

TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN THÍCH NGHI CHO HỆ SERVO ĐIỆN THỦY LỰC SỬ DỤNG ĐỘNG CƠ ĐIỆN TRUYỀN THẲNG

SYNTHESIZE ADAPTIVE CONTROLLER FOR ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEM USING DIRECT DRIVE MOTOR

Phan Thành Chung¹,
Hoàng Thị Thu Giang^{2*}, Phan Thị Cẩm Trang³

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.34>

TÓM TẮT

Bài báo này đề xuất xây dựng một mô hình toán học của một động cơ tuyến tính để di chuyển đầu vào van trượt của một bộ truyền động điện thủy lực. Đầu tiên, là mô tả phân tích về đặc tính lực kéo phi tuyến tính của động cơ cũng như phản ứng tạo ra từ tác dụng của lực điện từ và lực đàn hồi của lò xo định tâm và sau đó là xây dựng mô hình cho hệ servo điện thủy lực. Thứ hai là xây dựng luật điều khiển thích nghi để tổng hợp bộ điều khiển cho hệ servo điện thủy lực và phân tích về hiệu quả của thuật toán thích nghi đối với hệ thống. Các kết quả nghiên cứu được kiểm chứng và so sánh trên các mô hình servo điện - thủy lực trong phần mềm Matlab-Simulink và thực nghiệm trên bàn thí nghiệm chuyên dụng.

Từ khóa: Động cơ điện truyền thẳng, hệ thống servo, điều khiển thích nghi, mô hình mô phỏng.

ABSTRACT

This paper proposes to build a mathematical model of a linear electric motor to move the slide valve inlet of an electro-hydraulic actuator. First, the analysis describes the non-linear traction characteristics of the motor as well as the response generated from the effect of the electromagnetic force and the elastic force of the centering spring and then builds a model for the electro-hydraulic servo system. The second is to build adaptive control law to synthesize the controller for the electro-hydraulic servo system and analyze the effectiveness of the adaptive algorithm for the system. The research results are verified, and compared on electro-hydraulic servo models in Matlab-Simulink software and experimented on specialized equipment.

Keywords: Linear electric motor, servo system, adaptive control, simulation model.

¹Viện Kỹ thuật cơ giới quân sự

²Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

³Khoa Cơ khí, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: gianghtt@hau.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/6/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 02/8/2022

Ngày chấp nhận đăng: 27/10/2022

1. GIỚI THIỆU

Ngày nay, nhu cầu tăng tốc độ chuyển động của hệ thống truyền động cơ điện - thủy lực chính xác là rất lớn nên việc cải thiện đặc tính động học của các hệ thống

truyền động trên là rất cần thiết, đặc biệt là các hệ thống truyền động lái máy bay hiện đại với áp suất cao trên 35MPa. Để đáp ứng các yêu cầu trên, hệ điều khiển điện - thủy lực với van điều khiển khuếch đại tầng đầu tiên kiểu "vòi phun - cửa chớp" và "ống phản lực" ("nozzle-shutter", "jet tube") đã được thay thế bằng cơ cấu ống lồng con trượt, điều khiển trực tiếp bằng động cơ điện truyền thẳng (Linear Motor - LM). Tuy nhiên việc sử dụng động cơ tuyến tính trong hệ thống kèm theo sự xuất hiện các đặc tính phi tuyến trong đặc tính điều khiển, chúng tăng lên khi tốc độ dòng chảy thủy lực tăng lên do lực thủy động lực học và lực ma sát tiếp tuyến [5, 9].

Nghiên cứu về các mẫu động cơ truyền thẳng cho thấy: tính phi tuyến của hệ số truyền đạt thay đổi từ 30 - 40% do sự thay đổi tính chất của vật liệu từ tính. Ngoài ra, tính phi tuyến của động cơ truyền thẳng cũng phụ thuộc vào độ trễ trong mạch từ, sự thay đổi nhiệt độ của chất lỏng làm việc và ảnh hưởng của phản lực và ma sát nhớt [9].

Các đặc tính phi tuyến tính của động cơ truyền thẳng cũng được quyết định bởi mô hình thiết kế và công nghệ sản xuất của nó, Các yếu tố này tác động đáng kể đến các đặc tính động của bộ truyền động servo. Để khắc phục điều này, điều khiển thích nghi là một gợi ý tốt nhất nhằm khắc phục các yếu tố phi tuyến, tăng độ nhạy và đảm bảo hoạt động ổn định của hệ thống truyền động điện - thủy lực [7 - 9].

2. MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA HỆ SERVO VỚI ĐỘNG CƠ TRUYỀN THẲNG

2.1. Mô hình toán học động cơ điện truyền thẳng

Sử dụng các giả định liên quan đến mô tả quá trình điện từ [5], mô hình toán học hoàn chỉnh của động cơ điện truyền thẳng được mô tả bằng các phương trình sau:

$$\begin{cases} L(F_i, \bar{x}) \frac{di}{dt} = u - Ri - C_e(F_i, \bar{x}) \frac{dx}{dt}, & F_i = wi \\ m_{LM} \frac{d^2x}{dt^2} = K_{Fi}(\bar{x})i - b_{LM} \frac{dx}{dt} - (C - C_M(\bar{x}))x - f_L \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó, các hệ số phi tuyến được kể đến là:

1. Hệ số phụ thuộc giữa lực của động cơ truyền thẳng với dòng điện chạy qua phản ứng

$$F_{LM} = K_{Fi}(\bar{x})i$$

$$K_{Fi}(\bar{x}) = \frac{2kF_M(\bar{R}_M + 1 + \bar{x}^2)w}{(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2} \quad (2)$$

2. Hợp lực của lực điện từ và lực đàn hồi trong động cơ

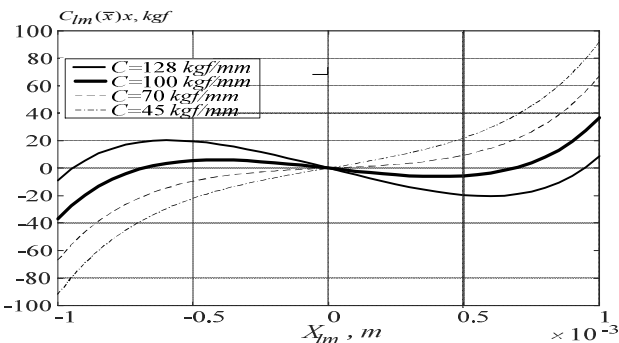
$$C_{im}(\bar{x})x = [C_M(\bar{x}) - C]x = \left(\frac{4kF_M^2}{(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2} - C \right) x \quad (3)$$

3. Hệ số phi tuyến suất phản điện động của động cơ truyền thẳng

$$C_e(\bar{x}) = \frac{wF_M(\bar{R}_M + 1 + \bar{x}^2)}{R_{x0}(\bar{R}_M + 1 - \bar{x}^2)^2} \delta \quad (4)$$

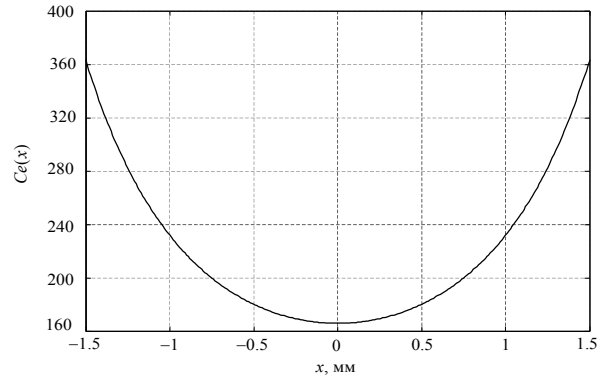
Hệ số của các phương trình trên được xác định như sau: x là độ dịch chuyển tuyệt đối của phần ứng trong động cơ truyền động thẳng; $u(U)$ là điện áp đặt vào động cơ truyền thẳng; i dòng điện chạy trong cuộn dây động cơ; R, w là điện trở và số vòng dây của cuộn dây động cơ; m_{LM} là khối lượng chuyển động của động cơ; b_{LM} là hệ số ma sát nhớt của phần ứng; F_L là lực ngoài tác động lên đầu trục động cơ; C là hệ số đàn hồi của cụm lò xo trung tâm trong động cơ truyền động thẳng; $k = (2\mu_0 S_f R_{x0}^2)^{-1}$, $\bar{x} = x / \delta$, δ là khe hở không khí của phần ứng và phần giới hạn khi ở vị trí trung tâm, μ_0 là độ từ thẩm của không khí, S_f là diện tích của cực từ; từ trở của nam châm vĩnh cửu: $R_M = R_{M1} = R_{M2}$, $\bar{R}_M = R_M / R_{x0}$, $R_{x0} = \delta / \mu_0 S_f$; F_M là lực từ động của nam châm vĩnh cửu.

Chuyển động của phần ứng động cơ truyền thẳng phụ thuộc vào đặc tính phi tuyến bên trong của động cơ [1, 5], đặc tính phi tuyến của lực truyền thẳng trong động cơ được mô tả với các công thức (2), (3), (4). Ảnh hưởng lớn nhất đến các đặc tính của động cơ là hợp lực đàn hồi $C_{im}(\bar{x})x$, đặc tính của nó được thể hiện trong hình 1. Độ dốc của nó phụ thuộc vào độ cứng của lò xo cơ học C . Đặc tính của nó có hai điểm cực trị, khi độ dịch chuyển tuyệt đối của phần ứng vượt qua giá trị mà tại đó hợp lực đàn hồi là cực đại, thì sau đó độ cứng tính của động cơ giảm. Khi hành trình chuyển động của phần ứng động cơ giảm xuống 1/3 thì sự thay đổi độ dốc đặc tính là không đáng kể, đặc tính lúc này được coi là tuyến tính.



Hình 1. Đặc tính hợp lực cơ học và điện từ theo độ dịch chuyển của phần ứng động cơ truyền thẳng $C_{im} = f(x_{im})$

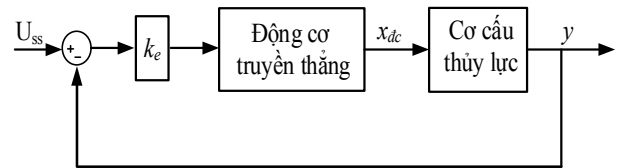
Trên hình 2 mô tả mối qua hệ giữa hệ số suất điện động phản kháng và độ dịch chuyển của phần ứng động cơ truyền thẳng theo cả hai chiều chuyển động đối xứng. Mối quan hệ này đã được mô tả theo công thức (4).



Hình 2. Giảm đồ quan hệ suất hản điện động và độ dịch chuyển phần ứng trong động cơ truyền thẳng

2.2. Mô hình hệ servo điện thủy lực sử dụng động cơ truyền thẳng

Trên hình 3 mô tả sơ đồ khối của hệ servo thủy lực dẫn động bằng động cơ truyền thẳng, trong đó động cơ truyền thẳng (đã được mô tả ở phần 2.1).



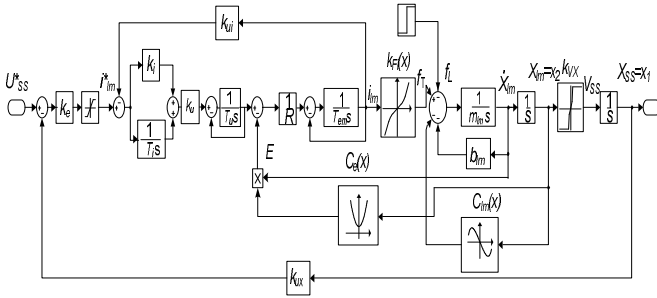
Hình 3. Sơ đồ khối của hệ servo thủy lực dẫn động bằng động cơ truyền thẳng

Trong sơ đồ, cơ cấu thủy lực thực chất là một khâu chấp hành thủy lực có đầu vào là độ mở của van cánh bướm được dẫn động bằng lực kéo của động cơ truyền thẳng nhằm thay đổi tiết diện thông qua cho dòng thủy lực, đầu ra của cơ cấu này là độ dịch chuyển của piston thủy lực. Độ dịch chuyển này có đặc tính tốc độ được xác định theo mối quan hệ (5) [6].

$$V(x) = k_{vx} x_{dc} \quad (5)$$

trong đó: $V(x)$ là tốc độ dịch chuyển piston thủy lực, k_{vx} là hệ số, phụ thuộc tuyến tính vào phẩm chất dầu thủy lực, chế độ làm việc, và diện tích của xilanh công tác; x_{dc} là độ dịch chuyển trực động cơ dẫn động.

Tổng hợp các yếu tố trên, ta có mô hình mô tả hệ thống servo điện thủy lực với các đặc tính phi tuyến của động cơ truyền động thẳng với bộ điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện được trình bày trên hình 4. Trong đó, k_e là hệ số khuếch đại sai lệch giữa vị trí đáp ứng của hệ thống và lượng đặt; k_i, T_i là hệ số khuếch đại và hằng số thời gian của bộ điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện; k_{vx} là hệ số tốc độ của đầu ra; k_{ui}, T_u là hệ số khuếch đại và hằng số thời gian của bộ khuếch đại công suất; k_{ui}, k_{ux} là hệ số truyền đạt của cảm biến dòng điện chạy qua cuộn dây động cơ và cảm biến vị trí đầu ra hệ thống servo.



Hình 4. Mô hình của hệ thống servo điện thủy lực với các đặc tính phi tuyến của động cơ truyền động thẳng

3. TỔNG HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN CHO HỆ THỐNG

Theo các phân tích đã nêu ở phần trên, mô hình hệ thống là hệ bậc cao và chứa các phần tử phi tuyến: $C_e, k_{F1}, C_{im}, k_{v1}$. Trong không gian trạng thái, hệ thống được mô tả dạng (6).

$$\dot{x} = A(x, t)x + B(x, t)u; \quad y = Cx \tag{6}$$

trong đó, x là véc tơ trạng thái n chiều; y là véc tơ đầu ra; u là véc tơ điều khiển m chiều; $A(x, t), B(x, t)$ là các ma trận có tham số biến đổi (phụ thuộc vào thời gian và vùng làm việc của hệ thống và các yếu tố phi tuyến), C là ma trận hằng số đầu ra.

Thực chất của việc áp dụng điều khiển thích nghi cho một hệ thống là thiết kế bộ điều khiển sao cho đặc tính của hệ thống bám theo các đặc tính của mô hình mẫu (mô hình toán học mong muốn). Giả sử rằng mô hình mẫu có dạng (7), chúng ta có mục tiêu của bài toán điều khiển (8).

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M u; \quad y = Cx_M \tag{7}$$

Trong đó, x_M là véc tơ ma trận trạng thái n chiều của mô hình mẫu; A_M, B_M, C là ma trận truyền đạt, ma trận điều khiển và ma trận đầu ra của mô hình mẫu.

Mục tiêu điều khiển sẽ là:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e = \lim_{t \rightarrow \infty} (x - x_M) = 0 \tag{8}$$

Khi đó phương trình (7) có thể viết dưới dạng (9).

$$\dot{x} = A_M x + B_M u + \sigma; \quad y = Cx \tag{9}$$

Trong đó, $\sigma = [A(x, t) - A_M]x + [B(x, t) - B_M]u$

Để có sự hội tụ tiệm cận của nghiệm, cần thỏa mãn điều kiện:

$$BB^+(A - A_M)x = (A - A_M)x; \quad BB^+(B - B_M)x = (B - B_M)x, \tag{11}$$

$$(I - B \cdot B^+) \cdot \sigma = 0$$

trong đó $B^+ = B^T (B \cdot B)^{-1}$ là ma trận giả đảo của ma trận B .

Khi thêm lượng điều khiển thích nghi $z = z(t)$ vào phương trình (7) để thỏa mãn điều kiện (11) thì khi đó (9) có thể viết dưới dạng:

$$\dot{x} = A_M x + B_M (u + z) + \sigma; \quad y = Cx .$$

Xét véc tơ sai lệch giữa trạng thái của hệ thống và mô hình mẫu $e = x - x_M$, ta có:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{x}_M = A_M x + B_M (u + z) + \sigma - (A_M x_M + B_M u) \\ &= A_M (x - x_M) + B_M z + \sigma = A_M e + B_M z + \sigma \end{aligned} \tag{12}$$

Xét hàm Lyapunov xác định dương:

$$V(e) = e^T P e \tag{13}$$

trong đó, P là ma trận đối xứng, xác định dương bậc $(n \times n)$, là nghiệm của phương trình Lyapunov $PA_M + A_M^T P = -Q$, với Q là ma trận xác định dương tam giác.

$$\text{Rõ ràng: } \begin{cases} \dot{V}(e) > 0, \forall e \neq 0 \\ \dot{V}(e) = 0, e = 0 \end{cases}$$

Từ (12), (13) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= \dot{x} - \dot{x}_M = (e^T) P e + e^T P e \\ &= (A_M e + B_M + \sigma)^T P e + e^T P (A_M e + B_M + \sigma) \\ &= [(A_M e)^T + (B_M z)^T + (\sigma)^T] P e + e^T P (A_M e + B_M + \sigma) \\ &= e^T (A_M^T P + P A_M) e + 2e^T P B_M z + 2e^T P \sigma. \end{aligned}$$

Theo lý thuyết ổn định Lyapunov, để hệ đạt được ổn định tiệm cận thì điều kiện sau phải được thỏa mãn.

$$\begin{cases} \dot{V}(e) < 0, \forall e \neq 0 \\ \dot{V}(e) = 0, e = 0 \end{cases}$$

Khi thực hiện luật điều khiển thích nghi:

$$z(t) = -h \cdot \text{sign}(B_M^T P e), \quad h > \|B_M\| \cdot \|\sigma\|, \tag{14}$$

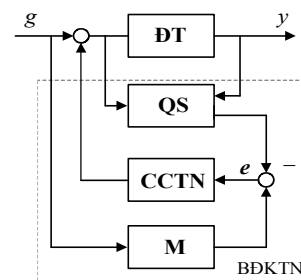
Kèm điều kiện (11) ta có:

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= -e^T Q_1 e + 2e^T P B_M z + 2e^T P \sigma \\ &= -e^T Q_1 e - 2he^T P B_M \text{sign}(B_M^T P e) + 2e^T P B_M B_M^+ \sigma \end{aligned}$$

$$\text{Khi đó: } \dot{V}(e) \leq -e^T Q_1 e - 2e^T P B_M |B_M^+ \sigma - h| \leq 0$$

Điều này có nghĩa là hệ thống đạt điều kiện ổn định tiệm cận theo định lý Lyapunov 2.

Trên cơ sở lý thuyết trên, mô hình hệ thống điều khiển thích nghi cho hệ thống được đề xuất như hình 5.



Hình 5. Mô hình hệ hống điều khiển thích nghi với mô hình mẫu

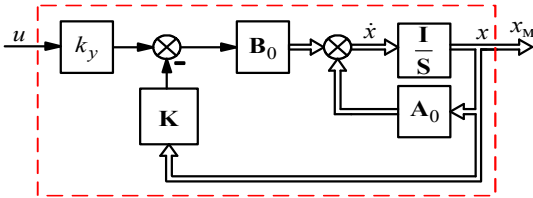
ĐT-Đối tượng điều khiển; QS-Bộ quan sát trạng thái; ĐĐKTN-Bộ điều khiển thích nghi; M-Mô hình mẫu; CCTN-Cơ cấu thích nghi

Theo lý thuyết điều khiển thích nghi [2], để xây dựng thuật toán thích nghi cho hệ thống, cần thực hiện những bước sau:

- Xây dựng một mô hình mẫu;
- Xây dựng bộ quan sát trạng thái;
- Xây dựng cơ cấu thích nghi cho hệ thống.

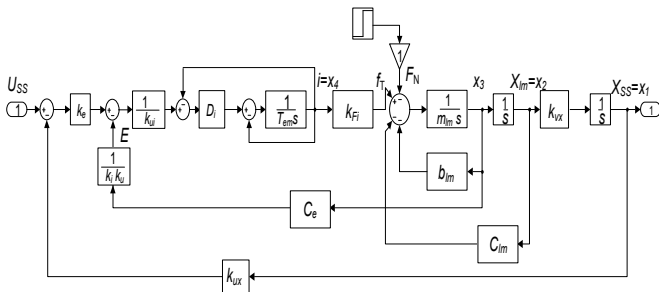
3.1. Xây dựng mô hình mẫu

Mô hình mẫu (mô hình tham chiếu) là mô hình có các đặc tính thỏa mãn các yêu cầu mong muốn của hệ thống. Mô hình mẫu cho hệ thống servo điện thủy lực được xây dựng từ mô hình tuyến tính hóa của hệ thống nguyên bản kết hợp với bộ điều khiển phản hồi trạng thái.



Hình 6. Cấu trúc mô hình mẫu cho hệ thống thích nghi

Mô hình tuyến tính hóa của hệ servo điện thủy lực được thể hiện trong hình 7, mô hình được tuyến tính hóa tại các điểm làm việc của các đặc tính. Trong sơ đồ đã bao gồm bộ điều khiển PI cho mạch vòng dòng điện.



Hình 7. Sơ đồ tuyến tính của hệ thống servo điện thủy lực

Trong đó, $D_1 = k_{ui}k_k r^{-1}$; U_{ss} : đầu vào điều khiển; $x_1 = x_{ss}$ - giá trị vị trí đầu ra của hệ thống servo; x_2 - giá trị dịch chuyển vị trí của phần ứng động cơ truyền động thẳng; x_3 - tốc độ dịch chuyển vị trí của phần ứng động cơ; x_4 - giá trị dòng điện chạy trong cuộn dây động cơ.

Phương trình trạng thái của hệ thống tuyến tính hóa:

$$\dot{x} = A_0 x + B_0 u; y = C_0 x$$

Trong đó

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & k_{vx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C_{lm}}{m_{lm}} & -\frac{b_{lm}}{m_{lm}} & -\frac{k_{FI}}{m_{lm}} \\ -\frac{k_{ux}k_e D_1}{k_{ui}T_{em}} & 0 & -\frac{C_e}{rT_{em}} & -\frac{(D_1 + 1)}{T_{em}} \end{bmatrix};$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{k_e D_1}{k_{ui}T_{em}} \end{bmatrix}^T; C_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0],$$

Ma trận A_0, B_0 là ma trận tuyến tính hóa.

Mô hình mẫu: $\dot{x}_M = A_M x + B_M u; y = C x_M$

Trong đó:

$A_M = A_0 - BK$; $B_M = B_0$; $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$. K là ma trận hệ số của bộ điều khiển phản hồi trạng thái. Các hệ số

của bộ điều khiển này được xác định thông qua việc cân bằng hệ số đa thức đặc trưng theo các đa thức mẫu Butterworth hoặc Newton.

$$H_0(p) = a_0 p^4 + a_1 \omega_0 p^3 + a_2 \omega_0^2 p^2 + a_3 \omega_0^3 p + a_4 \omega_0^4,$$

Trong đó a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 là các hệ số của đa thức Butterworth hoặc Newton; ω_0 là tần số cắt của hệ thống.

3.2. Xây dựng bộ quan sát trạng thái của hệ thống

Bộ điều khiển thích nghi trạng thái cần đầy đủ các tín hiệu trạng thái hệ thống, trong khi đó vì nhiều lý do khác nhau mà các cảm biến trạng thái không thể có mặt đầy đủ. Do đó bộ quan sát trạng thái được sử dụng để nhận được thông tin đầy đủ về trạng thái hệ thống thông qua các ràng buộc được xây dựng.

Phương trình bộ quan sát:

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + B_0 u + G(y - \hat{y}); \hat{y} = C \hat{x}$$

trong đó, \hat{x} là véc tơ ước lượng trạng thái hệ thống; G - véc tơ hệ số phản hồi của bộ quan sát.

Ma trận G được xác định bởi phương trình:

$$\det[pl - A + GC] = H_g(p),$$

$$\text{Với: } H_g(p) = a_0 p^4 + a_1 \omega_g p^3 + a_2 \omega_g^2 p^2 + a_3 \omega_g^3 p + a_4 \omega_g^4,$$

$$\omega_g = (3 \div 5) \omega_0.$$

3.3. Xây dựng cơ cấu thích nghi

Việc thiết kế thuật toán điều khiển thích nghi với các hệ số của bộ điều chỉnh được thực hiện để thỏa mãn điều kiện:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (x - x_M) = 0,$$

Trong đó, $e = x - x_M$ hoặc $e = \hat{x} - x_M$.

Với thuật toán thích nghi đã xây dựng, tín hiệu đầu vào của hệ thống là $u(t) = g + z(t)$, $z(t) = -h \text{sgn}(B_M^T P \bar{e})$,

Trong đó $\bar{e} = x_M - x = x_M - \hat{x}$; $g(t)$ - lượng đặt đầu vào điều khiển, $z(t)$ - tín hiệu thích nghi, h - hệ số khuếch đại thích nghi, $h = \text{const} > 0$; P - ma trận đối xứng xác định dương, được xác định thông qua phương trình Lyapunov $PA_M + A_M^T P = -Q$, Q là ma trận tam giác xác định dương.

Giá trị cụ thể của ma trận Q có thể được lựa chọn theo kinh nghiệm hoặc theo thuật toán đặc biệt [7]. Chương trình tối ưu hóa việc lựa chọn các giá trị cho ma trận Q nhằm thỏa mãn điều kiện tỷ lệ giữa trị riêng lớn nhất và trị riêng nhỏ nhất của ma trận P đạt cực tiểu.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

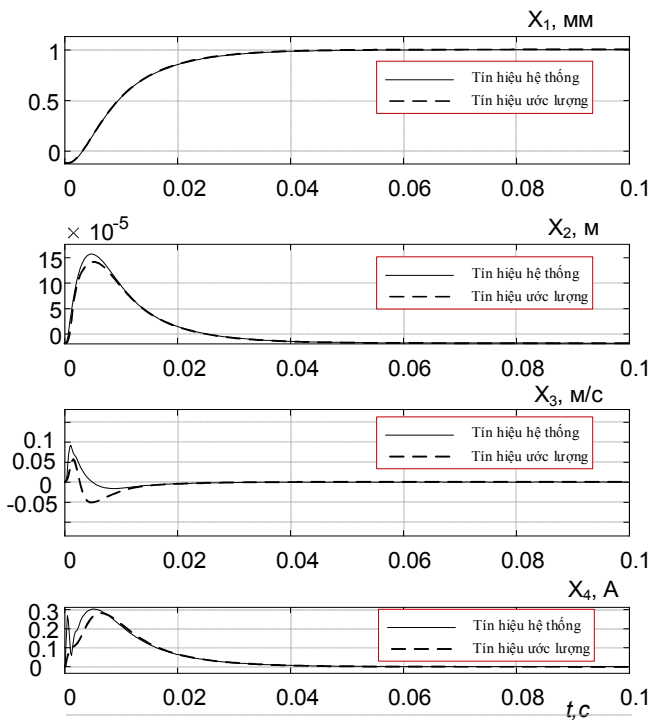
Mô phỏng hệ thống servo điện thủy lực với các trường hợp sau: hệ thống nguyên bản, hệ thống tuyến tính hóa, mô hình mẫu, hệ thống. Minh chứng hiệu quả của bộ điều khiển thích nghi, so sánh với hệ thống nguyên bản, ta đặt vào hệ thống những sự thay đổi về thông số hệ thống có thể xảy ra trong quá trình làm việc.

Tham số mô phỏng như sau:

$k_e = 1,5; k_i = 3; T_i = 0,1; r = 12; T_{em} = 0,12; k_{Fl} = 0,12;$
 $C_e = 162; b_{lm} = 1,99; m_{lm} = 0,017;$
 $k_{vx} = 450000; k_{ux} = 1; C_{lm} = 21820.$

*** Kiểm nghiệm bộ quan sát trạng thái**

Mô phỏng hệ thống cùng bộ quan sát trạng thái, ta thấy tín hiệu ước lượng trạng thái trên bộ quan sát (tín hiệu ước lượng) bám sát hệ thống nguyên bản (tín hiệu hệ thống). Việc bám sát càng tốt khi tăng hệ số của ma trận phản hồi G.

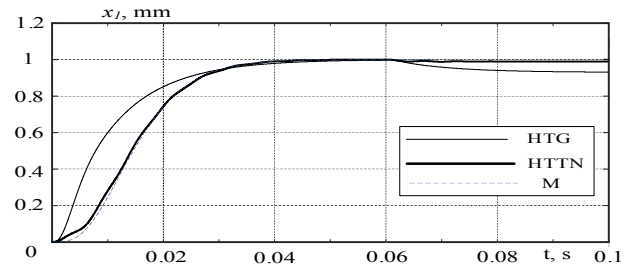


Hình 8. Giải đồ so sánh tín hiệu bộ quan sát trạng thái và mô hình hệ thống

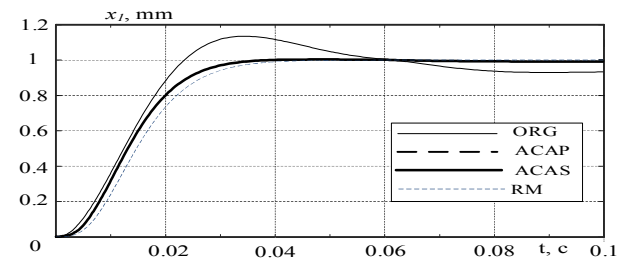
Trên hình 8 là giải đồ so sánh các tín hiệu trạng thái của hệ thống bậc 4 bao gồm 4 tín hiệu từ X1 đến X4, ta thấy rằng có những sai lệch nhất định trong giai đoạn quá độ, tuy nhiên bộ quan sát phản ánh đúng các tín hiệu của hệ thống.

Trên hình 9 thể hiện đặc tính quá độ của hệ thống servo điện thủy lực nguyên bản (HTG), của hệ thống servo điện thủy lực có bộ điều khiển thích nghi (HTTN) và của mô hình mẫu (M) tại giá trị $k_i = 3, C = C_{lm}$. Hệ thống thích nghi servo điện thủy lực đã bám sát mô hình mẫu mong muốn, trong khi đó mô hình gốc với bộ điều khiển PI chậm hơn nhiều so với mô hình mẫu. Đặc biệt, tại thời điểm $t = 0,06$ s, đặt tải $F_N = 1N$ lên đầu ra động cơ, đặc tính của hệ thống nguyên bản có xu hướng đi xuống tạo nên sai lệch tĩnh lớn, trong khi đó với hệ thống servo thích nghi, lượng sai lệch này là không đáng kể (< 1%).

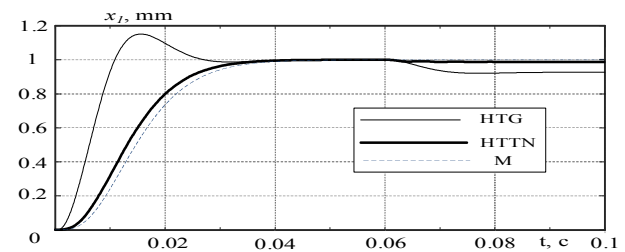
Khi giảm hệ số bộ điều khiển PI mạch vòng dòng điện của động cơ (hình 10), lượng quá điều chỉnh và sai lệch tĩnh khi tăng tải của hệ thống nguyên bản có xu hướng tăng lên, trong khi đặc tính hệ thống servo thích nghi vẫn bám sát đặc tính mong muốn của mô hình mẫu.



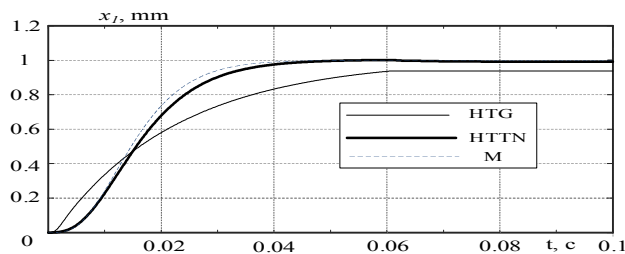
Hình 9. Đặc tính quá độ các hệ thống tại $k_i = 3, C = C_{lm}$



Hình 10. Đặc tính quá độ các hệ thống tại $k_i = 0,5, C = C_{lm}$



Hình 11. Quá trình quá độ của các hệ thống servo khi thay đổi các thông số của phần đàn hồi của động cơ truyền động thẳng ($k_i = 2, C = 0,5C_{lm}$)



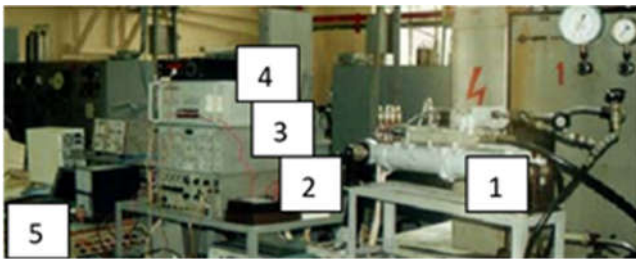
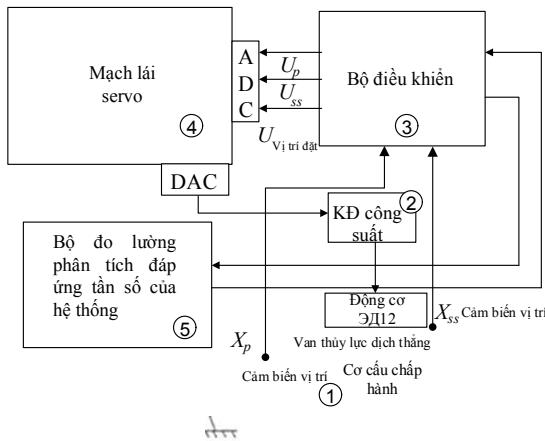
Hình 12. Quá trình quá độ của các hệ thống servo khi thay đổi các thông số của phần đàn hồi của động cơ truyền động thẳng ($k_i = 2, C = 2C_{lm}$)

Với việc tăng tốc độ của phần cơ khí của hệ thống servo (hình 11). Tần số cộng hưởng của động cơ truyền động thẳng tăng gấp 2 lần tần số ban đầu. Bộ điều khiển thích nghi vẫn đưa đặc tính của hệ thống servo bám sát đặc tính của mô hình mẫu mong muốn cả khi quá độ và khi thay đổi tải.

Bằng cách giảm tần số cộng hưởng của động cơ đi một nửa (hình 12), Sự thích nghi của hệ thống điều khiển vẫn đưa chuyển động của hệ thống servo đến gần hệ thống mô hình mẫu. Ta thấy trong tất cả các trường hợp trên, bộ điều khiển thích nghi đã tăng độ dự trữ biên pha cần thiết cho hệ thống.

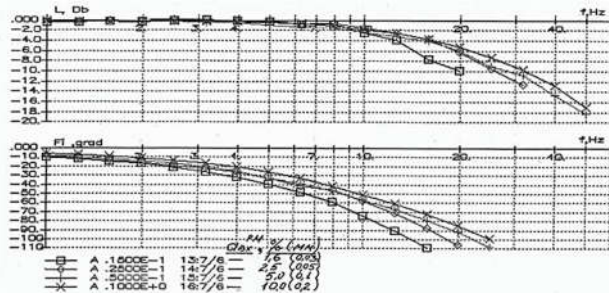
5. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Tiến hành thực nghiệm trên bàn thí nghiệm thủy lực chuyên dụng Test bench với sơ đồ hình 13.

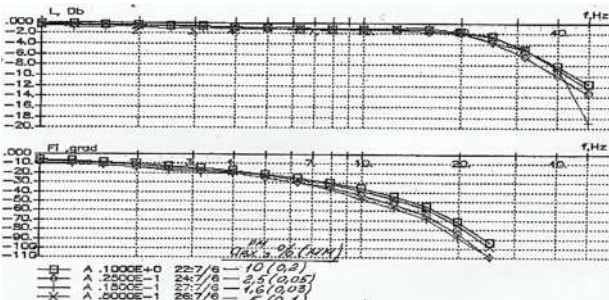


Hình 13. Mô hình thực nghiệm hệ thống servo điện - thủy lực trên băng thử Test bench

Với kết quả nghiên cứu thực nghiệm khi so sánh giữa bộ truyền động có bộ điều khiển thích nghi (hình 14) và không có bộ điều khiển thích nghi (hình 15) ở các mức khác nhau (nhỏ hơn 0,03mm và hơn 0,2mm) của bộ điều khiển, ta thấy có sự mở rộng băng thông của hệ thống servo với bộ điều khiển thích nghi. Quan sát thấy một cụm dày đặc các nhánh tần số cao của đáp ứng tần số khi bộ điều khiển thích nghi được sử dụng.



Hình 14. Đặc tính hệ servo điện thủy lực (lượng đặt đầu ra 0,03; 0,05; 0,1; 0,2mm), khi không có điều khiển thích nghi



Hình 15. Đặc tính hệ servo điện thủy lực (lượng đặt đầu ra 0,03; 0,05; 0,1; 0,2mm) khi có bộ điều khiển thích nghi

6. KẾT LUẬN

Bộ quan sát trạng thái hệ thống phản ánh đúng các biến trạng thái của hệ thống trong điều kiện thiếu các cảm biến. Điều này cho phép việc điều khiển hệ thống sử dụng các thông tin trạng thái ước lượng.

Hệ thống servo điện thủy lực chứa trong nó nhiều phần tử phi tuyến và các thông số không chắc chắn bao gồm tốc độ của mạch vòng dòng điện động cơ, lực ngoài tác động và sự cộng hưởng của phần cơ của động cơ truyền thẳng. Tuy nhiên chất lượng đầu ra của hệ thống đã được cải thiện rõ rệt khi được bổ sung bộ điều khiển thích nghi với mô hình mẫu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V. Kuznetsov, S. Konstantinov, N. Polyakhov, et al, 2011. *Electrohydraulic actuators of aircraft flight surface with adaptive control*. St. Petersburg, Russia: Publishing House of the ETU "LETI".
- [2]. Bortsov Yu. A., Polyakhov N. D., Putov V.V., 1984. *Electromechanical systems with adaptive and modal control*. Leningrad, USSR: Energoatomizdat, 216 pp.
- [3]. Kuznetsov V.E., Polyakhov N.D., 2015. *Adaptive control of technical plants based on exo-model*. Proceedings of International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2015, art.no. 7190425, pp. 106-108, DOI: 10.1109/SCM.2015.7190425
- [4]. *Adaptive control of the steering servo system based on exo-model* / B. Kuznetsov V.E.// *Problems of improvement of robotic and intelligent aircraft systems*: Collection of reports of the X All-Russian Scientific Technical Conference. 26.6.2015, MAI - Moscow.2015. – C.204–208.
- [5]. Kuznetsov VE, Chung PT, Lukichev AN, Ha NH., 2019. *A Linear Electric Motor Servo System with the Adaptive Controller Based on Exo-model*. ElConRus (pp. 584-589). IEEE.
- [6]. V. V. Putov, V. N. Sheludko, 2009. *Multi mass mechanical objects with resilient deformations control systems: Study guide*. SPb.: Publisher house SPbETU «LETI», pp. 167.
- [7]. Kuznetsov VE, Chung PT, 2018. *The program for calculating the parameters of the signal adaptive algorithm for the servo electro-hydraulic system*. Certificate of state registration of computer programs № 2018664091.
- [8]. Vladimir E. Kuznetsov, Phan Thanh Chung, Andrey N. Lukichev, 2019. *Synthesis of Adaptive Regulator for Servo System with Linear Electric Motor*. 2019 XXII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)). St. Petersburg.
- [9]. *Hydraulic drives of aircraft* [Text] / N.S. Gamynin, V.I. Karaev A.M. Potapov, M.P. Selivanov. Under. ed. IN AND. Karaev. M.: Mashinostroenie, 1992.
- [10]. V. E. Kuznetsov, A. D. Skakun, Phan Thanh Chung, Nguyen Dinh Khanh, 2021. *Adaptive Algorithms for a Servo System Using a Linear Electric Motor*. Russian Electrical Engineering volume 92, 169–174.
- [11]. Kuznetsov, V. E., Phan Thanh Chung, S. V. Konstantinov. 2019. *Expanding Control Range of Nonlinear Precision Tracking Systems with a Linear Electric Motor by Means of Adaptive Control*. Russian Electrical Engineering 90.12: 786-792.

AUTHORS INFORMATION

Phan Thanh Chung¹, Hoang Thi Thu Giang², Phan Thi Cam Trang³

¹Military Institute of Mechanical Engineering

²Faculty of Electrical Engineering, Hanoi University of Industry

³Faculty of Mechanical Engineering, Hanoi University of Civil Engineering