ĐIỀU KHIỂN ĐÓN TRƯỚC PI-SMITH TRONG HỆ THỐNG BẮT BÁM MỤC TIÊU CÓ TRỄ XỬ LÝ ẢNH VÀ TRUYỀN THÔNG

Vũ Quốc Huy*, Nguyễn Văn Đức, Chu Đức Chình, Nguyễn Thị Lê Na

Tóm tắt: *Xử lý ảnh và truyền thông của một đài quan sát trong hệ thống bắt bám mục tiêu C4I là quá trình có trễ. Trong bài báo này, trễ được hạn chế bởi bộ đón trước Smith bằng cách đưa thành phần trễ ra khỏi vòng điều khiển kín. Khi luật điều khiển PI truyền thống không mang lại chất lượng điều khiển mong muốn, giải pháp kết hợp điều khiển PI với bộ đón trước Smith sẽ nâng cao chất lượng điều khiển cho hệ thống. Mô hình hóa và mô phỏng hệ điều khiển kênh hướng của đài quan sát với tham số thực cho thấy hiệu quả của giải pháp.*

Từ khóa: Hệ bắt bám mục tiêu; Trễ xử lý ảnh; Trễ truyền thông; Điều khiển đón trước; PI; Smith.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

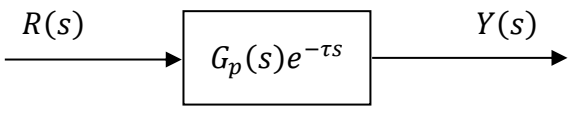
Trễ là một hiện tượng thường xảy ra trong đo lường, truyền thông và trong các hệ thống tính toán. Trong hệ thống thông tin, chỉ huy và điều hành tích hợp C4I (Command - Control - Communications - Computers, Intelligence) [1], đài quan sát (ĐQS) quang điện tử sử dụng các camera ngày, đêm để bắt bám mục tiêu. Trễ xảy ra trong quá trình phản hồi tín hiệu ảnh từ các camera (bao gồm cả quá trình xử lý ảnh) đặc biệt là camera ảnh nhiệt, làm suy giảm chất lượng hệ thống. Thực tế cho thấy, với những hệ thống bắt bám phát triển trên nền nghiên cứu [1], dù công nghệ máy tính nhúng đã tăng cường khả năng tính toán, song vẫn còn trễ trong xử lý ảnh và truyền thông cần được khắc phục thêm bằng các thuật toán điều khiển.

Bài toán xử lý thông tin đo lường điều khiển các đối tượng có trễ vẫn luôn thu hút nhiều sự quan tâm. Ở nghiên cứu [2], thuật toán điều khiển cấu trúc biến đổi ở chế độ trượt được xác định trên cơ sở mô hình đối tượng không chứa trễ và bộ đón trước Smith. Mặc dù thuật toán điều khiển hướng đến đối tượng vừa có trễ vừa có sự thay đổi tham số trong dải rộng, song cần phải liên tục hiệu chỉnh tham số của bộ đón trước và đặt ra yêu cầu động học của luật thích nghi phải có thời gian đáp ứng nhỏ hơn thời gian trễ. Trong [3], vấn đề xử lý thông tin đo lường có trễ được thực hiện bằng giải pháp hồi phục và ngoại suy tín hiệu. Trên cơ sở của vi xử lý và công nghệ nhúng FPGA, một số nhà thiết kế ứng dụng đã xây dựng các hệ thống số, có khả năng thực hiện các thuật toán phức tạp ở chế độ thời gian thực. Trong [4], trễ xử lý ảnh được xử lý bằng hệ logic mờ, tuy nhiên sai lệch bám ảnh (độ lệch tâm ảnh) còn khá rộng do độ quá chỉnh của hệ thống vẫn còn tương đối lớn.

Trong nghiên cứu này, đối với ĐQS có các tham số xác định hoặc dải tham số thay đổi không đáng kể, nhằm hạn chế ảnh hưởng của trễ truyền thông, trễ xử lý ảnh và tốc độ lấy mẫu đo lường chậm mà hệ thống xử lý ảnh gặp phải, ứng dụng tính đơn giản và dễ dàng lập trình kỹ thuật của điều khiển PID, chúng tôi đề xuất luật điều khiển đón trước PI-Smith. Ở đây, trên cơ sở mô hình toán học của hệ thống bao gồm cơ cấu chấp hành, cơ cấu đo lường và xử lý ảnh, thời gian trễ tối đa trong hệ thống để xác định tham số của bộ đón trước Smith được định lượng ngay từ đầu. Do vậy tính ổn định và chất lượng của hệ thống đã được đánh giá với lượng trễ lớn nhất.

2. BỘ ĐÓN TRƯỚC SMITH

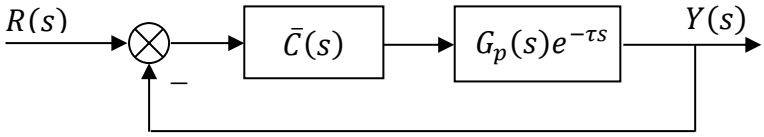
Một cách tổng quát, bộ đón trước Smith là một bộ điều khiển dự báo được thiết kế cho hệ thống điều khiển có sự hiện diện đáng kể của trễ thời gian.



Hình 1. *Sơ đồ vòng hở của hệ thống có trễ.*

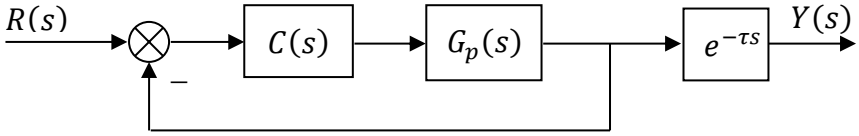
Giả sử, đối tượng điều khiển bao gồm thành phần không có trễ $G_p(s)$ và thành phần trễ thời gian $e^{-\tau s}$. Hệ thống có đầu vào $R(s)$, đầu ra $Y(s)$ như thể hiện trên hình 1.

Thông thường, đối tượng không chứa trễ $G_p(s)$ được điều khiển bởi bộ điều khiển $C(s)$. Khi $G_p(s)$ chứa trễ, cần phải thay thế $C(s)$ bởi bộ điều khiển $\bar{C}(s)$ phù hợp hơn. Khi đó, hệ thống có cấu trúc như hình 2.



Hình 2. *Sơ đồ hệ thống kín với bộ bù trễ.*

Mục tiêu của $\bar{C}(s)$ là vẫn đảm bảo chức năng của $C(s)$ và phải đưa được trễ $e^{-\tau s}$ ra khỏi vòng kín. Khi đó, hệ thống có cấu trúc như hình 2 sẽ tương đương với cấu trúc trên hình 3.



Hình 3. *Sơ đồ hệ thống điều khiển kín không có trễ.*

Hàm truyền đạt của hệ thống với cấu trúc trên hình 2:

$$W_k = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1+\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \tag{1}$$

Hàm truyền đạt của hệ thống với cấu trúc trên hình 3:

$$W_k = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G_p(s)}{1+C(s)G_p(s)}e^{-\tau s} \tag{2}$$

Hệ thống điều khiển trong hình 2 và hình 3 là tương đương. Từ (1) và (2) sẽ có:

$$\frac{\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1+\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s}} = \frac{C(s)G_p(s)}{1+C(s)G_p(s)}e^{-\tau s} \tag{3}$$

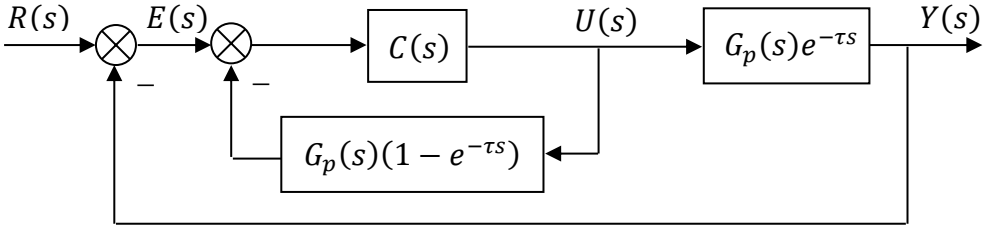
$$\left(1+C(s)G_p(s)\right)\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s} = \left(1+\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s}\right)C(s)G_p(s)e^{-\tau s} \tag{4}$$

$$\left(1+C(s)G_p(s)\right)\bar{C}(s)G_p(s)e^{-\tau s} - C(s)\bar{C}(s)\left(G_p(s)e^{-\tau s}\right)^2 = C(s)G_p(s)e^{-\tau s} \tag{5}$$

Từ đó:

$$\bar{C}(s) = \frac{C(s)}{1+C(s)G_p(s)(1-e^{-\tau s})} \tag{6}$$

Biểu diễn (6) vào trong cấu trúc hệ thống ở hình 2 sẽ nhận được cấu trúc của hệ thống điều khiển có trễ với bộ đón trước Smith như hình 4.

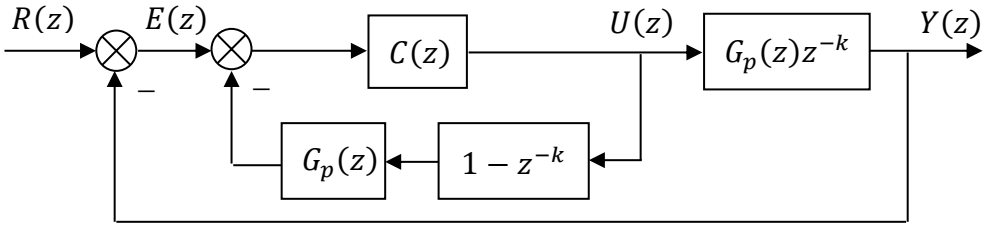


Hình 4. *Cấu trúc điều khiển đón trước Smith.*

Chuyển sang miền rời rạc, hệ thống điều khiển trễ thời gian z^{-k} có cấu trúc như hình 5. Bộ

điều khiển số sử dụng bộ đón trước Smith có hàm truyền đạt như biểu diễn trong (7):

$$\bar{C}(z) = \frac{C(z)}{1 + C(z)G_p(z)(1 - z^{-k})} \tag{7}$$



Hình 5. *Cấu trúc điều khiển đón trước Smith trong miền số.*

Nhận xét: Hệ thống điều khiển số trên hình 5 có 2 vòng hồi tiếp âm. Vòng ngoài là vòng phản hồi đầu ra như thường thấy. Tuy nhiên, do đối tượng có chứa trễ nên chỉ riêng vòng hồi tiếp đầu ra không đáp ứng đủ chất lượng điều khiển. Một cách trực quan, vòng phản hồi này đang cung cấp thông tin phản ánh không đầy đủ về hệ thống (thông tin không cập nhật). Đối với bước tính thứ k mà ở đó không có thông tin mới, hệ thống sẽ được điều khiển bởi vòng lặp bên trong có chứa bộ đón trước đầu ra (không quan sát được) của đối tượng G_p.

3. ĐỘNG LỰC HỌC HỆ TRUYỀN ĐỘNG BÁM CỦA ĐÀI QUAN SÁT

3.1. Động lực học cơ cấu chấp hành hệ truyền động ĐQS

Gần đây, một loại cơ cấu chấp hành (CCCH) sử dụng động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu (PMSM) và bộ khuếch đại công suất trong hệ truyền động bám là xu thế công nghệ được nhiều cơ sở nghiên cứu ứng dụng. Trong các bộ khuếch đại công suất (hoặc biến tần) đã có một số thuật toán và phương pháp điều khiển động cơ PMSM được tích hợp sẵn. Trong bài báo này, sau khi lựa chọn động cơ và bộ biến tần phù hợp, chúng tôi tiến hành cài đặt, hiệu chỉnh tham số biến tần ở chế độ điều khiển trực tiếp mô men hoặc tích hợp biến tần cùng với động cơ PMSM thành một vòng điều chỉnh tốc độ để có đáp ứng tốc độ tốt nhất với tải sử dụng. Nhiệm vụ còn lại là tổng hợp thuật toán vòng ngoài trên cơ sở mô hình động lực học của hệ truyền động bám.

Thực tế, cơ hệ của ĐQS được thiết kế đảm bảo độ đối xứng để không bị mất cân bằng động học, vì thế có thể phân rã hệ truyền động ĐQS thành 2 kênh điều khiển độc lập có cấu trúc tương tự nhau, kênh tầm và kênh hướng.

Phương trình động lực học hệ cơ điện của kênh tầm và kênh hướng có dạng:

$$J_m \frac{d\omega_\theta}{dt} = M_m - M_l - b\omega_\theta \tag{8}$$

Trong đó: ω_θ là tốc độ quay của rotor, $\omega_\theta = \dot{\theta}$; J_m là mô men quán tính quy về đầu trục động cơ; M_m là mô men điện từ; M_l là mô men tải quy về đầu trục động cơ; b là hệ số ma sát quay.

Chuyển sang miền ảnh Laplace, phương trình (8) trở thành:

$$(J_m s + b)\omega_\theta(s) = M_m - M_l \tag{9}$$

$$\omega_\theta(s) = \frac{M_m - M_l}{J_m s + b} \tag{10}$$

Khi tính chọn công suất động cơ đủ lớn, động lực học cơ hệ của một kênh điều khiển ĐQS được mô tả bởi một khâu quán tính có hàm truyền đạt (11):

$$\frac{\omega_\theta(s)}{M_m(s)} \overset{\text{def}}{=} \frac{k}{\tau s + 1} \tag{11}$$

Trong đó: $\tau = J_m/b$ là hằng số thời gian quán tính của khối biến tần – động cơ; $k = 1/b$ là

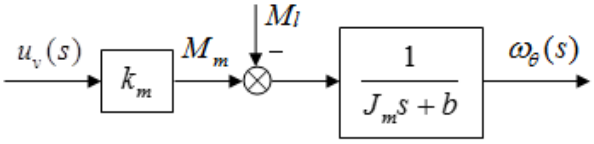
hệ số khuếch đại.

Cài đặt và hiệu chỉnh tham số biến tần hoạt động ở chế độ điều khiển trực tiếp mô men, động lực học của khối biến tần – động cơ PMSM được mô tả bởi khâu tỉ lệ giữa mô men và điện áp điều khiển.

$$M_m = k_m u_v \tag{12}$$

Với u_v là điện áp điều khiển đưa vào biến tần; k_m là hệ số điều chỉnh mô-men theo điện áp.

Sơ đồ cấu trúc hệ truyền động bám góc kênh tầm và hướng của ĐQS được mô tả như hình 6.



Hình 6. *Sơ đồ cấu trúc khối CCCH với đầu vào điện áp.*

3.2. Động học của cơ cấu đo lường và xử lý ảnh

a) Động học cơ cấu đo góc mục tiêu từ camera

Theo [3], sai lệch góc hướng, góc tầm $(\Delta\beta_M, \Delta\varepsilon_M)$ của mục tiêu (β_M, ε_M) đã quy đổi theo đơn vị radian là:

$$\Delta\beta_M = \beta_M - \beta_0 = \frac{x_M - P_{x0}}{k_x};\ \Delta\varepsilon_M = \varepsilon_M - \varepsilon_0 = \frac{y_M - P_{y0}}{k_y} \tag{13}$$

Trong đó:

β_0, ε_0 lần lượt là góc hướng và góc tầm của ĐQS tương ứng với điểm trung tâm của camera trong mặt phẳng ảnh; P_{x0} và P_{y0} biểu diễn tâm của màn hình quan sát.

$$P_{y0} = P_y/2;\ P_{x0} = P_x/2 \tag{14}$$

P_x, P_y là chiều rộng và chiều cao của khung ảnh được đưa vào xử lý (pixel).

$$k_x = P_x/G_x;\ k_y = P_y/G_y \tag{15}$$

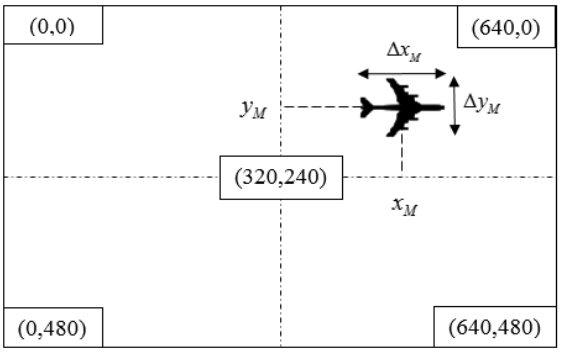
G_x, G_y là góc mở của camera theo chiều ngang, chiều dọc mặt phẳng ảnh (rad).

Sau khi thiết lập ĐQS, các góc hướng β_0, góc tầm ε_0 cũng chính là góc đường ngắm của ĐQS.

Do vậy, (13) được viết lại như sau:

$$\Delta\beta_M = \beta_M - \beta = \frac{x_M - P_{x0}}{k_x};\ \Delta\varepsilon_M = \varepsilon_M - \varepsilon = \frac{y_M - P_{y0}}{k_y} \tag{16}$$

Như vậy từ độ lệch tâm ảnh, sai lệch góc bám mục tiêu trong hệ tọa độ liên kết được tính toán theo công thức (16).



Hình 7. *Biểu diễn mục tiêu trên màn hình quan sát [3].*

b) Động học khâu xử lý ảnh

Trong các ĐQS [1, 4], máy tính xử lý ảnh nhận tín hiệu video từ camera, qua cạc thu thập số hóa video thành các chuỗi khung ảnh (frame) với tốc độ thu thập 40 frame/s. Mỗi chuỗi khung ảnh này được xử lý, lưu lại dưới dạng mảng dữ liệu [3]. Mỗi phần tử trong mảng là một dữ liệu kiểu cấu trúc chứa các thông tin bao gồm góc tầm của mục tiêu; góc hướng của mục tiêu; chiều rộng của mục tiêu; chiều cao của mục tiêu; độ sáng trung bình của mục tiêu; thời điểm cập nhật. Để có được độ lệch tâm ảnh như công thức (15), quá trình xử lý ảnh đã thực hiện một số thuật toán xử lý và bám ảnh. Quá trình xử lý ảnh để đưa ra độ lệch tâm ảnh, cùng với quá trình truyền sai lệch bám ảnh tới vòng điều khiển trong máy tính xử lý trung tâm bị trễ một khoảng thời gian. Thực tế trong một số hệ thống [1, 4], quá trình xử lý ảnh có thể chiếm khoảng thời gian bằng thời gian thu thập 3 frame ảnh. Với tốc độ thu thập 40 frame/s, để đưa ra được độ lệch tâm ảnh hệ thống bị trễ 0,075 s. Quá trình truyền thông với vòng điều khiển mất 0,010 s. Tổng trễ trong hệ thống là 0,085 s.

4. MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

4.1. Tham số đối tượng mô phỏng

Thông số kỹ thuật của ĐQS được trích xuất từ các hệ bắt bám cố định đang trang bị cho các cPPK 37^{mm} - 2N [1]. Mô phỏng được thực hiện với kênh điều khiển góc hướng của ĐQS.

a) Cơ cấu chấp hành

Động cơ loại ECMA, biến tần ASDA-B2 của Delta [6]:

- Công suất: $P = 750$ W;
- Mô men cực đại: $T_{max} = 2{,}39$ Nm;
- Mô men quán tính động cơ: $J_m = 1{,}13 \times 10^{-4}$ kgm^2;
- Hệ số ma sát tải: $b = 10^{-3}$ Nm/(rad/s);
- Hệ số khuếch đại khâu điều chỉnh mô men: $J_m = 0{,}717$ Nm/V;
- Hộp số Harmonic, tỉ số truyền của kênh tầm i_E và kênh hướng i_A là 160. Giả sử hiệu suất truyền động kênh tầm η_E và kênh hướng η_A là 100%.

b) Mô hình nhận dạng kênh hướng của ĐQS

Sử dụng các thuật toán điều khiển sẵn có trong bộ biến tần đi kèm động cơ PMSM và cài đặt khâu biến tần – động cơ PMSM như một khâu điều khiển theo tốc độ, bằng thực nghiệm chủ động chúng tôi xác định được hàm truyền hở của khâu biến tần - động cơ có dạng (17).

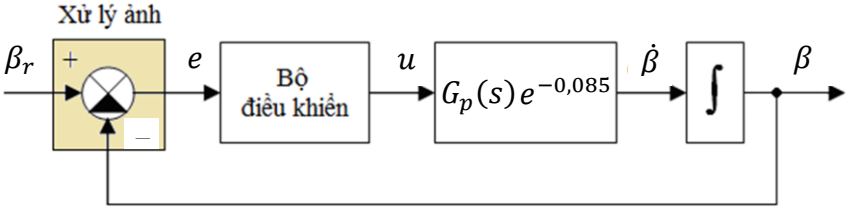
$$G_{CCCH}(s) = \frac{310{,}859}{0{,}048s + 1} \tag{17}$$

Mô men quán tính kênh hướng: $J_L = 1{,}25$ kgm^2.

Tổng trễ thời thời gian: $\tau = 0{,}085$ s.

Đối tượng điều khiển không có trễ:

$$G_p(s) = \frac{310{,}859}{0{,}048s + 1} \times \frac{1}{1{,}25s} \tag{18}$$



Hình 8. *Sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển bám của kênh hướng.*

Sơ đồ cấu trúc hệ điều khiển bám kênh hướng với góc đặt β_r được biểu diễn trên hình 8. Kênh hướng (18) được kiểm soát bởi bộ điều khiển u.

4.2. Kết quả mô phỏng với bộ điều khiển PI-Smith

Bộ điều khiển PI với cấu trúc (19):

$$C_{PI} = K_p + K_i \frac{z}{z-1} \tag{19}$$

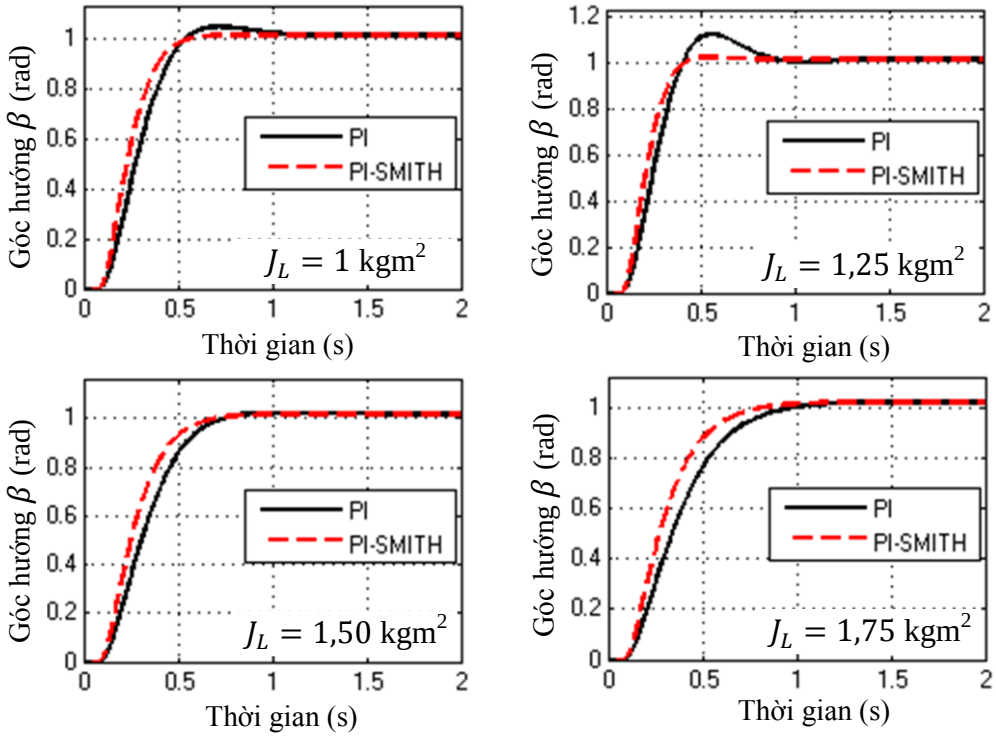
Tham số của bộ điều khiển PI được xác định theo tiêu chuẩn tối ưu đối xứng:

$$K_p = 0{,}237;\ K_i = 4{,}928. \tag{20}$$

Chọn thời gian lấy mẫu T_s = 0,005 s, hàm truyền của đối tượng là:

$$G_p(z) = \frac{0{,}02104z^2 + 0{,}082z + 0{,}01997}{z^2 - 1{,}901z + 0{,}9011} \tag{21}$$

Nhận xét: Hình 9 thể hiện đáp ứng quá độ của hệ thống có trễ với 4 trường hợp tham số mô men quán tính của của đối tượng (18) thay đổi.



Hình 9. *Đáp ứng quá độ của hệ thống khi tải thay đổi.*

- Trường hợp $J_L = 1{,}25$ kgm^2 tương ứng với mô men quán tính danh định, điều khiển PI-Smith giúp cho hệ thống nhanh xác lập và không quá chỉnh.

- Khi mô men quán tính tăng lên (trường hợp $J_L = 1{,}50$ kgm^2, $J_L = 1{,}75$ kgm^2) đồng nghĩa với tải lớn hơn, quán tính tải bù được quá chỉnh song thời gian xác lập của hệ cũng lớn hơn. PI-Smith đã cải thiện rõ rệt thời gian xác lập cho hệ thống.

- Khi mô men quán tính giảm, $J_L = 1$ kgm^2, có nghĩa với tải giảm đi, PI-Smith ngoài việc giúp cho hệ thống không có quá chỉnh còn rút ngắn thời gian xác lập.

Như vậy, các kết quả mô phỏng đều cho thấy việc kết hợp điều khiển PI và bộ đón trước Smith làm cho hệ thống có trễ thu được chất lượng điều khiển tốt hơn so với chỉ sử dụng bộ điều khiển PI thông thường. Khi thời gian xác lập và độ quá chỉnh của hệ thống được rút ngắn thì sai

lệch bám cũng sẽ giảm đi.

5. KẾT LUẬN

Giải pháp kết hợp điều khiển PI với bộ đón trước Smith cho ĐQS trong hệ thống thông tin, chỉ huy và điều hành tích hợp C4I đảm bảo hệ thống có chất lượng điều khiển tốt hơn so với bộ điều khiển PI thông thường. Kết quả mô phỏng đã cho thấy độ quá chỉnh và thời gian xác lập của hệ thống điều khiển kênh hướng được cải thiện rõ rệt. Đối với đối tượng điều khiển có tham số thay đổi trong dải rộng, nghiên cứu tiếp theo hướng đến việc xây dựng cấu trúc và tham số thích nghi cho bộ đón trước Smith trên cơ sở chứng minh động học của luật thích nghi có đáp ứng nhanh và hội tụ trong khoảng thời gian hữu hạn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Viện Tự động hóa KTQS (2005), "*Đại đội PPK 37^{mm} - 2N tác chiến ngày và đêm*", Tài liệu kỹ thuật tổng hợp, Hà Nội.

[2]. Cao Tiến Huỳnh (2005), "*Tổng hợp hệ điều khiển trượt thích nghi cho các đối tượng có trễ*", Hội nghị toàn quốc lần thứ 6 về Tự động hóa (VICA 6), tr. 288 - 293.

[3]. Vũ Quốc Huy, Nguyễn Quang Hùng, Nguyễn Vũ (2016), "*Thuật toán đồng bộ và tổng hợp số liệu đầu vào hệ điều khiển bám góc mục tiêu của đài quan sát sử dụng thông tin từ hệ quang ảnh*", Tạp chí Khoa học & Kỹ thuật, Số 180, T10-2016, tr. 74-81.

[4]. Maurício Gruzman, Hans Ingo Weber and Luciano Luporini Menegaldo (2010), "*Control of a target tracking system embedded in a moving body*", ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol. 4, pp. 80-89.

[5]. A. Ingimundarson and T. Hagglund (2001), "*Robust Tuning Procedures of Dead-Time Compensating Controllers*", Control Engineering Practice, No. 9, pp. 1195-1208.

[6]. www.delta.com.tw/product/em/.../manual/DELTA_ASDA- B2_M_EN_20130906.pdf

ABSTRACT

PREDICTOR CONTROL PI-SMITH IN THE TRACKING SYSTEM WITH TIME DELAY IN IMAGE PROCESSING AND COMMUNICATION

Delay in image processing and communication of an observatory in the C4I target tracking system is limited by the Smith predictor by taking the delay component out of the closed control loop. When the traditional PI control rule does not give the desired control quality, the combination of the PI control and the Smith predictor will improve system quality. Modeling and simulation of azimuth channel control system with real parameters shows the effectiveness of the solution.

Keywords: Target tracking system; Image processing delay; Communication delay; Predictor control; PI; Smith.

Nhận bài ngày 15 tháng 4 năm 2021
Hoàn thiện ngày 05 tháng 8 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: Viện Tự động hóa KTQS.
[*]Email: maihuyvu@gmail.com; vuquochuy@capiti.info.