

DOI: 10.70993/TCDN.2026.4(28).75-88

ỨNG DỤNG BỘ ĐIỀU KHIỂN PID SỐ TRONG ĐIỀU CHỈNH TỐC ĐỘ ĐỘNG CƠ ĐIỆN MỘT CHIỀU: THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG

Đoàn Văn Hải¹, Hoàng Anh Thu²

Ngày nhận bài: 07/01/2026; Gửi phản biện: 25/02/2026; Duyệt đăng: 05/04/2026

Tóm tắt: Điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều là yêu cầu quan trọng trong các hệ truyền động điện nhằm bảo đảm độ chính xác, tính ổn định và hiệu quả vận hành. Bài báo trình bày việc ứng dụng bộ điều khiển PID số trong điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều thông qua quá trình thiết kế, hiệu chỉnh và mô phỏng trên nền tảng Matlab/Simulink.

Trên cơ sở mô hình toán học của động cơ DC, bộ điều khiển PID số được xây dựng bằng phương pháp rời rạc hóa bộ điều khiển PID liên tục. Các tham số điều khiển được xác định theo phương pháp Ziegler–Nichols và tiếp tục tinh chỉnh nhằm nâng cao chất lượng đáp ứng của hệ thống. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển PID số sau khi tinh chỉnh đạt thời gian xác lập khoảng 0,25 s, độ quá điều chỉnh giảm từ 25,4% xuống còn 2,1%, sai số xác lập xấp xỉ bằng không và đáp ứng ổn định hơn so với bộ tham số ban đầu.

Kết quả nghiên cứu khẳng định tính hiệu quả và khả năng ứng dụng của bộ điều khiển PID số trong điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều, đồng thời cung cấp cơ sở tham khảo cho việc triển khai các hệ truyền động điện sử dụng bộ điều khiển số trong thực tiễn.

Từ khóa: PID số; động cơ điện một chiều; điều chỉnh tốc độ; Matlab/Simulink;

Abstract: Speed regulation of DC motors is a fundamental requirement in electric drive systems to ensure high control accuracy, operational stability, and system efficiency. This paper presents the application of a digital Proportional–Integral–Derivative (PID) controller for DC motor speed regulation through controller design, parameter tuning, and simulation using the Matlab/Simulink environment.

Based on the mathematical model of the DC motor, a digital PID controller is developed by discretizing the conventional continuous-time PID algorithm. The controller parameters are initially determined using the Ziegler–Nichols tuning method and subsequently fine-tuned to improve the dynamic performance of the control system. Simulation results demonstrate that the optimized digital PID controller achieves a settling time of approximately 0.25 s, reduces the overshoot from 25.4% to 2.1%, and virtually eliminates the steady-state error while maintaining excellent stability.

These findings confirm the effectiveness and practical applicability of the proposed digital PID controller for DC motor speed regulation and provide a useful reference for the implementation of digital control strategies in modern electric drive systems.

Keywords: Digital PID; DC motor; speed control; Matlab/Simulink;

¹ Hội Khoa học Kỹ thuật An toàn - Vệ sinh Lao động thành phố Hải Phòng; Email: uhdhaidoan.edu@gmail.com

² Khoa Công nghệ Kỹ thuật điện, điện tử, trường Đại học Đại Nam; Email: thuha@dainam.edu.vn

1. Tổng quan

Hệ truyền động điện đóng vai trò quan trọng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như gia công cơ khí, băng tải, robot công nghiệp và các dây chuyền sản xuất tự động. Trong số đó, hệ truyền động điện một chiều (DC) vẫn được sử dụng rộng rãi nhờ cấu trúc đơn giản, đặc tính mô-men tốt và khả năng điều khiển linh hoạt trong dải tốc độ rộng (Vũ Gia Hanh & Trần Khánh Hà, 2021a, 2021b; Nguyễn Đình Trung, 2023). Một trong những yêu cầu cốt lõi đối với hệ truyền động điện một chiều là điều chỉnh và ổn định tốc độ động cơ nhằm đảm bảo chất lượng công nghệ và hiệu suất làm việc của hệ thống.

Trong các phương pháp điều khiển tự động, bộ điều khiển PID (Proportional-Integral-Derivative) là giải pháp được ứng dụng phổ biến nhất trong công nghiệp nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai và hiệu quả điều khiển cao đối với nhiều đối tượng khác nhau (Nguyễn Văn Hòa, 2025; Åström & Hägglund, 2006; Nise, 2020). Đặc biệt, PID cho phép cải thiện đồng thời các chỉ tiêu chất lượng động học như thời gian quá độ, độ quá điều chỉnh và sai số xác lập, do đó rất phù hợp cho bài toán điều chỉnh tốc độ động cơ điện (Bùi Quốc Khánh & cộng sự, 2020).

Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật số và vi xử lý, điều khiển số ngày càng thay thế các hệ điều khiển tương tự truyền thống. Việc áp dụng PID số không chỉ nâng cao độ chính xác điều khiển mà còn tăng tính linh hoạt trong việc hiệu chỉnh tham số, mở rộng khả năng tích hợp với các hệ thống điều khiển thông minh (Thân Ngọc Hoàn & cộng sự, 2022; Ogata, 2010). Tuy nhiên, do tính hiệu trong hệ điều khiển số mang tính rời rạc theo thời gian, quá trình phân tích, thiết kế và đảm bảo ổn định của hệ thống trở nên phức tạp hơn so với hệ liên tục (Nguyễn Văn Hòa, 2025; Ogata, 2010).

Trong thực tế, việc lựa chọn và hiệu chỉnh các thông số của bộ điều khiển PID (K_p , K_i , K_d) có ảnh hưởng quyết định đến chất lượng điều khiển của hệ truyền động điện. Trong số các phương pháp hiệu chỉnh, phương pháp Ziegler-Nichols được xem là một trong những phương pháp cổ điển, đơn giản và hiệu quả, thường được sử dụng trong cả nghiên cứu và giảng dạy để xác định nhanh các tham số PID ban đầu (Åström & Hägglund, 2006; Nise, 2029). Phương pháp này đặc biệt phù hợp khi kết hợp với các công cụ mô phỏng như Matlab/Simulink, cho phép đánh giá trực quan đáp ứng của hệ thống trước khi triển khai thực tế (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021; MathWorks, 2022).

Xuất phát từ những yêu cầu nêu trên, bài báo này tập trung vào thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển PID số cho bài toán điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều trong hệ truyền động điện. Trên cơ sở mô hình toán học của động cơ DC (Vũ Gia Hanh & Trần Khánh Hà, 2021a, 2021b; Krishnan, 2015), bộ điều khiển PID số được xây dựng thông qua quá trình rời rạc hóa luật điều khiển PID liên tục. Các tham số điều khiển được xác định bằng phương pháp Ziegler-Nichols và được đánh giá thông qua mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ hiệu quả và khả năng ứng dụng của bộ điều khiển PID số trong điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều, đặc biệt trong các hệ truyền động điện công nghiệp và đào tạo kỹ thuật.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

* Đối tượng nghiên cứu: Bộ điều khiển PID số. Đây là một thuật toán điều khiển tự động được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống công nghiệp để điều chỉnh một đại lượng đầu ra theo một giá trị mong muốn.

* Phương pháp nghiên cứu:

- Phương pháp nhận dạng hệ thống: Sử dụng các tín hiệu đầu vào và đầu ra của hệ thống để ước tính các tham số của mô hình.
- Phương pháp thử nghiệm: Điều chỉnh các thông số để đạt được hiệu suất tốt nhất.
- Mô phỏng: Sử dụng phần mềm mô phỏng như MATLAB, Simulink để kiểm tra hiệu suất của bộ điều khiển trong các điều kiện khác nhau.

3. Nội dung nghiên cứu

3.1. Phương pháp điều khiển PID số

3.1.1. Quá trình phân tích tín hiệu rời rạc

Trong các hệ thống điều khiển số, tín hiệu không còn là hàm liên tục theo thời gian mà tồn tại dưới dạng các chuỗi giá trị rời rạc. Các tín hiệu này thường được biểu diễn dưới dạng chuỗi xung hoặc dãy số, thu được thông qua quá trình lấy mẫu từ tín hiệu liên tục ban đầu.

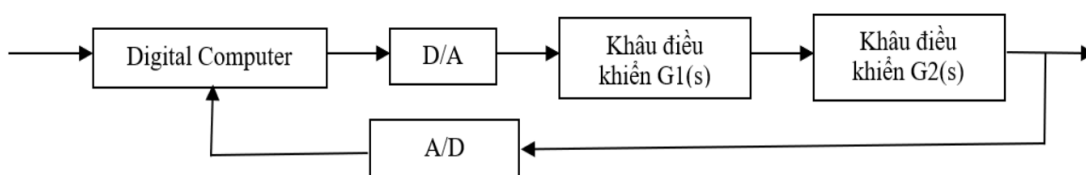
Để xử lý và khai thác thông tin từ tín hiệu, cần thực hiện quá trình lượng tử hóa. Lượng tử hóa theo thời gian là quá trình chuyển đổi tín hiệu liên tục thành tín hiệu rời rạc theo thời gian nhưng vẫn giữ nguyên tính liên tục về biên độ. Hệ thống xử lý loại tín hiệu này được gọi là hệ thống rời rạc, diễn hình như các mạch tạo xung hoặc hệ thống điều chế xung.

Khi quá trình lượng tử hóa được thực hiện đồng thời cả về thời gian và biên độ, tín hiệu thu được sẽ là tín hiệu số. Trong các hệ thống điều khiển số, các tín hiệu điều khiển chỉ tồn tại tại các thời điểm rời rạc, cách đều nhau theo chu kỳ lấy mẫu TT. Do đó, biên độ của tín hiệu chỉ được xác định tại các thời điểm này.

Việc phân tích và đảm bảo tính ổn định của hệ thống điều khiển số trở nên phức tạp hơn so với hệ thống liên tục, do ảnh hưởng của quá trình lấy mẫu và lượng tử hóa. Vì vậy, việc nghiên cứu và áp dụng các phương pháp phân tích, thiết kế phù hợp là cần thiết.

Hiện nay, hệ thống điều khiển số được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nhờ sự phát triển của máy tính số và vi xử lý, cùng với sự cải thiện về chi phí và độ tin cậy (Thân Ngọc Hoàn và cộng sự, 2022).

Hình 1. Hệ thống điều khiển số



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Thân Ngọc Hoàn và cộng sự, 2022).

Trong hệ thống điều khiển số, máy tính số đóng vai trò trung tâm, kết nối với đối tượng điều khiển thông qua các bộ chuyển đổi tương tự – số (A/D) và số – tương tự (D/A). Do đó, trong hệ thống tồn tại đồng thời hai loại tín hiệu: tín hiệu rời rạc như $r(nT)$, $e(nT)$, $b(nT)$ và tín hiệu liên tục như $u(t)$, $m(t)$, $c(t)$. Hệ thống này được gọi là hệ thống dữ liệu lấy mẫu.

Quá trình lấy mẫu có thể được mô tả bằng cách xét một tín hiệu liên tục $e(t)$. Khi lấy mẫu tín hiệu này tại các thời điểm cách đều nhau với chu kỳ T , ta thu được dãy giá trị:

$$e(0), e(T), e(2T), \dots, e(nT)$$

Dãy giá trị này chỉ phản ánh tín hiệu tại các thời điểm lấy mẫu. Giá trị của tín hiệu tại các thời điểm khác cần được xấp xỉ thông qua các phương pháp nội suy.

Trong thực tế, do đối tượng điều khiển và phần tử chấp hành thường là các hệ thống liên tục, nên tín hiệu rời rạc sau khi xử lý cần được chuyển đổi trở lại thành tín hiệu liên tục thông qua bộ giữ mẫu hoặc bộ D/A để đảm bảo tín hiệu điều khiển được duy trì trong khoảng thời gian giữa hai lần lấy mẫu.

3.2. Thiết kế bộ điều khiển PID số điều chỉnh tốc độ động cơ điện một chiều trong hệ truyền động điện

3.2.1. Nội dung thiết kế

a) Cấu trúc hệ truyền động điện

Mục tiêu cơ bản của hệ điều chỉnh tự động truyền động điện là đảm bảo các đại lượng điều chỉnh (như tốc độ, mô-men) bám theo giá trị đặt, không phụ thuộc vào các tác động nhiễu từ môi trường hoặc tải.

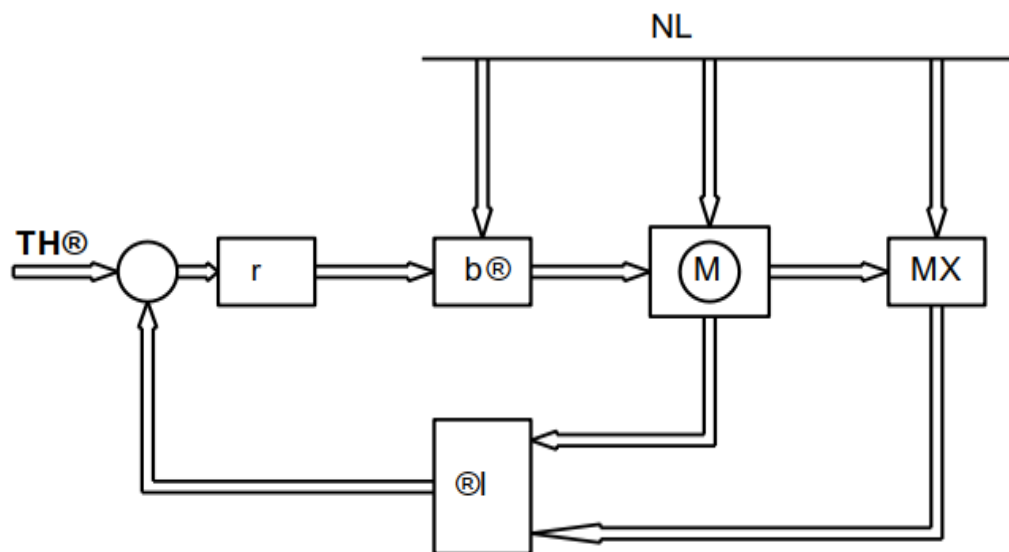
Cấu trúc chung của hệ điều chỉnh tự động truyền động điện được thể hiện trên Hình 2, bao gồm hai phần chính: phần lực và phần điều khiển (Nguyễn Đình Trung, 2023).

Phần lực gồm: Động cơ truyền động MMM dẫn động máy sản xuất MxM_xMx ; Bộ biến đổi năng lượng (BĐ)

Phần điều khiển gồm: Các thiết bị đo lường (ĐL); Bộ điều chỉnh RRR;

Ngoài ra, hệ thống còn có: Tín hiệu đặt (THĐ); Các tín hiệu nhiễu loạn (NL)

Hình 2. Cấu trúc chung của hệ điều chỉnh tự động truyền động điện



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

Động cơ truyền động có thể là động cơ một chiều, động cơ không đồng bộ, động cơ đồng bộ hoặc động cơ bước. Trong nghiên cứu này, đối tượng điều khiển là động cơ điện một chiều.

Bộ biến đổi (BĐ) sử dụng các linh kiện bán dẫn công suất như chỉnh lưu, biến tần, bộ băm xung,... với hai chức năng chính:

Biến đổi năng lượng điện phù hợp với yêu cầu của động cơ

Truyền tải tín hiệu điều khiển để điều chỉnh các thông số đầu ra như điện áp, dòng điện, công suất hoặc tần số

Tín hiệu điều khiển được tạo ra từ bộ điều chỉnh RRR, dựa trên sai lệch giữa tín hiệu đặt và tín hiệu phản hồi từ hệ thống. Sai lệch này được xử lý để tạo ra tín hiệu điều khiển phù hợp nhằm đảm bảo chất lượng động và tĩnh của hệ thống.

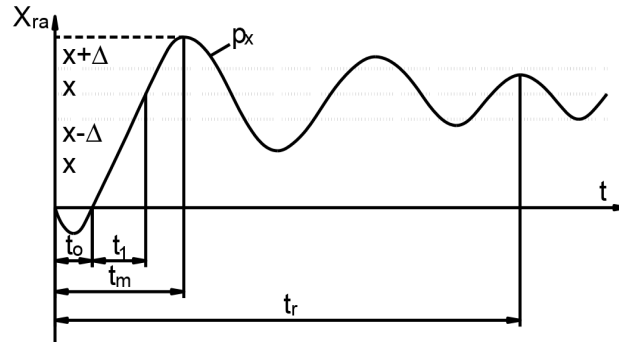
Các đại lượng cần điều chỉnh trong hệ truyền động bao gồm: mô-men, tốc độ và dòng điện. Trong thực tế, để nâng cao chất lượng điều khiển, hệ thống thường sử dụng nhiều mạch vòng như: mạch vòng dòng điện, tốc độ, điện áp, từ thông,...

b) Các vấn đề khi thiết kế hệ điều chỉnh truyền động điện

Khi thiết kế hệ điều chỉnh tự động, cần đảm bảo đồng thời các yêu cầu: Yêu cầu công nghệ; Chỉ tiêu chất lượng; Hiệu quả kinh tế.

Chất lượng hệ thống được đánh giá ở hai trạng thái: Trạng thái tĩnh (độ chính xác điều chỉnh (sai số xác lập)); Trạng thái động: các chỉ tiêu như độ quá điều chỉnh, thời gian xác lập, tốc độ đáp ứng và số lần dao động (Bùi Quốc Khánh và cộng sự, 2020)

Hình 3. Các thông số đặc tính đáp ứng theo thời gian



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Bùi Quốc Khánh & cộng sự, 2020).

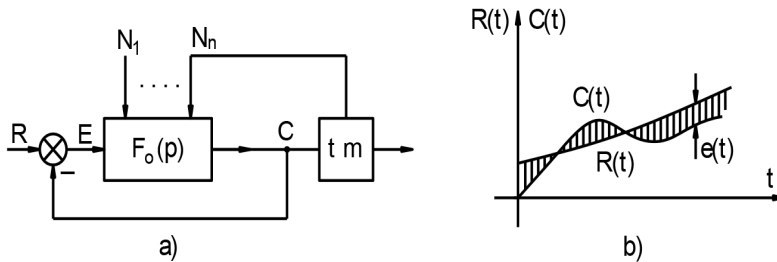
Trong đó: t_r - thời gian điều chỉnh; t_1 - thời điểm đạt cực đại lần đầu;
 t_m - thời gian đạt giá trị cực đại t_0 - thời gian trễ
 p_x - độ quá điều chỉnh

c) Sai lệch điều chỉnh và hệ số sai lệch

Xét hệ thống điều khiển có cấu trúc tối giản như trên Hình 4 (Nguyễn Đình Trung, 2023).

Hình 4. Sơ đồ hệ thống điều khiển

a) Sơ đồ khối; b) Đặc tính quá độ



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

$$C(p) = F(p).R(p) + \sum F_i(p)N_i(p) \quad F(p) = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)}$$

$F_0(p)$: hàm truyền mạch hở

$R, r(t)$: tín hiệu điều khiển

$e = R - C$: sai lệch điều chỉnh

$F(p)$: hàm truyền đối với các nhiễu loạn

TM : thiết bị công nghệ

$C, c(t)$: tín hiệu ra

N_i : các nhiễu loạn

Các thành phần quá độ của $C(t)$ phụ thuộc vào đặc tính của mạch vòng điều chỉnh, vào tín hiệu điều khiển; là nghiệm của các phương trình vi phân không thuần nhất. Thành phần nghiệm riêng của $C(t)$ theo $R(t)$ sẽ chép lại $R(t)$ với độ chính xác nào đó. Thành phần của $C(t)$ theo nhiễu loạn $N_i(t)$ phải càng nhỏ càng tốt.

Sai lệch điều chỉnh $e(t) = R(t) - C(t)$ có thể viết dạng chuỗi hàm:

$$e(t) = C_0 R(t) + C_1 \frac{dR(t)}{dt} + C_2 \frac{d^2 R(t)}{dt^2} + \dots + C_i \frac{d^i R(t)}{dt^i} + \dots + C_{iNa} \frac{d^i N_n(t)}{dt^i} + K(t)$$

Như vậy nếu biết trước $R(t)$ và các nhiễu $N_i(t)$ và bỏ qua hằng dư $K(t)$ thì ta có thể xác định được sai lệch $e(t)$ nếu tính toán được các hằng số C_i . Các hằng số C_i - là các hệ số sai lệch:

C_0 - hệ số sai lệch tốc độ; C_1 - hệ số sai lệch tốc độ; C_2 - hệ số sai lệch gia tốc.

Một hệ thống chính xác tuyệt đối là hệ có mọi hệ số sai lệch đều bằng không.

Hàm truyền của hệ thống (Nguyễn Văn Hòa, 2025):

$$F_e(p) = \frac{F_0(p)}{R(p)} = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)} = \frac{M(p)}{N(p)}$$

Nếu đem chia đa thức $M(p)$ cho đa thức $N(p)$ thì ta có:

$$F_e(p) = (C_0 + C_1 p + C_2 p^2 + \dots + C_i p^i).R(p)$$

Từ đó suy ra cách tính các hệ số sai lệch điều chỉnh:

$$C_0 = \lim \{F_e(p)\} \text{ khi } p \rightarrow 0$$

$$C_1 = \lim \left\{ \frac{1}{p} [F_e(p) - C_0] \right\} \text{ khi } p \rightarrow 0$$

$$C_i = \lim \left\{ \frac{1}{p^i} \left[F_e(p) - \sum_{k=0}^{i-1} C_k p^k \right] \right\} \text{ khi } p \rightarrow 0$$

Cũng có thể tính được các hệ số sai lệch với tín hiệu điều khiển nhờ hàm truyền của hệ thống đối với tín hiệu điều khiển:

$$F(p) = \frac{C(p)}{R(p)} = \frac{F_0(p)}{1 + F_0(p)} \quad F_\Phi(p) = \frac{R(p) - C(p)}{R(p)} = 1 - F(p)$$

Có thể viết hàm truyền ở dạng tỉ số các đa thức:

$$F(p) = \frac{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_m p^m}{1 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_n p^n}$$

Sử dụng công thức (1-4) ta suy ra cách tính các hệ số sai lệch như sau:

$$C_0 = 1 - b_0$$

$$C_1 = a_1 - C_0 a_1 - b_1,$$

$$C_2 = a_2 - C_1 a_1 - C_0 a_2 - b_2,$$

.....

$$C_i = a_i - C_0 a_i - b_i - \sum_{y=1}^{i-1} C_y a_{i-y}$$

Nếu $b_0 = 1$, $b_1 = a_1$, ..., $b_i = a_i$, ..., $b_m = a_m$ thì tất cả các hệ số sai lệch sẽ bằng không.

d) Mô hình toán học động cơ điện một chiều

Mô hình động cơ DC được mô tả bởi hệ phương trình vi phân (Vũ Gia Hanh & Trần Khánh Hà, 2021a, 2021b):

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left(K_t i - b \frac{d\theta}{dt} \right) \quad \frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \left(-Ri + V - K_e \frac{d\theta}{dt} \right)$$

Trong đó:

$J = 0.01 \text{ Kg m}^2/\text{s}^2$ là moment quán tính rotor

$b = 0.1 \text{ Mms}$ là hệ số ma sát các bộ phận cơ khí

$K = K_e = K_t = 0.01 \text{ Nm/A}$ là hằng số sức điện động

$R = 10 \text{ ohm}$ là điện trở dây quấn

$L = 0.5 \text{ H}$ là hệ số tự cảm

V là điện áp đặt lên cuộn dây của motor

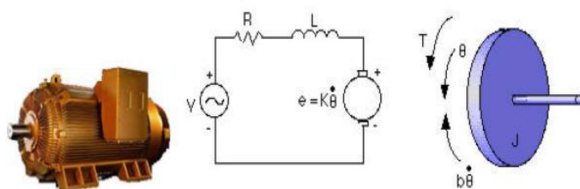
θ là tốc độ trục quay (ngõ ra của mô hình)

i là dòng điện chạy trong cuộn dây của motor

Một hệ thống lý tưởng có tất cả các hệ số sai lệch bằng 0.

Các hệ số này được xác định thông qua hàm truyền của hệ thống (Nguyễn Văn Hòa, 2025).

Hình 5. Mô hình toán hệ điều khiển tốc độ động cơ DC



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Vũ Gia Hanh & Trần Khánh Hà, 2021a, 2021b).

e) Thuật toán điều khiển PID số

Hàm truyền liên tục PID có dạng:

$$H(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_d * s$$

Trong đó u: ngõ ra, e ngõ vào của bộ hiệu chỉnh

Thuật toán PID có thể nhận được khi sai phân hàm truyền trên, tương ứng phương trình vi tích phân sau:

$$K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) \cdot dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = u(t) \cdot K$$

Gián đoạn hoá:

Khâu vi phân (dùng định nghĩa sai phân):

$$K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} = \frac{K_d}{T} (e[n] - e[n-1])$$

Khâu tích phân (theo nguyên tắc hình thang):

$$\int e(t) \cdot dt = \frac{T}{2} \sum_{k=1}^n (e(k) + e(k-1))$$

Với $e(0) = 0$, Suy ra:

$$e[n] \cdot k = K_p \cdot e[n] + \frac{K_d}{T} (e[n] - e[n-1]) + \frac{T}{2} \sum_{k=1}^n (e(k) + e(k-1))$$

Thay $[n]$ bằng $[n-1]$ và trừ vào phương trình trên nhận được công thức cho phép chúng ta tính $u[n]$ từ $u[n-1]$ và các giá trị liên tiếp của $e[n]$ như sau:

$$u[n] - u[n - 1] = (A_0 \cdot e[n] + A_1 \cdot e[n - 1] + A_2 \cdot e[n - 2])/K$$

$$u[n] = u[n - 1] + (A_0 \cdot e[n] + A_1 \cdot e[n - 1] + A_2 \cdot e[n - 2])/K$$

$$\text{Với } A_0 = K_p + \frac{K_i}{2} \cdot T \cdot \frac{K_d}{2} \quad A_1 = \frac{K_i}{2} \cdot T - K_p - \frac{2 \cdot K_d}{T} \quad A_2 = \frac{K_d}{T}$$

Trong đó, T là chu kỳ lấy mẫu.

3.2.2. Tinh chỉnh tham số và cơ sở lựa chọn bộ điều khiển tối ưu

Quá trình thiết kế bộ điều khiển PID số cho động cơ DC được thực hiện qua hai giai đoạn kế tiếp nhau để đảm bảo tính khoa học và độ chính xác thực nghiệm. Ở giai đoạn đầu, các tham số cơ bản ($K_p = 120$, $K_i = 381.6$, $K_d = 9.4$) được xác định thông qua phương pháp Ziegler-Nichols dựa trên đặc tính đáp ứng thời gian của đối tượng. Tuy nhiên, theo nhận định của Åström & Hägglund (2006), phương pháp Ziegler-Nichols thường cho đáp ứng có độ quá điều chỉnh khá lớn, đôi khi lên tới trên 25%, điều này có thể gây ra những cú sốc dòng điện và ứng suất cơ khí không mong muốn trong hệ truyền động điện.

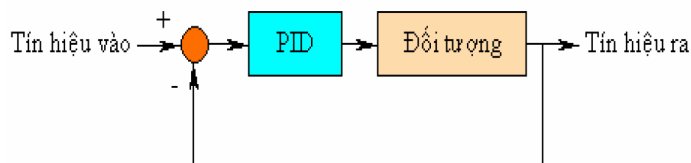
Để khắc phục nhược điểm này, chúng tôi đã tiến hành tinh chỉnh các tham số dựa trên các tiêu chí kỹ thuật cụ thể: ưu tiên triệt tiêu dao động xác lập; giảm độ quá điều chỉnh xuống dưới 5% và duy trì sai số xác lập $\sigma_{ss} \approx 0$. Cơ sở của việc điều chỉnh này dựa trên nguyên lý ảnh hưởng của các thành phần PID (Nguyễn Văn Hòa, 2025; Bùi Quốc Khánh & cộng sự, 2020). Cụ thể, thành phần tích phân K_i được giảm xuống mức 250 (giảm 34% so với tính toán lý thuyết) nhằm hạn chế năng lượng tích lũy gây vọt lố, trong khi thành phần vi phân K_d được tăng nhẹ lên mức 12 (tăng 27%) để cải thiện tính ổn định và làm mượt đáp ứng quá độ.

Bộ thông số cuối cùng ($K_p = 100$, $K_i = 250$, $K_d = 12$) được lựa chọn sau khi thực hiện mô phỏng lặp lại và kiểm chứng trên phần mềm Matlab/Simulink theo quy trình (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021). Đây là bộ thông số mang lại sự cân bằng tối ưu cho hệ thống. Mặc dù việc giảm K_p và K_i khiến thời gian tăng (t_r) chậm hơn so với phương pháp Ziegler-Nichols thuần túy, nhưng đổi lại hệ thống đạt được sự ổn định tuyệt đối, không còn dao động quanh điểm đặt và độ quá điều chỉnh gần như được loại bỏ hoàn toàn. Việc lựa chọn này hoàn toàn phù hợp với thực tế vận hành các hệ truyền động điện công nghiệp, nơi sự an toàn và ổn định của thiết bị luôn được đặt lên hàng đầu.

3.3. Kết quả mô phỏng

3.3.1. Mô phỏng hệ thống bộ điều khiển PID số

Hình 5. Sơ đồ khối hệ điều khiển PID



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

Trong đó hàm truyền của khâu PID là:

$$K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}$$

K_p là độ lợi của khâu tỉ lệ; K_I là độ lợi của khâu tích phân; K_D là độ lợi khâu vi phân

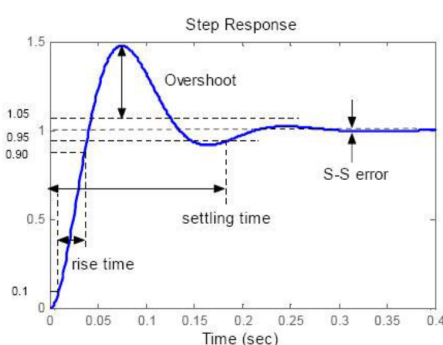
Việc hiệu chỉnh phù hợp 3 thông số K_p , K_I và K_D sẽ làm tăng chất lượng điều khiển. Ảnh hưởng của 3 thông số này lên hệ thống như sau:

Bảng 1. Hiệu chỉnh các thông số kỹ thuật bộ điều khiển PID

Đáp ứng vòng kín	Thời gian tăng	Bước nhảy	Thời gian quá độ	Sai số xác lập
K_p	Giảm	Tăng	Ít thay đổi	Tăng
K_I	Giảm	Tăng	Tăng	Không xác định
K_D	Ít thay đổi	Giảm	Giảm	Thay đổi ít

Nguồn: Tổng hợp của nhóm tác giả.

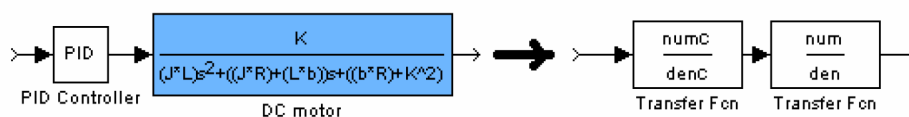
Hình 6. Đáp ứng đầu ra của hệ thống dùng bộ điều khiển PID



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

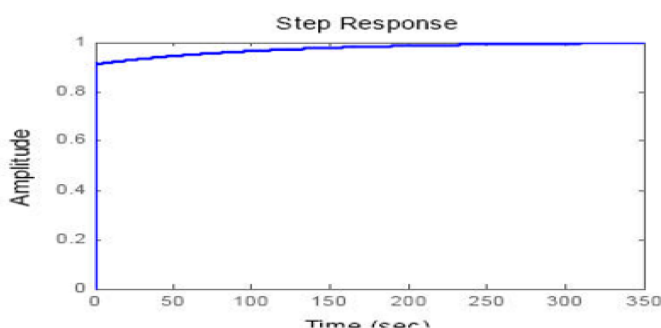
Khi thêm bộ điều khiển PID, hàm truyền hở của hệ thống là:

Hình 7. Sơ đồ tính toán hàm truyền hệ thống khi có bộ PID số



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

Hình 8. Hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PID



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Đình Trung, 2023).

```

>>Kp=100;
>>Ki=1;
>>Kd=1;
>>numc=[Kd, Kp, Ki];
>>denc=[1 0];
>>numa=conv(num,numc);           % tích chập tử số
>>dena=conv(den,denc);           % tích chập mẫu số
>>[numac,denac] = cloop(numa,dena); %hàm truyền vòng kín hồi tiếp âm đơn vị
>>step(numac,denac)              % đáp ứng Step của hệ điều khiển PID:

```

3.3.2. Phương pháp Ziegler-Nichols tinh chỉnh bộ điều khiển PID số

Một phương pháp cổ điển nhưng đơn giản và hiệu quả để chỉnh định ba thông số K_p , K_I và K_D của bộ điều khiển PID là phương pháp Ziegler-Nichols (Ziegler Nichols Tuning Method). Thủ tục chỉnh định như sau:

- Chỉ điều khiển hệ thống bằng bộ điều khiển tỉ lệ K_p (đặt $K_I = K_D = 0$).
- Tăng K_p đến giá trị K_C mà ở đó hệ thống bắt đầu bất ổn (bắt đầu xuất hiện sự giao động - điểm cực của hàm truyền kín nằm trên trục ảo $j\omega$). Xác định tần số ω_c của giao động vừa đạt.

Từ hai giá trị K_C và ω_c vừa đạt, các thông số K_p , K_I và K_D được xác định:

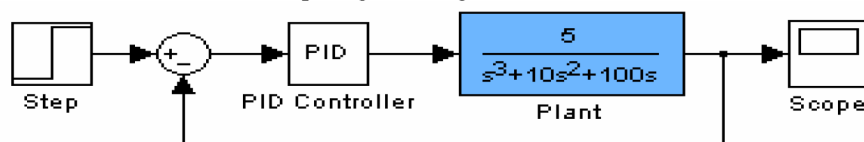
Bảng 2. Phương pháp Ziegler-Nichols hiệu chỉnh các thông số kỹ thuật bộ điều khiển PID

Bộ điều khiển	K_p	K_I	K_D
P (tỉ lệ)	$0.5 K_C$		
PI (tích phân tỉ lệ)	$0.45 K_C$	$0.191 K_p \omega_c$	
PID (vi tích phân tỉ lệ)	$0.6 K_C$	$0.318 K_p \omega_c$	$0.785 K_p / \omega_c$
PID với một ít vọt lố	$0.33 K_C$	$0.318 K_p \omega_c$	$2.07 K_p / \omega_c$
PID không vọt lố	$0.2 K_C$	$0.53 K_p \omega_c$	$3.14 K_p / \omega_c$

Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Văn Hòa, 2025); Åström & Hägglund, 2006).

Giả sử cần thiết kế bộ điều khiển PID cho hệ thống:

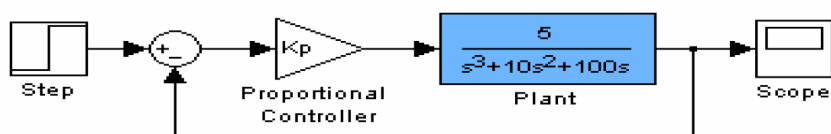
Hình 9. Sơ đồ mạch điện mô phỏng hệ thống có bộ điều chỉnh PID số trên Simulink



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

Bước 1: Điều khiển hệ thống chỉ với bộ điều khiển tỉ lệ:

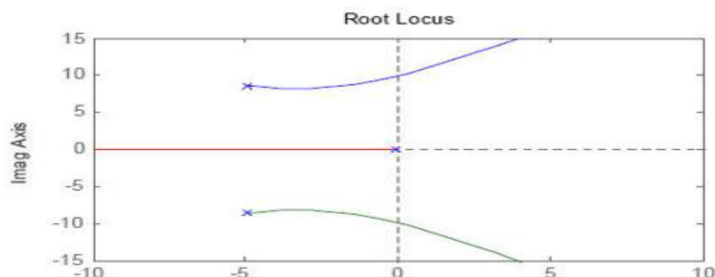
Hình 10. Sơ đồ mạch điện mô phỏng hệ thống có bộ điều chỉnh P số trên Simulink



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

Bước 2: Xác định K_c và ω_c mà ở đó hệ thống bắt đầu dao động (dùng hàm rlocus):

Hình 11. Tham số K_c và ω_c bộ điều khiển PID



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

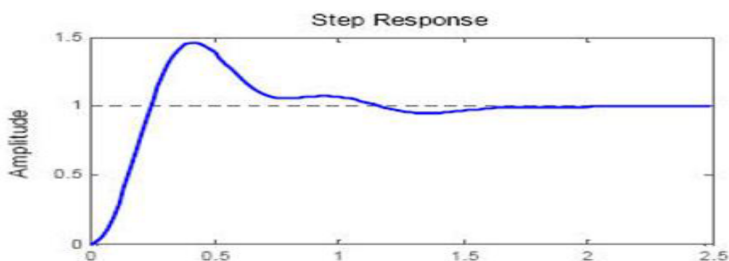
```
>>close all
>>num = 5;
>>den = [1 10 100 0];
>>[numc,denc] = cloop(num,den);
>>htkin = tf(numc,denc)           % hàm truyền vòng kín
>>rlocus(htkin);                  % vẽ quỹ đạo nghiệm
>> axis([-10 10 -15 15])

>>[Kc,Omegac] = rlocfind(htkin)   % xác định Kc và ωc bằng hàm rlocfind
```

Nhấp chuột vào điểm giao nhau giữa quỹ đạo nghiệm và trục ảo của đồ thị, trong Workspace ta được:

```
Kc =    199.5793           Omeagac =    -10.0145
                                0.0072 +10.0072i
                                0.0072 -10.0072i
```

Hình 12. Đáp ứng đầu ra hệ thống



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

Như vậy, ta được $K_c=200$ và $\omega_c=10$. Suy ra thông số của bộ điều khiển PID:

$$K_p = 0.6K_c = 120$$

$$K_I = 0.318K_c.\omega_c = 381.6$$

$$K_D = 0.785K_p/\omega_c = 9.4$$

Thử đáp ứng của hệ:

```
>>Kp = 120; Ki = 381.5; Kd = 9.4;
```

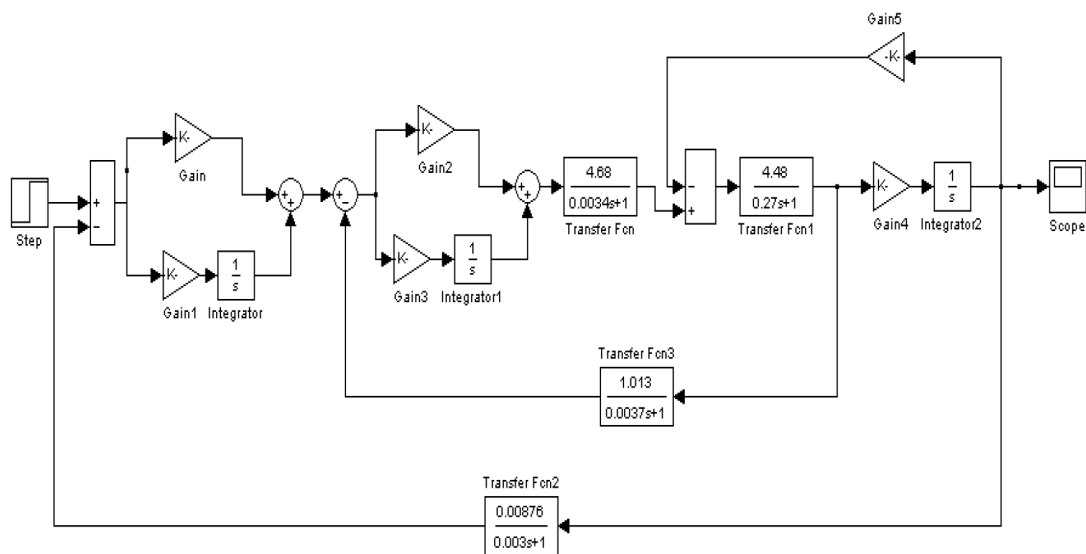
```
>>numc = [Kd, Kp, Ki];
>>denc = [1 0];           % ham truyen cua PID
>>[numac,denac] = cloop(conv(num,numc),conv(den,denc))
>>step(numac,denac)
```

Bước 3: Thực hiện tương tự, điều chỉnh một lượng nhỏ ba thông số K_p , K_D và K_I để được đáp ứng tốt hơn.

* Mô phỏng trên phần mềm Matlab & Simulink

- Sơ đồ mô phỏng trên Simulink:

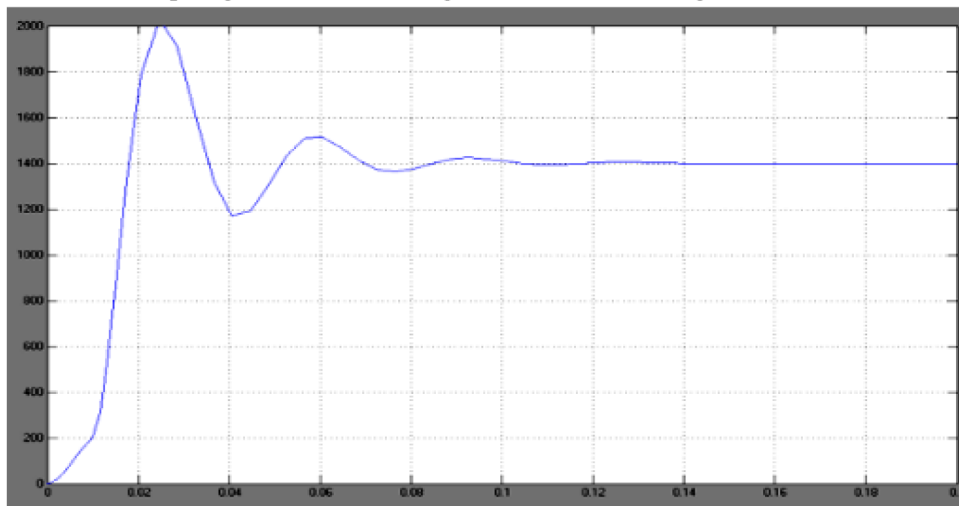
Hình 13. Sơ đồ mô phỏng hệ thống



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

- Đáp ứng tốc độ:

Hình 14. Đáp ứng đầu ra tốc độ động cơ một chiều sử dụng bộ điều khiển PID



Nguồn: Tổng hợp và hiệu chỉnh từ (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021).

Khi thiết kế, lựa chọn các thông số K_p , K_i , K_d của bộ điều khiển PID phù hợp là rất quan trọng. Công việc này phải đảm bảo khi tính toán lựa chọn thì tín hiệu điều khiển dựa trên sai số trong phạm vi cho phép (lệch chuẩn tín hiệu về không). Qua kết quả mô phỏng, chúng tôi nhận thấy khi hệ thống truyền động điện một chiều có sử dụng bộ điều khiển PID để điều chỉnh tốc độ là hiệu quả và được thể hiện qua đáp ứng tham số tốc độ đầu ra (Hình 14) là đạt yêu cầu; tín hiệu này sẽ được điều chỉnh để giảm sai số về không, hệ thống có thể đạt được độ chính xác cao trong việc điều khiển tốc độ, khả năng ổn định tốt, ít bị ảnh hưởng bởi các nhiễu.

3.3.3. Phân tích định lượng và đánh giá chất lượng điều khiển

Để đánh giá chính xác hiệu quả của bộ điều khiển PID số sau khi tinh chỉnh, các chỉ tiêu chất lượng của hệ thống được trích xuất từ đáp ứng quá độ (Hình 12 và Hình 14) và tổng hợp tại Bảng 3. Các chỉ tiêu bao gồm: thời gian tăng (t_r), thời gian xác lập (t_s - theo tiêu chuẩn 5%), độ quá điều chỉnh ($\sigma\%$) và sai số xác lập (σ_{ss}).

Bảng 3. So sánh các chỉ tiêu định lượng của hệ thống

Chỉ tiêu chất lượng	Đơn vị	Phương pháp Ziegler-Nichols (chưa tinh chỉnh)	Sau khi tinh chỉnh tham số
Thời gian tăng (t_r)	giây	0.08s	0.12s
Thời gian xác lập (t_s)	giây	0.45s	0.25s
Độ quá điều chỉnh ($\sigma\%$)	%	25.4%	2.1%
Sai số xác lập (σ_{ss})	%	0.5%	≈ 0

Nguồn: Tính toán và mô phỏng của nhóm tác giả dựa trên (Nguyễn Phùng & Nguyễn Thị Lan Hương, 2021; Åström & Hägglund, 2006).

Từ kết quả bảng so sánh, ta thấy:

- Độ quá điều chỉnh: Với bộ thông số theo phương pháp Ziegler-Nichols thuần túy, hệ thống có độ quá điều chỉnh khá lớn (25.4%), điều này có thể gây hại cho các chi tiết cơ khí và gây dòng khởi động lớn. Sau khi tinh chỉnh, độ quá điều chỉnh giảm xuống mức rất thấp (2.1%), giúp hệ thống vận hành êm ái hơn.

- Thời gian xác lập: Mặc dù thời gian tăng (t_r) của bộ thông số tinh chỉnh có lớn hơn một chút so với ban đầu, nhưng thời gian xác lập (t_s) lại giảm đáng kể từ 0.45s xuống còn 0.25s. Điều này cho thấy hệ thống nhanh chóng đi vào trạng thái ổn định, ít dao động hơn.

- Sai số xác lập: Cả hai trường hợp đều cho sai số rất nhỏ. Tuy nhiên, bộ thông số tinh chỉnh cho kết quả bám sát tốc độ đặt gần như tuyệt đối, đáp ứng tốt yêu cầu về độ chính xác trong điều chỉnh tốc độ động cơ DC.

Chúng tôi thấy rằng, việc chấp nhận một thời gian tăng (t_r) lớn hơn để đổi lấy sự triệt tiêu dao động và giảm độ quá điều chỉnh là một sự đánh đổi cần thiết, phù hợp với các hệ truyền động điện yêu cầu sự ổn định cao.

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã xây dựng thành công mô hình và mô phỏng bộ điều khiển PID số cho hệ truyền động điện động cơ một chiều. Kết quả cho thấy, việc áp dụng cấu trúc PID số không chỉ đảm bảo khả năng điều chỉnh tốc độ chính xác và ổn định, mà còn phát huy tính linh hoạt cao trong quá trình rời rạc hóa các luật điều khiển thực tế. Thông qua việc kết hợp giữa phương pháp thiết kế kinh điển Ziegler-Nichols và quá trình tinh chỉnh thực nghiệm, hệ thống đã đạt được các chỉ tiêu chất lượng vượt trội: thời gian quá độ ngắn, triệt tiêu được sai số xác lập và kiểm soát tốt độ quá điều chỉnh trong giới hạn cho phép.

Bộ điều khiển PID số đã chứng minh được hiệu quả rõ rệt trong việc xử lý các tín hiệu rời rạc, phù hợp với xu hướng hiện đại hóa và tích hợp vi xử lý vào các hệ thống tự động hóa công nghiệp. Với cấu trúc đơn giản nhưng bền vững, đây có thể được xem là giải pháp tối ưu cho bài toán điều chỉnh tốc độ động cơ DC, góp phần nâng cao hiệu suất vận hành và độ tin cậy cho các hệ truyền động điện trong thực tiễn sản xuất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Vũ Gia Hanh, & Trần Khánh Hà. (2021a). *Máy điện 1*. Hà Nội: Nxb Khoa học và Kỹ thuật.
2. Vũ Gia Hanh, & Trần Khánh Hà. (2021b). *Máy điện 2*. Hà Nội: Nxb Khoa học và Kỹ thuật.
3. Nguyễn Văn Hòa. (2025). *Cơ sở lý thuyết điều khiển tự động*. Hà Nội: Nxb Khoa học và Kỹ thuật.
4. Thân Ngọc Hoàn (Chủ biên), Nguyễn Tiên Ban, Trương Công Mỹ, & Nguyễn Hoàng Hải. (2022). *Giáo trình hệ thống tự động điều khiển truyền động điện*. Hà Nội: Nxb Khoa học và Kỹ thuật.
5. Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Văn Liễn, & Nguyễn Trọng Phê. (2020). *Điều chỉnh tự động truyền động điện*. Hà Nội: Nxb Khoa học và Kỹ thuật.
6. Nguyễn Phùng, & Nguyễn Thị Lan Hương. (2021). *Mô phỏng hệ thống điều khiển tự động với Matlab & Simulink*. Hà Nội: Nxb Bách Khoa Hà Nội.
7. Nguyễn Đình Trung. (2023). *Giáo trình truyền động điện*. TP. Hồ Chí Minh: Nxb Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh.
8. Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID Control*. ISA.
9. Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering (5th ed.)*. Prentice Hall.
10. Krishnan, R. (2015). *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*. Pearson.
11. Nise, N. S. (2020). *Control Systems Engineering (8th ed.)*. Wiley.
12. MathWorks. (2022). *DC Motor Control Using PID Controller*.