

NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ CẦU TRỤC BẰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID MỜ MỚI

Nguyễn Văn Minh Tri*

Lê Văn Mạnh**

Phạm Thị Minh Thủy***

TÓM TẮT

Bài báo đưa ra mô hình toán, thiết kế và chọn tham số của bộ điều khiển PID Mờ mới để điều khiển hệ cầu trục. Nghiên cứu sự ảnh hưởng của các tham số trong bộ điều khiển PID Mờ mới với mong muốn giảm dao động của tải và khả năng ứng dụng vào thực tiễn. Việc tính hệ số K_P , K_I , K_D của bộ điều khiển PID Mờ mới được xác định bằng công thức mới có tính khoa học và tường minh. Qua các kết quả mô phỏng mô hình hệ cầu trục cho thấy bộ điều khiển PID Mờ mới có tính đơn giản và hiệu quả trong việc điều khiển cho các hệ phi tuyến có các thành phần và nhiễu tác động không xác định.

Từ khóa: Điều khiển tự động, PID mờ, Điều khiển hệ cầu trục

ABSTRACT

The paper given mathematical model, design and selected parameters of new PID Fuzzy controller to control crane system. Research the influence of the parameters in new PID Fuzzy controller with the desire to oscillate of load reduction and applicability to practice. The calculation of coefficients K_P , K_I , K_D new PID Fuzzy controller are determined by the new formula is a scientific and explicit. Through the simulation results for the model crane system shows the new PID Fuzzy controller is simple and effective to control for nonlinear systems with components and unidentifiable disturbances impacts.

Keywords: Automatic control, PID Fuzzy, Control crane

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống cầu trục là thiết bị công nghiệp được ứng dụng rất rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như trong xây dựng, trong nhà máy hay tại cảng bốc dỡ hàng,... Những cầu trục này thường được vận hành bằng tay. Khi kích thước của cầu trục trở nên lớn hơn và yêu cầu vận chuyển nhanh hơn và chính xác thì quá trình điều khiển chúng sẽ trở nên khó khăn nếu không tự động hoá quá trình này. Cầu trục dịch chuyển theo quỹ đạo không cứng nhắc, nó thường hoạt động trong những điều kiện khắc nghiệt, như vậy một hệ thống điều khiển kín là thích hợp.

Hệ thống cầu trục là hệ phi tuyến lớn, hơn nữa trong quá trình làm việc của hệ thống cầu trục khi di chuyển phải đảm bảo được yêu cầu dao động của tải là nhỏ nhất. Vì thế khi thiết kế bộ điều khiển cho hệ cầu trục phải tính

đến các yếu tố này. Trong trường hợp vận hành đòi hỏi cao về chất lượng thì luật PID Mờ mới hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu đặt ra. Việc chọn và tính hệ số K_P , K_I , K_D cho bộ điều khiển PID Mờ mới không chỉ đơn giản và tường minh mà còn dễ dàng trong sử dụng.

Trong bài báo này, tổng hợp được hệ cầu trục và thiết kế bộ điều khiển PID Mờ mới cho hệ thống phi tuyến không xác định SISO. Mục đích là áp dụng bộ điều khiển này để hệ thống đạt được sự ổn định nhanh, giảm hiện tượng rung của tín hiệu điều khiển và hạn chế góc dao động của tải. Các kết quả mô phỏng khi áp dụng cho việc điều khiển hệ cầu trục, được trình bày ở phần III. Kết luận được nêu lên ở phần IV.

* Đại Học Đà Nẵng

** Đại Học Công Nghiệp Tp. Hồ Chí Minh

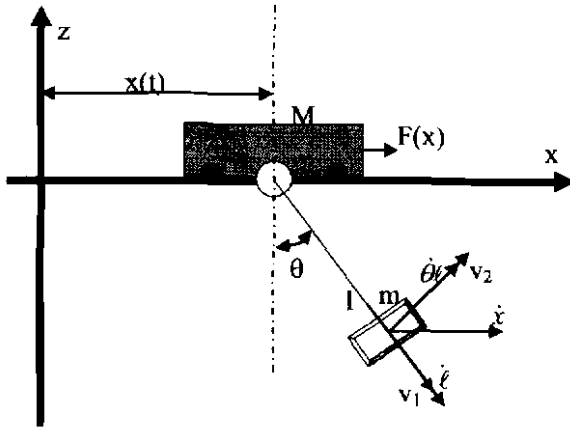
*** Cao Đẳng Công Nghiệp Huế

II. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

1. Xây dựng mô hình toán học của cầu trục

Xét hệ cầu trục như hình 1:

Hình 1: Mô hình hệ thống cầu trục trong hệ trục tọa độ.



Dùng phương pháp Lagrange, ta có:

$$L_1 = \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

$$L_2 = \frac{1}{2} m v^2 + m g l \cos \theta$$

$$v_1 = \dot{\ell} + \dot{x} \sin \theta$$

$$v_2 = \dot{\theta} \ell + \dot{x} \cos \theta$$

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

$$v^2 = (\dot{\ell} + \dot{x} \sin \theta)^2 + (\dot{\theta} \ell + \dot{x} \cos \theta)^2$$

$$= \dot{\ell}^2 + 2\dot{\ell}\dot{x} \sin \theta + \dot{x}^2 \sin^2 \theta + \dot{\theta}^2 \ell^2 + 2\dot{\theta} \ell \dot{x} \cos \theta + \dot{x}^2 \cos^2 \theta$$

$$L = L_1 + L_2$$

* Đối với xe lăn:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = M \dot{x} + m \dot{\ell} \sin \theta + m \dot{x} \sin^2 \theta + m \dot{\theta} \ell \cos \theta + m \dot{x} \cos^2 \theta$$

$$= (M + m) \dot{x} + m \dot{\ell} \sin \theta + m \dot{\theta} \ell \cos \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = (M + m) \ddot{x} + m \ddot{\ell} \sin \theta + m \dot{\ell} \dot{\theta} \cos \theta + m \ddot{\theta} \ell \cos \theta + m \dot{\theta} \dot{\ell} \cos \theta - m \dot{\theta}^2 \ell \sin \theta$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0$$

$$\Rightarrow F = (M + m) \ddot{x} + m \ddot{\ell} \sin \theta + 2m \dot{\ell} \dot{\theta} \cos \theta + m \ddot{\theta} \ell \cos \theta - m \dot{\theta}^2 \ell \sin \theta$$

$$\Rightarrow \ddot{x} = (M + m)^{-1} \left[F - m \ddot{\ell} \sin \theta - 2m \dot{\ell} \dot{\theta} \cos \theta - m \ddot{\theta} \ell \cos \theta + m \dot{\theta}^2 \ell \sin \theta \right] \quad (1)$$

* Đối với vật m: (l thay đổi)

$$q_2 = \ell$$

$$F_2 = -F_m \quad (F_m - \text{Lực nâng vật})$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\ell}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \ell} = -F_m$$

$$\frac{\partial L}{\partial \ell} = m \ddot{\ell} + m \dot{x} \sin \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\ell}} \right) = m \ddot{\ell} + m \dot{x} \sin \theta + m \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta$$

$$\text{Tính: } \frac{\partial L}{\partial \ell} = m g \cos \theta + m \dot{\theta}^2 \ell + m \dot{\theta} \dot{x} \cos \theta$$

$$\Rightarrow m \ddot{\ell} + m \dot{x} \sin \theta - m g \cos \theta + m \dot{\theta}^2 \ell = -F_m$$

$$\Rightarrow \ddot{\ell} = -\frac{F_m}{m} - \dot{x} \sin \theta + g \cos \theta + \dot{\theta}^2 \ell \quad (2)$$

* Đối với vật m:

$$q_1 = \theta$$

$$F_1 = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = F_1 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m \dot{\theta} \ell^2 + m \dot{x} \ell \cos \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = m \ddot{\theta} \ell^2 + 2m \dot{\theta} \ell \dot{\ell} + m \dot{x} \cos \theta + m \dot{\ell} \dot{x} \cos \theta - m \dot{x} \ell \sin \theta \dot{\theta}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -m g \ell \sin \theta + m \dot{x} \ell \cos \theta - m \dot{\theta} \dot{x} \sin \theta$$

$$\Rightarrow m \ddot{\theta} \ell^2 + 2m \dot{\theta} \ell \dot{\ell} + m \dot{x} \cos \theta + m g \ell \sin \theta = 0$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta} = \ell^{-1} [-2\dot{\ell} \dot{\theta} - \dot{x} \cos \theta - g \sin \theta] \quad (3)$$

Với yêu cầu bài toán đặt ra là tìm F như thế nào để xe lăn được di chuyển theo phương ngang với chiều dài dây là không đổi, sao cho góc dao động tiến về 0 nhanh nhất. Do l không đổi nên $\dot{\ell} = 0$, $\ddot{\ell} = 0$, ta có:

$$\text{Từ (1)} \Rightarrow \ddot{x} = (M + m)^{-1} [F - m \ddot{\theta} \ell \cos \theta + m \dot{\theta}^2 \ell \sin \theta] \quad (4)$$

$$\text{Từ (3)} \Rightarrow \ddot{\theta} = \ell^{-1} [-\dot{x} \cos \theta - g \sin \theta] \quad (5)$$

Giả sử hệ được kéo bởi hệ động cơ điện một chiều qua pulley có bán kính r.

Lực F được biểu diễn như sau:

$$F = \frac{\tau_1}{r} \quad (6)$$

Trong đó động cơ điện một chiều có các thông số sau:

- + R - điện trở mạch phản ứng của động cơ,
- + τ_1 - mô men tải,
- + K_m - là hằng số mô men.

Từ các phương trình (4), (5) và (6), ta được:

$$\ddot{x} = (M+m)^{-1} \left[\frac{K_m}{R.r} u - m\ddot{\theta}l \cos \theta + m\dot{\theta}^2 \sin \theta \right] \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} &= l^{-1} \left[(M+m)^{-1} \left(-\frac{K_m}{R.r} u + m\ddot{\theta}l \cos \theta - m\dot{\theta}^2 \sin \theta \right) \cos \theta - g \sin \theta \right] \\ &= (M+m)^{-1} \frac{K_m \cos \theta}{ml \cos^2 \theta - (M+m)l} u + \frac{(M+m)g + m\dot{\theta}^2 \cos \theta}{ml \cos^2 \theta - (M+m)l} \sin \theta \quad (8) \end{aligned}$$

Thế (5) vào (7), ta được:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (M+m)^{-1} \left[\frac{K_m}{R.r} u + m(\ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta) \cos \theta + m\dot{\theta}^2 \sin \theta \right] \\ \left[(M+m) - m \cos^2 \theta \right] \ddot{x} &= \frac{K_m}{R.r} u + m\dot{\theta}^2 \sin \theta - mg \sin \theta \cos \theta \\ \ddot{x} &= \frac{K_m}{[(M+m) - m \cos^2 \theta] R.r} u + \frac{m\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta}{[(M+m) - m \cos^2 \theta]} \sin \theta \quad (9) \end{aligned}$$

Đặt $x_1 = x$; $x_2 = \theta$; $x_3 = \dot{x}$; $x_4 = \dot{\theta}$, và $\dot{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$, ta được:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = f_1(x) + b_1(x)u \\ \dot{x}_4 = f_2(x) + b_2(x)u \end{cases} \quad (10)$$

$$f_1(x) = \frac{(M+m)g + m\dot{x}_4^2 \cos x_2}{[ml \cos^2 x_2 - (M+m)l]} \sin x_2 \quad (11a)$$

$$b_1(x) = \frac{K_m \cos x_2}{[ml \cos^2 x_2 - (M+m)l]R.r} \quad (11b)$$

$$f_2(x) = \frac{m\dot{x}_4^2 + mg \cos x_2}{[(M+m) - m \cos^2 x_2]} \sin x_2 \quad (12a)$$

$$b_2(x) = \frac{K_m}{[(M+m) - m \cos^2 x_2]R.r} \quad (12b)$$

Từ các phương trình trạng thái (10), (11) và (12), là cơ sở để xây dựng mô hình hệ thống cầu trục trong Matlab-Simulink.

2. Thiết kế bộ điều khiển PID Mở mới cho hệ thống cầu trục

Xét một hệ thống phi tuyến một đầu vào - một đầu ra

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + b(x)u \end{cases} \quad (13)$$

trong đó $x = [x_1, x_2]^T$ là vector trạng thái, u là tín hiệu điều khiển, $b(x)$ và $f(x)$ là các hàm phi tuyến không xác định của hệ thống.

Giả thuyết rằng:

$$\begin{cases} |f| \leq F \\ 0 < b_{\min} \leq b \end{cases} \quad (14)$$

Điều kiện $0 < b_{\min} \leq b$ này không làm mất tính tổng quát của hệ thống.

Bài toán đặt ra là thiết kế bộ điều khiển PID sao cho hệ (13) đạt chất lượng mong muốn và chất lượng này không ảnh hưởng bởi các thành phần không xác định f và b .

Cho quỹ đạo mẫu $x_{1d}(t)$ và định nghĩa sai lệch bám $e = x_{1d} - x_1$.

Chọn một hàm PD như sau:

$$\sigma = \lambda e + \dot{e} = x_{2d} - x_2 + \lambda(x_{1d} - x_1) \quad (15)$$

trong đó $x_{2d} = \dot{x}_{1d}$ và λ là một số xác định dương.

Tính chất của hàm PD (15) là khi giữ cho $\sigma = 0$ thì quỹ đạo thực của hệ thống sẽ bám theo quỹ đạo đặt sau một thời gian t_0 . Do đó tín hiệu điều khiển u được thiết kế sao cho trạng thái hệ thống được đẩy về trên đường $\sigma = 0$.

Ta có luật điều khiển PID như sau:

$$u = \begin{cases} -K & \text{khi } \sigma < -\varphi \\ K_p e + K_I \int_0^t e dt + K_D \dot{e} & \text{khi } -\varphi \leq \sigma \leq \varphi \\ K & \text{khi } \sigma > \varphi \end{cases} \quad (16)$$

$$\text{với } K_p = \frac{K \cdot \lambda + I}{\varphi}; K_I = \frac{\lambda \cdot I}{\varphi}; K_D = \frac{K}{\varphi}$$

Nhận xét:

+ Trong bộ điều khiển PID (16), tham số λ quyết định tốc độ hội tụ về không của sai lệch bám e , đó đó quyết định chất lượng điều khiển của hệ thống. Việc chọn lựa giá trị λ thích hợp phụ thuộc vào yêu cầu về thời gian quá độ của hệ thống.

+ Tham số I đóng góp vào việc làm sai lệch bám e hội tụ về 0, tuy nhiên nếu I chọn lớn sẽ gây dao động cho sai lệch bám của hệ thống. Do đó ta nên chọn giá trị I nhỏ.

+ Tham số φ sẽ quyết định độ lớn của sai lệch bám. Khi chọn một giá trị φ nhỏ thì tín hiệu điều khiển u lại thay đổi nhanh giữa hai giá trị $\pm K$.

Để làm giảm thiểu tác hại của việc thay đổi u liên tục, chúng ta dùng bộ điều khiển PID mờ như trình bày ở phần tiếp theo.

+ Tham số K chọn theo thuật toán mờ trong bộ điều khiển PID mờ được trình bày ở phần tiếp theo sẽ loại bỏ được những khó khăn này.

Thiết kế bộ điều khiển PID Mờ mới:

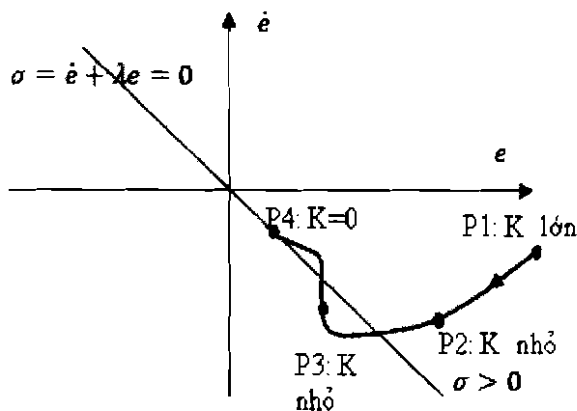
Ý tưởng của việc dùng lý thuyết điều khiển mờ vào trong bộ điều khiển PID (16) chọn K theo trạng thái hệ thống.

+ Nếu quỹ đạo hệ thống ở xa đường $\sigma = 0$ thì K chọn lớn để tính ổn định của hệ thống được đảm bảo, tăng tính bền vững của hệ và làm nhanh quá trình tiến về đường $\sigma = 0$ của quỹ đạo trạng thái hệ thống.

+ Nếu quỹ đạo hệ thống ở gần đường $\sigma = 0$ thì K chọn nhỏ để giảm hiện tượng thay đổi liên tục của tín hiệu điều khiển u.

+ Nếu quỹ đạo hệ thống ở trên đường $\sigma = 0$ thì K chọn bằng 0 để loại bỏ hoàn toàn hiện tượng thay đổi liên tục của tín hiệu điều khiển u.

Hình 2: Quỹ đạo pha trạng thái hệ thống và cách lựa chọn K



Hình 2 biểu diễn quỹ đạo pha trạng thái hệ thống và cách lựa chọn K. Khi vị trí quỹ đạo trạng thái hệ thống ở xa đường $\sigma = 0$ và về phía $\sigma > 0$ (điểm P1 như hình 2), giá trị K phải chọn là dương lớn. Khi quỹ đạo trạng thái hệ thống tiến về gần đường $\sigma = 0$ và ở phía $\sigma > 0$ (điểm P2 như hình 2), giá trị K phải chọn là dương nhỏ. Khi quỹ đạo trạng thái hệ thống về trên đường

$\sigma = 0$ (điểm P4 như hình 2) thì $K = 0$. Trường hợp quỹ đạo trạng thái hệ thống tiến về gần đường $\sigma = 0$ và ở phía $\sigma < 0$ (điểm P3 như hình 2), giá trị K phải chọn là dương nhỏ. Tương tự cho trường hợp quỹ đạo trạng thái hệ thống ở xa đường $\sigma = 0$ và về phía $\sigma < 0$, giá trị K phải chọn là dương lớn.

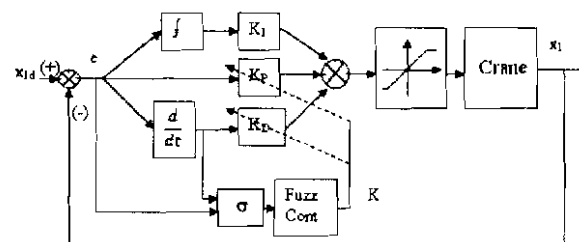
Từ đó ta có thể thiết kế một bộ điều khiển mờ với các luật hợp thành như sau:

- + R₁: NẾU σ là DƯƠNG LỚN THÌ K là DƯƠNG LỚN
- + R₂: NẾU σ là DƯƠNG NHỎ THÌ K là DƯƠNG NHỎ
- + R₃: NẾU σ là KHÔNG THÌ K là KHÔNG
- + R₄: NẾU σ là ÂM LỚN THÌ K là DƯƠNG LỚN
- + R₅: NẾU σ là ÂM NHỎ THÌ K là DƯƠNG NHỎ

Trong đó các hàm liên thuộc cho σ và K dạng tam giác, luật mờ SUM-MIN và giải mờ bằng phương pháp điểm trọng tâm được chọn.

Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID Mờ mới thể hiện trên hình 3.

Hình 3: Sơ đồ khối hệ thống điều khiển PID Mờ mới

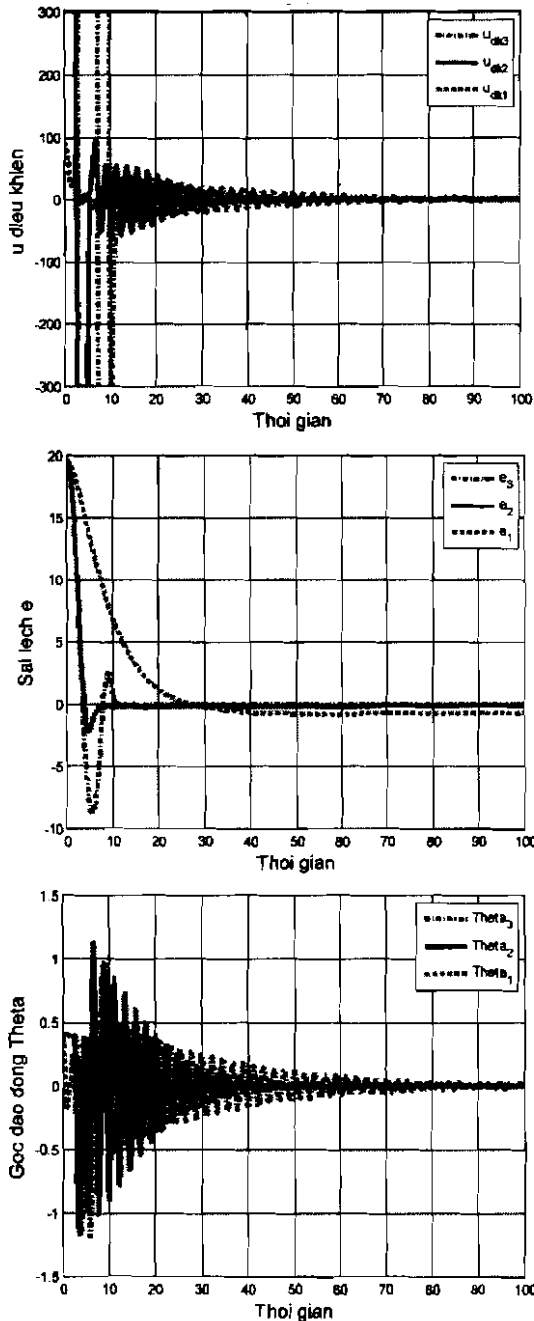


Bộ điều khiển PID Mờ mới được áp dụng cho mô hình hệ thống cầu trục, các kết quả mô phỏng sẽ chứng minh tính đúng đắn của thuật toán được đưa ra.

III. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

a) Với I , ϕ là hằng số chọn trước, λ_i ($i = 1 \div 3$) lần lượt là $\lambda_1 = 0.1$; $\lambda_2 = 1$; $\lambda_3 = 2$; K được xác định bằng luật mờ

Hình 4: Tín hiệu điều khiển, sai lệch bám và góc dao động của hệ thống cầu trục $\{u_i, e_i \text{ và } \theta_i \text{ tương ứng với } \lambda_i (i = 1 \div 3)\}$.

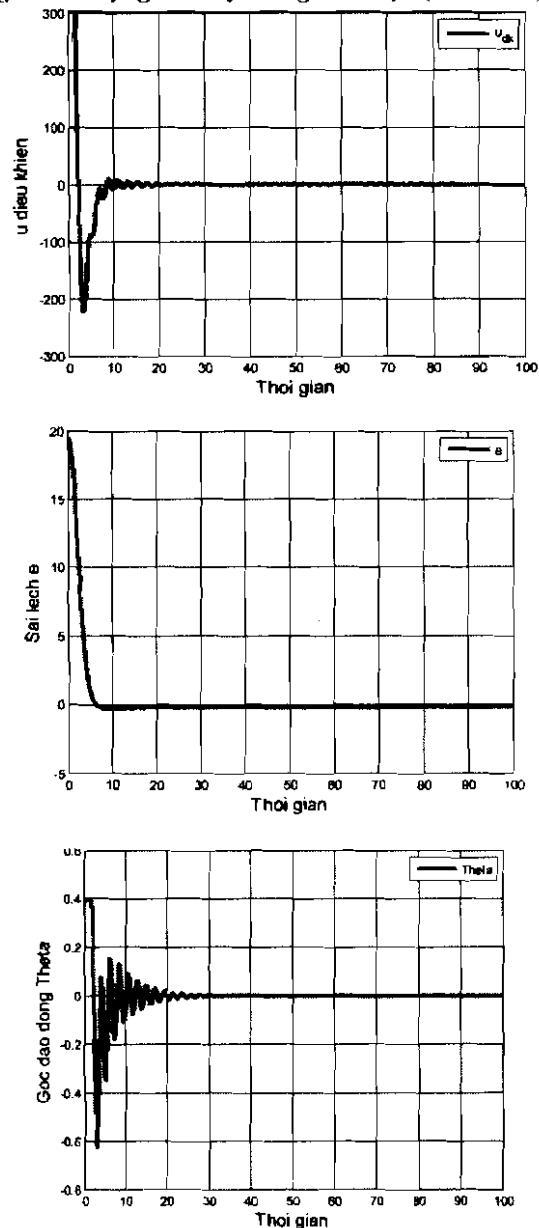


* **Nhận xét:** Khi λ_i nhỏ sai lệch bám của hệ thống chậm tiến về không so với λ_i lớn hơn. Tăng λ_i góc dao động của hệ thống tăng, tín hiệu điều khiển có hiện tượng rung và sai lệch bám nhanh tiến về không. Nếu λ_i lớn sai lệch bám tiến về không rất nhanh nhưng có sự quá

điều chỉnh, sự quá điều chỉnh này lớn hay nhỏ tùy thuộc vào độ lớn λ_i . Hay khi thay đổi λ_i sẽ làm cho sai lệch bám, góc dao động và tín hiệu điều khiển cũng thay đổi. Từ kết quả trên cho ta chọn được một tham số λ tối ưu cho hệ thống để hệ đạt chất lượng theo yêu cầu cho trước.

b) Với I , ϕ là hằng số chọn trước, chọn $\lambda = 0,5$ tối ưu dựa vào mục III.a; K được xác định bằng luật mờ

Hình 5: Tín hiệu điều khiển, sai lệch bám và góc dao động của hệ thống cầu trục $\{u, e \text{ và } \theta\}$.



* **Nhận xét:** Khi chọn tham số tối ưu là $\lambda = 0,5$, K được xác định theo luật mờ, I, ϕ là hằng số chọn trước ta thấy: sai lệch bám e của hệ thống nhanh tiến về không, tín hiệu điều khiển không còn hiện tượng rung, góc dao động θ được khống chế và dao động trong thời gian nhỏ.

c) Nhận xét chung

Kết quả mô phỏng cho thấy sự tác động nhanh, sai lệch bám, tín hiệu điều khiển và góc dao động của hệ thống cầu trục phụ thuộc vào sự thay đổi của thông số λ .

Từ kết quả mô phỏng trên và việc xác định thông số λ tối ưu của bộ điều khiển ta tính được các hệ số K_P , K_I , K_D dễ dàng, kết quả này có được nhờ vào bộ điều khiển PID Mờ mới ở mục II. Đây là kết quả mang tính khoa học cao khi mà các hệ số của bộ điều khiển PID cho một đối tượng phi tuyến SISO được xác định bằng công thức rõ ràng.

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã nêu được phương pháp xây dựng mô hình toán học hệ cầu trục, bộ điều khiển PID Mờ mới và áp dụng để điều khiển hệ thống cầu trục nhằm làm giảm sự dao động của vật được nâng. Các kết quả mô phỏng cho hệ thống cầu trục cho thấy độ chính xác của quỹ đạo và góc dao động của hệ thống có thể khống chế được theo yêu cầu cho trước. Các hệ số của bộ điều khiển PID Mờ mới này được xác định dễ dàng hơn so với bộ điều khiển PID bền vững [1] trước đây.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Văn Minh Trí, Lê Văn Mạnh, *Bộ điều khiển PID bền vững cho hệ thống phi tuyến một đầu vào – một đầu ra với nhiễu và thành phần không xác định*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 4(39)/2010.
2. Vũ Tú Anh, *Bộ điều khiển PID số cho động cơ DC ứng dụng ASIC*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 4/2008.
3. Lê Tấn Duy, *Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ tay máy robot*, Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng, số 4/2003.
4. Q. G. Wang, B. Zou, T. H. Lee, and Q. Bi, *Auto-tuning of multivariable PID controller from decentralized relay feedback*, Automatica, vol. 33, 1997, pp. 319-330.
5. Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*, 2004.

Thành phần bản thân

TS. NGUYỄN VĂN MINH TRÍ

Địa chỉ: Trường Đại Học Đà Nẵng

Chức vụ: Giảng viên

DD: 0935.646.268

Email: ngvminhtri@yahoo.com

Chữ ký:

ThS. LÊ VĂN MẠNH

Địa chỉ: 938 Quang Trung – Quảng Ngãi -

Khoa Công Nghệ - Trường Đại Học

Công Nghiệp Tp Hồ Chí Minh –

Cơ sở Quảng Ngãi.

Chức vụ: Giảng viên

DD: 0905.959.353

Email: manhlevan.vn@gmail.com

Chữ ký:

ThS. PHẠM THỊ MINH THÚY

Địa chỉ: Trường Cao Đẳng Công Nghiệp Huế

Chức vụ: Giảng viên

DD: 0905.020.482

Email: minhthuy24vn@gmail.com

Chữ ký: