

XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN RST SỐ THEO MÔ HÌNH MẪU CONSTRUCTION OF DIGITAL RST CONTROLLER WITH DESIRED MODEL

Trần Đình Khôi Quốc¹, Lê Phượng Quyên²

¹Đại học Đà Nẵng; Email: tdkquoc@ac.udn.vn

²Trường Đại học Duy Tân; Email: phuongquyen85@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp xây dựng bộ điều khiển RST số cho hệ thống tuyến tính với ba thành phần R, S, T riêng biệt và một mô hình mẫu mắc nối tiếp với mạch kín. Quá trình thiết kế bắt đầu bằng cách tính toán các thành phần R, S để mạch kín có các điểm cực chọn trước. Việc tách bộ điều khiển T đặt trước mạch kín cho phép ta tùy chọn T, nhờ đó có thể xây dựng được bộ điều khiển RST sao cho tín hiệu ra lặp lại dạng tín hiệu vào. Đây là cơ sở để tín hiệu ra của hệ thống kín với bộ điều khiển RST số có thể bám theo tín hiệu mẫu. Đánh giá tác dụng của bộ điều khiển RST số được thực hiện thông qua mô phỏng trên đối tượng bậc 2 và mô hình mẫu được chọn lựa theo tiêu chuẩn ITAE. Kết quả mô phỏng chứng tỏ rằng với bộ điều khiển RST số, ta có thể hoàn toàn chủ động điều khiển hệ tuyến tính bám theo một mô hình mẫu mong muốn.

Từ khóa - điều khiển số; bộ điều khiển RST; mô hình mẫu; PID; tiêu chuẩn ITAE.

1. Cấu trúc hệ thống với bộ điều khiển RST số

Việc ứng dụng kỹ thuật số vào điều khiển tự động trong nhiều năm qua đã góp phần nâng cao chất lượng điều khiển và làm cho việc xây dựng bộ điều khiển trở nên ngày càng đơn giản hơn. Cho đến nay, bộ điều khiển PID, cả tương tự và số, vẫn luôn là bộ điều khiển được sử dụng phổ biến nhất trong các hệ thống tuyến tính. Tuy nhiên, việc lựa chọn thông số cho bộ điều khiển PID để hệ thống đạt được các chỉ tiêu chất lượng đặt ra không phải lúc nào cũng thực hiện được, nhất là với các hệ gián đoạn. Nhiều phương pháp thiết kế bộ điều khiển khác nhau đã và đang được nghiên cứu hoàn thiện. Trong số đó, phương pháp thiết kế bộ điều khiển RST với 3 thành phần R , S và T độc lập được giới thiệu trong [1] tỏ ra có nhiều ưu điểm như linh hoạt, khả năng thay đổi thông số lớn và dễ dàng tạo ra trong điều khiển số. Bộ điều khiển RST đã nhận được sự quan tâm của nhiều tác giả trong ứng dụng điều khiển công nghiệp [2], [4], điều khiển bền vững [3] và đang được tiếp tục nghiên cứu ứng dụng. Một trong các ứng dụng của bộ điều khiển RST là điều khiển đề tín hiệu ra của hệ thống có khả năng bám theo một tín hiệu mẫu cho trước được giới thiệu trong [6]. Tuy nhiên quá trình tính toán và điều kiện đề tìm được bộ điều khiển RST được giới thiệu trong tài liệu này khá phức tạp. Trong bài báo này, chúng tôi tổng hợp một quy trình xây dựng bộ điều khiển RST số đơn giản và có khả năng bám theo mô hình mẫu. Bộ điều khiển tìm ra sẽ được mô phỏng để kiểm tra, đánh giá và so sánh với các bộ điều khiển được tổng hợp theo phương pháp cổ điển.

Xét sơ đồ cấu trúc thông dụng của hệ thống điều khiển số được biểu diễn trong Hình 1, trong đó $G_p(s)$ là hàm truyền đạt liên tục của đối tượng, $G_p(z)$ là hàm truyền đạt của đối tượng đã được số hóa và $G_c(z)$ là hàm truyền đạt của bộ điều khiển số. Gọi $G_p(z) = z^{-d} \frac{B(z)}{A(z)}$ với d là số

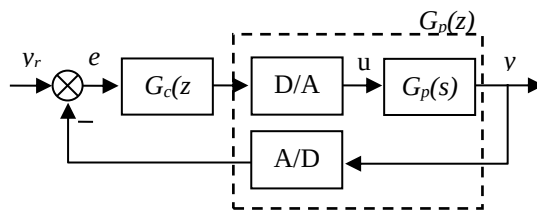
Abstract - This article presents the method to build a digital RST controller for linear system with three independent parts R, S, T and a desired model in series with closed loop. The design begins by calculating R, S parts so that the closed loop system has selected poles. The separation of T controller in the preceding closed loop system permits us to choose T freely, then we can create a digital RST controller so that the output can repeat its reference. This is the reason that the output of closed loop system with the digital RST controller can track the desired sample model. The evaluation effect of the digital RST is done by simulation on 2nd order system and desired sample model is chosen by the ITAE criterion. The results of simulation shows that we can control freely a linear system to track following a desired sample model with this digital RST controller.

Key words - digital control; RST controller; desired model; PID; ITAE criterion.

chu kỳ trễ của đối tượng và $G_c(z) = \frac{R(z)}{S(z)}$, sơ đồ tổng quát

của hệ thống trong Hình 1 có thể được biểu diễn trong Hình 2a với hàm truyền đạt của hệ kín là:

$$G_k(z) = \frac{Y(z)}{Y_r(z)} = \frac{z^{-d} B(z) R(z)}{A(z) S(z) + z^{-d} B(z) R(z)} \quad (1)$$



Hình 1. Sơ đồ tổng quát của hệ thống điều khiển số

Hệ thống số trong *Hình 2a* có thể biểu diễn tương đương thành hệ thống trong *Hình 2b* khi chọn $T=R$. Ví dụ với G_c là bộ điều khiển PID số, trong đó khâu tích phân được số hóa theo phương pháp hình thang hay

$$G_c(z) = K_p + K_I \frac{T_e(z+1)}{2(z-1)} + K_D \frac{z-1}{T_e z}, \text{ các biểu thức tương}$$

ứng của R và S là:

$$R(z) = r_0 + r_1 z^{-1} + r_2 z^{-2}$$

$$S(z) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2}$$

với

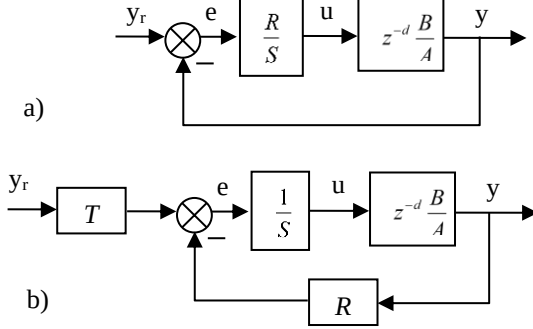
$$r_0 = K_p + \frac{T_e K_I}{2} + \frac{K_D}{T_s}$$

$$r_1 = \frac{T_e K_I}{2} - K_P - \frac{2K_D}{T_e}$$

$$r_2 = \frac{K_D}{T_e}$$

$$s_0 = 1; s_1 = -1; s_2 = 0$$

T_e là chu kỳ lấy mẫu



Hình 2. Cấu trúc hệ thống có bộ điều khiển số
a) Thông thường; b) RST

Trường hợp $T \neq R$, sơ đồ hệ thống Hình 2b biểu diễn cấu trúc tổng quát của hệ thống có bộ điều khiển RST số. Hàm truyền đạt của hệ thống kín này là:

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

Như vậy, các bộ điều khiển thông thường trong Hình 1 là trường hợp đặc biệt của bộ điều khiển RST số. Khác với việc tính toán các bộ điều khiển thông thường, việc thiết kế bộ điều khiển RST cần tính toán ba thành phần R , S và T độc lập.

2. Thiết kế bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu

2.1. Tính chọn R , S để gắn cực cho vòng kín

Các thành phần R và S theo sơ đồ khối trong Hình 2 tạo thành mạch vòng kín cho hệ thống. Do vậy, trước tiên ta xét ảnh hưởng của 2 thành phần R , S đối với vòng kín này. Gọi:

$$A(z) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_A} z^{-n_A}$$

$$B(z) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B} \quad (3)$$

$$= z^{-1} (b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_{n_B} z^{-n_B+1}) = z^{-1} B^*(z)$$

Giả sử R , S trong (2) được chọn sao cho:

$$A(z)S(z) + z^{-d} B(z)R(z) = B^*(z)P_m(z) \quad (4)$$

Lúc này, hàm truyền đạt của hệ kín trở thành:

$$G_{k_{RST}}(z) = \frac{z^{-(d+1)} B^*(z) T(z)}{B^*(z) P_m(z)} = \frac{z^{-(d+1)} T(z)}{P_m(z)} \quad (5)$$

Như vậy theo (5), P_m sẽ quyết định vị trí các điểm cực của vòng kín trong hệ thống có bộ điều khiển RST.

Để tính các biểu thức của R , S thỏa mãn phương trình (4), thay $B(z) = z^{-1} B^*(z)$ vào phương trình này, ta có:

$$A(z)S(z) + z^{-(d+1)} B^*(z)R(z) = B^*(z)P_m(z) \quad (6)$$

Để có thể giải phương trình (6) một cách đơn giản, ta chọn S thỏa mãn

$$S(z) = B^*(z)S'(z)$$

phương trình (6) trở thành

$$A(z)S'(z) + z^{-(d+1)} R(z) = P_m(z) \quad (7)$$

Phương trình (7) là phương trình cơ bản để tìm là các hệ số của đa thức S' , R . Theo [1], phương trình (7) có nghiệm duy nhất khi:

$$\begin{cases} \deg R = n_A - 1 \\ \deg S' = d \\ \deg P_m \leq n_A + d \end{cases} \quad (8)$$

deg. chỉ bậc của đa thức.

Gọi

$$R(z) = r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_{n_A-1} z^{-(n_A-1)}$$

$$S'(z) = 1 + s'_1 z^{-1} + \dots + s'_d z^{-d} \quad (9)$$

$$P_m(z) = 1 + p_1 z^{-1} + \dots + p_{n_A+d} z^{-(n_A+d)}$$

và đặt:

$$x = [1, s'_1, \dots, s'_d, r_0, r_1, \dots, r_{n_A-1}]^T \quad (10)$$

$$p = [1, p_1, p_2, \dots, p_{n_A}, p_{n_A+1}, \dots, p_{n_A+d}]^T$$

phương trình (7) trở thành:

$$Mx = p \quad (11)$$

với

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & & & \\ a_2 & a_1 & \dots & & \\ \dots & & & 1 & 0 \\ a_{n_A} & \dots & & a_1 & 1 & \dots \\ 0 & a_{n_A} & & a_2 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & & & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & a_{n_A} & 0 & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Giải phương trình (11), ta xác định được các hệ số của biểu thức R , S' , từ đó tìm được các biểu thức R , S .

Quy trình thiết kế các thành phần R , S để vòng kín có các điểm cực xác định qua biểu thức P_m được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Quy trình thiết kế các thành phần R , S

- Số hóa đối tượng điều khiển, xác định A , B và B^* ;
- Chọn các điểm cực mong muốn của vòng kín, xác định P_m với điều kiện $\deg P_m \leq n_A + d$;
- Thiết lập ma trận M và vector p , giải phương trình $x = M^{-1} p$ để tìm các hệ số r_i , s'_i ;
- Xác định R và $S = B^* S'$.

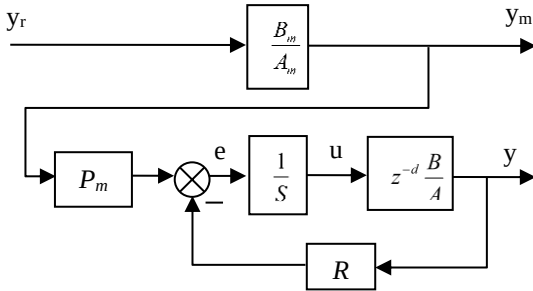
3. Tính chọn T và điều khiển theo mô hình mẫu

Với các thành phần R , S đã chọn ở trên, hàm truyền đạt của hệ thống kín có bộ điều khiển RST có công thức tổng quát trong (5). Do đó, nếu ta chọn:

$$T = P_M \quad (12)$$

hệ thống kín có tín hiệu ra y lặp lại dạng tín hiệu vào y_r , có trễ $d+1$ chu kỳ lấy mẫu, trong đó d chu kỳ trễ do đối tượng gây ra và 1 chu kỳ trễ do tính chất của điều khiển số.

Từ tính chất ở trên, có thể thấy rằng nếu tín hiệu vào y_r trong Hình 2b là tín hiệu mẫu mong muốn y_m thì tín hiệu ra y của hệ thống sẽ bám theo tín hiệu mẫu nhưng trễ $(d+1)$ chu kỳ lấy mẫu. Từ đó, ta xây dựng được cấu trúc của hệ thống với bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu trong Hình 3.



Hình 3: Cấu trúc hệ thống có bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu

3.1. Tính tín hiệu điều khiển

Từ sơ đồ trong Hình 3, ta có:

$$S(z)U(z) = P_m(z)Y_m(z) - R(z)Y(z) \quad (13)$$

Mặt khác:

$$S(z) = B^*(z)S'(z) = (b_1 + \dots + b_{n_B} z^{-n_B+1}) (1 + \dots + s'_d z^{-d})$$

$$\text{hay } S(z) = b_1 + z^{-1}S^*(z).$$

Do đó

$$S(z)U(z) = b_1 U(z) + z^{-1}S^*(z)U(z) \quad (14)$$

Từ (13) và (14), tín hiệu điều khiển tác động vào đối tượng là:

$$U(z) = \frac{1}{b_1} [P_m(z)y_m(z) - z^{-1}S^*(z)U(z) - R(z)Y(z)] \quad (15)$$

Thực hiện phép biến đổi Z^{-1} đối với tín hiệu $U(z)$ trong (15), ta xác định được tín hiệu u tác động vào đối tượng điều khiển, trong đó y_m là tín hiệu mẫu được tính theo các biểu thức A_m , B_m và tín hiệu đặt y_r .

Như vậy, việc chọn các điểm cực của vòng kín qua biểu thức P_m không bị ảnh hưởng của mô hình mẫu. Tuy nhiên, nó phải đảm bảo điều kiện (8) để tính được các thành phần R , S , T , đồng thời phải làm cho vòng kín bên trong ổn định. Trong khi đó, đáp ứng quá độ của tín hiệu ra chỉ phụ thuộc vào việc chọn mô hình mẫu nên mô hình mẫu sẽ quyết định chất lượng của quá trình điều khiển.

4. Mô phỏng

Để đánh giá bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu, ta thực hiện mô phỏng trên đối tượng điều khiển bậc 2 được giới thiệu trong [5] có hàm truyền đạt $G_p(s) = \frac{2500}{s(s+25)}$.

Số hóa đối tượng điều khiển bằng khâu giữ mẫu bậc 0, chu kỳ lấy mẫu $T_e=0.01s$, hàm truyền đạt gián đoạn của đối

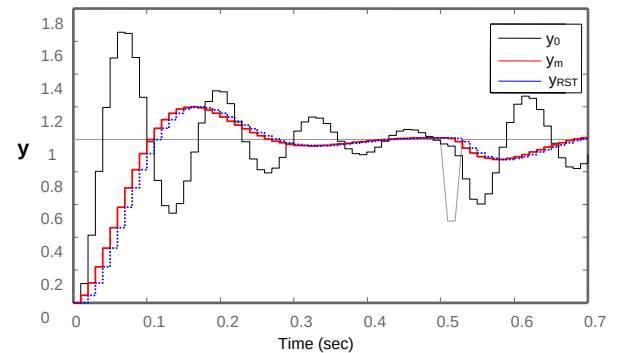
tượng là: $G_p(z) = \frac{0.1152(z+0.9201)}{(z-1)(z-0.7788)}$. Khi chưa có bộ

điều khiển, đáp ứng quá độ của tín hiệu ra có độ quá điều chỉnh $\sigma_{\max}=65.6\%$ và thời gian quá độ $T_{\max}=0.6s$ (Hình 4). Chọn đa thức đặc tính của vòng kín là $P_m = 1 - 1.2z^{-1} + 0.45z^{-2}$ thỏa mãn điều kiện trong (8), các thành phần R , S tìm được là: $R = 0.5788 - 0.2788z^{-1}$, $S = 0.1152 + 0.106z^{-1}$ và $T = P_m$. Hình 4 biểu diễn đáp ứng ngõ ra y_0 của hệ thống khi chưa có bộ điều khiển, của mô hình mẫu y_m và đáp ứng ngõ ra y_{RST} khi có bộ điều khiển RST tìm được ở trên. Mô hình mẫu trong ví dụ này được chọn ngẫu nhiên, bậc 2, ổn định và có hai điểm cực tại $z_{1,2}=0.6 \pm j0.3$.

Kết quả mô phỏng chứng tỏ:

- Tín hiệu ra y_{RST} có khả năng bám theo tín hiệu mẫu y_m nhưng trễ một chu kỳ lấy mẫu. Điều này đã phản ánh đúng đặc điểm của bộ điều khiển RST số.
- Đáp ứng quá độ của tín hiệu ra phụ thuộc vào mô hình mẫu được chọn.

Từ kết quả này cho thấy bằng việc sử dụng bộ điều khiển RST số và mô hình mẫu, ta có thể tạo ra hệ thống có đáp ứng ngõ ra hoàn toàn theo dạng mong muốn thông qua việc chọn mô hình mẫu phù hợp.



Hình 4. Đáp ứng ngõ ra

Để đánh giá tác dụng của bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu, ta mô phỏng ảnh hưởng của bộ điều khiển RST và các bộ điều khiển cổ điển lên đối tượng nói trên. Hình 5 biểu diễn đáp ứng ngõ ra khi sử dụng các bộ điều khiển khác nhau, trong đó bộ điều khiển RST có mô hình mẫu bậc 2 thỏa mãn tiêu chuẩn tối ưu ITAE [7] với

$$ITAE = \int_0^T |y_r - y| dt \rightarrow \min. \text{ Các bộ điều khiển PI, PD cổ}$$

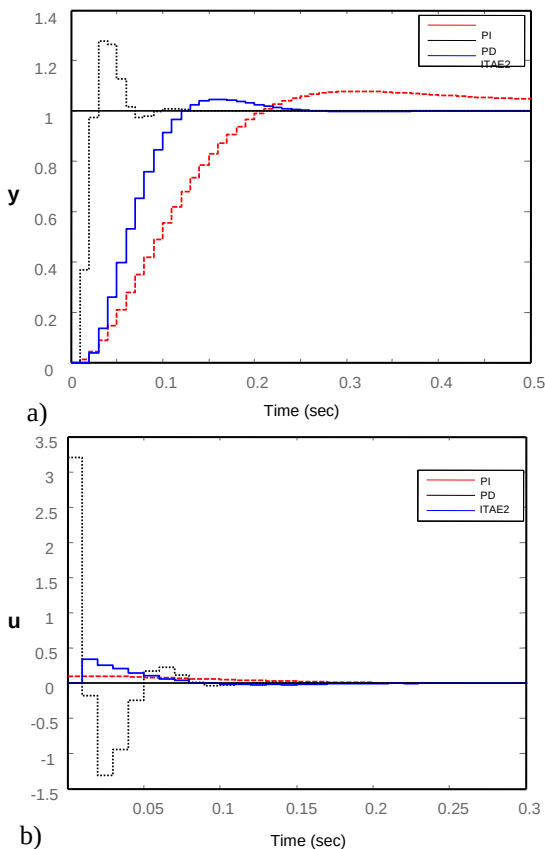
diển được tổng hợp bằng cách biến đổi từ hệ gián đoạn sang hệ liên tục tương đương và áp dụng phương pháp tính chọn thông số từ quỹ đạo nghiệm số. Kết quả đã được giới thiệu trong [5]. So sánh các thông số đánh giá chất lượng của các bộ điều khiển được trình bày trong Bảng 2.

Kết quả trên cho thấy, bộ điều khiển PD mang lại đáp ứng nhanh nhất nhưng có độ quá điều chỉnh lớn. Trong khi đó bộ điều khiển PI có độ quá điều chỉnh bé hơn nhưng tác dụng điều khiển chậm. Bộ điều khiển RST số sử dụng mô hình mẫu bậc 2 theo tiêu chuẩn ITAE tuy đáp ứng không nhanh bằng bộ điều khiển PD nhưng bù lại, độ quá điều

chính của hệ thống bé và tác động nhanh hơn hệ thống sử dụng bộ điều khiển PI. Ngoài ra, khi quan sát tín hiệu điều khiển trên Hình 5b, có thể thấy bộ điều khiển PD tạo ra một tín hiệu điều khiển u rất lớn. Do đó trong thực tế điều khiển, tín hiệu này cần qua bộ lọc trước khi đưa đến hệ thống nên đáp ứng ngõ ra khi có bộ lọc sẽ bị thay đổi.

Bảng 2. So sánh các thông số đánh giá chất lượng ở quá trình quá độ với các bộ điều khiển khác nhau

Bộ điều khiển	$\sigma_{\max} (\%)$	$T_{\max}$	t_m
RST (mẫu ITAE2)	4.58	0.21	0.072
PI	7.77	1.99	0.136
PD	27.6	0.08	0.016



Hình 5. Đáp ứng ngõ ra (a) và tín hiệu điều khiển (b) với các bộ điều khiển khác nhau

Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng, với bộ điều khiển RST số, ta hoàn toàn có thể điều khiển tín hiệu ra theo một mô hình mẫu mong muốn. Do đó, khi cần điều khiển hệ thống theo một hàm mục tiêu xác định trước, người điều khiển có thể chọn mẫu thỏa mãn hàm mục tiêu và tính toán bộ điều khiển RST để hệ thống đạt được hàm mục tiêu đề ra. Ngoài ra, tín hiệu mẫu cũng có thể là tín hiệu được lưu trữ sẵn có bởi người sử dụng, được đưa đến đầu vào bộ điều khiển RST để đáp ứng ngõ ra bám theo tín hiệu này.

So với việc thiết kế các bộ điều khiển PID truyền thống vốn phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố như đáp ứng quá độ của tín hiệu ra, bậc của đối tượng, tiêu chuẩn lựa chọn khi thiết kế, v.v., phương pháp thiết kế bộ điều khiển RST số đã trình bày tỏ ra khá đơn giản và linh hoạt. Tín hiệu điều khiển u có thể dễ dàng được lập trình nhờ máy tính số trước khi đưa đến đối tượng điều khiển.

Các kết quả mô phỏng trên đây được thực hiện với giả thiết hệ thống không có nhiễu. Trong thực tế, do nhiều nguồn nhiễu khác nhau tác động lên hệ thống, nhất là trong điều khiển số, nên việc lựa chọn các điểm cực của mạch kín để xác định đa thức P_m cần xét đến khả năng loại nhiễu của bộ điều khiển RST. Ngoài ra, nhờ các thành phần R , S được tính toán một cách độc lập theo đa thức P_m tự chọn nên trường hợp muốn R , S mang tính năng xác định trước như lọc số, tích phân, v.v. thì ta cũng có thể xem xét để đưa các tính năng này vào trong các đa thức của R , S trước khi tính các hệ số còn lại theo công thức (10), (11).

Trong thực tế, các đối tượng điều khiển thường chưa sẵn có mô tả toán học nên phải xác định mô hình thông qua phương pháp thực nghiệm. Do đó, việc sử dụng kết hợp kỹ thuật nhận dạng với bộ điều khiển RST số theo mô hình mẫu là cơ hội để điều khiển đối tượng tuyến tính bất kỳ theo yêu cầu đặt ra.

5. Kết luận

Nhờ tính chất của điều khiển số, việc thiết kế bộ điều khiển theo mô hình mẫu thông qua bộ điều khiển RST số khá thuận lợi và dễ thực hiện. Điều kiện duy nhất khi tính toán các bộ điều khiển thể hiện trong việc chọn bậc của các đa thức P_m , S và R . Kết quả mô phỏng trên đối tượng bậc 2 sử dụng hai mẫu khác nhau cho thấy tín hiệu ra có khả năng bám theo tín hiệu mong muốn. Đáp ứng ngõ ra và chất lượng của quá trình điều khiển phụ thuộc vào mô hình mẫu. Do vậy, kết hợp việc lựa chọn một mô hình mẫu thích hợp theo một hàm mục tiêu cho trước và bộ điều khiển RST số cho phép chúng ta thiết kế bộ điều khiển để hệ thống thỏa mãn hàm mục tiêu đặt ra.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ioan Doré Landau, Gianluca Zito, *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*, Springer, 2006.
- [2] Francisco Cabaleiro, Fulvio Boattini, *RST Controllers: General Introduction and application on the POPS power converter*, EPC technical seminars, April 25, 2013.
- [3] Ioan Doré Landau, Robust R-S-T Digital Control and Open Loop System Identification, A brief Review, *IEEE Advanced Process Control Workshop*, Vancouver, April 29 – May 1, 2002.
- [4] 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.
- [5] Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo, *Automatic Control system*, 9th edition, John Wiley & Son, INC, 2010.
- [6] Nguyễn Doãn Phước, *Lý thuyết điều khiển tuyến tính*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2005.
- [7] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, *Modern control system*, 12th edition, Prentice Hall, 2011.