

NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG SẢN XUẤT AXIT SUNFURIC TRÊN CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP ĐIỀU KHIỂN TÍCH CỰC LOẠI BỎ NHIỀU

RESEARCH AND UPGRADE SULFURIC ACID SYSTEM BASED ON ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL METHOD

Nguyễn Đức Dương^{1*}, Nguyễn Thùy Dung¹, Mẫn Đức Hậu²

¹Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

²Công ty Cổ phần giải pháp Next Home

Đến Tòa soạn ngày 19/12/2025, chấp nhận đăng ngày 27/4/2026

Tóm tắt: Axit sunfuric là nguyên liệu rất quan trọng, phục vụ nhiều ngành công nghiệp. Trong bất cứ dây chuyền sản xuất axit sunfuric nào, chất lượng sản phẩm axit sunfuric được quyết định bởi công đoạn hấp thụ với đối tượng chính là thùng tuần hoàn. Bài báo trình bày giải pháp tích hợp phương pháp ADRC (Active Disturbance Rejection Control - điều khiển tích cực loại bỏ nhiễu) kết hợp bộ dự báo Smith và bộ quan sát trạng thái để nâng cao độ ổn định và chất lượng của hệ thống điều khiển, từ đó nâng cao chất lượng hệ thống sản xuất axit sunfuric.

Từ khóa: Dây chuyền sản xuất axit sunfuric, ADRC, bộ dự báo Smith.

Abstract: Sulfuric acid is a very important material, which is used in many industries. In any production lines of sulfuric acid, its quality is determined by the absorbance section with the main object is a mono circulating tank. This paper presents a solution integrating ADRC (Active Disturbance Rejection Control) combined with Smith Prediction algorithm and Extended State Observer to upgrade the stability and quality of the control system, therefore upgrades the quality of sulfuric acid system.

Keywords: Production lines of sulfuric acid, ADRC, Smith Prediction.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

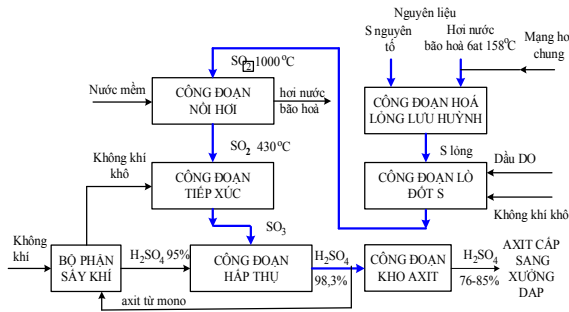
Ngày nay, trong các nhà máy công nghiệp trên thế giới nói chung và các nhà máy nghiệp công nghiệp ở nước ta nói riêng, nhu cầu sử dụng axit sunfuric ngày càng gia tăng. Axit sunfuric là nguyên liệu không thể thiếu, phục vụ nhiều ngành công nghiệp, như: sản xuất phân đạm, phân bón Diamoni photphat (DAP), sản xuất acquy,...

Từ năm 2002, nhà máy DAP Hải Phòng bắt đầu được xây dựng với ba xưởng chính: xưởng axit Sunfuric với công suất 440.000 tấn/năm sử dụng công nghệ Monsanto của Mỹ, xưởng axit photphoric công suất 162.000 tấn/năm với công nghệ Prayon của Bỉ, xưởng

DAP công suất 330.000 tấn/năm với công nghệ của Tây Ban Nha. Trong đó, xưởng axit sunfuric sử dụng công nghệ đốt lưu huỳnh rắn, tính chế khô, gồm nhiều công đoạn [1] (hình 1). Hệ thống do nhà thầu Trung Quốc lắp đặt, tính đến nay đã hơn 20 năm, chương trình điều khiển xuất hiện nhiều lỗi và giải pháp điều khiển còn hạn chế. Do đó chất lượng điều khiển, độ bền vững và tính ổn định của hệ thống đã giảm đi đáng kể.

Nội dung chính của bài báo tập trung vào vấn đề tìm hiểu, nghiên cứu dây chuyền sản xuất axit sunfuric, cụ thể là công đoạn hấp thụ với thùng tuần hoàn V0141 để đảm bảo nồng độ axit sunfuric 98,3%. Từ mô hình tìm được,

chúng tôi phân tích và đưa ra cấu trúc điều khiển mới nâng cao chất lượng và tính ổn định của hệ điều khiển.

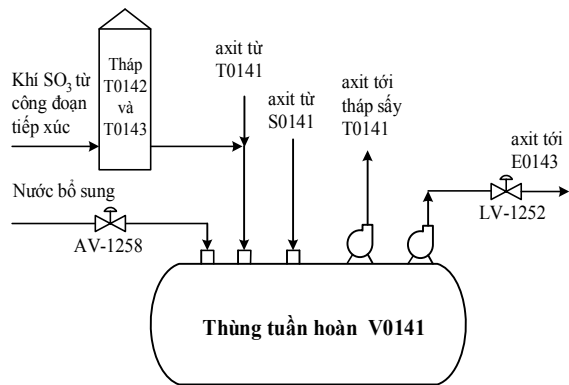


Hình 1. Dây chuyền công nghệ sản xuất axit sunfuric

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

2.1. Khái quát hệ thống sản xuất axit sunfuric

Dây chuyền sản xuất axit sunfuric của Công ty Cổ phần DAP - Vinachem có nhiều công đoạn, nhưng ảnh hưởng nhiều nhất tới chất lượng axit sunfuric là công đoạn hấp thụ, cụ thể là thùng tuần hoàn V0141.

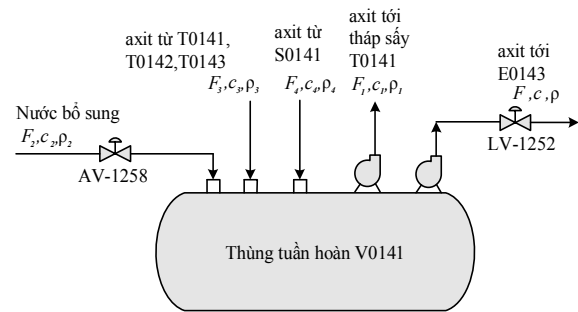


Hình 2 Sơ đồ công đoạn hấp thụ

Đơn giản hóa các thành phần của thùng V0141, ta có sơ đồ thùng này được minh họa ở hình 3.

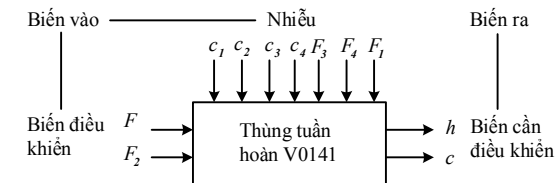
F_1, F_2, F_3, F_4, F lần lượt là lưu lượng thể tích của axit tới tháp sấy T0141, của nước bổ sung (nước khử khoáng), của axit từ tháp hấp thụ T0142, T0142 và tháp sấy T0141, của axit từ thiết bị S0141, của axit ở đầu ra của thùng

tuần hoàn V0141 (m^3/h); c_1, c_2, c_3, c lần lượt là nồng độ của axit tới tháp sấy T0141, của axit trong nước bổ sung, của axit từ tháp hấp thụ T0142, T0143 và tháp sấy T0141, của axit ở đầu ra của thùng V0141 (%), h : chiều cao mức axit trong thùng V0141; $h_{max} = 2,8$; $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho$ lần lượt là khối lượng riêng của axit tới tháp sấy T0141, của nước, của axit từ tháp hấp thụ T0142, T0143 và tháp sấy T0141, của axit ở đầu ra thùng V0141 (kg/m^3); V - thể tích axit trong thùng V0141 (m^3); L - chiều dài thùng V0141; $L = 12,6$ (m); R - bán kính của thùng V0141, $R = 1,45$ (m).



Hình 3. Sơ đồ thùng tuần hoàn V0141

Từ hình 3, các biến quá trình bao gồm:

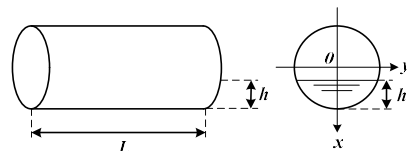


Hình 4. Các biến quá trình của thùng V0141

2.2. Thực trạng hệ thống sản xuất axit sunfuric

Dựa trên hình 3 và hình 4 kết hợp định luật cân bằng vật chất toàn phần, ta có (1) [2]:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_2 F_2 + \rho_3 F_3 + \rho_4 F_4 - \rho_1 F_1 - \rho F \quad (1)$$



Hình 5. Dạng hình học của thùng V0141

Dựa vào hình 5, ta có phương trình (2) [2]:

$$\frac{dV}{dt} = 2L\sqrt{h(2R-H)} \frac{dh}{dt} = A \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

Từ các phương trình (1) và (2), ta có (3):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{\rho A} (\rho_2 F_2 + \rho_3 F_3 + \rho_4 F_4 - \rho_1 F_1 - \rho F) = f \quad (3)$$

$$\text{với } A = 2L\sqrt{h(2R-h)}$$

Dựa vào cân bằng vật chất thành phần, ta có (4):

$$\frac{dc}{dt} = \frac{1}{V} \left[\frac{\rho_3}{\rho} F_3 c_3 + \frac{\rho_4}{\rho} F_4 c_4 - \frac{\rho_1}{\rho} F_1 c_1 - c \left(\frac{\rho_2}{\rho} F_2 + \frac{\rho_3}{\rho} F_3 + \frac{\rho_4}{\rho} F_4 - \frac{\rho_1}{\rho} F_1 \right) \right] = g \quad (4)$$

Từ (3), ta có phương trình sai phân của mức axit (5); phương trình laplace của mức (6) [2]:

$$\Delta \dot{h} = -\frac{\rho_1}{A\rho} \Delta F_1 + \frac{\rho_2}{A\rho} \Delta F_2 + \frac{\rho_3}{A\rho} \Delta F_3 - \frac{1}{A} \Delta F \quad (5)$$

Do lượng axit thu hồi về từ ống khói S0141 ít và có lưu lượng nhỏ, không đổi, ta có thể coi $\Delta F_4 \approx 0$.

$$\Delta h(s) = \frac{1}{As} \left(\frac{\rho_2}{\rho} \Delta F_2 + \frac{\rho_3}{\rho} \Delta F_3 - \frac{\rho_1}{\rho} \Delta F_1 - \Delta F \right) \quad (6)$$

$$\bar{A} = 2L\sqrt{\bar{h}(2R-\bar{h})}$$

Từ (4) ta có phương trình sai phân (7); phương trình laplace của nồng độ axit đầu ra (8):

$$\Delta c = \frac{K_1 a}{\rho V} \Delta F_1 + \frac{K_2 a}{\rho V} \Delta F_2 + \frac{K_3 a}{\rho V} \Delta F_3 + \frac{K_4 a}{\rho V} \Delta c_1 - \frac{a}{\rho V} \Delta c \quad (7)$$

$$\Delta c(s) = \frac{K_1 \Delta F_1}{1+T_c s} + \frac{K_2 \Delta F_2}{1+T_c s} + \frac{K_3 \Delta F_3}{1+T_c s} + \frac{K_4 \Delta c_1}{1+T_c s} \quad (8)$$

$$\text{với } a = \rho_1 \bar{F}_1 + \rho_2 \bar{F}_2 + \rho_3 \bar{F}_3; T_c = \frac{\rho \bar{V}}{a}$$

$$K_1 = \frac{\rho_1 (\bar{c} - c_1)}{a}; K_2 = -\frac{\rho_2 \bar{c}}{a}; K_3 = \frac{\rho_3 (\bar{c}_3 - \bar{c})}{a}; K_4 = -\frac{\rho_1 \bar{F}_1}{a}$$

$$\bar{V} = L \left[\frac{\pi R^2}{2} - R^2 \arcsin \frac{R-H}{R} - (R-H) \sqrt{H(2R-H)} \right]$$

Từ (4) và (8) ta có các phương trình ở dạng phần trăm (9) [2]:

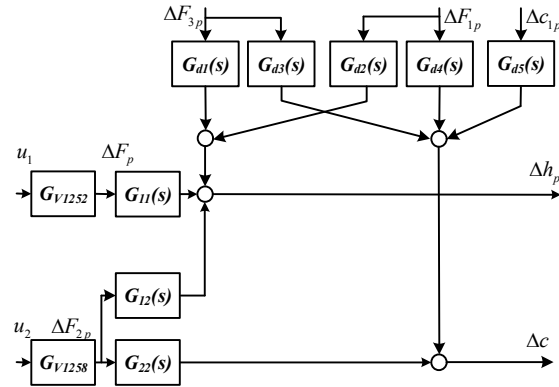
$$\Delta h_p(s) = \frac{\Delta F_{2p}}{sT_{h2}} - \frac{\Delta F_p}{sT} + \frac{\Delta F_{3p}}{sT_{h3}} - \frac{\Delta F_{1p}}{sT_{h1}} \quad (9)$$

$$\Delta c(s) = \frac{N_1 \Delta F_{1p}}{1+T_c s} + \frac{N_2 \Delta F_{2p}}{1+T_c s} + \frac{N_3 \Delta F_{3p}}{1+T_c s} + \frac{N_4 \Delta c_1}{1+T_c s} \quad (10)$$

$$\text{với } N_1 = K_1 F_{\max}, N_2 = K_2 F_{\max}, N_3 = K_3 F_{\max} \quad (11)$$

$$N_4 = K_4$$

Từ (9) và (10), ta có sơ đồ khối thùng tuần hoàn V0141 được minh họa như ở hình 6. Trong đó $G_{11}(s), G_{12}(s), G_{22}(s)$ là các hàm truyền đạt đối tượng, được mô tả ở (12) và hình 6.



Hình 6. Sơ đồ khối mô hình thùng tuần hoàn V0141

$$G_{11}(s) = -\frac{1}{sT}; G_{12}(s) = \frac{1}{sT_{h2}}; G_{22}(s) = \frac{N_2}{1+T_c s} \quad (12)$$

Hàm truyền đạt nhiều được mô tả ở (13):

$$G_{d1}(s) = \frac{1}{sT_{h3}}; G_{d2}(s) = \frac{1}{sT_{h1}}; G_{d3}(s) = \frac{N_3}{1+T_c s} \quad (13)$$

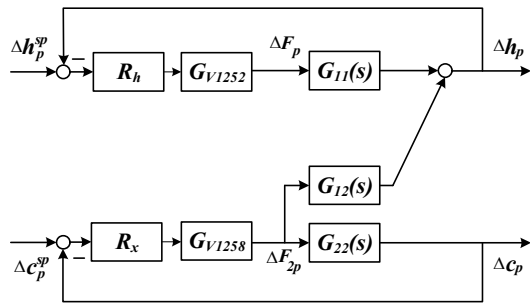
$$G_{d4}(s) = \frac{N_1}{1+T_c s}; G_{d5}(s) = \frac{N_4}{1+T_c s}$$

Hàm truyền đạt của van được minh họa ở (14)

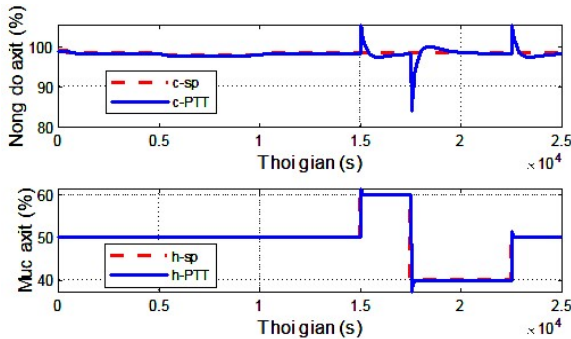
$$G_{V1252} = \frac{\Delta F_p}{u_1} = e^{-\theta s}; G_{V1258} = \frac{\Delta F_{2p}}{u_2} = e^{-\theta s} \quad (14)$$

Thực trạng hệ điều khiển thùng tuần hoàn V0141: Một vấn đề rất quan trọng đối với

công đoạn hấp thụ, sản xuất axit sunfuric là phải duy trì axit sunfuric đưa vào tháp hấp thụ 304 ở nồng độ 98,3%. Axit sunfuric 98,3% hấp thụ khí SO₃ tốt nhất vì áp suất hơi SO₃ trên bề mặt dung dịch axit này rất thấp. Dây chuyền sản xuất axit sunfuric này được nhà thầu Trung Quốc lắp đặt từ năm 2002, tính đến nay đã hơn 20 năm. Chất lượng sản phẩm axit sunfuric phụ thuộc khá nhiều vào chất lượng hệ điều khiển. Nhưng thực tế phần điều khiển hiện tại chưa được hoàn thiện. Chẳng hạn, đối với thùng V0141, nhà máy sử dụng phương pháp điều khiển phi tập trung với cấu trúc được minh họa ở hình 7.



Hình 7. Cấu trúc điều khiển phi tập trung



Hình 8. Đáp ứng nồng độ và mức với phương pháp điều khiển phi tập trung

Dựa vào Matlab-Simulink với thông số của đối tượng

$$R_a = 1,45 \text{ m}; F_{\max} = 160 \text{ m}^3 / h; L = 12,6 \text{ m}$$

$\theta = 5 \text{ s}; \bar{c}_1 = 97,5\%; \bar{c} = 97\%; \bar{c}_3 = 98,5\%;$ ta thu được đáp ứng nồng độ và mức axit gần giống với thực tế, được minh họa ở hình 8.

Trong khoảng thời gian từ 0 đến 15000(s), giá trị nồng độ axit được điều chỉnh, mức vẫn được giữ nguyên ở giá trị ban đầu (tức là không có sự thay đổi mức đặt) thì sự thay đổi của nồng độ axit không ảnh hưởng đến mức. Trong khoảng thời gian 0 đến 15000 (s), nồng độ axit bám khá sát theo giá trị đặt của nồng độ. Tuy nhiên, từ 15000 (s) trở đi, khi giá trị mức đặt thay đổi thì cũng tác động đến nồng độ, làm nồng độ thay đổi, độ quá điều chỉnh lớn và thời gian quá độ khá dài. Tuy nồng độ cũng trở lại giá trị cân bằng nhưng điều này chứng tỏ phương pháp điều khiển phi tập trung chưa giải quyết được hiện tượng xen kênh, vẫn còn sự tương tác lẫn nhau giữa mức và nồng độ axit.

3. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU

3.1. Xét cặp đôi biến vào ra

Hệ số khuếch đại tương đối λ : Từ (9) và (10) ta có (15):

$$\begin{bmatrix} \Delta h_p \\ \Delta x_p \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta F_{2p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta F_{2p} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Theo [3], ta có (16):

$$G(0) = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}; \lambda = \lambda_{11} = \frac{k_{11}}{1 - \frac{k_{12}k_{21}}{k_{22}}}$$

$$\lambda = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{k_{11}}{k_{11} - 0} = 1 \quad (16)$$

Từ (16) và theo [3], ta có cặp đôi biến quá trình $\Delta h_p - \Delta F_p; \Delta c - \Delta F_{2p}$.

Để loại bỏ sự tương tác giữa các biến quá trình có bốn phương pháp: điều khiển loại bỏ nhiễu tích cực - ADRC, điều khiển tỷ lệ, điều khiển tách kênh và điều khiển dự báo theo mô hình - MPC (Model Predictive Control). Cơ sở thiết kế một bộ điều khiển MPC dựa trên một chu kỳ trích mẫu cố định, trong khi mỗi biến quá trình có đặc điểm thay đổi nhanh

chậm khác nhau. Để đạt yêu cầu chung của nhiều biến, ta phải chọn chu kỳ điều khiển nhỏ nhất, do đó làm tăng tải cho CPU. Ngoài ra việc hiệu chỉnh các tham số của bộ điều khiển MPC trong thực tế rất khó khăn, tốn rất nhiều thời gian [3]. Trong [2], tác giả đã trình bày về phương pháp điều khiển tách kênh và phương pháp điều khiển tỷ lệ. Do đó nhóm nghiên cứu sẽ chọn phương pháp ADRC.

3.2. Phương pháp ADRC

Mục tiêu: kiểm soát loại bỏ nhiễu một cách tích cực. Đối tượng điều khiển thùng V0141 có hàm truyền là các khâu quán tính bậc nhất có trễ.

$$G_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts+1} \quad (17)$$

Từ (17) chuyển sang phương trình vi phân (18)

$$\dot{y}(t) = -\frac{1}{T}y(t) + \frac{K}{T}u(t) \quad (18)$$

Thêm một nhiễu $d(t)$ vào (18) và đặt $b = \frac{K}{T}$

$$\dot{y}(t) = -\frac{1}{T}y(t) + \frac{1}{T}d(t) + bu(t) \quad (19)$$

Thay $b = b_0 + \Delta b$ vào (19), ta có (20) [4], [5]:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= f(t) + b_0 u(t) \\ f(t) &= -\frac{1}{T}y(t) + \frac{1}{T}d(t) + \Delta b u(t) \end{aligned} \quad (20)$$

Ý tưởng của ADRC là thiết kế bộ quan sát trạng thái-ESO (Extended State Observer) để ước lượng $\hat{f}(t) \approx f(t)$. Khi chọn

$$u(t) = \frac{u_0(t) - \hat{f}(t)}{b_0} \text{ thay vào (20) [4], [5], ta có} \quad (21):$$

$$\dot{y}(t) = [f(t) - \hat{f}(t)] + u_0(t) \approx u_0(t) \quad (21)$$

Ta có thể bù đắp những thay đổi của $f(t)$ trên mô hình. Tất cả những gì còn lại được xử lý bởi luật điều khiển $u_0(t)$ mà ta có thể chọn.

3.3. Xây dựng phương trình không gian trạng thái của bộ quan sát ESO

Đặt $x_1(t) = y(t); x_2(t) = f(t)$ thay vào (20), ta có (22) [4], [5]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} f(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{với } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

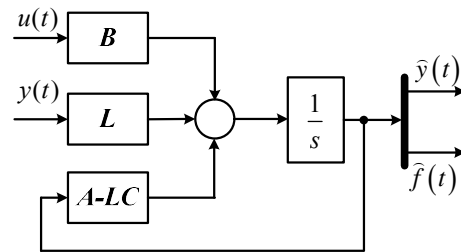
Dựa trên phương pháp thiết kế bộ quan sát trạng thái Luenberger thì mô hình của bộ ESO được mô tả như phương trình (24) [4], [5]:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) \quad (24)$$

Thay (24) vào (23), ta có (25):

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 & 1 \\ -l_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} y(t) \quad (25)$$

Từ (24), ta có sơ đồ cấu trúc bộ ESO, được mô tả ở hình 9 [4], [5].



Hình 9. Cấu trúc bộ ESO

3.4. Xây dựng cấu trúc điều khiển của đối tượng quán tính bậc nhất (không có trễ)

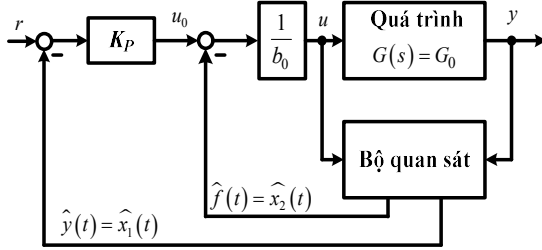
Coi van điều khiển là lý tưởng, tức là: $G_{van}(s) = 1$. Sử dụng các biến ước lượng: $\hat{x}_1(t) = \hat{y}(t)$ và $\hat{x}_2(t) = \hat{f}(t)$ để điều khiển và loại bỏ nhiễu, ta có (26):

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) \quad (26)$$

Thay (26) vào (21), ta có (27):

$$\dot{y}(t) \approx u_0(t) = K_p(r(t) - \hat{y}(t)) \quad (27)$$

Từ (27), ta có cấu trúc vòng lặp điều khiển ADRC được minh họa ở hình 10.



Hình 10. Cấu trúc vòng lặp điều khiển với ADRC cho đối tượng quán tính bậc nhất không có trễ

Từ (27), ta có phương trình laplace (28):

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K_p}{s + K_p} \quad (28)$$

Nếu $\hat{y}(t) \approx y(t)$ ta có hàm bậc nhất với một điểm cực (29) [4], [5]:

$$s_{CL} = -K_p \quad (29)$$

Hệ số K_p được tính toán dựa trên các thông số đầu vào của khâu quán tính bậc nhất với tỷ lệ sai lệch 2% thời gian đặt (30):

$$K_p \approx \frac{4}{T_{Settle}} = -s_{CL} \Rightarrow s_{CL} = \frac{-4}{T_{Settle}} \quad (30)$$

Để bộ quan sát hoạt động tốt, các thông số bộ quan sát l_1 và l_2 được xác định sao cho bộ quan sát có động học đủ nhanh, khi đó các điểm cực của bộ quan sát $s_{1/2}^{ESO}$ phải nằm bên trái điểm cực của mạch vòng kín. Theo [4], [5], ta chọn (31):

$$s_{1/2}^{ESO} = s^{ESO} \approx (3 \div 10)s_{CL} \quad (31)$$

Điểm cực của bộ quan sát được xác định bởi trị riêng của ma trận $(A - LC)$ (32):

$$\det(sI - (A - LC)) = s^2 - 2s^{ESO} + (s^{ESO})^2 = 0 \quad (32)$$

Giải phương trình (32) ta có thông số bộ quan sát (33):

$$l_1 = -2s^{ESO}; \quad l_2 = (s^{ESO})^2 \quad (33)$$

3.5. Xây dựng cấu trúc điều khiển của đối tượng quán tính bậc nhất có trễ

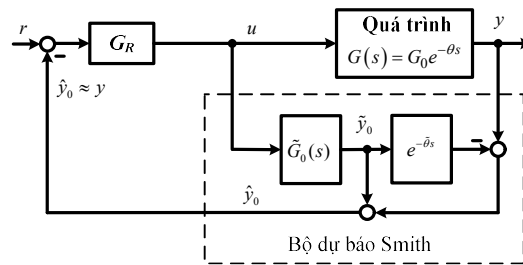
Theo [4], [5], mô hình động học của van điều khiển có dạng khâu trễ $G_{van} = e^{-\theta s}$, quá trình có hàm truyền đạt $G(s) = G_0 G_{van} = G_0 e^{-\theta s}$.

Phương trình vi phân của đối tượng được mô tả ở (34):

$$\dot{y}(t) = f(t) + b_0 e^{-\theta s} u(t) \quad (34)$$

Do đối tượng là khâu quán tính bậc nhất có trễ và khâu tích phân có trễ nên tín hiệu đầu ra phản hồi về bộ quan sát sẽ bị trễ, cần thêm một khâu trễ như trên vào trước tín hiệu điều khiển về bộ ESO để bộ này hoạt động tốt. Thành phần trễ tạo nên sự chậm pha và độ chậm pha này đặc biệt lớn ở dải tần số cao, làm giảm độ dự trữ ổn định của hệ kín. Cần thêm bộ dự báo Smith để bù nhiễu tăng độ bền vững của hệ. Mô hình ước lượng được minh họa thông qua (35) [4], [5]:

$$\tilde{G}(s) = \tilde{G}_0(s) e^{-\tilde{\theta}s} \quad (35)$$



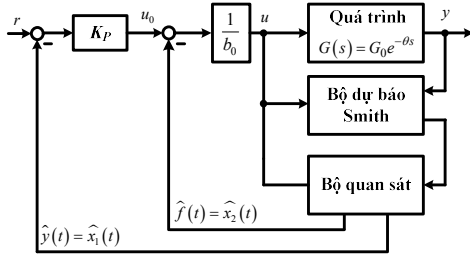
Hình 11. Cấu trúc bộ dự báo Smith

Trong đó $G_0(s)$ và $\tilde{G}_0(s)$ là mô hình thành phần không chứa trễ. Đặt tín hiệu ra sau khâu $G_0(s)$ là y_0 . Tín hiệu ước lượng của y_0 là $\tilde{y}_0$ được minh họa ở hình 11 và được xác định

thông qua (36) [4], [5]:

$$\hat{y}_0 = \tilde{y}_0 + (y - \tilde{y}_0 e^{-\hat{\theta}s}) \approx \tilde{y}_0 + y - \tilde{y}_0 = y \quad (36)$$

Kết hợp hình 10 và 11, ta có cấu trúc điều khiển ADRC được minh họa ở hình 12.



Hình 12. Sơ đồ điều khiển theo phương pháp ADRC

Sơ đồ này có khả năng bù nhiễu do trễ và tăng độ bền vững của hệ thống.

4. TÍCH HỢP BỘ ĐIỀU KHIỂN ADRC CHO THÙNG TUẦN HOÀN V0141

Từ các phương trình (7) và (5) ta có phương trình trạng thái của thùng tuần hoàn V0141 (37):

$$\dot{x} = Ax + Bu + d; y = Cx \quad (37)$$

$$x = \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta c \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a}{\rho V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{A} & \frac{\rho_2}{A\rho} \\ 0 & \frac{K_2 a}{\rho V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta F_2 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho_1}{A\rho} \Delta F + \frac{\rho_3}{A\rho} \Delta F_3 \\ \frac{K_1 a}{\rho V} \Delta F_1 + \frac{K_3 a}{\rho V} \Delta F_3 + \frac{K_4 a}{\rho V} \Delta c_1 \end{bmatrix}$$

Từ (37) ta có (38):

$$\begin{aligned} \dot{\Delta h} &= a_{11} \Delta h + b_{11} \Delta F + b_{12} \Delta F_2 + d_1 \\ \dot{\Delta c} &= a_{22} \Delta c + b_{21} \Delta F + b_{22} \Delta F_2 + d_2 \end{aligned} \quad (38)$$

Giả sử đặt như ở (39)

$$b_{11} = b_{0,11} + \Delta b_{11}; b_{22} = b_{0,22} + \Delta b_{22} \quad (39)$$

với $b_{0,11}; b_{0,22}$ là những hệ số liên quan đến điểm làm việc của hệ thống mà ta đã biết; $\Delta b_{11}; \Delta b_{22}$ là những sai số mà ta chưa biết.

Thay (39) vào (38), ta có (40):

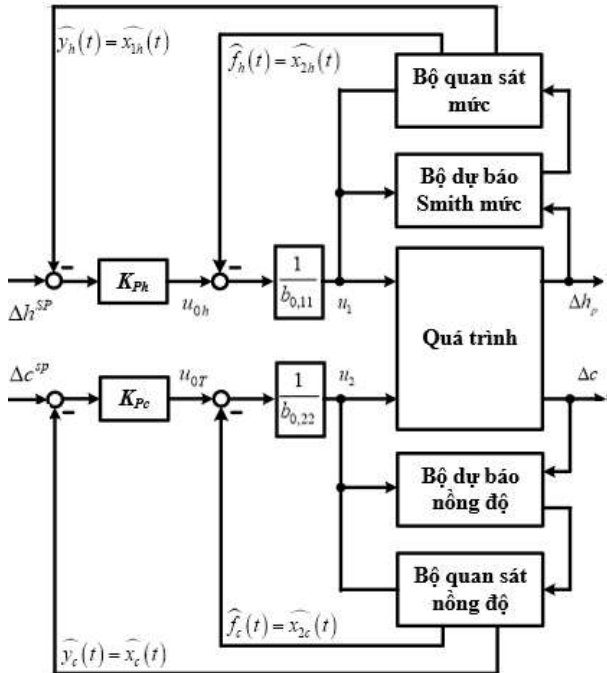
$$\dot{\Delta h} = f_1(t) + b_{0,11} \Delta F; \dot{\Delta c} = f_2(t) + b_{0,22} \Delta F_2 \quad (40)$$

$$\text{với } \begin{cases} f_1(t) = a_{11} \Delta h + \Delta b_{11} \Delta F + b_{12} \Delta F_2 + d_1 \\ f_2(t) = a_{22} \Delta c + b_{21} \Delta F + \Delta b_{22} \Delta F_2 + d_2 \end{cases} \quad (41)$$

Thay (14) vào (40), ta có (42):

$$\dot{\Delta h} = f_1(t) + b_{0,11} e^{-\theta s} u_1; \dot{\Delta c} = f_2(t) + b_{0,22} e^{-\theta s} u_2 \quad (42)$$

Từ (40) ÷ (42), ta có cấu trúc điều khiển bình V0141 theo phương pháp ADRC như hình 13.



Hình 13. Cấu trúc điều khiển thùng V0141 theo phương pháp ADRC

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Xét thùng tuần hoàn V0141 với các thông số:

$$R_a = 1,45 \text{ m}; F_{\max} = 160 \text{ m}^3 / \text{h}; L = 12,6 \text{ m}$$

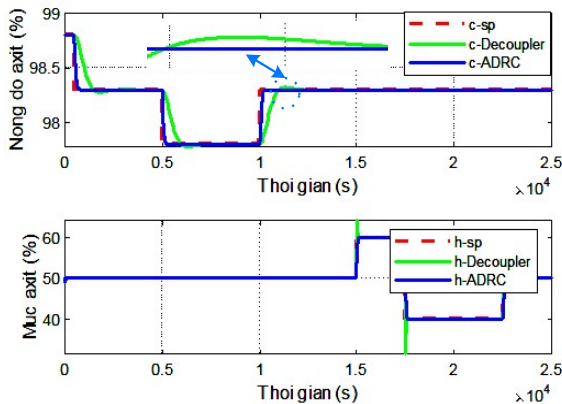
$$\theta = 5s; \bar{c}_1 = 97.5\% ; \bar{c} = 97\%; \bar{c}_3 = 98.5\%$$

Thông số bộ điều khiển nồng độ: từ các phương trình (28) đến (42), chọn $T_{settleC} = 40(s)$.

$$\begin{aligned} b_{0,22} &= \frac{N_2}{T_c} = -0,002; K_{PC} = \frac{4}{T_{settleC}} = 0,02 \\ s_C^{CL} &= -K_{PC} = -0,1; s_C^{ESO} = 20s_C^{CL} = -2 \\ l_{1C} &= -2s_C^{ESO} = 4; l_{2C} = (s_C^{ESO})^2 = 4 \end{aligned} \quad (43)$$

Thông số bộ điều khiển mức, từ các phương trình từ (28) đến (42), chọn $T_{settleH} = 90(s)$.

$$\begin{aligned} b_{0,11} &= \frac{1}{T} \approx 5,24 \cdot 10^{-4}; K_{PH} = \frac{4}{T_{settleH}} = 0,0444 \\ s_H^{CL} &= -K_{PH} = -0,044; s_H^{ESO} = 20s_H^{CL} = -0,89 \\ l_{1H} &= -2s_H^{ESO} = 1,777; l_{2H} = (s_H^{ESO})^2 = 0,7901 \end{aligned} \quad (44)$$



Hình 14. Đáp ứng nồng độ và mức axit với ADRC

Từ hình 14, ta thấy, giai đoạn từ 0 đến 15000 (s), khi giá trị đặt của nồng độ axit từ 98,8% xuống 98,3% rồi từ 98,3% xuống 97,8% và sau đó trở về 98,3%, đặc tính nồng độ axit theo ADRC (đường xanh tím than) nhanh chóng bám theo giá trị đặt (đường màu đỏ). Đặc tính nồng độ axit theo phương pháp tách

kênh (đường xanh lá) cũng bám theo giá trị đặt nhưng có độ quá điều chỉnh (khoảng 4,34%) và thời gian đáp ứng dài hơn. Ngoài ra, khi nồng độ axit sảy tới thay đổi thì nhận thấy giá trị mức gần như không bị ảnh hưởng.

Giai đoạn từ 15000 (s) đến 25000 (s), khi giá trị đặt của mức axit từ 50% lên 60% rồi xuống 40% và trở về 50%, đặc tính đáp ứng của mức axit theo ADRC (đường xanh tím than) gần như không có độ quá điều chỉnh và bám nhanh giá trị đặt, còn theo phương pháp tách kênh (đường xanh lá), độ quá điều chỉnh khá rõ rệt. Như vậy bộ điều khiển ADRC hoạt động tốt, có khả năng loại bỏ sự xen kênh và tốt hơn phương pháp tách kênh kết hợp mô hình nội IMC.

6. KẾT LUẬN

Ngày nay, một số nhà máy sản xuất axit sunfuric vẫn còn những tồn tại, một phần là do nhà máy tận dụng thiết bị công nghệ cũ trước đây, chỉ cải tạo nâng cấp hệ thống điều khiển, cấu trúc điều khiển chưa phù hợp, các đại lượng cần điều khiển vẫn có sự xen kênh, tương tác với nhau. Bằng việc tìm hiểu nghiên cứu cấu tạo các thiết bị và nguyên lý làm việc đặc thù của của các thiết bị đó trong quá trình sản xuất axit sunfuric, nhóm nghiên cứu đã áp dụng giải pháp điều khiển hiện đại - ADRC để nâng cao chất lượng sản xuất axit sunfuric. Vấn đề này đã được kiểm chứng thông qua mô phỏng Matlab - Simulink.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, chúng tôi sẽ nghiên cứu phương pháp ADRC mở rộng và cố gắng triển khai các phương pháp này trên hệ thống thiết bị thực ở nhà máy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Võ Thị Thương *et al.*, "Nghiên cứu khả năng sản xuất axit sunfuric (H_2SO_4) từ nguồn nguyên liệu lưu huỳnh/chứa lưu huỳnh tại nhà máy lọc dầu Dung Quất," *Petrovietnam Journal*, vol. 11, pp. 66–76,

Nov. 2021, doi: 10.47800/PVJ.2021.11-05.

- [2] Nguyễn Đức Dương, “Nghiên cứu phương pháp điều khiển tách kênh để nâng cao chất lượng sản xuất axit sunfuric trong nhà máy hóa chất Lâm Thao,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật công nghiệp*, vol. 8, pp. 6–14, Sep. 2015.
- [3] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [4] G. Herbst, “A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) as a Control Tool for Practitioners,” *Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 246–279, Sep. 2013, doi: 10.3390/electronics2030246.
- [5] Y.-H. Tu, R.-F. Wang, and W.-H. Su, “Active Disturbance Rejection Control - New Trends in Agricultural Cybernetics in the Future: A Comprehensive Review,” *Machines*, vol. 13, no. 2, p. 111, Feb. 2025, doi: 10.3390/machines13020111.

Thông tin liên hệ: **Nguyễn Đức Dương**

Điện thoại: 0904662074 - Email: ndduong86.ddt@uneti.edu.vn

Khoa Điện - Tự động hóa, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.