

TỐI ƯU HÓA BỘ ĐIỀU KHIỂN PID BẰNG GIẢI THUẬT DI TRUYỀN

Nguyễn Chí Ngôn¹

ABSTRACT

PID controller is a very popular controller in industry, that is commonly designed by the Ziegler-Nichols tuning method. However, due to the effect of noise and the errors of measuring devices, it is difficult to obtain the optimal values of K_p , K_d and K_i of the PID controller. In that case, the designer needs an experimental process for fine tuning the controller, which is unreliable to reach the optimum parameters. In order to improve the fine tuning process, the paper presents a solution of using Genetic Algorithm to achieve the optimum PID controller around the operating point of the Ziegler-Nichols algorithm. The results getting from simulations on DC motor speed control system indicates that using Genetic Algorithm can improve the quality of the PID controller. The system response has no overshoot. The rising time is reduced up to $98\pm 0.24\%$. And the steady-state time is decreased up to $97\pm 0.33\%$.

Keywords: PID controller, Ziegler-Nichols tuning method, genetic algorithm

Title: PID Controller Optimization using Genetic Algorithm

TÓM TẮT

Bộ điều khiển PID là một bộ điều khiển rất phổ biến trong công nghiệp. Phương pháp thông dụng để chỉnh định bộ điều khiển này là giải thuật Ziegler-Nichols. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của nhiễu và sai số của thiết bị đo mà phương pháp này khó có thể đạt được giá trị tối ưu cho các hệ số K_p , K_d và K_i của bộ điều khiển PID. Trong trường hợp đó, người thiết kế phải thực hiện một quá trình tinh chỉnh các tham số của bộ điều khiển. Điều đó đòi hỏi kinh nghiệm, cũng như không có cơ sở để xác định giá trị tối ưu cho các tham số cần tinh chỉnh. Nhằm hỗ trợ cho quá trình này, bài báo trình bày một kỹ thuật ứng dụng giải thuật di truyền để tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID xung quanh điểm điều hành của giải thuật Ziegler-Nichols. Kết quả mô phỏng trên bài toán điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều cho thấy, chất lượng bộ điều khiển được cải thiện rõ rệt. Đáp ứng của hệ thống không bị vọt lố đáng kể. Thời gian tăng của đáp ứng được rút ngắn $98\pm 0,24\%$. Thời gian xác lập của hệ thống được rút ngắn đến $97\pm 0,33\%$.

Từ khóa: Bộ điều khiển PID, phương pháp Ziegler-Nichols, giải thuật di truyền

1 GIỚI THIỆU

Ngày nay bộ điều khiển PID (Proportional–Integral–Derivative controller) được ứng dụng rất phổ biến trong công nghiệp, do khả năng điều khiển hiệu quả, tính đơn giản trong thiết kế và phạm vi ứng dụng rộng (Salami, M. & G. Cain, 1995). Trong lý thuyết điều khiển, có rất nhiều phương pháp để hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PID, phổ biến nhất là phương pháp Ziegler-Nichols (Kwok, D.P. & P. Wang, 1992). Tuy nhiên, đối với một số hệ thống, việc hiệu chỉnh bộ điều khiển PID bằng phương pháp này đòi hỏi một quá trình thực nghiệm khá mất thời gian (Jones A.H. & P.B.M. Oliveira, 1995). Thông thường, các thông số của bộ điều khiển được xác lập bằng

¹ Bộ môn Tự động hóa, Khoa Kỹ thuật Công Nghệ, Trường Đại học Cần thơ.

phương pháp Ziegler-Nichols (Z-N) dựa trên kết quả đo đặc được từ đáp ứng của hệ thống. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của nhiễu và sai số của các thiết bị lên tín hiệu đo, dẫn đến việc hiệu chỉnh thông số của bộ điều khiển PID khó đạt được giá trị tốt. Vì vậy, một quá trình tinh chỉnh được thực hiện trước khi áp dụng bộ điều khiển vào hệ thống (Kwok, D.P. & P. Wang, 1992). Vấn đề là làm thế nào để có thể tinh chỉnh thông số của bộ điều khiển đạt được giá trị tối ưu.

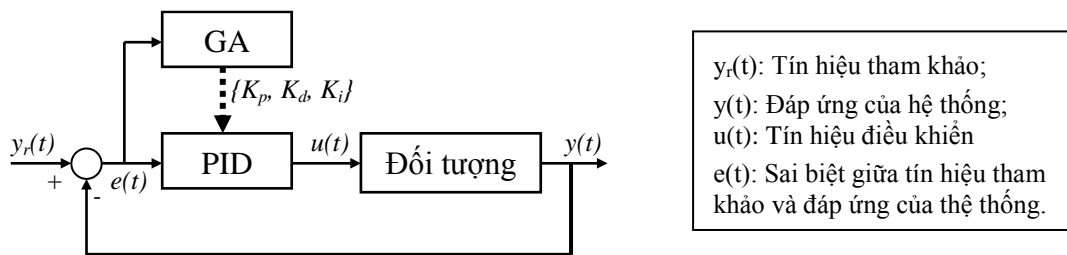
Nhằm mục tiêu tối ưu hóa các thông số thiết kế, nhiều giải thuật máy tính đã được nghiên cứu và triển khai ứng dụng. Trong đó, giải thuật di truyền (Genetic Algorithm - GA) được sử dụng rộng rãi để xây dựng hệ thống điều khiển (Singh, R. & I. Sen, 2004). Giải thuật này dựa trên một cơ chế tương tự như quá trình di truyền tự nhiên để tìm kiếm giá trị tối ưu của các tham số thiết kế, thỏa mãn một hàm mục tiêu nào đó, trong miền xác định của chúng. Tùy thuộc vào việc thiết lập hàm mục tiêu mà nhiều nghiên cứu áp dụng giải thuật GA để tìm kiếm tham số tối ưu cho bộ điều khiển PID đã được thực hiện (Salami *et. al.*, 1995; Kwok *et. al.*, 1992; etc.). Tuy nhiên, do bộ điều khiển PID có ba tham số nên việc tìm kiếm trực tiếp các giá trị tối ưu của chúng trong miền xác định đòi hỏi rất nhiều thời gian (Mitsukura *et. al.*, 1997). Vấn đề là làm sao giới hạn không gian tìm kiếm này để có thể rút ngắn được thời gian thiết kế.

Bài báo mô tả một phương pháp áp dụng giải thuật GA để tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID xung quanh giá trị đạt được từ phương pháp Z-N. Điều này có nghĩa rằng, phương pháp Z-N được dùng để giới hạn không gian tìm kiếm. Sau đó, giải thuật GA được áp dụng để tìm các giá trị tối ưu của bộ điều khiển trong không gian này. Ngoài ra, bài báo cũng so sánh chất lượng đáp ứng của hệ thống, thông qua việc thiết kế các bộ điều khiển thỏa mãn các hàm mục tiêu khác nhau, bao gồm IAE (Integral of Absolute Error), ITAE (Integral of Time x Absolute Error) và MSE (Mean Squared Error). Hệ thống điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều được áp dụng để kiểm chứng giải thuật.

2 PHƯƠNG PHÁP THỰC HIỆN

2.1 Mục tiêu tổng quát

Trước tiên, đối tượng điều khiển được xem xét như một hộp đen – điều này phù hợp với các ứng dụng trong thực tế. Một chu kỳ nhận dạng hành vi của hệ thống được xác lập, dựa vào đáp ứng bước vòng hở của đối tượng. Từ đáp ứng này, giải thuật Z-N được áp dụng để xác định ba thông số của bộ điều khiển PID. Ba thông số này là cơ sở để giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA. Nhiệm vụ của giải thuật GA là chọn lọc bộ ba $\{K_p, K_d, K_i\}$ tối ưu cho bộ điều khiển PID, thỏa mãn một trong các hàm mục tiêu IAE, ITAE và MSE (Hình 1).



Hình 1: Mô hình tổng quát của hệ thống điều khiển

2.2 Bộ điều khiển PID

Hàm truyền của bộ điều khiển PID lý tưởng được xác định bởi (1) (Johnson M. A. & M. H. Moradi, 2005).

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{1}$$

Trong đó, K_p là hệ số tỉ lệ. T_i và T_d là các thời hằng tích phân và vi phân tương ứng. Các hệ số tích phân K_i và vi phân K_d của bộ điều khiển được xác định bởi (2):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}; \quad K_d = K_p T_d \tag{2}$$

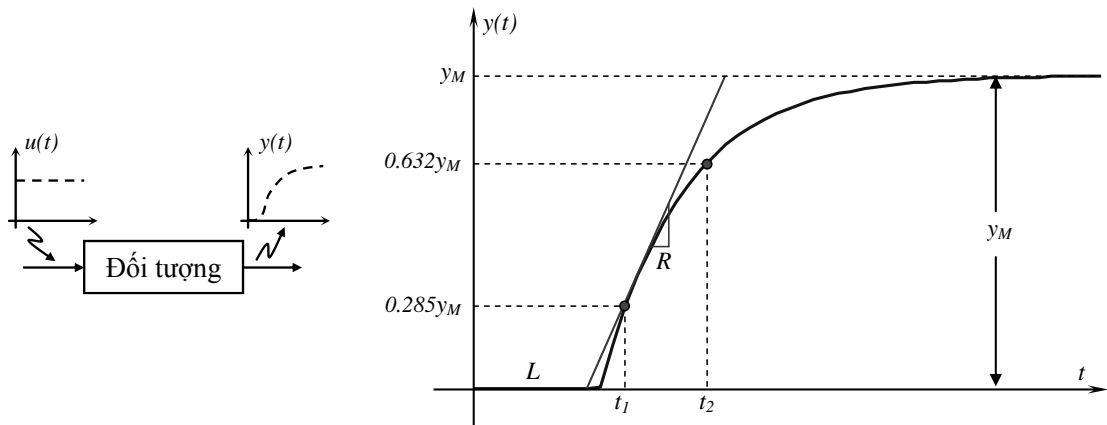
Từ (2), ta biểu diễn (1) tương đương với (3):

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \tag{3}$$

Nhiệm vụ của người thiết kế bộ điều khiển PID, xác định bởi (3), là chọn lựa bộ ba giá trị $\{K_p, K_d, K_i\}$ thỏa mãn các yêu cầu về chất lượng điều khiển.

2.3 Phương pháp Ziegler-Nichols

Ziegler và Nichols đã đề xuất hai phương pháp thực nghiệm để thiết kế bộ điều khiển PID. Trong bài này, chúng ta chỉ quan tâm đến phương pháp thiết kế dựa trên đáp ứng bước vòng hở của đối tượng.



Hình 2: Nhận dạng đối tượng điều khiển

Trước tiên, ngõ vào của đối tượng được áp dụng một tín hiệu dạng hàm bước (còn gọi là hàm nấc). Sau đó đáp ứng của đối tượng, gọi là đáp ứng bước, được đo đạc để xác định hai tham số cơ bản, đó là thời gian trễ L và độ dốc cực đại R của đường cong đáp ứng (Hình 2). Từ hai tham số này, bộ điều khiển PID được xác lập theo (4) (Åström, K.J. & T. Hägglund, 1988).

$$K_{p-Z-N} = \frac{1.2}{RL}; \quad T_{d-Z-N} = 0.5L; \quad T_{i-Z-N} = 2L \tag{4}$$

Từ (2) và (4) ta có:

$$K_{p-Z-N} = \frac{1.2}{RL}; \quad K_{d-Z-N} = \frac{0.6}{R}; \quad K_{i-Z-N} = \frac{0.6}{RL^2} \tag{5}$$

Thông thường, đường cong đáp ứng bước vòng hở của đối tượng chịu ảnh hưởng của nhiễu và sai số của thiết bị đo. Do vậy, việc xác định trực tiếp hai tham số R và L từ đường cong đáp ứng không được chính xác, dẫn đến các thông số $\{K_{p_Z-N}, K_{d_Z-N}, K_{i_Z-N}\}$ không đạt được giá trị tốt. Để hạn chế điều này, một phương pháp xác định gián tiếp R và L được đề xuất, thông qua việc xác định hai thời điểm t_1 và t_2 (Hình 2). Thời điểm t_1 và t_2 , tương ứng, được xác định tại vị trí mà đáp ứng của hệ thống đạt được 28,5% và 63,2% giá trị xác lập. Từ hai giá trị t_1 và t_2 , các tham số R và L được xác định bởi (6) (Smith, C.A. & A.B. Corripio, 1997).

$$L = \frac{1}{2}(3t_1 - t_2); \quad R = \frac{2}{3} \frac{y_M}{y_{rM}(t_2 - t_1)} \tag{6}$$

Trong đó, y_M là giá trị xác lập của đáp ứng bước vòng hở của đối tượng. y_{rM} là biên độ của tín hiệu bước được áp dụng vào đối tượng. Khi thời gian trễ của hệ thống đáng kể, tức giá trị L lớn, chưa kể đến ảnh hưởng của nhiễu và sai số của thiết bị đo, thì $\{K_{p_Z-N}, K_{d_Z-N}, K_{i_Z-N}\}$ đạt được từ (5), không thỏa mãn chất lượng điều khiển hệ thống. Các giá trị này cần phải được tinh chỉnh lại bằng thực nghiệm, mất khá nhiều thời gian, trước khi áp dụng (Jones A.H. & P.B.M. Oliveira, 1995). Mục tiêu của bài báo này nhằm hỗ trợ quá trình tinh chỉnh trên bằng một giải thuật thông minh trên máy tính.

2.4 Hàm mục tiêu

Trong hệ điều khiển vòng kín Hình 1, gọi $e(t)$ là sai biệt giữa tín hiệu tham khảo $y_r(t)$ và tín hiệu đáp ứng $y(t)$ của hệ thống, thì:

$$e(t) = y_r(t) - y(t) \tag{7}$$

Các hàm mục tiêu của quá trình tinh chỉnh bộ điều khiển, trong bài toán này, được định nghĩa như sau:

$$IAE : J_1 = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \tag{8}$$

$$IATE : J_2 = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \tag{9}$$

$$MSE : J_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2(t) \tag{10}$$

Nhiệm vụ của giải thuật GA được áp dụng là tìm kiếm các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ tối ưu của bộ điều khiển PID, mà ở đó các hàm $J_{i(i=1,3)}$ đạt giá trị cực tiểu. Nói cách khác, hàm mục tiêu của giải thuật GA là:

$$\min \{J_{i(i=1,3)}\} \tag{11}$$

Nhằm giới hạn không gian tìm kiếm của giải thuật GA, ta giả thiết các giá trị tối ưu $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ nằm xung quanh giá trị $\{K_{p_Z-N}, K_{d_Z-N}, K_{i_Z-N}\}$ đạt được từ giải thuật Z-N. Các giới hạn tìm kiếm tương ứng cho ba thông số của bộ điều khiển PID như sau:

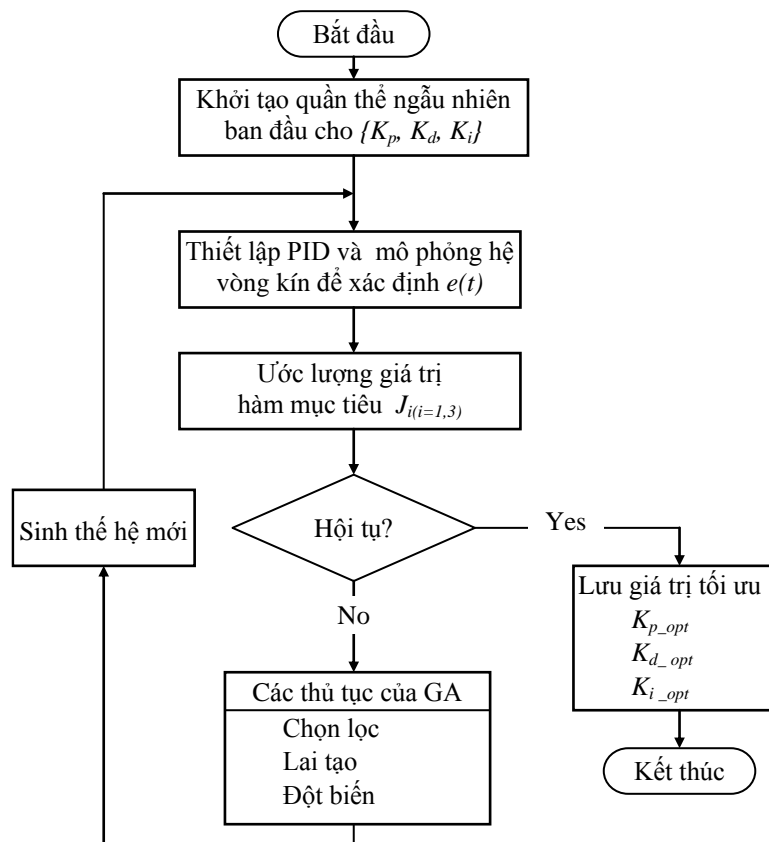
$$\begin{aligned}
 \alpha K_{p_Z-N} &\leq K_{p_opt} \leq \beta K_{p_Z-N} \\
 \alpha K_{d_Z-N} &\leq K_{d_opt} \leq \beta K_{d_Z-N} \\
 \alpha K_{i_Z-N} &\leq K_{i_opt} \leq \beta K_{i_Z-N}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Trong đó, các hệ số α và β được chọn sao cho không gian tìm kiếm đủ rộng để chứa được giá trị tối ưu mong muốn. Kết quả mô phỏng trên mô hình hệ thống điều khiển tốc độ động cơ cho thấy, $\alpha=0,02$ và $\beta=50$ là thỏa mãn.

2.5 Giải thuật di truyền

Giải thuật GA được hỗ trợ bởi phần mềm MATLAB và được trình bày chi tiết trong (The Mathworks Inc., 2007). Bài báo này không nhằm mục tiêu trình bày về giải thuật GA. Nó chỉ được sử dụng như một công cụ để giải bài toán tối ưu, nhằm đạt được các giá trị $\{K_{p_opt}, K_{d_opt}, K_{i_opt}\}$ thỏa các hàm mục tiêu (11) với không gian tìm kiếm được giới hạn bởi (12).

Các tham số của giải thuật GA trong nghiên cứu này được chọn lựa như sau: quá trình tiến hóa qua 50 thế hệ ($generations=50$); kích thước quần thể 20 ($populationsize=20$); tần suất lai ghép 0,8 ($CrossoverFraction=0,8$); xác suất đột biến được điều chỉnh thích nghi trong khoảng từ 0,001 đến 0,01.



Hình 3: Lưu đồ tiến trình GA xác định thông số bộ điều khiển PID

Tiến trình tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA được mô tả tóm tắt trên lưu đồ Hình 3. Kết quả tìm kiếm các thông số của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA, thỏa mãn các tiêu chuẩn chất lượng IAE, ITAE và MSE, được trình bày trên Bảng 1. Rõ ràng, giá trị các thông số của bộ điều khiển PID mà

giải thuật GA đạt được khá xa các giá trị đạt được bằng phương pháp Z-N. Điều này minh chứng cho sự khó khăn trong quá trình tinh chỉnh bộ điều khiển theo phương pháp “thử và sai” của người thiết kế, sau khi dùng phương pháp Z-N.

Bảng 1: So sánh thông số của bộ điều khiển PID theo các tiêu chuẩn thiết kế

PID	Z-N	GA_IAE (J ₁)	GA_ITAE (J ₂)	GA_MSE (J ₃)
K _p (-)	2.7273	41.1345	34.2229	75.3636
K _d (s)	0,0902	1.7939	1.3859	3.5937
K _i (Hz)	20.6612	214.0640	180.2925	384.1574

3 KẾT QUẢ

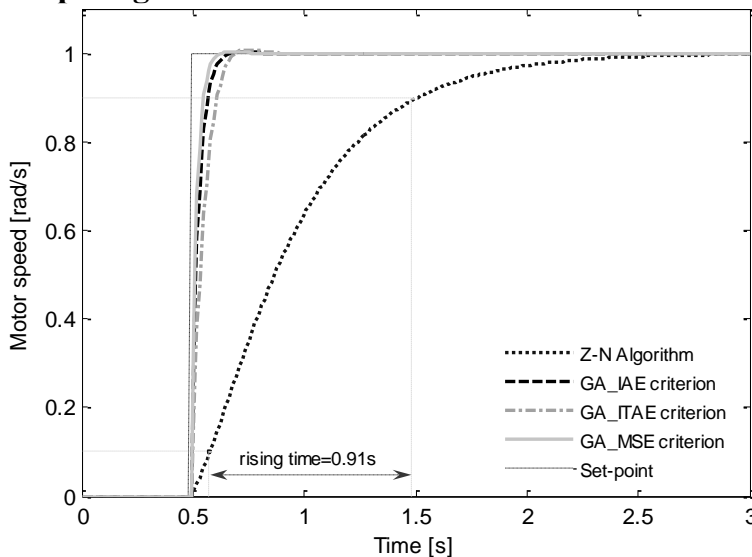
3.1 Đối tượng điều khiển

Đối tượng điều khiển được chọn để minh họa cho bài toán này là mô hình quan hệ giữa điện áp và tốc độ động cơ điện một chiều, có hàm truyền xác định bởi (13), được trình bày trong The Regents of the University of Michigan, 1997

$$\frac{S(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \tag{13}$$

Trong đó, moment quán tính của rotor J=0.01 kgm²/s²; hệ số ma sát b=0,1 Nms; hằng số sức điện động K=0,01 Nm/A; điện trở dây quấn R=1Ω; điện cảm cuộn dây L=0,5 H; ngõ vào V của mô hình là điện áp đặt lên hai đầu cuộn dây (đơn vị V); Ngõ ra S của mô hình là tốc độ rotor (đơn vị rad/s).

3.2 Kết quả mô phỏng

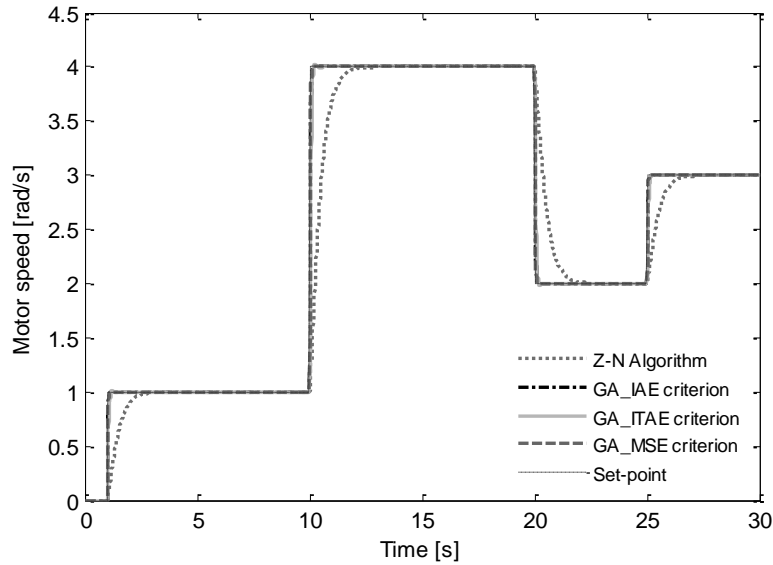


Hình 4: Đáp ứng bước đơn vị, ứng với 4 bộ điều khiển PID

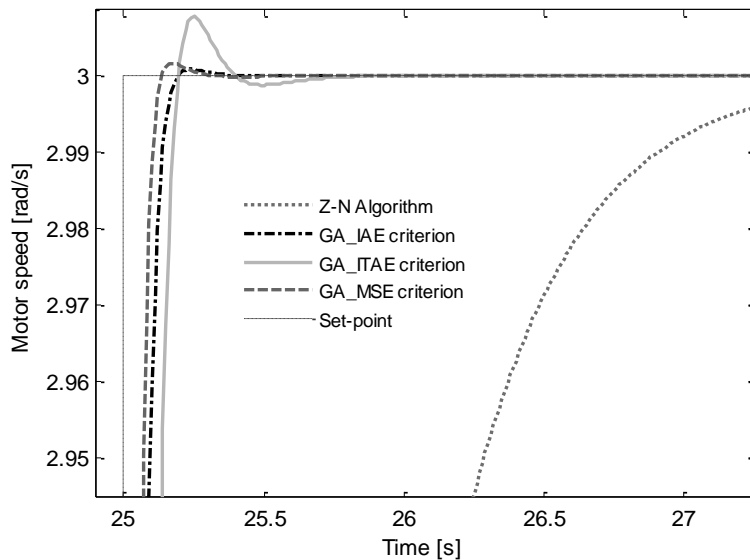
Sau khi ước lượng được bộ điều khiển PID bằng phương pháp Z-N và ba bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA, tương ứng với ba tiêu chuẩn chất lượng IAE, ITAE và MSE (Bảng 1), các bộ điều khiển này lần lượt được áp dụng cho mô hình điều khiển hồi tiếp âm đơn vị, Hình 1. Các ngõ ra tương ứng của hệ thống được vẽ trên cùng đồ thị để so sánh trực quan chất lượng các bộ điều khiển.

Bảng 2: So sánh các chỉ tiêu chất lượng điều khiển

Chỉ tiêu	PID _{Z-N} (±0.01)	PID _{GA_IAE} (±0.001)	PID _{GA_ITAE} (±0.001)	PID _{GA_MSE} (±0.001)
Độ vọt lố (%)	0	0,02	0,25	0,01
Thời gian tăng (s)	0,91	0,01	0,007	0,008
Thời gian xác lập (s)	1,03	0,013	0,018	0,015



Hình 5: Đáp ứng bậc thang biên độ thay đổi, ứng với 4 bộ điều khiển PID



Hình 6: Nhìn gần đáp ứng bậc thang Hình 5

Hình 4 trình bày đáp ứng bước đơn vị (biên độ bằng 1) của hệ thống, ứng với bốn bộ điều khiển PID xác định bởi các thông số cho trên Bảng 1. Tương tự, Hình 5 so sánh đáp ứng bậc thang biên độ thay đổi của hệ thống, ứng với bốn bộ điều khiển trên. Hình 6 trình bày một phần đáp ứng bậc thang ở Hình 5 (nhìn gần). Từ kết quả trên Hình 4, 5 và 6 ta thấy, giải thuật GA đã cải tiến tốt bộ điều khiển PID xác định bằng phương pháp Z-N. Một thủ tục đơn giản được áp dụng để tính toán cho thấy:

thời gian tăng của đáp ứng được rút ngắn $98\pm 0,24\%$; thời gian xác lập của hệ thống được rút ngắn đến $97\pm 0,33\%$; đáp ứng không bị vọt lớn và sai số xác lập không đáng kể. Kết quả so sánh các chỉ tiêu chất lượng điều khiển được trình bày trên Bảng 2.

4 KẾT LUẬN

Bài báo trình bày một phương pháp tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển PID bằng giải thuật GA, thỏa mãn các hàm mục tiêu IAE, ITAE và MSE, dựa trên các giá trị khởi điểm xác định bởi giải thuật Z-N. Ưu điểm lớn của phương pháp này là thiết kế được bộ điều khiển tối ưu mà không cần quan tâm đến mô hình toán của đối tượng. Bởi vì, trong quá trình thiết kế, các giải thuật chỉ dựa trên các tín hiệu vào ra đo đạc được từ hệ thống. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là phải chạy rất nhiều vòng hồi tiếp âm đơn vị để xác định giá trị hàm mục tiêu trong quá trình áp dụng giải thuật GA. Trong thực tế, điều này không phải lúc nào cũng được phép. Ngoài ra, để có thể ứng dụng được trong thực tiễn, hệ thống cần được trang bị thêm các thiết bị đo đạc tín hiệu. Khi đó, việc thiết kế bộ điều khiển thời gian thực trở nên khả thi cho nhiều đối tượng bằng cách kết nối máy tính vào các thiết bị đo đạc này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Åström, K.J. and T. Hägglund, 1988. Automatic Tuning of PID Controllers. Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC.
- Johnson M.A. and M.H. Moradi, 2005. Chapter 8, in: PID Control - New Identification and Design Methods, pp. 297-337. Springer-Verlag London Limited. ISBN-10: 1-85233-702-8.
- Jones A.H. and P.B.M. Oliveira, 1995. Genetic Auto-tuning of PID Controllers. IEEE Conf. Publ. No. 414, 12-14 Sep 1995, pp. 141-145.
- Kwok, D.P. and P. Wang, 1992. Fine-tuning of classical PID Controllers based on Genetic Algorithms. IEEE Inter. Workshop on Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 37-43.
- Mitsukura Y., T. Yamamoto and M. Kaneda. 1997. A Genetic Tuning Algorithm of PID Parameters, Proc. IEEE Confer. Syst, Man and Cyber., Orlando, Oct. 1997, pp. 923-928.
- Salami, M. and G. Cain, 1995. An adaptive PID controller based on genetic algorithm processor. IEEE Conf. Publ. No. 414, 12-14 Sep 1995, pp. 88-93.
- Smith, C.A. and A.B. Corripio, 1997. Principles and practice of automatic process control. 2nd Ed., Wiley, New York, 1997. ISBN: 0-471-57588-7.
- Singh, R. and I. Sen, 2004. Tuning of PID Controller Based AGC System Using Genetic Algorithms. TENCON 2004. IEEE Region 10th Confer., pp. 531-534.
- The Regents of the University of Michigan, 1997. PID Design Method for DC Motor Speed Control. In: Control Tutorials for MATLAB. <http://www.engin.umich.edu/group/ctm/examples/motor/PID2.html>.
- The Mathworks Inc., 2007. Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox 2, User's Guide.