

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN TỐC ĐỘ BẰNG TÀI SỬ DỤNG ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI MÔ HÌNH THAM CHIẾU HIỆU CHỈNH VỚI TOÁN TỬ THAM CHIẾU

Phạm Thế Duy*, Nguyễn Huy Hùng#

*Khoa Kỹ Thuật Điện Tử 2, Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

#Khoa Điện Tử Viễn Thông, Đại Học Sài Gòn

Tóm tắt: Bài báo đề xuất phương pháp giảm ảnh hưởng của nhiễu biên độ giới hạn bằng toán tử tham chiếu, cho bộ điều khiển tốc độ bằng tài sử dụng điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu hiệu chỉnh. Ngoài ra, bài báo cũng trình bày việc xem xét về ảnh hưởng của các tham số: sai số trạng thái, độ lợi sai số hồi tiếp, độ lợi thích nghi, và việc chọn độ lợi sai số hồi tiếp thích hợp tăng khả năng bám tốc độ của hệ thống. Bài báo cũng tiến hành các mô phỏng và thực nghiệm, để so sánh kiểm chứng hiệu quả của việc giảm ảnh hưởng của nhiễu biên độ giới hạn của bộ điều khiển mới.¹

Từ khóa: Điều khiển thích nghi mô hình chuẩn, điều khiển bền vững, mô hình hóa bằng tài, ngõ vào bão hòa, điều khiển tốc độ, điều khiển bằng tài, toán tử tham chiếu.

I. MỞ ĐẦU

Bằng tài là một hệ thống được sử dụng rất nhiều trong các nhà máy công nghiệp, bài toán điều khiển tốc độ bằng tài với các thuật toán khác nhau đã được nghiên cứu và công bố trên các tạp chí hội thảo khoa học trong và ngoài nước. Khi mô hình hóa hệ thống bằng tài, để tính toán áp dụng các lý thuyết điều khiển, sẽ có các tham số không thể xác định chính xác như: hệ số ma sát, hệ số co giãn của băng tải, lực căng.... Vì vậy, để điều khiển tốc độ bằng tài tốt có thể sử dụng thuật toán điều khiển thích nghi, với ưu điểm cực kỳ quan trọng là có khả năng điều khiển các hệ thống, mà không cần biết chính xác một số thông số [2, 3]. Trong lĩnh vực điều khiển thích nghi, thì điều khiển thích nghi dựa theo mô hình tham chiếu (Model Reference Adaptive Controller: MRAC), là một trong những hướng nghiên cứu phổ biến [4–6].

Mặc dù bộ điều khiển MRAC [13] có thể bám tốt theo tín hiệu tham chiếu ở ngõ vào, nhưng trong thời gian quá độ thì khả năng bám của nó kém, vì trong thời gian này bộ điều khiển phải ước lượng các thông số không xác định. Tốc độ ước lượng được định nghĩa là tốc độ thích nghi.

Nếu tăng tốc độ thích nghi, thì khả năng bám trong thời gian quá độ được cải thiện, tuy nhiên điều này lại tạo

ra thành phần tần số cao trong tín hiệu điều khiển, ảnh hưởng đến độ ổn định của hệ thống [7].

Trong các hệ thống kỹ thuật, vấn đề ngõ vào điều khiển bị bão hòa thường xuyên gặp phải, và nó được xem như là một trong những nguyên nhân dẫn đến chất lượng điều khiển bị giảm, thậm chí dẫn đến mất ổn định [8, 9]. Vì vậy, vấn đề bão hòa ở ngõ vào của tín hiệu điều khiển, cũng cần được xem xét trong quá trình thiết kế bộ điều khiển.

Ngoài ra các thông số ước lượng trong luật điều khiển, sẽ bị trôi dần dần nếu có ảnh hưởng của nhiễu có biên độ giới hạn. Một số kỹ thuật [10] được sử dụng để giải quyết vấn đề này, như là e-modification, σ -modification hay toán tử tham chiếu (projection operator).

Để loại bỏ các dao động tần số cao trong tín hiệu điều khiển ngõ vào, đồng thời cũng giảm bớt ảnh hưởng của nhiễu có biên độ giới hạn, và tăng chất lượng điều khiển ở trạng thái ngõ vào bão hòa, có thể hiệu chỉnh bộ điều khiển MRAC bằng cách thêm vào vec tơ sai lệch trạng thái và độ lợi sai lệch hồi tiếp [11], tạo thành bộ điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu hiệu chỉnh (Modified-Model Reference Adaptive Controller: M-MRAC) [14]. Bộ điều khiển M-MRAC hiệu quả hơn so với điều khiển MRAC truyền thống (Conventional Model Reference Adaptive Controller: CMRAC) về khả năng bám tốc độ, ở cả hai trạng thái quá độ và tiệm cận ổn định. Các thành phần tần số cao trong các ngõ vào điều khiển của hệ thống M-MRAC, được giảm khi tăng hệ số thích nghi [14]. Tuy nhiên, khi tăng độ lợi sai số hồi tiếp sẽ làm giảm các thành phần tần số cao không mong muốn, nhưng khi tăng độ lợi sai số hồi tiếp tới một mức độ nào đó, thì sai số bám giữa ngõ ra bộ điều khiển tham chiếu và ngõ vào tham chiếu cũng cao.

Trong bài báo này đề xuất một bộ điều khiển tốc độ bằng tài sử dụng toán tử tham chiếu, để giảm ảnh hưởng của nhiễu biên độ giới hạn. Ngoài ra, các hạn chế của vec tơ sai số trạng thái, độ lợi sai số hồi tiếp và độ lợi thích nghi cũng được xử lý, bằng cách chọn độ lợi sai số hồi tiếp thích hợp. Bài báo cũng đưa ra các kết quả mô phỏng và thực nghiệm, để đánh giá về hiệu quả của bộ điều khiển đề nghị. Các thực nghiệm được chạy trên hệ thống ba băng tải thực, trong phòng thí nghiệm thuộc khoa Kỹ Thuật Thiết Kế Cơ Khí, đại học quốc gia Pukyong, Busan- Hàn quốc. Phòng thí nghiệm ứng dụng điện - điện tử, khoa Kỹ Thuật Điện Tử 2, học viện Công Nghệ Bưu

Tác giả liên hệ: Phạm Thế Duy

Email: ptduy2011@gmail.com

Đến tòa soạn: 10/2019, chỉnh sửa 12/2019, chấp nhận đăng 12/2019

Chính Viễn Thông. Và ứng dụng cho hệ thống cân bằng tải tự động nhà máy xi măng Insee Việt nam.

II. TOÁN TỬ THAM CHIẾU VÀ CÁC TÍNH CHẤT

Định nghĩa 1: Một tập $E \in \mathfrak{R}^k$ là tập lồi nếu thỏa điều kiện sau:

$$\alpha x + (1-\alpha)y \in E \quad (1)$$

Với $x, y \in E$ và $0 \leq \alpha \leq 1$

Lưu ý: Tính chất trong một tập lồi là nếu hai điểm x, y bất kỳ thuộc một tập lồi E , thì tất cả các điểm trên đường thẳng nối giữa x và y cũng thuộc tập lồi E .

Định nghĩa 2: Nếu một hàm $\mathfrak{R}^k \rightarrow \mathfrak{R}$ là lồi nếu:

$$f(\alpha x + (1-\alpha)y) \leq \alpha f(x) + (1-\alpha)f(y) \quad (2)$$

Với $0 \leq \alpha \leq 1$

Bổ đề 1: Nếu $f(\theta): \mathfrak{R}^k \rightarrow \mathfrak{R}$ là một hàm lồi thì $O_\delta = \{\theta \in \mathfrak{R}^k \mid f(\theta) \leq \delta\}$ cũng là một hàm lồi với hằng số bất kỳ $\delta > 0$.

Chứng minh bổ đề 1: Với $\theta_1, \theta_2 \in O_\delta, f(\theta_1) \leq \delta$ và $f(\theta_2) \leq \delta$. Do $f(\theta)$ là một hàm lồi nên từ định nghĩa (2) sẽ có:

$$\begin{aligned} f(\underbrace{\alpha\theta_1 + (1-\alpha)\theta_2}_{\theta}) &\leq \underbrace{\alpha f(\theta_1)}_{\leq \delta} + (1-\alpha) \underbrace{f(\theta_2)}_{\leq \delta} \\ f(\theta) &\leq \alpha\delta + (1-\alpha)\delta = \delta \end{aligned} \quad (3)$$

Vì $f(\theta) \leq \delta$, nghĩa là θ thuộc tập $O_\delta (\theta \in O_\delta)$, nên từ định nghĩa 1 có thể kết luận O_δ là tập lồi.

Bổ đề 2: Với $f(\theta): \mathfrak{R}^k \rightarrow \mathfrak{R}$ là một hàm lồi đạo hàm liên tục. Chọn một hằng số $\delta > 0$ và xem xét $O_\delta = \{\theta \in \mathfrak{R}^n \mid f(\theta) \leq \delta\} \subset \mathfrak{R}$. Với θ^* là một điểm trong O_δ , nghĩa là $f(\theta^*) \leq \delta$. Chọn θ_b là một điểm tại biên vì thế $f(\theta_b) = \delta$. Với điều kiện sau:

$$(\theta^* - \theta_b)^T \nabla f(\theta_b) \leq 0 \quad (4)$$

$$\text{Với } \nabla f(\theta_b) = \left[\frac{\partial f(\theta_b)}{\partial \theta_{b1}} \quad \frac{\partial f(\theta_b)}{\partial \theta_{b2}} \quad \dots \quad \frac{\partial f(\theta_b)}{\partial \theta_{bn}} \right]^T$$

Chứng minh bổ đề 2: $f(\theta)$ là một hàm lồi, từ phương trình (3) cho $\theta_1 = \theta^*$ và $\theta_2 = \theta_b$ sẽ thu được phương trình sau:

$$f(\alpha\theta^* + (1-\alpha)\theta_b) \leq \alpha f(\theta^*) + (1-\alpha)f(\theta_b) \quad (5)$$

Tương đương:

$$f(\theta_b + \alpha(\theta^* - \theta_b)) \leq f(\theta_b) + \alpha(f(\theta^*) - f(\theta_b)) \quad (6)$$

Với bất kỳ $0 < \alpha \leq 1$, $f(\theta^*) < \delta$ và $f(\theta_b) = \delta$ từ giả thiết bổ đề 2 và bất phương trình (6) sẽ được:

$$\frac{f(\theta_b + \alpha(\theta^* - \theta_b)) - f(\theta_b)}{\alpha} \leq f(\theta^*) - f(\theta_b) \leq \delta - \delta = 0 \quad (7)$$

Với θ được định nghĩa như sau:

$$\theta = \alpha\theta^* + (1-\alpha)\theta_b = \theta_b + \alpha(\theta^* - \theta_b) \quad (8)$$

Từ phương trình (8) thu được α như sau:

$$\alpha = \frac{\theta - \theta_b}{\theta^* - \theta_b} \quad (9)$$

Từ phương trình (7) lấy giới hạn với $\alpha \rightarrow 0$ và $\theta \rightarrow \theta_b$

$$\begin{aligned} \lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{f(\theta) - f(\theta_b)}{\alpha} &\leq 0 \\ \Rightarrow \lim_{\theta \rightarrow \theta_b} \frac{f(\theta) - f(\theta_b)}{\frac{\theta - \theta_b}{\theta^* - \theta_b}} &\leq 0 \\ \Rightarrow \lim_{\theta \rightarrow \theta_b} (\theta^* - \theta_b)^T \frac{f(\theta) - f(\theta_b)}{\theta^* - \theta_b} &\leq 0 \quad (10) \\ \Rightarrow (\theta^* - \theta_b)^T \lim_{\theta \rightarrow \theta_b} \frac{f(\theta) - f(\theta_b)}{\theta^* - \theta_b} &\leq 0 \\ \Rightarrow (\theta^* - \theta_b)^T \nabla f(\theta_b) &\leq 0 \end{aligned}$$

Định nghĩa 3: Một toán tử tham chiếu cho hai véc tơ $\theta_j, y_j \in \mathfrak{R}^n$ được định nghĩa như sau:

$$\text{Proj}(y_j, \theta_j, f_j) = \begin{cases} y_j - \frac{\nabla f_j(\theta_j)(\nabla f_j(\theta_j))^T}{\|\nabla f_j(\theta_j)\|^2} y_j f_j(\theta_j) & \text{khi } f_j(\theta_j) > 0 \wedge (\nabla f_j(\theta_j))^T y_j > 0 \\ y_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11) \quad \text{với}$$

$$\nabla f_j(\theta_j) = \left[\frac{\partial f_j(\theta_j)}{\partial \theta_{j1}} \quad \frac{\partial f_j(\theta_j)}{\partial \theta_{j2}} \quad \dots \quad \frac{\partial f_j(\theta_j)}{\partial \theta_{jn}} \right]^T, \wedge \text{ là toán tử}$$

“và”, $f_j: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$ là một hàm trơn lồi được định nghĩa như sau:

$$f_j(\theta_j) = \frac{\|\theta_j\|^2 - \theta_{j\max}^2}{\varepsilon_j \theta_{j\max}^2} \quad (12)$$

Với $\theta_{j\max}$ là giới hạn biên của θ_j và ε_j là giá trị dung sai hội tụ.

Bổ đề 3: Một tính chất quan trọng của toán tử tham chiếu được cho bởi phương trình sau:

$$(\theta_j - \theta_j^*)^T \left(\text{Proj}(\theta_j, f_j, y_j) - y_j \right) \leq 0 \quad (13)$$

Với $\theta_j^* \in \Omega_0$ và $\Omega_0 \sqcap \{\theta_j \in \mathfrak{R}^n \mid f_j(\theta_j) \leq 0\}$.

Chứng minh bổ đề 3:

Chú ý rằng:

$$\begin{aligned} & (\theta_j - \theta_j^*)^T \left(\text{Proj}(\theta_j, f_j, y_j) - y_j \right) \\ & = (\theta_j^* - \theta_j)^T \left(y_j - \text{Proj}(\theta_j, f_j, y_j) \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Nếu $f_j(\theta_j) > 0 \wedge (\nabla f_j(\theta_j))^T y_j > 0$, từ phương trình (10) và bổ đề 2 thì vế phải của phương trình (14) trở thành:

$$\begin{aligned} & (\theta_j^* - \theta_j)^T \left[y_j - \left(y_j - \frac{\nabla f_j(\theta_j)(\nabla f_j(\theta_j))^T}{\|\nabla f_j(\theta_j)\|^2} y_j f_j(\theta_j) \right) \right] \\ & = \frac{\underbrace{(\theta_j^* - \theta_j)^T \nabla f_j(\theta_j)}_{\leq 0} \underbrace{(\nabla f_j(\theta_j))^T y_j}_{> 0}}{\|\nabla f_j(\theta_j)\|^2} \underbrace{f_j(\theta_j)}_{> 0} \leq 0 \end{aligned}$$

Ngược lại nếu $\text{Proj}(\theta_j, f_j, y_j) = y_j$, như vậy phương trình (13) đã được chứng minh.

Định nghĩa 4: Dạng thông dụng của một toán tử tham chiếu là một ma trận mở rộng $n \times m$, một véc tơ toán tử tham chiếu trong định nghĩa 3 như sau:

$$\text{Proj}(\hat{\theta}, Y, f) = [\text{Proj}(\hat{\theta}_1, y_1, f_1) \cdots \text{Proj}(\hat{\theta}_m, y_m, f_m)] \quad (15)$$

Với $\text{Proj}(\hat{\theta}_j, y_j, f_j)$ là một toán tử tham chiếu với hai véc tơ $\hat{\theta}_j, y_j \in \mathbb{R}^n$ ($j = 1 \dots m$) như trong định nghĩa 3, $\hat{\theta}, Y \in \mathbb{R}^{n \times m}$ và $f \in \mathbb{R}^m$ là một hàm véc tơ lỗi.

Bổ đề 4: đặt $F[f_1 \cdots f_m]^T \in \mathbb{R}^m$ là một hàm véc tơ lỗi, $\hat{\Theta} = [\hat{\theta}_1 \cdots \hat{\theta}_m]$, $\Theta = [\theta_1 \cdots \theta_m]$ và $Y = [y_1 \cdots y_m]$ với $\hat{\Theta}, \Theta, Y \in \mathbb{R}^{n \times m}$ thì bất đẳng thức sau sẽ thỏa:

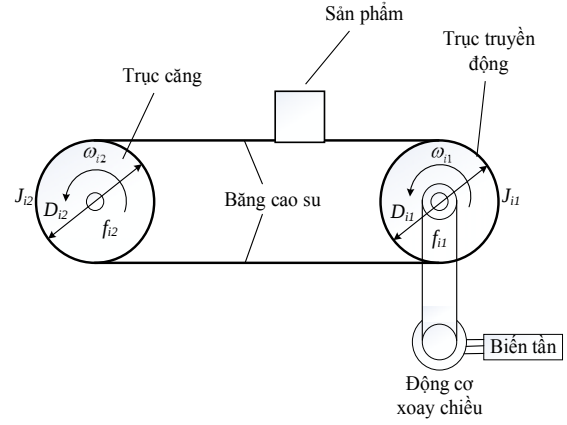
$$\text{trace} \left\{ (\hat{\Theta} - \Theta)^T (\text{Proj}(\Theta, Y, f) - Y) \right\} \leq 0 \quad (16)$$

Chứng minh bổ đề 4: sử dụng phương trình (13) sẽ được:

$$\begin{aligned} & \text{trace} \left\{ (\hat{\Theta} - \Theta)^T (\text{Proj}(\Theta, Y, f) - Y) \right\} \\ & = \sum_{j=1}^m (\hat{\theta}_j - \theta_j)^T (\text{Proj}(\hat{\theta}_j, y_j, f_j) - y_j) \leq 0 \end{aligned}$$

III. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN M-MRAC SỬ DỤNG TOÁN TỬ THAM CHIẾU

Một băng tải bao gồm hệ thống cơ khí và hệ thống điện. Mô hình hóa đơn giản của hệ thống cơ khí của băng tải thứ i được trình bày trong hình 1 ($i = 1, 2, 3$).



Hình 1. Mô hình hóa đơn giản của băng tải thứ i

Trong hình 1, các bộ tham số (J_{i1}, J_{i2}) , $(\omega_{i1}, \omega_{i2})$, (f_{i1}, f_{i2}) và (D_{i1}, D_{i2}) lần lượt tương ứng là các moment quán tính các vận tốc góc các hệ số ma sát và các đường kính, của trục truyền động và trục căng băng tải.

Để kéo băng tải, hệ thống sử dụng hệ truyền động điện bao gồm động cơ xoay chiều kéo trục truyền động. Động cơ này được điều khiển tốc độ bằng biến tần. Tốc độ đặt cho hệ thống được cung cấp tới biến tần bằng mức điện áp DC, để điều khiển động cơ xoay chiều tạo ra moment xoắn (torque) đủ để kéo băng tải. Moment xoắn của băng tải thứ i được cho như sau:

$$\tau_i = J_i \dot{\omega}_{i1} + f_i \omega_{i1} + \tau_{di}(t) \quad (17)$$

trong đó $J_i = J_{i1} + J_{i2}$, $f_i = f_{i1} + f_{i2}$, $\tau_{di}(t)$ là moment xoắn do nhiều bên ngoài tạo ra (chẳng hạn như khối lượng của sản phẩm được đặt lên băng tải), và τ_i là moment xoắn cần thiết mà động cơ xoay chiều phải tạo ra, để kéo hệ thống cơ khí của băng tải thứ i . Nó được xác định như sau:

$$\tau_i = k_i u_i^* \quad (18)$$

trong đó k_i là độ lợi của biến tần, u_i^* là điện áp DC ở ngõ vào của biến tần thứ i để tạo ra moment xoắn mong muốn τ_i . u_i^* là ngõ vào điều khiển bị bão hòa được định nghĩa như sau:

$$u_i^* = \text{sat}(u_i) = \begin{cases} u_{i\min} & \text{khí } u_i < u_{i\min} \\ u_i & \text{khí } u_{i\min} \leq u_i \leq u_{i\max} \\ u_{i\max} & \text{khí } u_i > u_{i\max} \end{cases} \quad (19)$$

trong đó u_i là ngõ vào điều khiển của bộ điều khiển được đề nghị đối với băng tải thứ i , $u_{i\min}$, $u_{i\max}$ là biên độ giới hạn của ngõ vào điều khiển thứ i .

Dựa vào các phương trình (17)~(19), mô hình động (dynamics) của hệ thống băng tải có thể biểu diễn bằng phương trình trạng thái sau:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{u}^* - \mathbf{d}(t)) \quad (20)$$

trong đó $\mathbf{x} = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^T$ là véc tơ vận tốc góc ngõ ra của hệ thống băng tải đo bằng cảm biến xung (encoder), ω_i là vận tốc của băng tải thứ i trong hệ thống băng tải. $\mathbf{u}^* = [u_1^* \ u_2^* \ u_3^*]^T$ là một véc tơ ngõ vào bão hòa, $\mathbf{d} = [d_1 \ d_2 \ d_3]^T$ là một véc tơ nhiễu có biên độ giới hạn, với $d_i = \frac{\tau_{di}(t)}{k_i}$, và các ma trận chứa các thông số chưa xác định được $\mathbf{A}, \mathbf{B} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ được cho như sau:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & b_{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{với } a_{ii} = -\frac{f_i}{J_i} \text{ và } b_{ii} = \frac{k_i}{J_i}.$$

Mục tiêu của nghiên cứu là thiết kế véc tơ ngõ vào điều khiển $u = [u_1, u_2, u_3]^T$ cho một hệ thống thích nghi mô hình tham chiếu hiệu chỉnh với các ngõ vào bão hòa, nhiều biên độ giới hạn. Và sử dụng toán tử tham chiếu trong bộ cập nhật luật điều khiển, để véc tơ vận tốc góc ngõ ra, bám theo véc tơ ngõ ra của một mô hình tham chiếu hiệu chỉnh.

1. Bộ điều khiển thích nghi mô hình tham chiếu hiệu chỉnh M-MRAC.

Trong hệ thống M-MRAC [14] giá trị của véc tơ ngõ vào điều khiển u được thiết kế nhỏ hơn một véc tơ điều khiển lý tưởng u_0 , trong trạng thái quá độ do sai lệch thiết lập lớn giữa độ lợi điều khiển ước lượng trong các ma trận $\hat{K}, \hat{\Phi}, \hat{d}$ và độ lợi điều khiển chưa biết trong các ma trận K, Φ, d . Vì vậy, tốc độ bám theo véc tơ ngõ vào tham chiếu r ở trạng thái quá độ chậm. Để cải thiện tốc độ bám, có thể tăng tốc độ thích nghi γ . Tuy nhiên, khi tăng tốc độ thích nghi sẽ làm xuất hiện các thành phần tần số cao không mong muốn ở tín hiệu điều khiển ngõ vào, của véc tơ điều khiển ngõ vào u . Do đó, mô hình điều khiển thích nghi tham chiếu truyền thống (CMRAC) [13], được thay đổi thành mô hình điều khiển thích nghi tham chiếu hiệu chỉnh (M-MRAC) với phương trình (21) sau:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m r + \dot{r} + \lambda e \quad (21)$$

$$e = x - x_m \quad (22)$$

Với $\lambda > 0$ là độ lợi sai lệch hồi tiếp, e là véc tơ sai lệch trạng thái, $x_m = [\omega_{m1}, \omega_{m2}, \omega_{m3}]^T$ là véc tơ ngõ ra của mô hình tham chiếu và ω_{mi} là vận tốc góc tham chiếu thứ i .

Khi véc tơ sai lệch trạng thái tiến về không, mô hình tham chiếu hiệu chỉnh (M-MRAC) trở thành mô hình tham chiếu truyền thống (CMRAC). Vì vậy, việc bám véc tơ ngõ ra không chỉ xảy ra ở M-MRAC mà còn cả trong CMRAC.

Trạng thái bão hòa véc tơ sai lệch ngõ vào được định nghĩa bằng phương trình sau:

$$\Delta e = u - u^* \quad (23)$$

Với u là một véc tơ điều khiển ngõ vào được thiết kế sao cho véc tơ ngõ ra trong trạng thái động có thể bám theo véc tơ ngõ ra của mô hình tham chiếu hiệu chỉnh phương trình (21).

Véc tơ điều khiển ngõ vào thiết kế được định nghĩa như sau:

$$u = \hat{K}^T x + \hat{\Phi}^T r + \hat{\Omega}^T \dot{r} + \hat{d}(t) \quad (24)$$

Với $\hat{K}, \hat{\Phi}, \hat{\Omega}$ là các giá trị ước lượng của các ma trận độ lợi điều khiển chưa biết K, Φ, Ω , và $\hat{d} \in \mathbb{R}^3$ là véc tơ

ước lượng của của véc tơ hằng số chưa biết, $\bar{d}$ là giá trị trung bình véc tơ của $d(t)$ trong phương trình trạng thái của hệ thống bằng tải $\dot{x} = Ax + B(u^* - d(t))$ [13].

Từ phương trình mô hình hóa hệ thống bằng tải và các phương trình (21) tới (24) thì đạo hàm bậc nhất của e sẽ là:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{x}_m \\ &= (A_m - \lambda I)e + B_m \Lambda (u - K^T x - \Phi^T r - \Omega^T \dot{r} - \bar{d}) \\ &\quad + B_m \Lambda (\bar{d} - d - \Delta u) \\ &= (A_m - \lambda I)e + B_m \Lambda (\tilde{K}^T x - \tilde{\Phi}^T r - \tilde{\Omega}^T \dot{r} - \bar{d}) \\ &\quad + B_m \Lambda (\bar{d} - d - \Delta u) \end{aligned} \quad (25)$$

Với $\tilde{K} = \hat{K} - K$, $\tilde{\Phi} = \hat{\Phi} - \Phi$, $\tilde{\Omega} = \hat{\Omega} - \Omega$, $\bar{d} = \hat{d} - \bar{d}$

Bỏ qua ảnh hưởng của ngõ vào bão hòa chúng ta định nghĩa một véc tơ sai số phụ:

$$\dot{e}_\Delta = (A_m - \lambda I)e_\Delta - \hat{K}_\Delta^T \Delta u \quad (26)$$

Với $(A_m - \lambda I)$ là ma trận ổn định Hurwitz và $\hat{K}_\Delta \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ là ma trận tham số thích nghi.

Véc tơ sai số phụ được sử dụng để bù vào véc tơ sai số trạng thái của ngõ vào bão hòa. Khi đó sẽ có một véc tơ sai số mới được định nghĩa như sau:

$$e_u = e - e_\Delta \quad (27)$$

Theo các phương trình (25) tới (27) có thể tính được đạo hàm bậc nhất của e_u như sau:

$$\begin{aligned} \dot{e}_u &= \dot{e} - \dot{e}_\Delta \\ &= (A_m - \lambda I)e_u + B_m \Lambda (\tilde{K}^T x - \tilde{\Phi}^T r - \tilde{\Omega}^T \dot{r} - \bar{d}) \\ &\quad + \tilde{K}_\Delta^T \Delta u + B_m \Lambda (\bar{d} - d) \end{aligned} \quad (28)$$

Với $\tilde{K}_\Delta^T = \hat{K}_\Delta^T - B_m \Lambda$

Các ma trận độ lợi điều khiển ước lượng $\hat{K}, \hat{\Phi}, \hat{\Omega}$ và véc tơ $\hat{d}$ trong phương trình (14), có thể thay đổi nhỏ dưới tác dụng của nhiễu biên độ giới hạn. Vì vậy, bộ cập nhật luật điều khiển với các toán tử tham chiếu để làm giảm ảnh hưởng trên, sẽ được thiết kế như trong định lý 1.

Định lý 1: Một bộ điều khiển M-MRAC cho hệ thống bằng tải là ổn định, khi véc tơ ngõ vào điều khiển thiết kế theo (24), và bộ cập nhật luật điều khiển sử dụng một toán tử tham chiếu được cho bởi các phương trình:

$$\dot{\hat{\Theta}} = \gamma_1 \text{Proj}(\hat{\Theta}, Y, f) \quad (29)$$

$$\dot{\hat{K}}_\Delta = \gamma_2 \text{Proj}(\hat{K}_\Delta, R, g)$$

$$(30) \quad \dot{\hat{d}} = \gamma_3 \text{Proj}(\hat{d}(t), S, h) \quad (31)$$

Trong đó: $Y = [Y_1^T \ Y_2^T \ Y_3^T]^T$ với $Y_1 = -B_m^T P e u x^T$,

$$Y_2 = -B_m^T P e u r^T \quad \text{và} \quad Y_3 = -B_m^T P e u \dot{r}^T,$$

$$\dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{K}^T & \dot{\Phi}^T & \dot{\Omega}^T \end{bmatrix}^T, \quad \dot{\Theta} = \begin{bmatrix} \dot{K}^T & \dot{\Phi}^T & \dot{\Omega}^T \end{bmatrix}^T,$$

$R = -Pe_u \Delta u^T$, $S = -B_m^T Pe_u$, $f, g \in \mathfrak{R}^3$ là các véc tơ hàm lồi, h là hàm lồi vô hướng và $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 > 0$ là các độ lợi thích nghi.

Chứng minh định lý 1: Chọn hàm Lyapunov để phân tích độ ổn định của hệ thống như sau:

$$V(t) = e_u^T Pe_u + \frac{1}{\gamma_1} \text{trace}(\tilde{K}^T \Lambda \tilde{K} + \tilde{\Phi}^T \Lambda \tilde{\Phi} + \tilde{\Omega}^T \Lambda \tilde{\Omega}) + \frac{1}{\gamma_2} \text{trace}(\tilde{K}_\Delta^T \tilde{K}_\Delta) + \frac{1}{\gamma_3} (\tilde{d}^T \Lambda \tilde{d}) \geq 0 \quad (32)$$

Lấy đạo hàm bậc nhất của $V(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & -e_u^T (Q_m + 2\lambda P) e_u + \frac{2}{\gamma_1} \text{trace} \left[(\dot{\Theta} - \Theta)^T \Lambda (\dot{\Theta} - \gamma_1 Y) \right] \\ & + 2e_u^T P B_m \Lambda (\bar{d} - d) + \frac{2}{\gamma_3} (\dot{d} - \bar{d})^T \Lambda (\dot{d} - \gamma_3 S) \\ & + \frac{2}{\gamma_2} \text{trace} \left[(\dot{K}_\Delta - K_\Delta)^T (\dot{K}_\Delta - \gamma_2 R) \right] \quad (33) \\ \leq & -\|e_u\| (a_1 \|e_u\| - 2d^*) \leq \eta \|e_u\|^2 \leq 0 \end{aligned}$$

Trong đó: $a_1 = \lambda_{\min}(Q_m) + 2\lambda_{\min}(P)\lambda > 0$, $d^* = \|PB_m \Lambda (d - \bar{d})\| \in l_\infty$ và $a_1 > \eta > 0$

$\dot{V}(t)$ sẽ có giá trị âm và bán xác định khi:

$$a_1 \|e_u\| - 2d^* \geq \eta \|e_u\| \Rightarrow \|e_u\| \geq \frac{2d^*}{a_1 - \eta} \quad (34)$$

Điều này suy ra $\hat{K}$, $\hat{\Phi}$, $\hat{\Omega}$, $\hat{K}_\Delta$ và $\hat{d}$ giới hạn từ (32) đến (34) và $e_u \rightarrow 0$ cũng như $t \rightarrow \infty$ theo định lý Barbalat. Do đó, $e \rightarrow e_\Delta$ và e giới hạn khi và chỉ khi e_Δ cũng giới hạn. Giới hạn của e_Δ được chứng minh như sau:

Chọn hàm Lyapunov:

$$W \square W(e(t)) = e_\Delta^T P e_\Delta \geq 0 \quad (35)$$

Sử dụng nguyên lý Rayleigh được:

$$\lambda_{\min}(P) \|e_\Delta\|^2 \leq W \leq \lambda_{\max}(P) \|e_\Delta\|^2 \quad (36)$$

Lấy đạo hàm bậc nhất theo thời gian của W được:

$$\begin{aligned} \dot{W} = & -e_\Delta^T (Q_m + 2\lambda P) e_\Delta - 2e_\Delta^T P \hat{K}_\Delta \Delta u \\ \leq & -\|e_\Delta\|^2 a_1 + \lambda_3 \leq \lambda_2 W + \lambda_3 \quad (37) \end{aligned}$$

trong đó $\lambda_3 = 2\| -e_\Delta^T P \hat{K}_\Delta^T \Delta u \| \geq 0$ và $\lambda_2 = \frac{a_1}{\lambda_{\max}(P)} > 0$.

Sử dụng bất phương trình Gronwall Bellman, phương trình (37) suy ra:

$$e_\Delta^T P e_\Delta = W \leq \left[W(e_\Delta(0)) - \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right] \exp(-\lambda_2 t) + \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (38)$$

Kết hợp phương trình (35) và (38) sẽ có:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_\Delta^T P e_\Delta \leq \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (39)$$

$$\frac{\lambda_3}{\lambda_2} \geq \lim_{t \rightarrow \infty} e_\Delta^T P e_\Delta \geq \lambda_{\min}(P) \lim_{t \rightarrow \infty} \|e_\Delta\|^2 \quad (40)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e_\Delta\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_3}{\lambda_2 \lambda_{\min}(P)}} \quad (41)$$

Và điều này chứng minh rằng e_Δ bị giới hạn.

2. Ràng buộc của véc tơ sai lệch, độ lợi hồi tiếp và tốc độ thích nghi.

Vì $\hat{K}$, $\hat{\Phi}$, $\hat{\Omega}$, $\hat{K}_\Delta$, $\hat{d}$ giới hạn, nên sẽ tồn tại một hằng số β thỏa mãn bất đẳng thức sau:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\gamma_1} \text{trace}(\tilde{K}^T \Lambda \tilde{K} + \tilde{\Phi}^T \Lambda \tilde{\Phi} + \tilde{\Omega}^T \Lambda \tilde{\Omega}) \\ & + \frac{1}{\gamma_2} \text{trace}(\tilde{K}_\Delta^T \tilde{K}_\Delta) + \frac{1}{\gamma_3} (\tilde{d}^T \Lambda \tilde{d}) \leq \frac{\beta}{\gamma} \quad (42) \end{aligned}$$

Trong đó γ là giá trị cực đại của tập $\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$.

Từ (32), (42) và nguyên lý Rayleigh có bất đẳng thức sau:

$$V(t) \leq e_u^T P e_u + \frac{\beta}{\gamma} t \leq \|e_u\|^2 \lambda_{\max}(P) + \frac{\beta}{\gamma} \quad (43)$$

Để đạt được một giới hạn trên $\|e_u\|$, một mức Lyapunov thiết lập được định nghĩa như sau:

$$L = \{(e_u, \tilde{K}, \tilde{\Phi}, \tilde{\Omega}, \tilde{K}_\Delta, \tilde{d}) : V \leq V^*\} \quad (44)$$

Trong đó: $V^* = \lambda_{\max}(P) \frac{4d^{*2}}{(a_1 - \eta)^2} + \frac{\beta}{\gamma}$

Sử dụng nguyên lý Rayleigh trong các phương trình (32), (43), (44) có bất đẳng thức sau:

$$\begin{aligned} & \lambda_{\min}(P) \|e_\Delta\|^2 \leq e_\Delta^T P e_\Delta \leq V \leq V^* \\ \Rightarrow & \lambda_{\min}(P) \|e_\Delta\|^2 \leq \lambda_{\max}(P) \frac{4d^{*2}}{(a_1 - \eta)^2} + \frac{\beta}{\gamma} \quad (45) \\ \Rightarrow & e_u \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} \frac{4d^{*2}}{(a_1 - \eta)^2} \frac{\beta}{\gamma \lambda_{\min}(P)}} \end{aligned}$$

Từ (34) và (45) suy ra:

$$0 \leq \frac{2d^*}{(a_1 - \eta)} \leq \|e_u\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} \frac{4d^{*2}}{(a_1 - \eta)^2} \frac{\beta}{\gamma \lambda_{\min}(P)}} \quad (46)$$

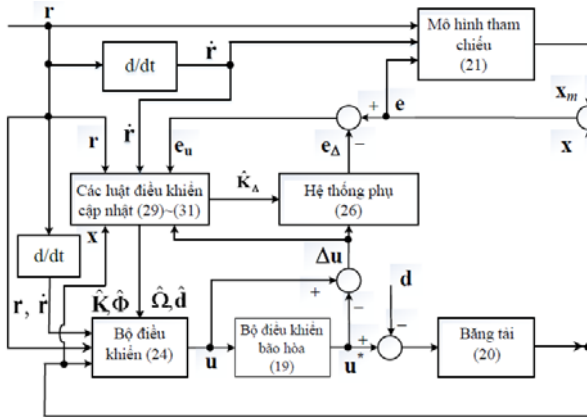
Do đó, từ (27), (41), (46) có thể đạt được giới hạn trên như sau:

$$\|e_u\| \leq \|e_u\| + \|e_\Delta\|$$

$$\leq \sqrt{\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} \frac{4d^2}{(a-\eta)^2} \frac{\beta}{\gamma \lambda_{\min}(P)}} \sqrt{\frac{\lambda_3}{\lambda_2 \lambda_{\min}(P)}} \quad (47)$$

Trong bất phương trình (47), giới hạn trên của $\|e_u\|$ có thể giảm nếu độ lợi hồi tiếp λ và độ lợi thích nghi γ tăng.

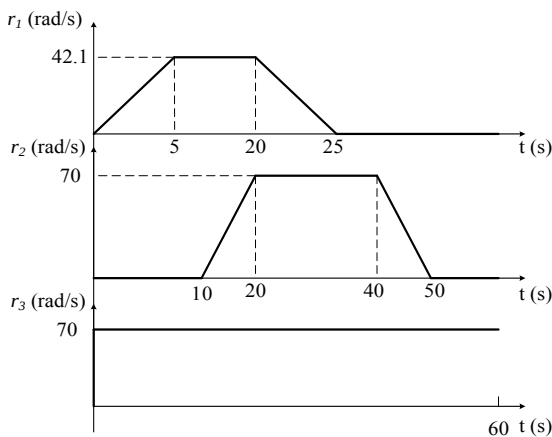
Sơ đồ khối của bộ điều khiển thích nghi đề nghị được trình bày trong hình 2.



Hình 2. Sơ đồ khối của bộ điều khiển được đề nghị

IV. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Để kiểm tra hiệu quả của độ lợi thích nghi, độ lợi hồi tiếp, trong bộ điều khiển thích nghi truyền thống (CMRAC) và bộ điều khiển thích nghi hiệu chỉnh (M-MRAC) với toán tử tham chiếu, nhóm nghiên cứu đã thực hiện các mô phỏng và thực nghiệm trên cả hai hệ thống với các điều kiện sau:



Hình 3. Vận tốc góc của các ngõ vào chuẩn.

- Các giá trị thiết lập của các biến trạng thái và các ngõ vào điều khiển bằng 0. Điện áp các ngõ vào của các biến tần điều khiển trực kéo các băng tải được xem như các ngõ vào của bộ điều khiển đề nghị, có thể thay đổi trong khoảng $u_{1min} = u_{2min} = u_{3min} = 0V$ đến $u_{1max} = u_{2max} = u_{3max} = 7V$.

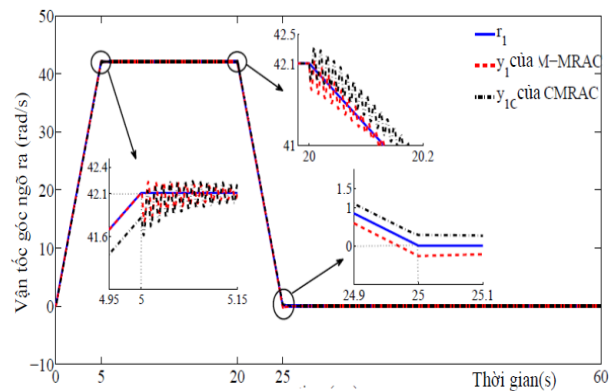
- Các tham số mô hình tham chiếu hiệu chỉnh được chọn lần lượt là: $P = \text{diag}([10^{-8} \ 10^{-8} \ 10^{-8}])$
 $a_{m1} = a_{m2} = a_{m3} = -30$, $b_{m1} = b_{m2} = b_{m3} = 30$.

Các ngõ vào tham chiếu tính theo vận tốc góc cho hệ thống bằng tải như hình 3.

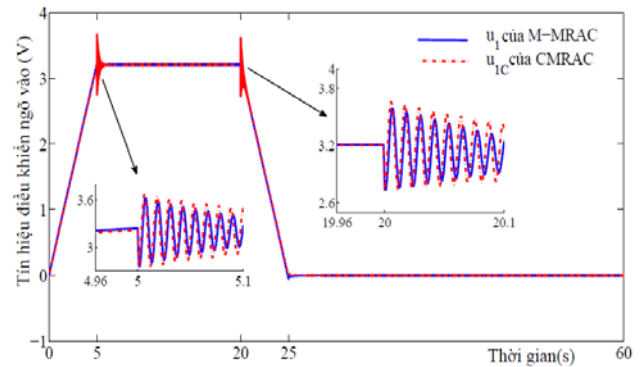
Thời gian mô phỏng là 60 giây, thời gian lấy mẫu là 1ms. Để minh họa sự hiệu quả của bộ điều khiển M-MRAC với toán tử tham chiếu đề nghị, xét ba trường hợp dưới đây tương ứng với ba băng tải trong hệ:

• Trường hợp 1:

Hệ số thích nghi của cả hai bộ điều khiển M-MRAC và CMRAC được thiết lập là $\gamma_1 = 10$. Tuy nhiên, khi độ lợi sai lệch hồi tiếp $\lambda = 280$ hệ thống M-MRAC có hiệu quả tốt hơn hệ thống CMRAC khi quá độ như hình 4.



Hình 4. Vận tốc góc của hai hệ thống CMRAC và M-MRAC với $\gamma_1 = 10$, $\lambda = 280$ ngõ vào tham chiếu r_1



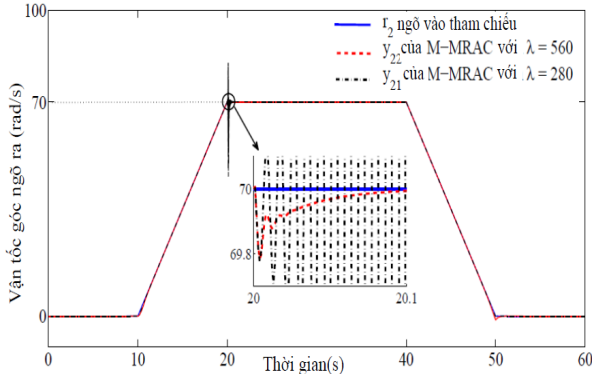
Hình 5. Các tín hiệu ngõ vào của hai hệ thống MRAC và M-MRAC với $\gamma_1 = 10$, $\lambda = 280$

Trên hình 4, vận tốc góc ngõ ra y_1 của hệ thống M-MRAC bám tiệm cận với ngõ vào tham chiếu r_1 , trong khi ngõ ra y_{1C} của hệ thống CMRAC có sai lệch nhỏ so với ngõ vào tham chiếu r_1 . Thời gian xảy ra các thành phần tần số cao trong tín hiệu điều khiển ngõ vào M-MRAC cũng ngắn hơn hệ thống CMRAC như hình 5.

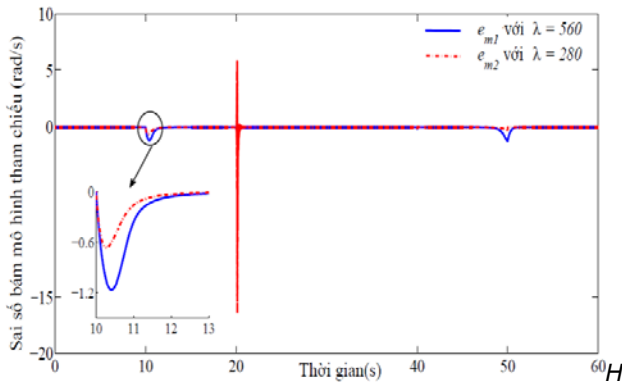
• Trường hợp 2:

Trên hình 6 vận tốc góc ngõ ra y_{22} cho hệ thống M-MRAC với $\lambda = 560$, bám theo ngõ vào tham chiếu r_2 trong một khoảng thời gian ngắn hơn vận tốc góc ngõ ra

cho hệ thống M-MRAC với $\lambda = 280$, trong thời gian quá độ. Có nghĩa là, các thành phần không mong muốn có thể giảm bằng cách tăng độ lợi hồi tiếp λ (từ 280 lên 560). Tuy nhiên, khi tăng độ lợi sai lệch hồi tiếp nhiều hơn, sai lệch bám mô hình tham chiếu giữa ngõ vào tham chiếu r_2 và ngõ ra mô hình tham chiếu y_{2m} , cũng tăng như hình 7. Trong hình này, sai lệch bám mô hình tham chiếu e_{m1} của M-MRAC với $\lambda = 560$ lớn hơn e_{m2} của M-MRAC với $\lambda = 280$. Nghĩa là, nếu tăng độ lợi sai lệch hồi tiếp λ , sai lệch bám mô hình tham chiếu, giữa ngõ vào tham chiếu và ngõ ra mô hình tham chiếu cũng tăng.



Hình 6. Các vận tốc góc ngõ ra của hệ thống M-MRAC với $\lambda = 280$, $\lambda = 560$ và ngõ vào tham chiếu r_2

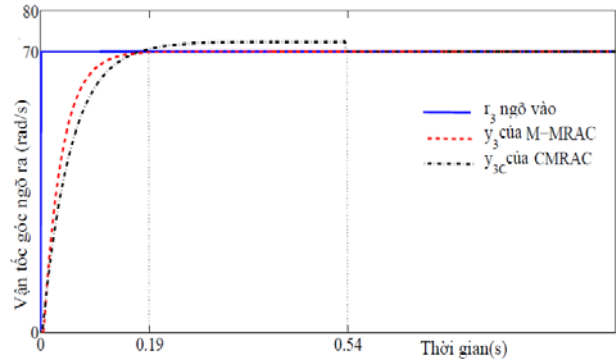


Hình 7. Sai lệch bám mô hình tham chiếu M-MRAC với $\lambda = 280$ và $\lambda = 560$

Mặc dù sai lệch trạng thái giảm, khi độ lợi sai lệch hồi tiếp tăng, theo bất phương trình (47), sai lệch bám mô hình tham chiếu cũng tăng. Do đó, ngõ ra không thể bám theo ngõ vào tham chiếu.

• Trường hợp 3:

Nhiều biên độ giới hạn ảnh hưởng trong hệ thống M-MRAC được giảm bớt bằng toán tử tham chiếu sử dụng trong bộ cập nhật các luật điều khiển, so với hệ thống CMRAC như trên hình 8 với ngõ vào tham chiếu r_3 dạng bước nhảy.

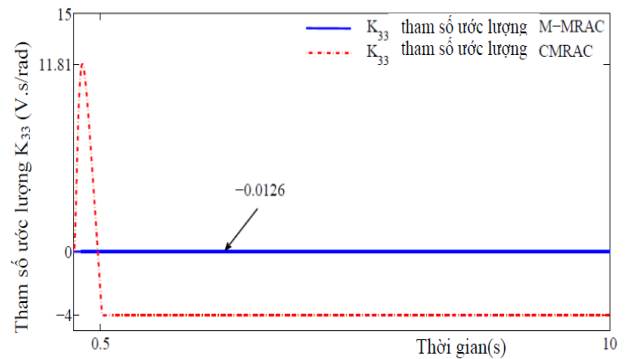


Hình 8. Vận tốc góc ngõ ra của hai hệ thống MRAC và M-MRAC với nhiều biên độ giới hạn và ngõ vào tham chiếu r_3

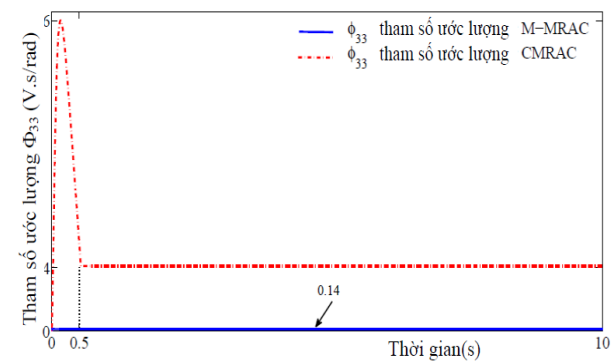
Trong hình 8, có thể thấy vận tốc góc ngõ ra của hệ thống M-MRAC y_3 bám theo ngõ vào tham chiếu r_3 , nhanh hơn so với ngõ ra y_{3c} của hệ thống CMRAC (0.19s so với 0.54s), với nhiều biên độ giới hạn $d = -2$.

Do ngõ vào dạng bước nhảy, nên đạo hàm bậc nhất của nó bằng 0. Vì vậy, tham số ước lượng $\hat{\Omega}_{33}$ của Ω không thể ước lượng. Các tham số ước lượng khác được biểu diễn trên hình 9 và 10.

Có thể thấy, các tham số ước lượng của hệ thống CMRAC, do ảnh hưởng của nhiều biên độ giới hạn chỉ hội tụ tới các giá trị ổn định sau 0,5 giây, còn trong hệ thống M-MRAC hội tụ gần như tức thời.



Hình 9. Giá trị K_{33} của ma trận tham số $\hat{K}$ của hai hệ thống CMRAC và M-MRAC với nhiều biên độ giới hạn



Hình 10. Giá trị Φ_{33} của ma trận tham số $\hat{\Phi}$ của hai hệ thống CMRAC và M-MRAC với nhiều biên độ giới hạn

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề nghị một bộ điều khiển tốc độ cho hệ thống băng tải, sử dụng mô hình thích nghi tham chiếu hiệu chỉnh (M-MRAC) với toán tử tham chiếu, để cải thiện hiệu suất trong trạng thái quá độ, và toán tử tham chiếu trong bộ cập nhật luật điều khiển làm hệ thống bền vững với nhiễu biên độ giới hạn. Ngoài ra bài báo cũng giải thích rằng bước của sai lệch mô hình tham chiếu, độ lợi sai lệch hồi tiếp và độ lợi thích nghi. Khi độ lợi sai lệch hồi tiếp tăng, sai lệch trạng thái sẽ giảm và các thành phần tần số cao không mong muốn cũng giảm. Mặc dù véc tơ vận tốc góc ngã ra bám theo tiệm cận với véc tơ vận tốc góc ngã ra của mô hình hiệu chỉnh, sai lệch bám tham chiếu cũng tăng khi tăng độ lợi sai lệch hồi tiếp. Do đó, hiệu suất bám của bộ điều khiển đề nghị sẽ thấp, nếu độ lợi sai lệch hồi tiếp tăng rất nhiều. Hơn nữa, bộ cập nhật luật điều khiển với toán tử tham chiếu trong bộ điều khiển đề nghị, có thể giảm ảnh hưởng của nhiễu biên độ giới hạn từ các tham số ước lượng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông (PTIT), cơ sở tại Thành Phố Hồ Chí Minh trong đề tài có mã số 05-HV-2019-RD_ĐT2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Thirachai, P. Komeswarakul, U. Supakchukul and J. Suwatthikul, "Trapezoidal velocity trajectory generator with speed override capability", International Conference on Control Automation and Systems, 2010, pp. 1468-1472.
- [2] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive Control", 2nd ed. Dover publication, INC, 2008.
- [3] D.K. Le and T.K. Nam, "Optimal iterative learning control with model uncertainty", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol 37, no. 7, 2013, pp. 743-751.
- [4] V. T. Duong, J. H. Jeong, N. S. Jeong, M. S. Shin, T. T. Nguyen, G. S. Byun and S. B. Kim, "Cross-coupling synchronous velocity control for an uncertain model of transformer winding system using model reference adaptive control method", Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 371, 2016, pp. 441-455.
- [5] T. T. Nestorovic, H. Koppe, and U. Gabbert, "Direct model reference adaptive control (MRAC) design and simulation for the vibration suppression of piezoelectric smart structures", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, vol. 13, no. 9, 2008, pp. 1896-1909.
- [6] S. Karason and A. Annaswamy, "Adaptive Control in the Presence of Input Constraints", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 11, 1994, pp. 2325-2330.
- [7] D. J. Wagg, "Transient bounds for adaptive control systems" IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, no. 1, 1994, pp. 171-175.
- [8] D. Y. Abramovitch, and G. F. Franklin, "On the stability of adaptive pole-placement controllers with a saturating actuator" IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 35, no. 3, 1990, pp. 303-306.
- [9] W. Sun, H. Gao and O. Kaynak, "Vibration isolation for active suspensions with performance constraints and actuator saturation, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 20, no. 2, 2015, pp. 675-683.

- [10] V. Stepanyan and K. Kalmanje, "Input and output performance of M-MRAC in the presence of bounded disturbances", In: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010, pp. 2-5.
- [11] T. Gibson, A. Annaswamy and E. Lavretsky, "Adaptive systems with closed-loop reference models, Part I: Transient performance", In: American Control Conf., 2013, pp. 3376-3383.
- [12] V. T. Duong, T. H. Nguyen, T. T. Nguyen, J. M. Lee and S. B. Kim, "Modified model reference adaptive controller for a nonlinear SISO system with external disturbance and input constraint" Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 415, 2016, pp. 118-128.
- [13] Phạm Thế Duy, "Velocity control of conveyor belt system using model reference adaptive control method with saturated input" Hội nghị 20 năm thành lập Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.
- [14] Phạm Thế Duy, Phạm Việt Hùng, "Cải thiện khả năng bám cho bộ điều khiển MRAC của hệ thống điều khiển tốc độ băng tải" Journal of Science and Technology on Information and Communications (JSTIC) No. 01&02 (CS.01) 2018/pp. 37-42

BELL CONVEYOR VELOCITY CONTROLLER DESIGN USING MMRAC AND PROJECTION OPERATOR IN PRESENCE OF BOUNDED DISTURBANCES

Abstract: The paper proposes a velocity controller using projection operator to reduce effectiveness of bounded disturbances is proposed, In addition, constraint of state error, the feedback error gain and adaptive gains are also presented to choose the suitable feedback error gain. The effectiveness of the proposed velocity controller is evaluated through simulation and experimental results.



Phạm Thế Duy

Nhận học vị Thạc sĩ năm 1998

Hiện công tác tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông CS tại TP. HCM.

Lĩnh vực nghiên cứu: Hệ thống nhúng, Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa.



Nguyễn Huy Hùng

Nhận học vị Tiến sĩ năm 2018

Hiện công tác tại: Đại học Sài Gòn

Lĩnh vực nghiên cứu: Kỹ thuật điều khiển và tự động hóa, thông tin vô tuyến.