l_1 = 0,1572(\text{m}),$$

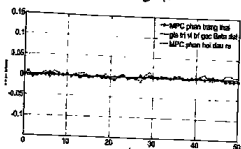
$$K_a = 0,0636, \quad K_1 = 0,0706, \quad K_b = 0,0707,$$

$$R_a = 0,9, \quad L_0 = 0,0312, \quad J_0 = 0,008591,$$

$$C_0 = 0,006408, \quad J_1 = 0,000217, \quad C_1 = 0,000158$$

Hình 5 biểu diễn kết quả mô phỏng bộ điều khiển phản hồi đầu ra cho hệ con lắc ngược quay. Nó cho thấy việc sử dụng thêm bộ quan sát trạng thái EKF gần như không làm thay đổi chất lượng bám giá trị đặt của bộ điều

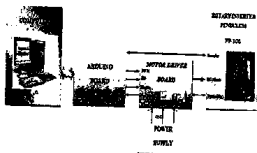
hiển phân hồi trạng thái, tức là bộ điều khiển dự báo phân hồi đầu ra cũng đã kháng được tốt nhiễu ồn trắng có trong hệ.



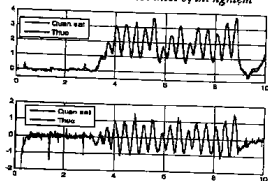
Hình 5: Kết quả mô phỏng bộ điều khiển phân hồi đầu ra so sánh với bộ điều khiển MPC phân hồi trạng thái

KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

Tiếp tục kiểm chứng kết quả trên hệ thống thí nghiệm con lắc ngược quay, với sơ đồ kết nối như trên hình 6.



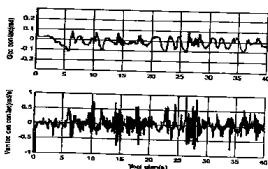
Hình 6: Sơ đồ kết nối thiết bị thí nghiệm



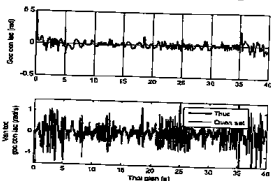
Hình 7: Vận tốc cánh tay và vận tốc con lắc thực và quan sát tại vị trí phía trên

Các kết quả quan sát trạng thái (vận tốc cánh tay và vận tốc con lắc) được thể hiện trên hình 7, kết quả khi sử dụng bộ điều khiển phân hồi trạng thái và bộ điều khiển phân hồi đầu ra để ổn định hệ con lắc ngược quay ở vị trí phía trên được thể hiện trong các hình 8 và

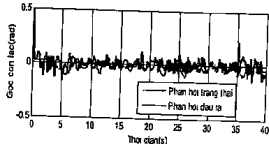
hình 9. Kết quả so sánh được thể hiện trên hình 10.



Hình 8: Góc và vận tốc của con lắc khi điều khiển bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái



Hình 9: Góc và vận tốc của con lắc khi điều khiển bằng bộ điều khiển dự báo phân hồi đầu ra



Hình 10: So sánh góc con lắc được điều khiển trong hai trường hợp phân hồi đầu ra và phân hồi trạng thái

Nhận xét: Kết quả quan sát trạng thái trên hình 7 cho thấy các trạng thái quan sát được hoàn toàn trùng khớp với các trạng thái thực của đối tượng. Các bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái và dự báo phân hồi đầu ra đều được kiểm chứng và thể hiện kết quả điều khiển ổn định vị trí góc lắc trên các hình 8 và 9, vị trí con lắc được điều khiển bám theo giá trị đặt là góc lắc bằng 0. Hình 10 cho ta kết quả so sánh về chất lượng làm việc giữa hai

bộ điều khiển, bộ điều khiển dự báo phân hồi đầu ra đã cho chất lượng điều khiển tương đương như bộ điều khiển phân hồi trạng thái

KẾT LUẬN

Bài báo đã thực hiện thiết kế bộ điều khiển phân hồi đầu ra theo nguyên lý tách trong đó ứng dụng bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) để quan sát trạng thái cho đối tượng con lắc ngược quay. Mô hình phi tuyến của con lắc ngược quay đã được biến đổi thành dạng mô hình song tuyến không liên tục để sử dụng làm mô hình dự báo trong bộ điều khiển. Tín hiệu điều khiển được tính toán thông qua thông qua cực tiểu hóa sai lệch hàm giữa giá trị đặt và giá trị thực. Bộ lọc Kalman mở rộng (EKF) làm việc trên cơ sở tuyến tính hóa các bước tính bên trong của bộ lọc Kalman tuyến tính (KF) được sử dụng để quan sát trạng thái cho đối tượng đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của các thành phần nhiễu tần số cao lên chất lượng điều khiển. Các kết quả mô phỏng và thí nghiệm kiểm chứng đã cho thấy chất lượng tương đương với bộ điều khiển dự báo phân hồi trạng thái và tính ứng dụng cao của bộ điều khiển dự báo phân hồi đầu ra vào thực tế, đồng thời cũng đã khẳng định chất lượng bám bền vững cao với nhiễu tần số cao (ôn trắng) của bộ điều khiển trong thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Phước, N.D (2015) *Tối ưu hóa trong điều khiển và điều khiển tối ưu*. Nhà Xuất Bản Khoa Học Kỹ Thuật

2. Phước, N.D (2012); *Phân tích và điều khiển hệ phi tuyến* NXB Bách Khoa Hà Nội

3. Camacho, E and Bordons, C (1999) *Model predictive control* Springer

4. Đăng Trung Dũng, (2014); " *Ứng dụng 11 mạch điện tử Andruino Mega trong cài đặt thuật toán điều khiển ổn định vị trí con lắc ngược quay*" Luận văn thạc sĩ kỹ thuật. Trường ĐH KTCN - ĐHTN

5. Findeisen, R., Insländ, L., Allgower, F and Foss, B. A. (2003) *States and output feedback nonlinear model predictive control. An Overview* European Journal of Control, Vol.9, pp.179-195.

6. Grüne, L and Pannek, J. (2010) *Nonlinear model predictive control Theory and Algorithms* Springer.

7. Findeisen, R., Insländ, L.; Allgower, F and Foss, B. A. (2003). *States and output feedback nonlinear model predictive control. An Overview* European Journal of Control, Vol.9, pp 179-195

8. K Futura, M Yamakita (1992) "Swing up control of inverted pendulum using pseudo-state feedback", Proc Instn Mech Engs, Vol 206

9. Tan Kok Chye, Teo Chun Sang (1998/99); "Rotary Inverted Pendulum" School of electrical and electronic engineering, Nanyang Technological University

10. Kumar, E V and Jerome, J (2013). *Robust LQR Controller Design for Stabilizing and Trajectory tracking of Inverted Pendulum* Procedia Engineering, Vol 64, pp.169-178

11. Rudolph van der Merwe, Alex T. Nelson, Eric Wan. "An Introduction to Kalman Filtering" OGI School of Science & Engineering lecture Oregon Health & Sciences University November 2004.