

ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN RST SỐ TRONG ĐIỀU KHIỂN BỀN VỮNG

AN APPLICATION OF DIGITAL RST CONTROLLERS IN ROBUST CONTROL

Trần Đình Khôi Quốc¹, Nguyễn Thị Hoài Hương²

¹Đại học Đà Nẵng; tdkquoc@ac.udn.vn

²Trường Cao đẳng Nghề Đà Nẵng; huongnguyen190783@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo giới thiệu ứng dụng của bộ điều khiển RST số trong điều khiển bền vững nhằm đảm bảo các độ dự trữ ổn định và hạn chế ảnh hưởng của nhiễu. Từ mối liên hệ giữa độ dự trữ modulun với hàm độ nhạy ngõ ra, chúng tôi trình bày phương pháp đạt được các độ dự trữ ổn định thông qua việc hạn chế giá trị cực đại của hàm độ nhạy ngõ ra. Quá trình thiết kế được thực hiện qua hai bước: gán cực và bám mô hình mẫu. Ở bước gán cực, ngoài các cực chính, các cực phụ được bổ sung vào hệ thống để thay đổi đặc tính Bode hàm độ nhạy. Ảnh hưởng của nhiễu lên ngõ vào đối tượng còn được hạn chế nhờ thành phần phụ trong R. Ở bước bám mẫu, mô hình mẫu được lựa chọn để hệ thống đạt được các chỉ tiêu chất lượng ở quá trình quá độ. Kết quả mô phỏng trên bộ truyền đại chứng tỏ hệ thống đạt được các yêu cầu về độ dự trữ ổn định và hạn chế được ảnh hưởng của nhiễu đến hệ thống.

Từ khóa - bộ điều khiển RST; điều khiển bền vững; hàm độ nhạy; độ dự trữ mô đun; mô hình mẫu; gán cực.

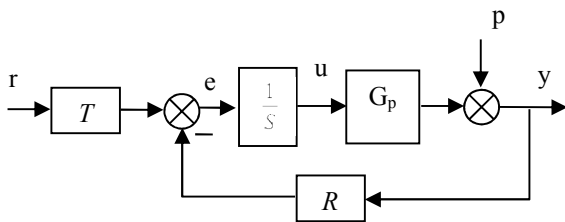
Abstract - This article introduces an application of RST controllers in robust control in order to obtain stability margins and reduce disturbance effect. From the relationship between modulus margin and output sensitivity function, we present a method to obtain stability margins by limiting maximum value of output sensitivity function. Design process comprises two stages: pole assignment and model tracking. In the pole assignment stage, besides dominant poles, auxiliary poles are added to change Bode diagram of sensitivity functions. Effect of disturbance on input of plant is also restrained by additional term in R. In the model tracking stage, a model is chosen so that the system will reach required time domain specifications. Simulation result on flexible transmission shows that the system attains required stability margins and limits disturbance effect on the system.

Key words - RST controller; robust control; sensitivity function; modulus margin; model; pole assignment.

1. Giới thiệu bộ điều khiển RST số

Điều khiển bền vững là yêu cầu đối với các hệ thống có thông số biến đổi hoặc làm việc trong môi trường nhiễu nhưng vẫn đảm bảo các chỉ tiêu chất lượng đề ra, mà không phụ thuộc vào sự thay đổi đó. Tính toán thiết kế bộ điều khiển bền vững đã thu hút được sự quan tâm của nhiều tác giả khác nhau, được tổng kết trong [3]. Bài báo này giới thiệu một ứng dụng của bộ điều khiển RST số để điều khiển bền vững hệ thống trong môi trường nhiễu và đảm bảo các độ dự trữ ổn định đặt ra.

Bộ điều khiển RST số gồm 3 thành phần R, S, T phân biệt được giới thiệu trong [1] là một ứng dụng của điều khiển số trong lĩnh vực điều khiển. So với bộ điều khiển PID cổ điển giới hạn trong ba thông số tính toán, bộ điều khiển RST số tỏ ra linh hoạt hơn nhờ vào tính đa dạng của ba thành phần R, S, T với nhiều thông số để lựa chọn. Nhờ vậy, bộ điều khiển RST có thể điều khiển cho nhiều hệ thống có tính chất rất khác nhau làm thay đổi triệt để tính chất của hệ thống. Nhiều ứng dụng của bộ điều khiển RST số đã được nghiên cứu, phát triển như điều khiển bám mô hình mẫu [5] hay điều khiển hàm độ nhạy [9], ứng dụng trong điều khiển đối tượng thực tế [6], [7], [8],...



Hình 1. Hệ thống với bộ điều khiển RST số

Xét sơ đồ khối tổng quát của một hệ thống có bộ điều khiển RST số như Hình 1, trong đó: r là tín hiệu vào, y là

tín hiệu ra và p là tín hiệu nhiễu. Giả sử hàm truyền đạt của đối tượng trong hệ gián đoạn là $G_p(z) = \frac{z^{-d}B(z)}{A(z)}$ với d là số chu kỳ trễ và $A(z)$, $B(z)$ có dạng tổng quát:

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A} \\ B(z) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B} \end{aligned} \quad (1)$$

Khi có bộ điều khiển RST, hàm truyền đạt của hệ kín đối với tín hiệu vào r là:

$$G_{CL}(z) = \frac{z^{-d}B(z)T(z)}{A(z)S(z) + z^{-d}B(z)R(z)} \quad (2)$$

Đặt:

$$P(z) = A(z)S(z) + z^{-d}B(z)R(z) \quad (3)$$

nghiệm của phương trình $P(z) = 0$ là các cực của hệ kín đã có bộ điều khiển. Giả sử các biểu thức $P(z)$, $R(z)$, $S(z)$ được viết dưới dạng tổng quát:

$$\begin{aligned} P(z) &= 1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_P} z^{-n_P} \\ R(z) &= r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_R} z^{-n_R} \\ S(z) &= 1 + s_1 z^{-1} + \dots + s_{n_S} z^{-n_S} \end{aligned} \quad (4)$$

Khi $P(z)$ xác định trước, phương trình (3) có $n_R + n_S + 1$ ẩn số r_i, s_j ($i=0 \div n_R, j=1 \div n_S$). Theo [1], phương trình (3) có nghiệm duy nhất khi:

$$\begin{aligned} n_R &= n_A - 1 \\ n_S &= n_B + d - 1 \\ n_P &\leq n_A + n_B + d - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Để giải (3), đặt phương trình dưới dạng ma trận:

$$Mx = p \quad (6)$$

trong đó:

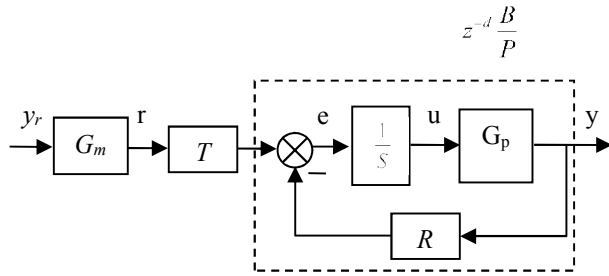
$$x^T = [1, s_1, \dots, s_{n_s}, r_0, \dots, r_{n_r}] \quad (7)$$

$$p^T = [1, p_1, \dots, p_{n_p}, 0, \dots, 0] \quad (8)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & & & b'_1 & & & \\ a_2 & a_1 & & & & & 0 & \\ & & & 0 & & & b'_1 & 0 \\ a_{n_A} & & & 1 & b'_{n_B} & & & b'_1 \\ 0 & a_{n_A} & a_1 & 0 & & & & b'_2 \\ & & & & & & b'_{n_B} & \\ 0 & 0 & a_{n_A} & 0 & 0 & & & b'_{n_B} \end{bmatrix} \quad (9)$$

với $b'_i = 0$ ($i = 0 \div d$); $b'_i = b_{i-d}$ ($i \geq d + 1$).

Giải phương trình (6), ta tìm được vector x chứa các hệ số r_i, s_j , từ đó xác định được thành phần R, S trong bộ điều khiển.



Hình 2. Sơ đồ bộ điều khiển RST bám theo mô hình mẫu

Ngoài các thành phần R, S tác động trực tiếp đến hệ thống qua các cực của hệ kín, thành phần tự do T cũng ảnh hưởng đến tính chất hệ thống thông qua các điểm không. Do việc tính chọn T độc lập với R, S nên bằng việc kết hợp giữa các thành phần R, S, T , ta có thể tạo được bộ điều khiển linh hoạt, đáp ứng được nhiều yêu cầu khác nhau. Trường hợp T có chứa biểu thức của P , như $T(z) = \frac{P(z)}{B(z)}$, hệ thống

có khả năng bám theo mô hình mẫu G_m [5] như sơ đồ biểu diễn trong Hình 2. Trường hợp $B(z)$ có chứa điểm zero không ổn định, để bám theo mô hình mẫu, biểu thức của T được xác định theo [1] là $T(z) = \frac{P(z)}{B(1)}$.

2. Thiết kế bộ điều khiển RST số gắn cực

2.1. Quy trình gắn cực

Cực của hệ kín được xác định từ biểu thức của $P(z)$ nên từ các công thức từ (3) đến (9), ta có thể gắn cực cho hệ kín khi dùng bộ điều khiển RST số. Quy trình thiết kế bộ điều khiển RST số gắn cực như sau:

1. Xác định hàm truyền đạt gián đoạn của đối tượng dưới dạng tổng quát $G_p(z) = z^{-d} \frac{B(z)}{A(z)}$;
2. Chọn n_p điểm cực mong muốn của hệ kín thỏa mãn điều kiện $n_p \leq n_A + n_B + d$ và tính đa thức đặc tính $P(z)$;
3. Xây dựng vector p theo (8) và ma trận M theo (9);
4. Giải phương trình $x = M^{-1}p$;
5. Xác định các thành phần $R(z), S(z)$ theo (7) từ vector

x tìm được.

Trường hợp R, S cần chứa một thành phần biết trước để đạt được yêu cầu điều khiển đặt ra, ví dụ như S chứa một khâu tích phân để loại trừ sai số xác lập trong hệ kín, ta có thể viết R, S dưới dạng:

$$R(z) = H_R(z)R'(z) \quad (10)$$

$$S(z) = H_S(z)S'(z)$$

với $H_R(z), H_S(z)$ là thành phần xác định trước. Phương trình (3) được viết lại như sau:

$$P(z) = A(z)H_R(z)R'(z) + z^{-d}B(z)H_S(z)S'(z) \quad (11)$$

Đặt:

$$A'(z) = A(z)H_R(z) \quad (12)$$

$$B'(z) = B(z)H_S(z)$$

trong đó với A', B' chứa các hệ số đã biết, phương trình (11) được viết lại như sau:

$$P(z) = A'(z)R'(z) + z^{-d}B'(z)S'(z) \quad (13)$$

Giải phương trình (13) theo trình tự thiết kế ở trên, ta tính được các biểu thức $R'(z), S'(z)$ và xác định được các thành phần R, S theo công thức (10).

2.2. Gắn cực phụ

Nhờ khả năng chủ động gắn cực vào hệ kín của bộ điều khiển RST, ngoài các điểm cực chính, ta có thể gắn thêm các cực phụ vào hệ thống. Đa thức đặc tính $P(z)$ sau khi gắn thêm cực phụ có thể được viết:

$$P(z) = P_D(z)P_F(z) \quad (14)$$

với $P_D(z), P_F(z)$ là các đa thức chứa cực chính và cực phụ tương ứng. Các cực phụ được lựa chọn để ít gây ảnh hưởng đến quá trình quá độ do cực chính gây ra.

Từ điều kiện trong (5), số cực phụ có thể thêm vào trong hệ thống phải thỏa mãn:

$$n_{p_f} \leq n_A + n_B + d - n_{p_d} - 1 \quad (15)$$

với n_{p_d}, n_{p_f} là số cực chính, cực phụ của hệ kín trong đa thức đặc tính $P(z)$.

3. Điều khiển bền vững và ảnh hưởng của nhiễu

3.1. Các độ dự trữ ổn định

Trong thực tế điều khiển, ta thường gặp đối tượng có thông số chưa chắc chắn. Có nhiều nguyên nhân dẫn đến tình trạng này như: giá trị thông số của mô hình không chính xác hoặc thay đổi trong quá trình làm việc, sai số mô hình do sử dụng một số giả thiết nhằm đơn giản quá trình tính toán, sai số do quá trình nhận dạng mô hình đối tượng, v.v. Chính vì vậy, tính bền vững rất quan trọng đối với các hệ thống điều khiển trong thực tế nhằm đảm bảo hệ thống làm việc ổn định khi mô hình có những thông số không chắc chắn đó. Nói cách khác, khi thiết kế bộ điều khiển cho đối tượng, ta cần có một độ dự trữ ổn định cho hệ thống.

Các độ dự trữ ổn định thường được sử dụng nhất là độ dự trữ biên độ ΔG (hoặc ΔL theo đơn vị dB) và độ dự trữ về pha $\Delta \varphi$. Phương pháp xác định các độ dự trữ ổn định này được biểu diễn trên đặc tính Nyquist hệ hở $G_{OL}(j\omega)$ trong Hình 3. Theo [2], [4], thông thường các độ dự trữ ổn định cần đạt được khi thiết kế bộ điều khiển là: $\Delta L \geq 6dB$ (hoặc $\Delta G \geq 2$) và $30^\circ \leq \Delta \varphi \leq 45^\circ$.

Theo [10], hàm truyền đạt gián đoạn của đối tượng là

$$G_p(z) = \frac{z^{-d}B(z)}{A(z)}, \text{ trong đó } T_s = 0.05s, d = 2 \text{ và:}$$

$$A(z) = 1 - 1.992z^{-1} + 2.203z^{-2} - 1.841z^{-3} + 0.894z^{-4}$$

$$B(z) = 0.103z^{-1} + 0.181z^{-2}$$

Khi chưa có bộ điều khiển RST, hàm truyền đạt hệ kín phản hồi đơn vị là:

$$G_{CL}(z) = z^{-2} \frac{0.103z^{-1} + 0.181z^{-2}}{1 - 1.992z^{-1} + 2.203z^{-2} - 1.738z^{-3} + 1.075z^{-4}}$$

Hệ kín gián đoạn có 2 điểm cực nằm ngoài đường tròn đơn vị nên không ổn định. Hai chế độ dao động được đặc trưng bởi $\omega_{01}=7.877 \text{ rad/s}$, $\zeta_1=0.358$ và $\omega_{02}=29.646 \text{ rad/s}$, $\zeta_2=0.028$. Nếu sử dụng bộ điều khiển PID thông thường, không tìm được thông số của bộ điều khiển PID để hệ ổn định. Do vậy, chúng tôi sử dụng bộ điều khiển RST số cho hệ thống này.

Yêu cầu đặt ra khi thiết kế bộ điều khiển RST cho bộ truyền đại như sau:

- Các chỉ tiêu chất lượng: sai số xác lập bằng 0; độ quá điều chỉnh lớn nhất $\sigma_{\max} < 10\%$, thời gian tăng $t_r < 1s$.

- Các độ dự trữ ổn định: $\Delta M \geq 0.5$ và $\Delta \tau \geq T_s$

- Hạn chế ảnh hưởng của nhiễu: Hàm độ nhạy ngõ ra nằm trong các giới hạn ở Hình 4; hàm độ nhạy ngõ vào nhỏ hơn 10 dB tại tần số $f \geq 0.35f_s$.

Để đạt được yêu cầu như trên, chúng tôi tiến hành thiết kế qua 2 bước:

- Bước 1: Thiết kế bộ điều khiển RST theo phương pháp gán cực. Cực và các thành phần R, S được chọn để hệ thống đạt được các độ dự trữ ổn định và hạn chế ảnh hưởng của nhiễu.

- Bước 2: Thiết kế thành phần bám mẫu để hệ thống đạt được các chỉ tiêu ở quá trình quá độ.

* Bước 1: Gán cực

Chọn cực chính của hệ kín là cặp nghiệm phức liên hợp tương ứng với tần số dao động tự nhiên $\omega_0 = 7.877$ và $\zeta = 0.8$. Đa thức đặc tính hệ kín gián đoạn là:

$$P_1(z) = 1 - 1.419z^{-1} + 0.532z^{-2}$$

Để loại bỏ sai số xác lập, đa thức S cần chứa thành phần tích phân, do đó đặt trước $H_s(z) = 1 - z^{-1}$. Thực hiện tính toán các thành phần R, S theo phương pháp gán cực với thành phần H_s biết trước trong mục 2.1, ta được bộ điều khiển đầu tiên RST1 như sau:

$$R_1(z) = 2.457 - 2.459z^{-1} - 0.657z^{-2} - 0.499z^{-3} + 1.556z^{-4}$$

$$S_1(z) = 1 + 0.572z^{-1} - 0.529z^{-2} - 0.727z^{-3} - 0.315z^{-4}$$

Các độ dự trữ ổn định đạt được là: $\Delta M = 0.39$, $\Delta \tau = 0.043s$.

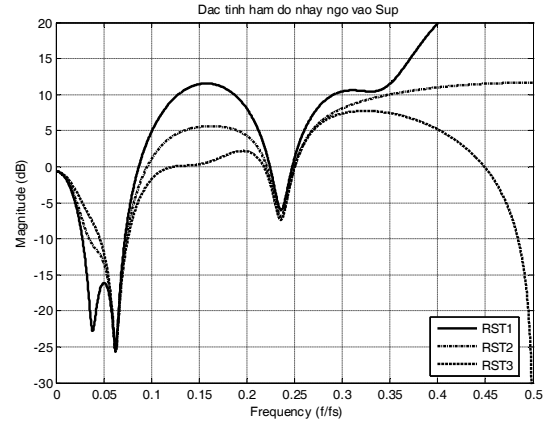
Hàm độ nhạy ngõ vào S_{ip} và hàm độ nhạy ngõ ra S_{yp} khi có bộ điều khiển RST1 được biểu diễn trên Hình 6 và Hình 7.

Có thể nhận thấy hàm độ nhạy ngõ vào tăng cao ở tần số lớn và hàm độ nhạy ngõ ra vượt khỏi vùng giới hạn yêu cầu. Các độ dự trữ ổn định không đạt được yêu cầu đặt ra.

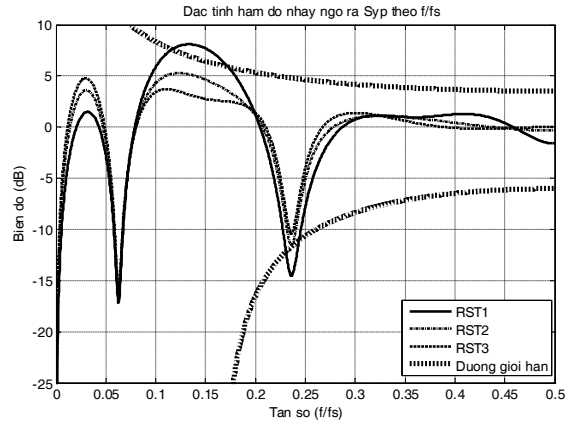
Do cả hai hàm độ nhạy ngõ vào, ngõ ra đều vượt giới hạn cho phép nên chúng tôi thiết kế bộ điều khiển RST2 với mục đích hạn chế giá trị cực đại của hai hàm độ nhạy. Phương pháp sử dụng là gán cực phụ như đã giới thiệu ở

phần 2.2. Các cực phụ được gán thêm bao gồm: cặp cực phụ tương ứng với dao động tại $\omega_0 = 29.64 \text{ rad/s}$, $\zeta = 0.15$ và 4 cực phụ tại -18.33 trong hệ liên tục để làm suy giảm đặc tính tần số các hàm độ nhạy. Đa thức đặc tính hệ gián đoạn hệ kín khi có bộ điều khiển RST2 là:+

$$P_2(z) = 1 - 3.188z^{-1} + 4.914z^{-2} - 5.041z^{-3} + 3.730z^{-4} - 1.908z^{-5} + 0.620z^{-6} - 0.113z^{-7} + 0.008z^{-8}$$



Hình 6. Các hàm độ nhạy ngõ vào với 3 bộ điều khiển



Hình 7. Các hàm độ nhạy ngõ ra với 3 bộ điều khiển

Các thành phần bộ điều khiển số RST2 tính được như sau:

$$R_2(z) = 1.346 - 3.398z^{-1} + 3.157z^{-2} - 1.489z^{-3} + 0.460z^{-4}$$

$$S_2(z) = 1 - 1.196z^{-1} - 0.328z^{-2} - 0.049z^{-3} - 0.083z^{-4}$$

Với việc bổ sung các cực phụ này, hàm độ nhạy ngõ ra khi có bộ điều khiển RST2 trong Hình 7 đã nằm trong giới hạn cho phép. Các độ dự trữ ổn định đạt được yêu cầu thiết kế: $\Delta M = 0.55$, $\Delta \tau = 0.062$. Tuy nhiên, hàm độ nhạy ngõ vào ở Hình 6 dù đã được cải thiện, nhưng vẫn lớn hơn 10dB khi $f > 0.35f_s$ nên chưa đạt được yêu cầu đặt ra.

Theo biểu thức (18), hàm độ nhạy ngõ vào S_{ip} ngoài việc phụ thuộc vào cực của hệ kín, còn phụ thuộc vào thành phần R của bộ điều khiển. Do vậy, để tiếp tục giảm hàm độ nhạy ngõ vào ở tần số cao, chúng tôi bổ sung thừa số $(1+z^{-1})$ trong R . Giữ nguyên cực của hệ kín như trong bộ điều khiển thứ hai, thực hiện các tính toán đã trình bày trong 2.1, bộ điều khiển RST3 tìm được như sau:

$$R_3(z) = 0.725 - 2.265z^{-1} + 2.817z^{-2} - 1.794z^{-3} + 0.555z^{-4}$$

$$S_3(z) = 1 - 1.196z^{-1} + 0.328z^{-2} + 0.014z^{-3} - 0.034z^{-4} - 0.112z^{-5}$$

Với độ điều khiển này, hàm độ nhảy ngã vào S_{up} suy giảm mạnh ở tần số cao trong *Hình 6* và đạt được yêu cầu thiết kế $S_{up} < 10 \text{ dB}$ ở tần số $f/f_s > 0.35$. Hệ thống có các độ dự trữ ổn định lớn: $\Delta M = 0.58$, $\Delta \tau = 0.285$.

Như vậy, qua 3 lần thiết kế, bộ điều khiển RST3 đã đạt được tất cả các yêu cầu đặt ra.

Bảng 1. Các thông số đánh giá chất lượng với 3 bộ điều khiển khác nhau

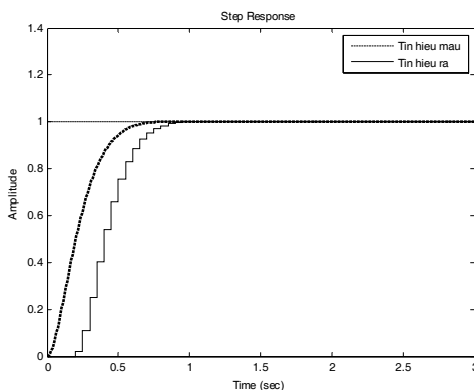
Bộ điều khiển	ΔM	$\Delta \tau$	$\Delta L \text{ [dB]}$	$\Delta \phi$	$S_{yp \text{ max [dB]}}$
RST1	0.39	0.043	4.36	42.25	8.09
RST2	0.55	0.062	7.01	59.97	5.27
RST3	0.58	0.285	7.49	63.71	4.78

* Bước 2: Bám mô hình mẫu

Bộ truyền đại có 1 điểm zero không ổn định, do đó để thiết kế bộ điều khiển bám mẫu cần chọn $T_i(z) = \frac{P_i(z)}{B(1)}$, trong đó $P_i(z)$ là đa thức đặc tính khi có 3 bộ điều khiển nói trên. Chọn mô hình mẫu là khâu bậc 2 có $\omega_0 = 7.877 \text{ rad/s}$ và $\zeta = 0.9$, mô hình này có các chỉ tiêu chất lượng ở quá trình quá độ thỏa mãn các yêu cầu thiết kế.

5. Kết quả mô phỏng

Đáp ứng quá độ của hệ thống đối với tín hiệu bậc thang đơn vị trong trường hợp sử dụng bộ điều khiển RST1 và hệ thống chưa có nhiễu được biểu diễn trên *Hình 8*. Tín hiệu ra bám theo mô hình mẫu đã chọn, có trễ 2 chu kỳ lấy mẫu do tính chất của bộ truyền đại. Các chỉ tiêu chất lượng đạt được như sau: độ quá điều chỉnh lớn nhất $\sigma_{\max} = 0.15\%$, thời gian tăng $t_r = 0.374 \text{ s}$, sai số xác lập bằng 0. Các chỉ tiêu này đạt được yêu cầu đặt ra. Mô phỏng hệ thống khi chưa có nhiễu với các bộ điều khiển RST2, RST3 cho ra các kết quả tương tự trong *Hình 8* nhờ khả năng bám theo mô hình mẫu đã thiết kế.

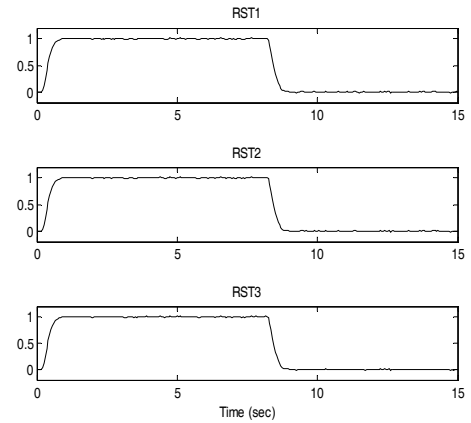


Hình 8. Hàm quá độ khi hệ thống khi chưa có nhiễu

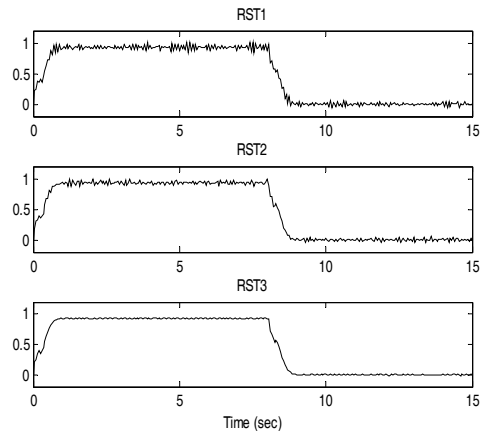
Tác động nhiễu lên hệ thống (nhiễu có độ lệch chuẩn bằng 1% so với tín hiệu vào), ngõ ra và ngõ vào đối tượng khi có nhiễu được biểu diễn trên *Hình 9* và *Hình 10* với ba bộ điều khiển RST khác nhau.

Kết quả mô phỏng cho thấy, ảnh hưởng của nhiễu lên ngõ ra giảm dần, nhưng không đáng kể khi sử dụng các bộ điều khiển RST1 đến RST3. Điều này phản ánh đúng đặc tính của hàm độ nhảy ngã ra S_{yp} ít thay đổi trong *Hình 7* với

ba bộ điều khiển khác nhau. Tuy nhiên, ảnh hưởng của nhiễu lên ngõ vào giảm rõ rệt khi gán thêm cực phụ trong bộ điều khiển RST2 và khi thêm thành phần phụ trong bộ điều khiển RST3. Việc giảm ảnh hưởng của nhiễu lên ngõ vào rất có ý nghĩa với các hệ thống thực tế nhằm đảm bảo sự làm việc bình thường của hệ thống đã thiết kế trong môi trường nhiễu.



Hình 9. Tín hiệu ra khi có nhiễu với 3 bộ điều khiển khác nhau



Hình 10. Tín hiệu vào đối tượng khi có nhiễu với 3 bộ điều khiển khác nhau

6. Kết luận

Vận dụng khả năng linh hoạt của bộ điều khiển RST, tác giả đã ứng dụng thiết kế bộ điều khiển nhằm thỏa mãn các mục tiêu: đảm bảo các độ dự trữ ổn định, hạn chế ảnh hưởng của nhiễu lên ngõ vào, ngõ ra của đối tượng và hệ thống kín đạt được các chỉ tiêu chất lượng yêu cầu. Việc bổ sung các cực phụ vào hệ kín và thừa số phụ trong biểu thức R của bộ điều khiển đã điều chỉnh các hàm độ nhảy ngã vào, ngõ ra vào vùng giới hạn làm giảm đáng kể ảnh hưởng của nhiễu, đồng thời tăng độ dự trữ ổn định để dự trữ cho sự biến đổi của thông số. Trong khi đó, khả năng bám mẫu của bộ điều khiển RST đã giúp hệ thống đạt được các chỉ tiêu chất lượng đề ra. Từ kết quả mô phỏng trên đối tượng phức tạp là bộ truyền đại, bài báo đã chứng tỏ bộ điều khiển RST số có thể ứng dụng rộng rãi để điều khiển bền vững cho nhiều hệ thống khác nhau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ioan Doré Landau, Gianluca Zito, Digital Control Systems: Design,

- Identification and Implementation., Springer, 2006.
- [2] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern control system, 12th edition, Prentice Hall, 2011.
- [3] Raoul Herzog, Jurg Keller, An overview on robust control, Master of science in engineering course, June 2009.
- [4] Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo, Automatic Control system, 9th edition, John Wiley & Son, INC, 2010.
- [5] Trần Đình Khôi Quốc, Lê Phương Quyên, “Xây dựng bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu”, *Tạp chí KH&CN Đại học Đà Nẵng, số 7(80) năm 2014*.
- [6] Francisco Cabaleiro, Fulvio Boattini, RST Controllers: General Introduction and application on the POPS power converter, EPC technical seminars, April 25, 2013.
- [7] Sofiane Khadraoui, Micky Rakotondrabe, Philippe Lutz, “Design of a fixed-order RST controller for interval systems: application to the control of piezoelectric actuators”, *Asian Journal of Control*, 15 (2013), 142-153.
- [8] N. Akkari, A. Chaghi, R. Abddesmed, Study and simulation of RST Regulator Applied to a Double Fed Induction Machine, *Journal of Electrical Engineering and Technology*, Vol. 3, No. 3, 2008, 308-313.
- [9] Deepika, Shiv Narayan, PSO Based Polynominal RST Controller design and Sensitivity Analysis, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Vol. 3, Issue 3, March 2015.
- [10] Gorka Galdos, Alireza Karimi, A solution to flexible transmission benchmark by convex optimization, *Journal of Vibration and Control*, June 2012, 964-972.

(BBT nhận bài: 09/04/2016, phản biện xong: 24/04/2016)