

GIẢI QUYẾT HẠN CHẾ CỦA THUẬT TOÁN ĐÁP ỨNG NHANH TRONG HỆ THỐNG ĐIỀU CHỈNH TỰ ĐỘNG CÁC ĐỐI TƯỢNG NHIỆT

Hoàng Văn Va^{1*}

¹Trường Đại học Đại Nam

*Tác giả liên hệ: vahv@dainam.edu.vn

TÓM TẮT

Bài viết nghiên cứu và xây dựng hệ thống điều chỉnh tự động (ACS) cho bộ sưởi điện bằng hệ thống điều chỉnh tự động lai, được tích hợp bộ tự động hiệu chỉnh (AT) và bộ điều khiển PID. Nghiên cứu đã đánh giá được hiệu quả của hệ thống được đề xuất, cũng như so sánh chất lượng của các quá trình hiện tại thu được với chất lượng hoạt động của hệ thống ACS với bộ điều khiển PID truyền thống. Đồng thời, đã xác định được các trường hợp nên áp dụng, cách loại bỏ hiện tượng tự dao động và đánh giá tính khả thi của việc duy trì hoặc ngắt đảo ngược ảnh hưởng đến chất lượng hệ thống của bộ điều khiển FRA. Đã đưa ra các khuyến nghị cho lựa chọn hệ số dự báo k_{pr} và xác định sự phụ thuộc của nó vào các thuộc tính của đối tượng điều khiển. Kết quả này đã khắc phục được các hạn chế của thuật toán FRA và đưa ra được bộ tham số cho khối dự báo để việc ứng dụng thuật toán này hiệu quả hơn trong thực tế.

Từ khóa: bộ điều khiển PI và PID, đối tượng thời gian trễ, hệ lai, hệ thống điều chỉnh tự động, nguyên lý cực đại Pontryagin, thuật toán đáp ứng nhanh nhất, tự động hiệu chỉnh.

SOLVING LIMITATIONS OF THE FASTEST RESPONSE ALGORITHM AUTOMATIC CONTROLSYSTEMS FOR THERMAL OBJECTS

ABSTRACT

The article studies and develops an Automatic Control System (ACS) for an electric heater using a hybrid automatic control system, integrating an Auto-Tuning (AT) module and a PID controller. The study evaluates the effectiveness of the proposed system, as well as compares the performance of current processes with the operational quality of the ACS system using a traditional PID controller. It also identifies scenarios where this system should be applied, how to eliminate self-oscillation phenomena, and assesses the feasibility of maintaining or switching off the inverse effect on the system quality of the FRA controller. Recommendations are provided for selecting the forecasting coefficient k_{pr} and determining its dependence on the properties of the controlled object. The results address the limitations of the FRA algorithm and propose parameter sets for the forecasting block to improve the practical application of this algorithm.

Keywords: automatic control system, automatic tuning, fastest response algorithm, hybrid system, objects with a time delay, PI and PID controller, pontryagin maximum principle, prediction.

Ngày nhận bài: 05/09/2024

Ngày nhận bài sửa: 15/10/2024

Ngày duyệt bài đăng: 30/11/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, có nhiều thuật toán được phát triển để nâng cao hiệu quả trong việc điều khiển các đối tượng, một trong số đó là thuật toán tác động nhanh nhất (FRA) (Ротач, 2007; Аракелян & Пикина, 2003) có thể

được coi là một trong những cách để cải thiện chất lượng hoạt động của hệ thống điều chỉnh tự động khi có sự thay đổi giá trị đầu vào. Hiện nay, thuật toán FRA được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như robot, hàng không, du hành vũ trụ (Geering, 2007; Cassel, 2013; Azimov, 2018) và một số lĩnh vực khác. Việc

áp dụng thuật toán FRA với bộ truyền động tốc độ không đổi được xem xét trong (Пикина & Кочаровский, 2003; Аракелян & Пикина, 2003; Кочаровский, 2010). Tuy nhiên, việc áp dụng FRA vào thực tế có một số khó khăn phát sinh.

Thứ nhất, để ACS vận hành chất lượng cao với FRA, cần phải biết đầy đủ, chính xác và cập nhật định kỳ mô hình của đối tượng, mô hình này được sử dụng để tính toán đường chuyển mạch và hành động điều khiển.

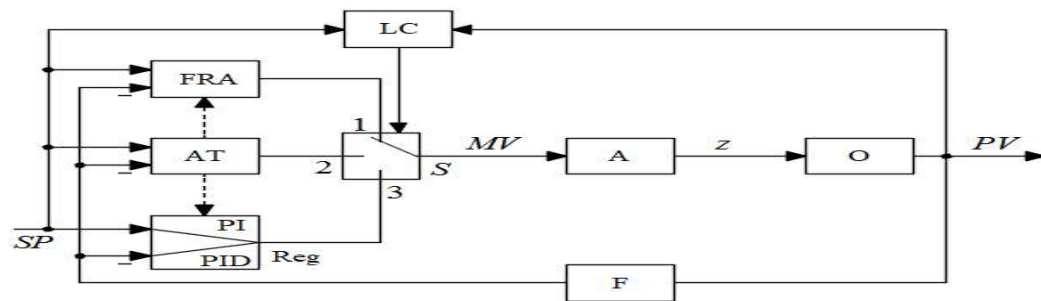
Thứ hai, các đối tượng nhiệt được đặc trưng bởi sự hiện diện của độ trễ. Trong trường hợp này, khối dự báo thường được sử dụng nhưng hiệu quả mang lại của nó vẫn còn nhiều nghi vấn.

Thứ ba, ở đầu ra của quá trình điều chỉnh trong hệ thống thực với FRA có thể xảy ra sự tự dao động do ảnh hưởng của chu kỳ thời gian đối với các biến điều khiển thăm dò, sự hiện diện của các bộ lọc làm mịn, độ không chính xác của mô hình đối tượng,...

Trước những hạn chế đó đang cản trở việc áp dụng rộng rãi hệ thống điều chỉnh tự động bằng thuật toán đáp ứng nhanh nhất vào thực tiễn điều khiển các đối tượng, quá trình nhiệt.

2. MÔ TẢ CẤU TRÚC VÀ ĐẶC ĐIỂM HỆ THỐNG

Hệ thống được thiết kế dạng hệ lai như Hình 1 bên dưới:



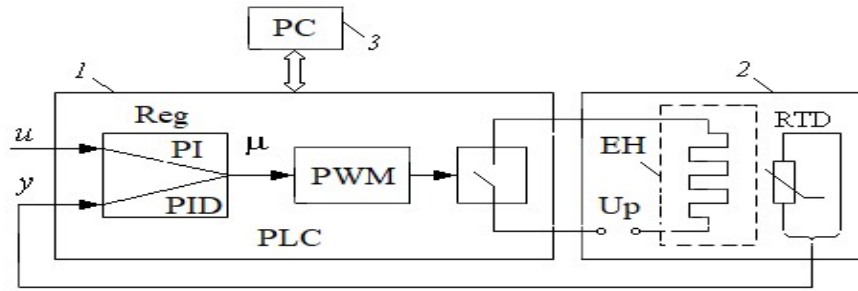
Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống

Nguồn: Tác giả

Trong đó: Reg - là bộ điều khiển (thực hiện theo thuật toán PI cho đầu vào SP và thuật toán PID cho đầu vào PV); AT - bộ điều chỉnh tự động; FRA - thuật toán đáp ứng nhanh nhất; O - đối tượng điều khiển; A - cơ cấu chấp hành; F - bộ lọc; SP - tín hiệu đặt; PV - biến điều khiển; MV - ảnh hưởng quy

định; z - đầu ra của cơ cấu chấp hành; LC – bộ điều khiển logic; S – bộ chuyển mạch.

Sơ đồ khối của hệ thống với mô hình vật lý được mô tả tại Hình 2 bên dưới:



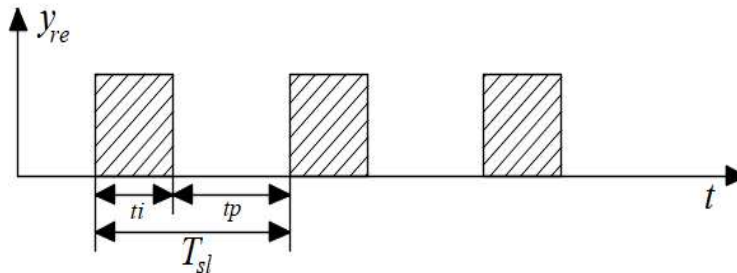
Hình 2. Sơ đồ khối với mô hình vật lý của đối tượng: EN - Lò sưởi điện; PLC - bộ điều khiển logic khả trình; RTD - Nhiệt kế điện trở, PLC – bộ điều khiển logic lập trình; PC - máy tính, PWM – bộ điều biến độ rộng xung.

Nguồn: Tác giả

Các giới hạn tín hiệu điều khiển ở đây được biểu thị bằng mức công suất của bộ gia nhiệt so với trạng thái cân bằng của vật thể. Khi chuyển đổi điều khiển trong quá trình vận hành FRA, tác động lên đối tượng (công suất làm nóng) ngay lập tức nhận một giá trị mới. Khi được điều khiển thông qua xung điện, công suất trung bình của lò sưởi điện có thể được xác định theo công thức:

$$N_{en} = N_{nom} * (\gamma/100) \quad (1)$$

Trong đó: $\gamma = (t_i/T_{sl}) \cdot 100$ - chu kỳ làm việc của tín hiệu



Hình 3. Mô hình tham số xung điều khiển

Nguồn: Tác giả

Khi hệ thống hoạt động, lúc này bộ chuyển mạch ở vị trí số 2, bộ điều chỉnh tự động AT được kích hoạt và nhận dạng đối tượng (Кузищин, 2014), giúp chúng ta tìm được bộ tham số mô hình toán học của đối tượng trên có dạng như (2).

$$W_m(s) = \frac{K_m \cdot \exp(-\tau_m \cdot s)}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T_{2m} \cdot s + 1)} = \frac{K_m \cdot \exp(-T_m \cdot \beta_m \cdot s)}{(T_m \cdot s + 1) \cdot (T_{1m} \cdot n_m \cdot s + 1)} \quad (2)$$

Trong đó: K_m - là hệ số truyền của mô hình đối tượng; T_{1m} , T_{2m} - hằng số thời gian;

điều khiển xung, %; t_i - độ dài xung; T_{sl} - chu kỳ lặp xung; $T_{sl} = t_i + t_p$; t_p - thời gian tạm dừng; N_{en} - là công suất trung bình hiện tại của lò sưởi điện, N_{nom} là công suất định mức của lò sưởi điện khi bật liên tục. Một minh họa về phương pháp kiểm soát công suất lò sưởi này được thể hiện trong Hình 3, trong đó y_{re} là đầu ra của phân tử role FRA.

τ_m - thời gian trễ; $n_m = T_{2m}/T_{1m}$; $\beta = \tau_m/T_{1m}$ - thông số tương đối.

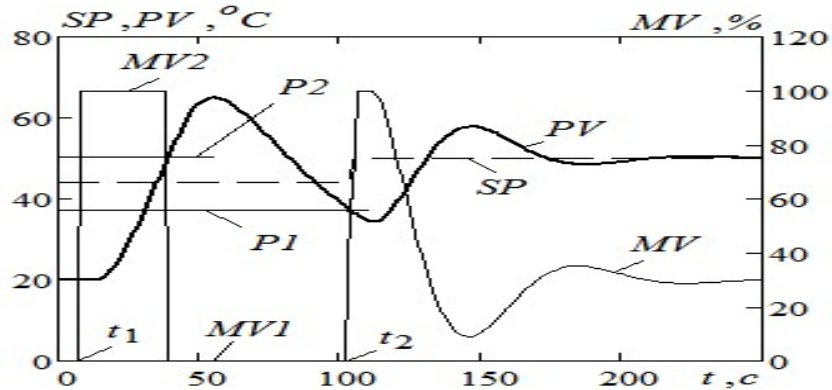
Đồng thời tìm được tham số cho bộ điều khiển PI và PID có dạng như (3) và (4).

$$W_{pid}(s) = K_r \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \cdot \frac{1}{(T_f \cdot s + 1)^2} \right] \quad (3)$$

$$W_p(s) = K_r \cdot \left[1 + \frac{1}{T_u \cdot s} \right] \quad (4)$$

Trong đó: K_r - hệ số truyền của bộ điều khiển, T_i - tích phân, T_d - vi phân và T_f - hằng số thời gian lọc. Trong trường hợp này, thành phần D có bộ lọc làm mịn bậc hai, với $T_f = T_d/8$.

Với sự trợ giúp của thuật toán AT-1 chúng ta nhận được đồ thị quá trình quá độ như sau:



Hình 4. Đồ thị quá trình quá độ của hệ thống khi bộ AT làm việc

Nguồn: Tác giả

Khi AT được bật, biến MV thay đổi từ giá trị ban đầu MV1 sang $MV2 = P_{MAX}$ mới. Giá trị này được duy trì cho đến thời điểm khi biến điều khiển PV, thay đổi từ giá trị cố định ban đầu PV0, đi qua một ngưỡng nhất định P2, tạo thành một phần nhất định của tín hiệu danh nghĩa của nhiệm vụ SP, sau đó MV

trở về giá trị ban đầu. Trong trường hợp này, đồ thị thay đổi MV theo thời gian có dạng xung hình chữ nhật.

Qua đáp ứng và thuật toán AT-1 chúng ta nhận được bộ tham số của mô hình điều khiển cung cấp cho bộ FRA và các bộ điều khiển PI và PID như ở Bảng 1 và 2.

Bảng 1. Tham số của mô hình lò sưởi

Tham số	K_{ob}	T_1	T_2	τ	n	β
Mô hình	0,84	16,4	61,3	6,5	3.7	0.4

Nguồn: Tác giả

Bảng 2. Tham số của bộ điều khiển PI và PID

Tham số	K_r	T_i	T_d
PID	7,3	33,4	11,3

Nguồn: Tác giả

Khi sử dụng FRA, giả định rằng giá trị tính mới của đáp ứng NEWMV tương ứng với giá trị mới của điểm đặt SP đã được biết. Trong trường hợp này, nó được tính từ các đặc tính tĩnh của mô hình thiết kế của đối tượng thu được từ ACS, sử dụng công thức:

$$NEWMV = MV1 + (SP2 - SP1) / K_m \quad (5)$$

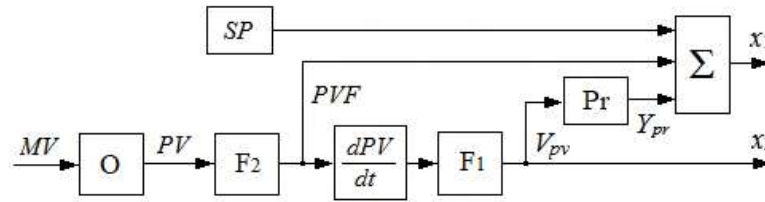
Trong đó K_m là hệ số truyền của mô hình đối tượng. Để tính đến độ trễ của đối tượng,

mức tăng dự đoán $Y_{pr} = \Delta PVF$ của biến PVF (sau bộ lọc đầu vào) được tính thông qua giá trị của V_{pv} , là ước tính làm mịn về tốc độ thay đổi của biến PV ($V_{pv} \approx dPV/dt$), theo công thức $Y_{pr} = \Delta PVF = \tau \cdot V_{pv}$.

Ước tính độ trễ τ được xác định bằng cách sử dụng dữ liệu AT. Khi FRA hoạt động, đường chuyển mạch được tính toán bằng các biến trạng thái $\{x1k; x2k\}$ ở dạng chuẩn,

được xác định thông qua các biến $\{x_1; x_2\}$ ở dạng chuẩn, lần lượt được lấy từ dữ liệu của

các biến vật lý PV và SP.



Hình 5. Sơ đồ khối nhận các biến chuẩn x_1, x_2 .

Nguồn: Tác giả

Trong đó: F1 – Bộ lọc bậc 1, F2 – Bộ lọc bậc 2; Pr – khối dự báo

Các biến thông thường x_1 và x_2 được tính bằng công thức:

$$x_1 = PVF + (\tau \cdot V_{pv}) \cdot k_{pr} - SP;$$

$$x_2 = V_{pv}, \quad (6)$$

trong đó k_{pr} là hệ số dự báo, được điều chỉnh trong quá trình thiết lập hệ thống.

Trong thực tế, giá trị mới của đáp ứng lên đối tượng NEWMV có thể không đối xứng đối với PMAX tối đa và PMIN tối thiểu, do đó đáp ứng tính toán từ FRA được xác định như sau:

$u_1 = P_{MAX} - NEWMV$ – đáp ứng lên mức tối đa của một trạng thái tương đối mới (tác động hướng tới “nhiều hơn”).

$u_2 = P_{MIN} - NEWMV$ - tác động ở mức tối thiểu so với trạng thái mới (tác động theo hướng “ít hơn”).

Để vận hành FRA, mô hình đối tượng có dạng (2) được sử dụng theo sự hoạt động của AT. Để thuận tiện cho việc tính toán đường chuyển mạch trong khối FRA, việc chuyển đổi được thực hiện sang các biến chính tắc (Аракелян & Пикина, 2003), các giá trị của chúng được tính toán thông qua các biến ở dạng chuẩn và tham số đối tượng:

$$x_{1k} = a \cdot (x_1 + x_2 \cdot T_{2m});$$

$$x_{2k} = - (a+1) \cdot (x_1 + x_2 \cdot T_{1m});$$

Trong đó $a = T_{1m}/(T_{2m}-T_{1m})$; T_{1m} và T_{2m} là các hằng số thời gian của mô hình đối tượng thu được từ dữ liệu của ACS.

Việc tính toán đường chuyển mạch và giá trị σ - khoảng cách từ điểm vận hành đến đường chuyển mạch (dọc theo tọa độ x_{2k} tại giá trị hiện tại của tọa độ x_{1k}). Đối với mô hình đối tượng (2), các mối quan hệ sau được áp dụng:

$$u = u_1 \text{ nếu } x_{1k} > 0;$$

$$u = u_2 \text{ nếu } x_{1k} < 0;$$

$$u = 0 \text{ nếu } x_{1k} = 0;$$

$$x_{2ks} = (1-zc)[u \cdot K_m \cdot (1+a)];$$

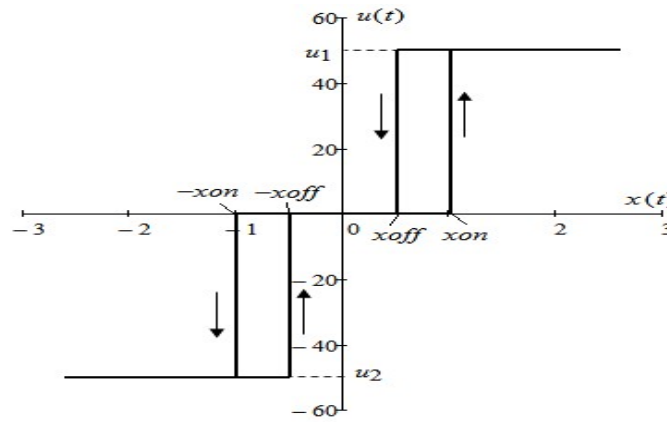
$$c = T_{1m}/T_{2m};$$

$$z = 1 + x_{1k}/(u \cdot K_m \cdot a);$$

$$\sigma = x_{2k} - x_{2ks},$$

trong đó x_{2ks} là giá trị tọa độ x_{2k} trên đường chuyển mạch tại x_{1k} .

Tín hiệu điều khiển $u(t)$ được tạo ra ở đầu ra của khối FRA bằng cách sử dụng phân tử rơle ba vị trí (RE) có vùng chết và độ trễ: $u_k = \text{Rele}(\sigma_k, u_{k-1})$.



Hình 6. Đặc tính tĩnh của Role 3 vị trí có trễ

Nguồn: Tác giả

Các đặc tính tĩnh của RE được thể hiện trong hình 6, trong đó $x = \sigma$. Trong hình, x_{on} và x_{off} là các ngưỡng để bật và tắt đặc tính role. Trong trường hợp này, giả sử $x_{off} = 0,5 \cdot x_{on}$. Ngưỡng chuyển đổi được thiết lập có tính đến các thuộc tính của đối tượng và độ chính xác cần thiết.

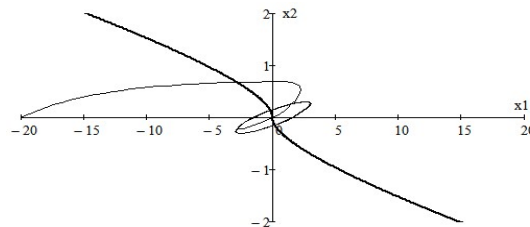
Tùy thuộc vào σ , giá trị đầu ra FRA ở bước hiện tại được xác định bằng cách sử dụng phân tử role RE theo thuật toán sau:

- nếu $\sigma > x_{on}$ thì $u = u_1$, $MV = P_{MAX}$;
- nếu $\sigma < -x_{on}$ thì $u = u_2$, $MV = P_{MIN}$;
- if $-x_{off} < \sigma < x_{off}$; thì $u = 0$, $MV = NEWMV$;
- trong các trường hợp khác $u_k = u_{k-1}$, tức

là giá trị trước đó của biến u (và MV tác động) vẫn giữ nguyên.

3. HỆ THỐNG HOẠT ĐỘNG TRONG ĐIỀU KIỆN THỰC

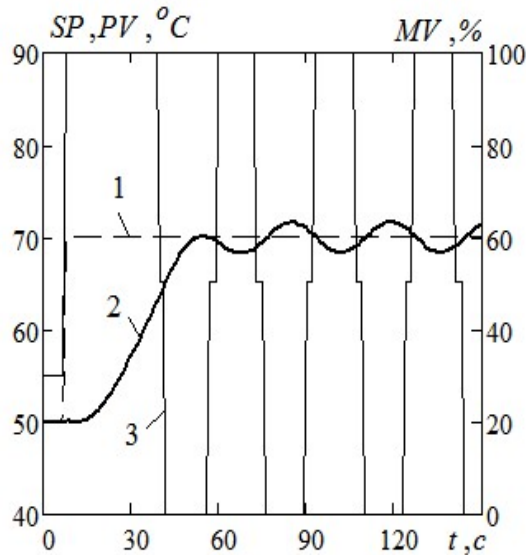
Khi hệ thống hoạt động trong thời gian thực bị ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố từ môi trường, sai số trong nhận dạng đối tượng, thời gian chu kỳ quét của cảm biến và hơn nữa là để loại bỏ nhiễu từ đầu đo nên thường được thông qua bộ lọc. Những yếu tố đó sẽ thường gây ra sự tự dao động trong hệ thống. Qua mô phỏng chúng ta nhận được việc chuyển động của các biến trong không gian trạng thái như Hình 7.



Hình 7. Quỹ đạo các điểm trong không gian trạng thái

Nguồn: Tác giả

Chúng ta nhận được đường đặc tính của hệ thống như Hình 8.



Hình 8. Các quá trình trong ACS có FRA. 1 - điểm đặt SP; 2 - đầu ra PV trong hệ thống; 3 - đáp ứng điều chỉnh của MV

Nguồn: Tác giả

Qua kết quả mô phỏng chúng ta nhận được sự tự giao động khi hệ thống thực tế áp dụng thuật toán đáp ứng nhanh dựa trên nguyên tắc Pontryagin khi áp dụng cho các đối tượng nhiệt. Điều này ảnh hưởng đến sự ổn định của hệ thống điều khiển.

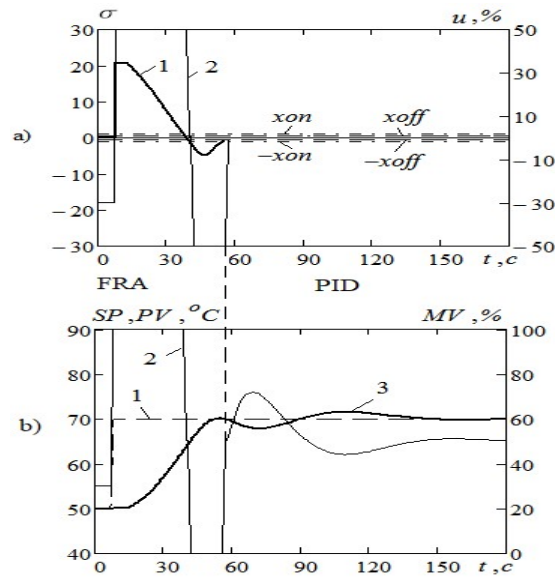
4. PHƯƠNG PHÁP LOẠI BỎ TỰ GIAO ĐỘNG TRONG HỆ THỐNG

Kết quả nghiên cứu trên cho thấy khi vận hành FRA cần hạn chế số lần chuyển mạch và có biện pháp ngăn ngừa hiện tượng tự dao động. Để làm điều này, bạn có thể sử dụng các phương pháp sau.

Thứ nhất, giảm thời gian chu kỳ thăm dò của biến được kiểm soát, nhưng đối với một số bộ điều khiển quản lý công nghiệp, điều này là không thể vì lý do kỹ thuật. Thứ hai, tăng vùng chết của phần tử role trong FRA, tuy nhiên, phương pháp này có khả năng hạn chế và không đủ tin cậy.

Trong công trình này, để loại bỏ khả năng tự dao động trong hệ thống có FRA, phương pháp thứ ba được đề xuất, đó là: chuyển sang điều khiển PID khi biến điều khiển tiến gần đến giá trị đặt.

Trong trường hợp này, không có hiện tượng tự dao động mà xuất hiện độ lệch dư của biến được điều khiển so với giá trị đã đặt, có thể vượt quá giới hạn cho phép. Về vấn đề này, để ngăn chặn sự tự dao động có thể xảy ra trong quá trình vận hành FRA, người ta đề xuất sử dụng một hệ thống kết hợp, trong đó tại một thời điểm nhất định sẽ có sự chuyển đổi sang thuật toán PID với giới hạn về số lượng vùng hoạt động của FRA. Trong trường hợp này, có thể có hai lựa chọn sử dụng FRA: với hành động đảo ngược được phép và hành động đảo ngược bị loại bỏ.

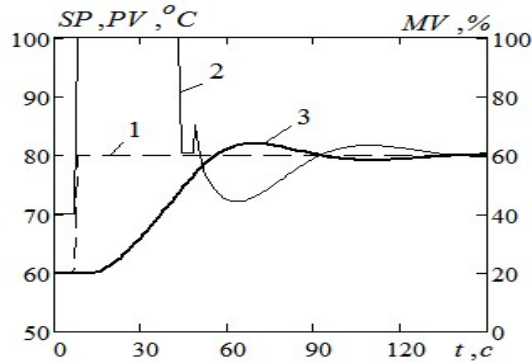


Hình 9. Đồ thị các đường đặc tính của hệ thống ACS với FRA và PID khi có đảo ngược.

Nguồn: Tác giả

Trong đó, ở Hình 9a các đường đặc tính 1 - khoảng cách σ của điểm vận hành tới đường

dây chuyển đổi trạng thái; 2 – MV; trong Hình 9b các đường đặc tính 1 – SP, 2 – MV, 3 – PV.



Hình 10. Đồ thị các đường đặc tính của hệ thống ACS với FRA và PID khi không đảo ngược

Nguồn: Tác giả

Qua kết quả mô phỏng hệ thống, để loại bỏ hiệu quả hiện tượng tự dao động ở cuối quá trình điều khiển, bạn nên chuyển sang thuật toán PID khi biến PV tiến gần đến mục tiêu. Bên cạnh đó, khi hệ thống hoạt động với bộ điều khiển FRA sẽ hiệu quả hơn khi ở chế độ không đảo chiều các tác động hiệu chỉnh.

Việc chuyển sang điều khiển PID được thực hiện sau khi hoàn thành thao tác FRA theo điều kiện sau: độ lệch ε đã đi vào vùng cho phép [-xon; xon] hoặc tốc độ thay đổi của biến PV đã giảm xuống giá trị có thể chấp

nhận được so với mức tối đa $(0,2 \cdot |V_{pv_max}|)$.

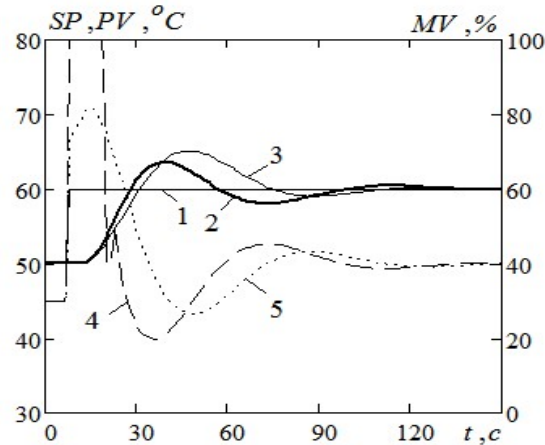
5. SO SÁNH CHẤT LƯỢNG HIỆU CHỈNH CỦA HỆ THỐNG LẠI CÓ FRA VÀ KHI KHÔNG CÓ FRA

Để xác định tính khả thi của việc sử dụng hệ thống điều khiển tự động lai được đề xuất, chúng tôi so sánh chất lượng của các quy trình trong hệ thống FRA với bộ điều khiển PID và trong hệ thống với bộ điều khiển PID thông thường (tức không có FRA). Trong trường

hợp này so sánh hệ thống có FRA khi không đảo ngược các biến hiệu chỉnh.

Trong Hình 11 thể hiện các quá trình trong hệ thống có FRA và bộ điều khiển PID cũng như trong hệ thống có bộ điều khiển PID thông thường khi cài đặt $dSP = 10^{\circ}\text{C}$ thay đổi. Ở đây: 1 - điểm đặt SP; 2 - đầu ra PV trong hệ

thống có bộ điều khiển FRA và PID; 3 - đầu ra PV trong hệ thống chỉ có bộ điều khiển PID; 4 - biến MV trong hệ thống có bộ điều khiển FRA và PID; 5 - biến MV trong hệ thống bằng bộ điều khiển PID.



Hình 11. Đồ thị các đường đặc tính của hệ thống ACS với FRA với PID khi không đảo ngược và hệ thống ACS với PID

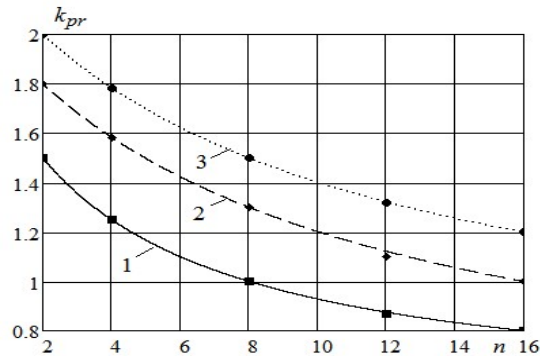
Nguồn: Tác giả

6. LỰA CHỌN HỆ SỐ DỰ BÁO

Để áp dụng thuật toán nhằm đạt hiệu suất tối đa trong các hệ thống có đối tượng có độ trễ, cần có khối dự báo, hoạt động của khối này đã được mô tả trước đó, xem công thức (6). Thông thường, thuật toán dự báo tuyến tính được sử dụng (Пикина & Кузнецов, 2011; Пикина, 2014). Giá trị của hệ số dự đoán kpr phụ thuộc vào tính chất của đối tượng điều khiển. Để có thể tự động tính toán hệ số này, cần phải có được các mối quan hệ

để tính kpr có tính đến các tham số của mô hình đối tượng nhận được từ ACS.

Dưới đây là kết quả thu được khi mô hình hóa việc lựa chọn giá trị kpr tối ưu cho một số đối tượng có dạng mô hình toán học (2) với các tỷ lệ tham số khác nhau: $K_{ob} = 1$; $T_1 = 16$ giây; $n = [2; 4; 8; 12; 16]$ và $\beta = [0,2; 0,4; 0,8]$. Đồ thị biểu diễn sự phụ thuộc thu được của kpr vào các tính chất của đối tượng (n và β) được thể hiện trên Hình 12.



Hình 12. Đồ thị mô tả sự phụ thuộc k_{pr} với n và β ; 1- $\beta = 0,2$; 2 - $\beta = 0,4$; 3 - $\beta = 0,8$

Nguồn: Tác giả

Với các đối tượng đã xem xét trong giai đoạn nghiên cứu này, từ các đồ thị trên đã nhận được công thức gần đúng giúp xác định giá trị k_{pr} như sau:

$$k_{pr} = A \cdot (1 - D) + B \cdot D \quad (7)$$

trong đó $A = 0,5 + 6/(n+4)$; $B = 0,55 + 16,66/(n+9,45)$; $C = 2,01 - 0,2/(\beta+0,06)$; $D = 1,88 \cdot C - 2,2$.

7. KẾT LUẬN

- Cấu trúc hệ thống lai với thuật toán cho hiệu suất tối đa của FRA (đồng thời giới hạn mức độ hoạt động điều khiển), thuật toán PID và khối AT được đề xuất, hiệu suất của nó được thể hiện;

- Để loại bỏ hiện tượng tự dao động trong hệ thống, nên hạn chế số lần đảo ngược FRA và sử dụng chuyển đổi sang thuật toán PID khi biến điều khiển tiếp cận mục tiêu.

- Hệ thống với bộ điều khiển FRA với nguyên lý Pontryagin nếu không có điều khiển đảo chiều biến MV sẽ nhận được hiệu suất và lợi thế hơn so với hệ thống có đảo chiều biến MV.

- Đã tìm thấy sự phụ thuộc của hệ số dự báo k_{pr} vào các tham số của mô hình đối tượng n và β , đảm bảo nâng cao chất lượng điều khiển.

- Một phân tích về ảnh hưởng của mức độ thay đổi đầu vào (hay điểm đặt như ngưỡng nhiệt độ, mực nước, áp suất, ...) đến hiệu quả của việc sử dụng hệ thống có FRA

và thuật toán PID đã được thực hiện và cho thấy trong trường hợp nào hệ thống này có lợi thế hơn hệ thống có thuật toán bộ điều khiển PID truyền thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Azimov, D. M. (2018). *Analytical solutions for extremal Space trajectories*. UK: Butterworth-Heinemann.
- Cassel, K. W. (2013). *Variational methods with applications in science and engineering*. New York: Cambridge University Press.
- Geering, H. P. (2007). *Optimal control with engineering applications*. Germany: Springer Science & Business Media.
- Аракелян, Э. К., & Пикина Г. А. (2003). Оптимизация и оптимальное управление. М.: Издательство МЭИ.
- Кочаровский, Д. Н. (2010). *Сравнительное исследование алгоритмов максимального быстрогодействия с учётом особенностей реальных систем регулирования*, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М.: МЭИ.
- Кузицин, В. Ф., & Царев, В. С. (2014). Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное

- воздействие и в режиме автоколебаний. *Теплоэнергетика*, 4, 35-44.
- Пикина, Г. А. (2014). Реализация принципа управления по прогнозу в автоматических системах регулирования. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления. ВСПУ*, Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды [Электронный ресурс].
- Пикина, Г. А., & Кочаровский, Д. Н. (2003). Синтез системы максимального быстродействия для объектов с экстремальной переходной характеристикой, Труды Международной научной конференции. М.: Издательство МЭИ, 104-111.
- Пикина, Г. А., & Кузнецов, М. С. (2011). Прогностические типовые алгоритмы регулирования. *Теплоэнергетика*, 4, 61-66.
- Ротач, В.Я. (2007). Теория автоматического управления, Учебник для вузов, М.: Изд. дом МЭИ.