

THIẾT KẾ VÀ ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG ĐIỀU KHIỂN NHIỆT ĐỘ PID TRÊN MÔ HÌNH PCT-M4

Đỗ Thị Hoa^{1,*}, Nguyễn Thị Mến¹

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

*Email: dohoaqn1@gmail.com

TÓM TẮT

Các Bộ điều khiển PID (Proportional – Integral – Derivative) là tiêu chuẩn vàng trong điều khiển công nghiệp, chiếm hơn 90% ứng dụng, nhờ ưu điểm về cấu trúc đơn giản và dễ hiệu chỉnh, được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển nhiệt độ. Trên cơ sở đó, bài báo trình bày việc thiết kế và đánh giá hệ thống điều khiển nhiệt độ PID trên mô hình thí nghiệm PCT-M4 nhằm phục vụ đào tạo và nghiên cứu điều khiển tự động. Các thí nghiệm so sánh giữa các chế độ P, PI, PD và PID được thực hiện trong cùng điều kiện vận hành. Kết quả cho thấy bộ điều khiển PID tối ưu kết hợp cơ chế Anti-windup đạt hiệu suất vượt trội với thời gian xác lập ngắn, độ quá điều chỉnh (overshoot) nhỏ và sai số tĩnh xấp xỉ bằng không. Đánh giá định lượng bằng các chỉ số IAE, ISE và ITAE khẳng định cấu hình PID tối ưu cho chất lượng điều khiển cao và khả năng chống nhiễu tốt, phù hợp với đặc tính quán tính lớn của hệ thống nhiệt PCT-M4. Nghiên cứu góp phần xây dựng bộ thí nghiệm chuẩn hóa, nâng cao hiệu quả giảng dạy thực hành điều khiển nhiệt độ trong đào tạo kỹ thuật điện – tự động hóa tại Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh.

Từ khóa: Điều khiển PID, Điều khiển nhiệt độ, Mô hình PCT-M4, chống bão hòa tích phân.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh tự động hóa công nghiệp phát triển mạnh mẽ, nhu cầu kiểm soát chính xác các tham số công nghệ như nhiệt độ trở nên vô cùng quan trọng. Yêu cầu điều khiển nhiệt độ chính xác, ổn định và đáp ứng nhanh [1] là yếu tố quyết định nhằm đảm bảo chất lượng sản phẩm và tối ưu hóa năng lượng [2].

Tại Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh, việc sinh viên tiếp cận thực hành với các mô hình điều khiển công nghiệp hiện đại còn hạn chế [3]. Mô hình PCT-M4 là thiết bị đào tạo chuyên dụng, cho phép mô phỏng hệ thống điều khiển nhiệt độ thực tế và tạo điều kiện để sinh viên thực nghiệm với bộ điều khiển PID. Việc nghiên cứu, xây dựng và tối ưu bài thí nghiệm điều khiển nhiệt độ trên mô hình PCT-M4 là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn, góp phần nâng cao chất lượng đào tạo, củng cố năng lực thực hành và kỹ năng điều khiển tự động cho sinh viên. Mục tiêu nghiên cứu là ứng dụng phần mềm PCT-M để thiết kế các bài thí nghiệm điều khiển nhiệt độ bằng phương pháp PID, hỗ trợ nâng

cao chất lượng giảng dạy và nghiên cứu khoa học tại phòng thí nghiệm đo lường điện - điện tử.



Hình 1. Bộ điều khiển nhiệt độ PCT-M4

Phạm vi nghiên cứu tập trung vào hệ thống điều khiển nhiệt độ mô hình PCT-M4 (Hình 1) [4] và ứng dụng giải thuật điều khiển PID. Bộ điều khiển nhiệt độ PCT-M4 đáp ứng tốt yêu cầu này nhờ thiết kế mô phỏng sát thực tế, tích hợp đầy đủ các phần tử từ cảm biến, bộ điều khiển, phần tử chấp hành đến thiết bị giám sát và phần mềm phân tích. Hệ thống phù hợp với các học phần: *Điều khiển quá trình*, *Kỹ thuật đo lường*, *Lý thuyết điều khiển tự động* và các đề tài nghiên

cứu liên quan đến điều khiển PID, tối ưu hệ thống và xử lý tín hiệu.

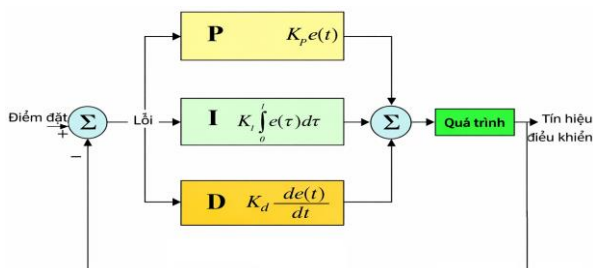
Trong giai đoạn 2020–2024, nhiều nghiên cứu đã tập trung nâng cao hiệu suất điều khiển PID cho các hệ thống nhiệt có độ trễ lớn thông qua các kỹ thuật như PID thích nghi, PID kết hợp Anti-windup và tối ưu tham số. Các kết quả cho thấy cơ chế giới hạn tích phân giúp giảm đáng kể độ quá điều chỉnh và rút ngắn thời gian xác lập [5]. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu này chủ yếu tập trung vào mô phỏng hệ thống công nghiệp, trong khi các mô hình thí nghiệm phục vụ đào tạo còn thiếu các nghiên cứu đánh giá định lượng và chuẩn hóa. Bài báo đã xây dựng và đánh giá một quy trình thí nghiệm điều khiển PID hoàn chỉnh trên mô hình PCT-M4, kết hợp các chỉ số IAE (Tích phân trị tuyệt đối của sai lệch), ISE (Tích phân bình phương sai lệch) và ITAE (Tích phân sai lệch tuyệt đối có trọng số thời gian) được sử dụng để đánh giá định lượng chất lượng điều khiển của hệ thống [6] và tích hợp cơ chế Anti-windup, qua đó góp phần chuẩn hóa nội dung thí nghiệm và nâng cao hiệu quả đào tạo điều khiển tự động.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan về Bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển PID hoạt động dựa trên tín hiệu sai lệch $e(t)$ giữa giá trị đặt (SetPoint – SP) và giá trị thực tế (Process Variable – PV). Bộ điều khiển PID sử dụng đồng thời ba thành phần: Tỷ lệ (P), Tích phân (I), và Vi phân (D) để tạo ra tín hiệu điều khiển ổn định và chính xác [5], được miêu tả trong Hình 2, tín hiệu điều khiển tổng hợp $u(t)$ được tính bởi công thức (1):

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$



Hình 2. Sơ đồ khối của bộ điều khiển PID

Khâu Tỷ lệ (K_p): Xác định tác động của sai

số hiện tại. K_p lớn giúp hệ phản ứng nhanh hơn, nhưng dễ gây dao động và vượt ngưỡng. Điều khiển P thuần túy luôn tồn tại sai số ổn định trạng thái (droop).

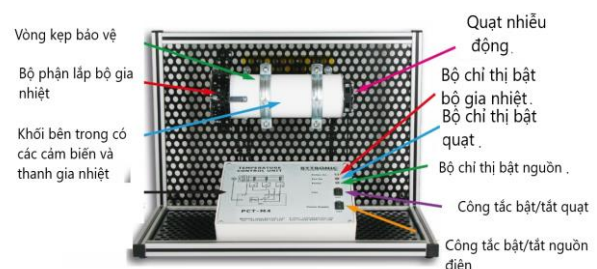
Khâu Tích phân (K_i): Xác định tác động của tổng các sai số quá khứ. Khâu I giúp loại bỏ sai số ổn định. K_i quá cao (thời gian tích phân T_i quá nhỏ) dễ dẫn đến mất ổn định và dao động kéo dài.

Khâu Đạo hàm (K_d): Dự đoán các sai số tương lai, dựa vào tốc độ thay đổi sai số hiện tại. K_d giảm độ quá điều chỉnh (overshoot) và tăng cường độ ổn định. Tuy nhiên, K_d lớn khuếch đại nhiễu đo lường [7].

2.2. Giới thiệu về mô hình PCT-M4 và phần mềm PCT-M

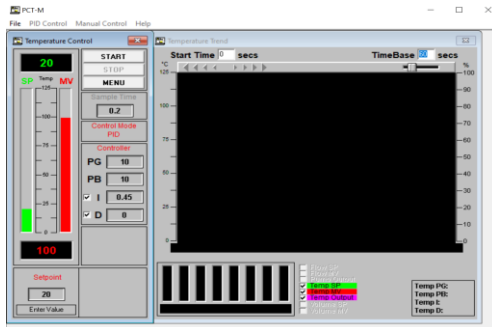
Bộ thí nghiệm điều khiển nhiệt độ PCT-M4 mô phỏng đầy đủ một vòng điều khiển công nghiệp, bao gồm bộ gia nhiệt Peltier/điện trở công suất, ba cảm biến PT100, quạt làm mát (tạo nhiễu), và bộ điều khiển PID tích hợp. PCT-M4 là hệ thống có độ trễ lớn và quán tính cao. Cấu tạo chi tiết của bộ điều khiển PCT-M4 được thể hiện trong Hình 3.

Quá trình điều khiển nhiệt độ trên PCT-M4 được xây dựng theo mô hình vòng kín. Bộ điều khiển nhận giá trị đặt (SP) do người vận hành nhập vào, sau đó so sánh với giá trị điều khiển (MV) mà bộ điều khiển PID gửi ra để điều khiển thiết bị như Peltier, quạt...đo từ cảm biến PT100. Dựa vào độ lệch (Error), bộ điều khiển tính toán tín hiệu điều khiển để đưa công suất cho bộ gia nhiệt hoặc kích hoạt quạt làm mát [8]. Nếu $MV < SP$, bộ điều khiển tăng công suất Heater. Nếu $MV > SP$, bộ điều khiển giảm công suất hoặc kích hoạt quạt làm mát để đưa hệ thống về trạng thái cân bằng.



Hình 3. Cấu tạo bộ điều khiển PTC-M4

Phần mềm PCT-M là giao diện giám sát, cho phép thiết lập các tham số PID như trình bày trong Hình 4. Phần mềm cho phép người dùng theo dõi dữ liệu đo lường, thiết lập giá trị đặt (SP), điều chỉnh thời gian lấy mẫu (Sampling Interval), và thay đổi các thông số điều khiển K_p (PG), K_i (I), K_d (D) theo thời gian thực và thu thập dữ liệu phục vụ phân tích hiệu suất điều khiển [8].



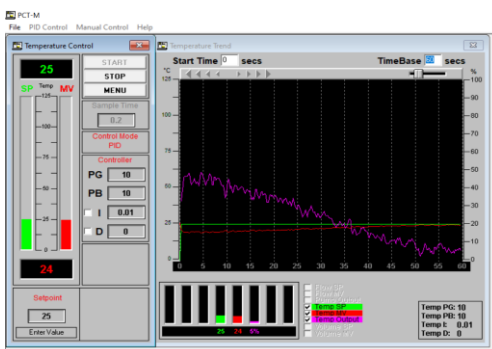
Hình 4. Giao diện hiển thị các tham số PID trong phần mềm PCT-M

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nhóm tác giả sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết (thu thập và phân tích tài liệu về PID và hệ thống nhiệt) và thực nghiệm trên mô hình PCT-M4, phù hợp với định hướng giảng dạy thực hành trong lĩnh vực đo lường – điều khiển công nghiệp.

1. Điều khiển Tỷ lệ (P).

Bộ điều khiển tỉ lệ có cấu trúc đơn giản, phản ứng nhanh nhưng không loại bỏ được sai số ổn định [9]. Khi PG tăng, hệ thống có xu hướng phản ứng nhanh hơn, nhưng dễ xuất hiện dao động. Sai số ổn định giảm dần khi PG tăng, tuy nhiên nếu PG quá cao thì nhiệt độ dao động quanh giá trị đặt. Khi PG nhỏ → hệ chậm, sai số lớn; PG quá lớn → hệ dao động nhiều.

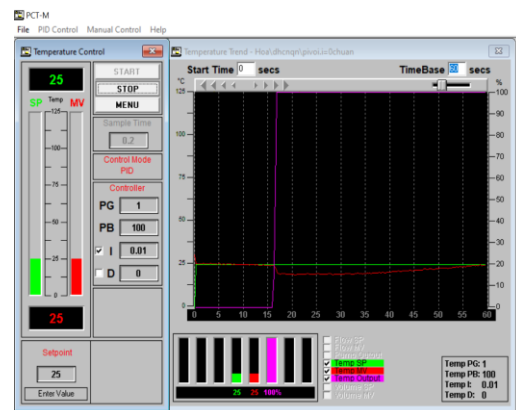


Hình 5. Đồ thị biểu diễn MV(t) với PG =10

Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian của hệ thống trong chế độ điều khiển P được thể hiện trong Hình 5. Việc lựa chọn giá trị PG phù hợp giúp hệ thống đạt hiệu suất tốt nhất giữa tốc độ – ổn định – sai số.

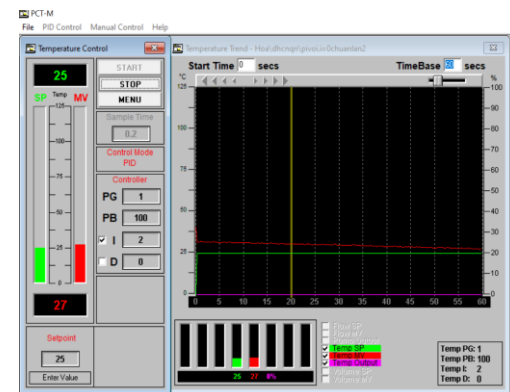
2. Điều khiển Tỷ lệ - Tích phân (PI).

Tuy I đã bật từ đầu nhưng *giá trị I rất nhỏ (0.01)* khiến tích phân gần như không có tác dụng thực tế → hệ vẫn hồi phục rất chậm. Khi Output = 100% liên tục và MV tiến gần đến giá trị ổn định → MV gần ổn định sau khoảng 50–60s, thời gian ổn định dài. Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian trong chế độ điều khiển PI với IAT=0 được thể hiện trong Hình 6.



Hình 6. Đồ thị biểu diễn MV(t) với IAT =0

Sau khoảng 20 giây, thay đổi IAT = 2s có nghĩa phân tích phân bắt đầu tham gia điều khiển sau 2 giây kể từ lúc thử. Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian trong chế độ điều khiển PI với IAT=2 được thể hiện trong Hình 7. Việc delayed I (IAT > 0) thường dùng để tránh tích phân tích lũy trong nhảy cảm nhiễu ban đầu. MV ổn định = 27,48°C (trung bình 4 mẫu). Sai số = 27,48 – 25 = +2,48°C (hệ cao hơn setpoint).



Hình 7. Đồ thị biểu diễn MV(t) với IAT =2s

Bộ điều khiển PI giúp hệ thống đạt giá trị mong muốn không còn sai số tĩnh.

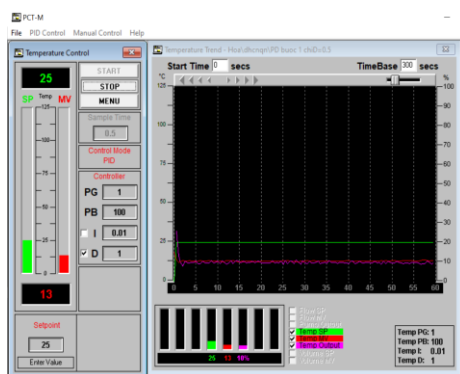
Thành phần I có tác dụng bù sai số nhưng cần điều chỉnh thích hợp để tránh dao động. Kết quả thí nghiệm chứng minh vai trò thiết yếu của tích phân trong hệ thống điều khiển nhiệt độ.

Qua quan sát thực nghiệm, có thể nhận thấy vòng điều khiển nhiệt độ của mô hình PCT-M4 có đặc tính rất khác so với các vòng điều khiển thông thường. Hệ thống nhiệt này có độ trễ lớn và quán tính nhiệt cao do nhiệt dung của thanh kim loại tích lũy nhiệt năng trong quá trình gia nhiệt.

Chính yếu tố này tạo ra một hiệu ứng tích phân nội tại ngay bên trong quá trình, độc lập với thuật toán điều khiển. Nhờ đặc tính này, nhiệt độ vẫn có thể tự tăng và tiến gần SP ngay cả khi không dùng thành phần I trong bộ điều khiển. Vì vậy, tác động tích phân trong PI không thật sự cần thiết và nếu đặt quá lớn còn gây dao động, kéo dài thời gian ổn định và làm hệ dễ quá nhiệt.

3. Điều khiển Tỷ lệ - Đạo hàm (PD).

Kết quả thử nghiệm với điều khiển PD cho thấy hệ thống không thể nâng nhiệt độ lên gần giá trị đặt 25°C , xuất hiện sai lệch tĩnh rất lớn khoảng 12°C . Nhiệt độ duy trì trong khoảng $12,5\text{--}13,5^{\circ}\text{C}$ với biên độ dao động nhỏ và lặp lại đều, chứng tỏ hệ thống ổn định nhanh (settling time khoảng $5\text{--}10\text{s}$) nhưng lại ổn định quanh một giá trị sai hoàn toàn so với setpoint.



Hình 8. Đồ thị biểu diễn MV(t) với D = 1

Việc tăng D lên 1s chỉ giúp giảm dao động nhờ tăng độ nhạy đạo hàm, nhưng không cải thiện được công suất sưởi. Đồng thời, $K_p = 1$ quá thấp và giá trị $T_i = 0,01$ quá nhỏ khiến thành

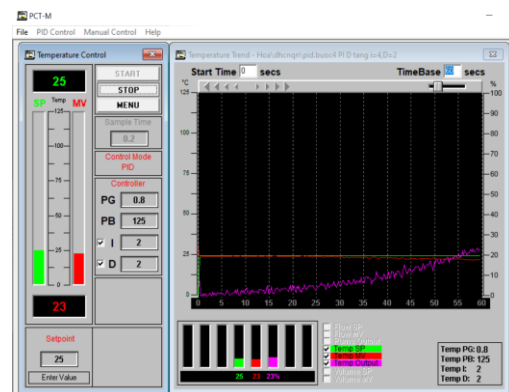
phần tích phân gần như không đóng góp, không thể nâng output để kéo nhiệt độ lên. Cấu hình PD thiên về giảm dao động, D giảm overshoot và giúp đáp ứng mượt nhờ dự báo xu hướng sai số, không phù hợp cho yêu cầu điều khiển bám setpoint. Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian trong chế độ điều khiển PD được thể hiện trong Hình 8.

Để đạt giá trị đặt, cần tăng K_p hoặc tăng tác động tích phân bằng cách tăng T_i . Tuy nhiên D rất nhạy nhiễu, đặc biệt khi nhiệt độ thay đổi đột ngột hoặc cảm biến bị tác động môi trường.

Hệ thống PD kiểu này dùng cho ứng dụng chống dao động, không phải điều khiển đạt setpoint.

4. Điều khiển Tỷ lệ - Tích phân - Đạo hàm (PID).

Với bộ thông số $K_p = 0,8$, $K_i = 2$ và $K_d = 2$, hệ thống không vượt quá giá trị đặt (Overshoot = 0%), cho thấy bộ điều khiển hoạt động an toàn và ổn định theo hướng không gây dao động lớn. Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian trong chế độ điều khiển PID được thể hiện trong Hình 9.



Hình 9. Đồ thị MV(t) ứng với chế độ PID

Tuy nhiên, thời gian tăng không đánh giá được do nhiệt độ ban đầu đã gần điểm đặt, trong khi hệ thống lại không đạt trạng thái ổn định vì nhiệt độ dao động liên tục quanh SP và đôi lúc giảm xuống thấp đáng kể. Sai số tĩnh vẫn tồn tại do K_p chưa đủ lớn và công suất gia nhiệt không đủ để đưa hệ thống lên chính xác 25°C . Tín hiệu điều khiển xuất hiện dạng xung cho thấy giới hạn phần cứng ảnh hưởng đến hiệu quả PID, khiến hệ thống chỉ tiến gần SP nhưng không bám được ổn định trong vùng sai số nhỏ.

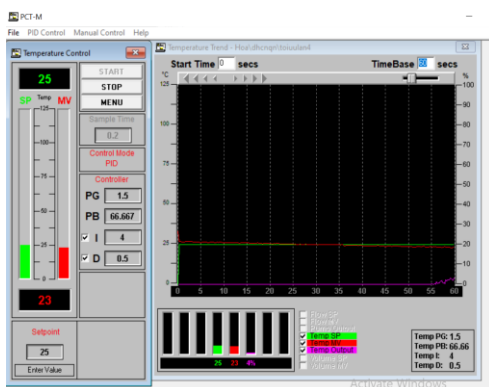
5. Tối ưu hóa PID và kiểm tra Anti-windup.

Phương pháp tinh chỉnh Ziegler–Nichols được áp dụng để tìm ra bộ thông số tối ưu ban đầu (K_{cr} , P_c).

Với $K_p = 0.6 K_{cr}$, $T_i = P_c / 2$, $T_d = P_c / 8$

Ta thấy những lần P thấp hoặc I/D quá cao đều làm hệ không ổn định, không đạt mục tiêu tăng nhiệt ổn định [10]. Bộ thông số tốt nhất cho hệ là giữ P trung bình – I vừa – D nhỏ, giúp hệ vừa đạt setpoint nhanh, vừa tránh vượt lớn và dao động. Do đó, bộ tham số PID ổn định nhất cho hệ điều khiển nhiệt độ là:

$K_p = 1,2 - 1,5$; $K_i = 3 - 4$; $K_d = 0,2 - 0,5$;



Hình 10. Đồ thị MV(t) ứng với bộ tham số PID tối ưu

Kết quả đáp ứng nhiệt độ theo thời gian trong chế độ điều khiển PID tối ưu được thể hiện trong Hình 10. Với bộ tham số PID gồm $K_p = 1,5$, $T_i = 4s$ và $T_d = 0,5s$, hệ thống cho thấy khả năng ổn định rất tốt trong suốt quá trình thí nghiệm. Do nhiệt độ ban đầu cao hơn giá trị đặt nên bộ điều khiển phản ứng nhanh, đưa tín hiệu điều khiển về 0% chỉ sau một chu kỳ lấy mẫu, nhờ tác dụng kết hợp giữa K_p cao và thành phần D làm giảm tốc độ thay đổi của sai số.

Trong giai đoạn tiếp theo, nhiệt độ giảm dần chủ yếu do quán tính và điều kiện môi trường khi AutoCool hoạt động, không phải do tác động trực tiếp của PID. Hệ thống duy trì mức dao động nhỏ quanh $24,8-25,1^{\circ}\text{C}$, tương ứng sai số xác lập chỉ $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, thể hiện đáp ứng mượt và không có hiện tượng quá điều chỉnh hoặc rung lắc.

Bộ tham số này mang lại đáp ứng ổn định, êm và an toàn, phù hợp cho các bài thí nghiệm về điều khiển nhiệt độ, mặc dù khả năng điều khiển chủ động bị hạn chế khi AutoCool chi phối toàn bộ quá trình làm mát.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích so sánh hiệu suất các chế độ điều khiển

Hệ thống điều khiển nhiệt độ PCT-M4 đánh giá đáp ứng với các chế độ điều khiển khác nhau, cụ thể (Bảng 1).

Chế độ P: Đáp ứng nhanh, nhưng tồn tại sai số tĩnh lớn (10%) và độ quá điều chỉnh (vọt lớn) cao (25%). Điều khiển P không phù hợp cho hệ nhiệt cần độ chính xác cao.

Chế độ PI: Loại bỏ được sai số tĩnh nhờ I, tuy nhiên thời gian xác lập lâu hơn so với P, và dễ dao động nhẹ quanh điểm đặt.

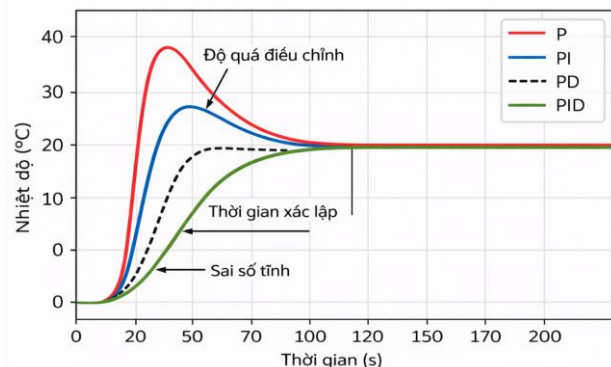
Chế độ PD: Giảm đáng kể độ vọt lớn và dao động nhờ D, nhưng vẫn còn sai số tĩnh (5%).

Chế độ PID: Kết hợp các ưu điểm P, I, D, cho hiệu suất vượt trội: thời gian đáp ứng hợp lý, độ quá độ thấp (5%), và sai số tĩnh bằng 0.

Bảng 1. Bảng so sánh hiệu suất các chế độ điều khiển

Chế độ	Thời gian đáp ứng (s)	Quá độ (%)	Sai số tĩnh (%)	Độ ổn định
P	45	25	10	Trung bình
PI	60	15	0	Tốt
PD	48	10	5	Tốt
PID	50	5	0	Rất tốt
PID tối ưu + AW	42	3	0	Rất tốt

Biểu đồ so sánh hiệu suất của các bộ điều khiển khác nhau trong việc đạt đến điểm đặt nhiệt độ mong muốn (khoảng 37°C) theo thời gian (Hình 11) (Nguồn: Nhóm tác giả xây dựng từ dữ liệu thực nghiệm trên mô hình PCT-M4).



Hình 11. Biểu đồ đáp ứng nhiệt độ - thời gian

Hình 11 thể hiện đáp ứng nhiệt độ theo thời gian của các chế độ điều khiển P, PI, PD và PID, qua đó cho thấy sự khác biệt rõ rệt về độ quá điều chỉnh, thời gian xác lập và sai số tĩnh.

P (Tỷ lệ): Đường nét liền màu đỏ trên cùng cho thấy bộ điều khiển P có thời gian đáp ứng nhanh nhất nhưng độ quá điều chỉnh (vọt lố) cao nhất và có thể có sai số trạng thái ổn định (không đạt chính xác điểm đặt).

PI (Tỷ lệ-Tích phân): Đường nét màu xanh dương cho thấy bộ điều khiển PI loại bỏ được sai số trạng thái ổn định so với P (đạt đến điểm đặt cuối cùng), nhưng có độ vọt lố và thời gian xác lập lâu hơn một chút so với P.

PD (Tỷ lệ-Vi phân): Đường nét đứt thứ ba (ngắn hơn) cho thấy bộ điều khiển PD giảm đáng kể độ vọt lố so với P và PI, làm cho hệ thống ổn định nhanh hơn (thời gian xác lập ngắn). Tuy nhiên, bản thân bộ điều khiển PD không thể loại bỏ sai số trạng thái ổn định nếu không có thêm thành phần tích phân.

PID (Tỷ lệ-Tích phân-Vi phân): Đường nét liền màu xanh lá dưới cùng cho thấy bộ điều khiển PID kết hợp tất cả các ưu điểm: đạt điểm đặt mà không có sai số trạng thái ổn định, giảm thiểu độ vọt lố và có thời gian xác lập tốt (ổn định nhanh). Biểu đồ cho thấy điều khiển PID có thời gian ổn định nhanh, ít dao động và độ chính xác cao nhất.

Bộ điều khiển PID thường được coi là cung cấp hiệu suất điều khiển tối ưu nhất cho các hệ thống như điều khiển nhiệt độ, nhờ khả năng cân bằng giữa tốc độ đáp ứng, độ chính xác và độ ổn định của hệ thống [10].

3.2. Đánh giá định lượng IAE – ISE – ITAE

Các chỉ số IAE, ISE và ITAE được sử dụng để đánh giá định lượng chất lượng điều khiển, trong đó ITAE phản ánh rõ nhất khả năng rút ngắn thời gian tồn tại sai số của hệ thống, cụ thể (Bảng 2).

Kết quả cho thấy PID tối ưu với Anti-windup đạt giá trị ITAE thấp nhất (616,6), chứng minh cấu hình này là hiệu quả nhất theo tiêu chí định lượng, đảm bảo hệ thống vào trạng thái ổn định cực nhanh và sai số tồn tại rất ngắn.

Chế độ	IAE	ISE	ITAE
P	20,6	11,4	1944,3
PI	11,6	4,2	805,8
PD	13,9	7,9	924,1
PID	8,9	3,8	672,4
PID + Anti-windup	9,3	4,2	616,6

Bảng 2. Bảng đánh giá định lượng chế độ

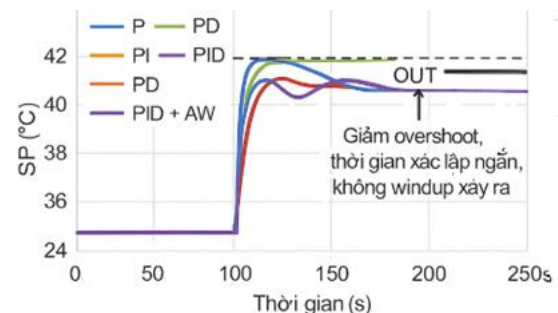
3.3. Ảnh hưởng của hiện tượng Windup và cơ chế Anti-windup

Hiện tượng Windup (tích phân quá mức) xảy ra khi tín hiệu điều khiển (OUT) đạt ngưỡng bão hòa (0% hoặc 100%) nhưng thành phần tích phân vẫn tiếp tục tích lũy sai lệch. Khi SP tăng đột ngột, OUT bị kẹt ở mức cao dẫn đến overshoot lớn và kéo dài thời gian xác lập.

Sau khi kích hoạt chức năng Anti-windup, sai số tích phân được giới hạn. Kết quả là overshoot giảm 30–50% so với PID thông thường và thời gian xác lập được rút ngắn rõ rệt. Anti-windup là chức năng bắt buộc đối với các hệ có quán tính lớn như nhiệt độ [11].

3.4. Khả năng chống nhiễu

Khả năng chống nhiễu của hệ thống điều khiển PID tối ưu được minh họa trong Hình 12.



Hình 12. Biểu đồ đáp ứng nhiễu

Khi có nhiễu (giảm nhiệt độ đột ngột bằng quạt hoặc mở nắp), hệ thống PID tối ưu + Anti-windup thể hiện khả năng hồi phục nhanh nhất và chính xác nhất, gần như không bị kéo dài sai lệch. Ngược lại, chế độ P và PD mất bám SP, còn PI hồi phục chậm.

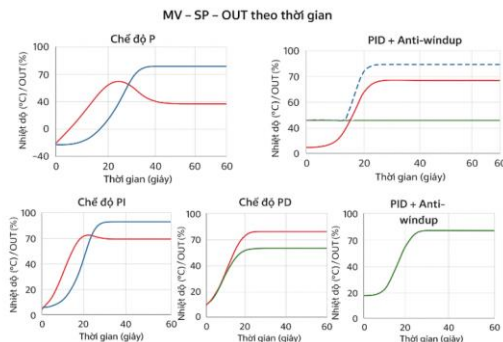
3.5. Đánh giá độ nhạy của hệ thống

Độ nhạy phản ánh mức độ đáp ứng của hệ thống khi có sự thay đổi nhẹ trong tải hoặc nhiễu. Các thí nghiệm cho thấy:

Khi tải tăng nhẹ (tác động nhiệt nhỏ): P và PD phản ứng nhanh nhưng dễ dao động. PI và PID ổn định hơn nhờ triệt sai lệch.

Khi tải thay đổi mạnh: P mất bám SP, PI bám lại nhưng chậm, PD phản ứng mạnh nhưng vẫn thiếu độ chính xác, PID thích ứng tốt nhất. PID cho độ nhạy tối ưu nhất, giữ được tính ổn định dù tải nhiệt thay đổi.

3.6. Biểu đồ MV – SP – OUT theo thời gian



Hình 13. Biểu đồ so sánh đáp ứng chế độ

Hình 13 so sánh trực quan đáp ứng của các chế độ điều khiển thông qua các tín hiệu MV–SP–OUT. Kết quả cho thấy:

P nhanh nhưng overshoot lớn, có sai số tĩnh.

PI bám SP, loại bỏ sai số tĩnh nhưng thời gian xác lập lâu, có dao động.

PD giảm overshoot nhưng còn sai số tĩnh.

PID và PID+AW cân bằng tốt nhất giữa tốc độ, độ chính xác và ổn định, ít dao động.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã khảo sát chi tiết mô hình PCT-M4 và ứng dụng phần mềm PCT-M để mô phỏng các thí nghiệm điều khiển nhiệt độ với các bộ điều khiển P, PI, PD đến PID, đồng thời đánh giá hiệu suất hệ thống bằng các chỉ số định lượng (IAE, ISE, ITAE).

Kết quả thực nghiệm cho thấy bộ điều khiển PID tối ưu hóa với cơ chế Anti-windup mang lại hiệu suất điều khiển tối ưu nhất cho hệ thống

nhiệt PCT-M4, đạt được sự cân bằng hợp lý giữa tốc độ đáp ứng, độ chính xác (sai số tĩnh ≈ 0), và khả năng chống nhiễu, phù hợp với đặc tính quán tính lớn của hệ thống nhiệt.

Đóng góp chính của bài báo là xây dựng và đánh giá một quy trình thí nghiệm điều khiển PID chuẩn hóa trên mô hình PCT-M4, có tích hợp cơ chế Anti-windup và đánh giá định lượng bằng các chỉ số IAE, ISE, ITAE phục vụ đào tạo thực hành. Điều đó không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả đào tạo thực hành trong lĩnh vực kỹ thuật điện – điện tử và tự động hóa, mà còn làm tăng tính trực quan và tính ứng dụng của học liệu, đáp ứng tốt nhu cầu giảng dạy và học tập tại phòng thí nghiệm của Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh.

4.2. Kiến nghị

Trong thời gian tới, hệ thống có thể được mở rộng theo hướng tích hợp nền tảng giám sát – điều khiển nâng cao và công cụ phân tích, mô phỏng hiện đại nhằm phục vụ tốt hơn cho giảng dạy và nghiên cứu khoa học, cụ thể như:

Điều khiển mờ (Fuzzy-PID), điều khiển thích nghi, điều khiển dự đoán mô hình (MPC) [12].

Phát triển giao diện giám sát – điều khiển trên nền tảng LabVIEW hoặc SCADA, cho phép lưu trữ dữ liệu, trực quan hóa và xuất báo cáo tự động.

Xây dựng bộ bài giảng điện tử và giáo trình nội bộ phục vụ tự học cho sinh viên.

Kết hợp với IoT để giám sát từ xa, cho phép truy cập dữ liệu thí nghiệm qua mạng LAN/Internet.

Tích hợp công cụ phân tích tự động, giúp đánh giá nhanh sai số và đề xuất thông số PID tối ưu.

Những hướng phát triển này sẽ giúp mô hình PCT-M4 trở thành bộ tài nguyên quan trọng phục vụ lâu dài cho công tác đào tạo, thực hành và nghiên cứu của giảng viên – sinh viên Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Văn Dư. (2015). *Giáo trình Kỹ thuật điều khiển tự động*. Nhà xuất bản Sư phạm Kỹ thuật.
2. TS. Bùi Quý Lực. (2011). *Kỹ thuật điều khiển tự động*. NXB Khoa học và kỹ thuật.
3. Hoàng Minh Sơn (2022). *Cơ sở hệ thống điều khiển quá trình* (tái bản lần thứ 5). NXB Bách Khoa Hà Nội.
4. Feedback Instruments Ltd. (2020). *PCT-M4 Temperature Control Trainer – Technical Manual*.
5. Alhelou, H. H., Golshan, M. E. H., Hatziaargyriou, N. D. (2024). *Improving PID controller performance in nonlinear oscillatory AGC systems using a multi-objective marine predator algorithm with enhanced diversity*. Journal of Bionic Engineering. Springer.
6. Dorf, R. C., Bishop, R. H., (2011) *Modern Control Systems*, 12th Edition, Pearson.
7. PGS.TS. Nguyễn Thương Ngô. (2023). *Lý thuyết điều khiển tự động thông thường và hiện đại* (tập 3). NXB Bách Khoa Hà Nội.
8. National Instruments. (2021). *LabVIEW Control Design and Simulation User Guide*, NI Press.
9. Nise, Norman S. (2015). *Control Systems Engineering*, 7th Edition, Wiley.
10. Wangpeng An, Haoqian Wang, Qingyun Sun, Jun Xu, Qionghai Dai, and Lei Zhang (2018). *A PID Controller Approach for Stochastic Optimization of Deep Networks*, China.
11. Huang, S., Liu, Y., Zhang, H. (2024). *Intelligent regulation of temperature and humidity in greenhouses based on single neuron PID algorithm*. Electronics. MDPI.
12. Zhang, Y., Li, X., Wang, J. (2024). *Improvement of temperature control performance for electric heating water tank*. Thermal Science.

Thông tin của tác giả:**ThS. Đỗ Thị Hoa**

Giảng viên Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).868.152.986 - Email: dohoaqn1@gmail.com

ThS. Nguyễn Thị Mến

Giảng viên Khoa Điện, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

Điện thoại: +(84).385.702.968 - Email: menk50tudong@gmail.com

DESIGN AND EVALUATION OF A PID TEMPERATURE CONTROL SYSTEM ON THE PCT-M4 MODEL**Information about authors:**

Do Thi Hoa, Lecturer of Electrical Department, Quang Ninh University of Industry, email: dohoaqn1@gmail.com

Nguyen Thi Men, Lecturer of Electrical Department, Quang Ninh University of Industry, Email: menk50tudong@gmail.com

ABSTRACT:

PID (Proportional-Integral-Derivative) controllers are the gold standard in industrial control, accounting for over 90% of applications due to their simple structure and ease of adjustment, thus widely used in temperature control systems. Based on this, this paper presents the design and evaluation of a PID temperature control system on a PCT-M4 experimental model for training and

research in automatic control. Comparative experiments between P, PI, PD, and PID modes were conducted under the same operating conditions. The results show that the optimal PID controller combined with an anti-windup mechanism achieved superior performance with short settling time, small overshoot, and near-zero steady-state error. Quantitative evaluation using IAE, ISE, and ITAE indices confirms that the optimal PID configuration provides high control quality and good noise immunity, suitable for the large inertial characteristics of the PCT-M4 temperature system. This research contributes to the development of a standardized set of experiments, improving the effectiveness of teaching practical temperature control in electrical and automation engineering training at Quang Ninh University of Industry.

Keywords: PID control, Temperature control, PCT-M4, Anti-windup.

REFERENCES

1. Nguyen Van Du. (2015). *Automatic Control Engineering Textbook*. Technical Pedagogical Publishing House.
2. Bui Quy Luc, PhD. (2011). *Automatic Control Engineering*. Science and Technology Publishing House.
3. Hoang Minh Son. (2022). *Fundamentals of Process Control Systems* (5th revised edition). Hanoi University of Science and Technology Publishing House.
4. Feedback Instruments Ltd. (2020). *PCT-M4 Temperature Control Trainer – Technical Manual*.
5. Alhelou, H. H., Golshan, M. E. H., Hatzigargyriou, N. D. (2024). *Improving PID controller performance in nonlinear oscillatory AGC systems using a multi-objective marine predator algorithm with enhanced diversity*. Journal of Bionic Engineering. Springer.
6. Dorf, R. C., Bishop, R. H., (2011) *Modern Control Systems*, 12th Edition, Pearson.
7. Nguyen Thuong Ngo, Assoc. Prof., PhD. (2023). *Classical and Modern Automatic Control Theory* (Volume 3). Hanoi University of Science and Technology Publishing House.
8. National Instruments. (2021). *LabVIEW Control Design and Simulation User Guide*, NI Press.
9. Nise, Norman S. (2015). *Control Systems Engineering*, 7th Edition, Wiley.
10. Wangpeng An, Haoqian Wang, Qingyun Sun, Jun Xu, Qionghai Dai, and Lei Zhang (2018). *A PID Controller Approach for Stochastic Optimization of Deep Networks*, China.
11. Huang, S., Liu, Y., Zhang, H. (2024). *Intelligent regulation of temperature and humidity in greenhouses based on single neuron PID algorithm*. Electronics. MDPI.
12. Zhang, Y., Li, X., Wang, J. (2024). *Improvement of temperature control performance for electric heating water tank*. Thermal Science.

Ngày nhận bài: 16/12/2025;

Ngày nhận bài sửa: 23/12 /2025;

Ngày chấp nhận đăng: 28/12/2025.