

ỨNG DỤNG GIẢI THUẬT DI TRUYỀN CHỈNH ĐỊNH MA TRẬN TỐI ƯU LQR CHO HỆ CON LẮC NGƯỢC PHI TUYẾN

USING GENETIC ALGORITHM IN OPTIMIZING THE MATRIX OF LQR CONTROLLER FOR NONLINEAR INVERTED PENDULUM SYSTEM

Nguyễn Thanh Tần¹

Tóm tắt – Trong nội dung bài viết này, tác giả đã sử dụng phần mềm matlab để tiến hành mô phỏng, sau đó so sánh kết quả giữa bộ điều khiển LQR (Linear Quadratic Regulator) cổ điển và một phương pháp kết hợp khác nhằm chỉnh định các thông số ma trận tối ưu bộ điều khiển LQR. Đó là ứng dụng giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) nhằm tối ưu hóa thông số của bộ điều khiển LQR, kết quả đã được kiểm chứng trên mô hình con lắc ngược phi tuyến. Giải thuật di truyền là một giải thuật điều khiển rất hiện đại đang được ứng dụng nhiều trong nghiên cứu và thực tế. Mục tiêu chính của nghiên cứu là sử dụng giải thuật GA để tối ưu hóa thông số ma trận LQR nhằm điều khiển vị trí và góc nghiêng con lắc ngược phi tuyến ổn định tại vị trí cân bằng. Kết quả mô phỏng trên phần mềm matlab cho thấy hệ thống đã hoạt động ổn định đúng yêu cầu đặt ra và đáp ứng ngõ ra đạt đến vị trí cân bằng trong khoảng 2,5s.

Từ khóa: giải thuật di truyền, điều khiển LQR, con lắc ngược, tối ưu hóa.

Abstract – In this article, the author used the matlab software to simulate and then compared the results between the classical LQR (Linear Quadratic Regulator) controller and another method to adjust the matrix parameters toward optimization of the LQR controller. It is the GA (Genetic Algorithm) method to optimize the matrix of the LQR controller, and the results have

been verified on the nonlinear pendulum model. The Genetic Algorithm is a modern control algorithm, which is widely applied in research and practice. The main objective of this article is to use the GA algorithm in order to optimize the matrix parameters of LQR controller, which controlled the position and angle of the nonlinear inverted pendulum at the stable balance point. The matlab-based simulating results showed that the system has operated properly to the requirements and the output response has reached an equilibrium position of about 2.5 seconds.

Keywords: genetic algorithm, Linear Quadratic Regulator, inverted pendulum, optimize.

I. MỞ ĐẦU

Ngày nay, sự phát triển vượt bậc của công nghệ đã giúp ích rất nhiều cho con người trong đời sống hằng ngày cũng như trong sản xuất. Đối với ngành điều khiển tự động, việc nghiên cứu nhằm làm giảm thiểu tối đa thời gian hay công sức so với các phương pháp tính toán cổ điển thông thường đang được ưu tiên hàng đầu. Trong đó, cụm từ “tối ưu hóa” đã được định hình và áp dụng một cách có hiệu quả ở hầu hết các lĩnh vực trong đời sống hằng ngày của chúng ta.

“Tối ưu hóa”, được khởi nguồn như một ngành của Toán học, có rất nhiều ứng dụng hiệu quả và rộng rãi trong quy hoạch tài nguyên, thiết kế chế tạo máy, điều khiển tự động, quản trị kinh doanh, kiến trúc đô thị, công nghệ thông tin. Chính vì vậy, các lĩnh vực ứng dụng của “tối ưu hóa” ngày càng trở nên đa dạng, mang nhiều tên gọi khác nhau như điều khiển tối ưu, quy

¹Bộ môn Điện – Điện tử, Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Trà Vinh

Email: thanhtantvu@tvu.edu.vn

Ngày nhận bài: 02/8/2017; Ngày nhận kết quả bình duyệt: 26/9/2017; Ngày chấp nhận đăng: 06/11/2017

hoạch toán học, vận trù học, lí thuyết trò chơi,... Việc tối ưu hóa sẽ giúp người lập trình giảm bớt tối đa thời gian nghiên cứu thực nghiệm hay “thử và sai”. Ví dụ: tối ưu các thông số PID (Proportional Integral Derivative), LQR (Linear Quadratic Regulator), tinh chỉnh luật mờ, tìm các thông số tối ưu trong điều khiển hệ thống, điều khiển động cơ,... Các phương pháp thường được sử dụng như giải thuật di truyền (GA: Genetic Algorithms), giải thuật bầy đàn (PSO: Particle Swarm Optimzation), thuật toán thích nghi,...

Hệ thống con lắc ngược là một hệ thống điều khiển kinh điển đã được sử dụng trong giảng dạy và nghiên cứu ở hầu hết các trường đại học trên khắp thế giới. Hệ thống con lắc ngược là mô hình phù hợp để kiểm tra các thuật toán điều khiển hệ phi tuyến cao trở lại ổn định. Đây là một hệ thống SIMO (Single Input Multi Output) điển hình vì chỉ gồm một ngõ vào là điện áp cấp cho động cơ (hoặc lực quay của động cơ) mà phải điều khiển cả vị trí và góc lệch con lắc ngược sao cho thẳng đứng (ít nhất hai ngõ ra). Ngoài ra, phương trình toán học được đề cập đến của con lắc ngược mang tính chất phi tuyến điển hình. Vì thế, đây là một mô hình nghiên cứu lí tưởng cho các phòng thí nghiệm điều khiển tự động.

Với mục tiêu tối ưu hóa thông số trong các bộ điều khiển nói chung và ưu điểm vượt trội của giải thuật di truyền GA trong ngành điều khiển tự động hóa, khả năng áp dụng cho các bộ điều khiển hiện đại nhằm điều khiển chính xác, độ bền vững, độ ổn định cao, giảm bớt thời gian và chi phí thử nghiệm nói riêng, nội dung bài viết tập trung nghiên cứu kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab trong điều khiển cân bằng hệ con lắc ngược phi tuyến sử dụng giải thuật di truyền GA để chỉnh định các thông số ma trận tối ưu trong bộ điều khiển LQR.

II. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Kết quả so sánh đáp ứng trong việc điều khiển tốc độ động cơ điện một chiều giữa phương pháp điều khiển PID (Ziegler-Nichols kinh điển) và phương pháp tối ưu hóa thông số K_p , K_i , K_d sử dụng thuật toán di truyền GA [1]. Kết quả nghiên cứu đã cho thấy ưu điểm vượt trội của phương pháp GA khi đã giảm đến 90% thời gian đáp ứng và thời gian xác lập của hệ thống.

Nhóm tác giả Moghaddas M et al. [2] đã sử dụng giải thuật di truyền GA để chỉnh định các thông số của bộ điều khiển PID giúp cân bằng hệ con lắc ngược với thời gian ổn định 2,8s. Điều này cho thấy hiệu quả rất tốt khi sử dụng giải thuật GA. Việc sử dụng giải thuật GA lai (Hybrid Genetic Algorithm) cũng được đề cập trong bài viết số [3], nội dung bài viết tập trung vào việc sử dụng giải thuật di truyền kết hợp với lựa chọn các hệ số ma trận Q, R để điều khiển mô hình con lắc ngược với thời gian đáp ứng ngắn 2,5s, độ vọt lố thấp.

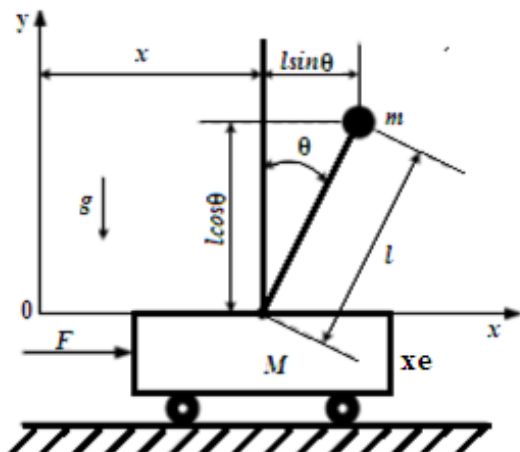
Một giải thuật tối ưu hóa khác cũng được sử dụng trong điều chỉnh hệ số ma trận tối ưu LQR trên mô hình con lắc ngược, đó là giải thuật bầy đàn PSO (cụ thể là đàn ong: Bees Algorithm) [4]. Kết quả áp dụng đáp ứng hệ con lắc ngược nhanh với thời gian tăng khoảng 1,51s, thời gian ổn định là 3,5s, độ vọt lố thấp 0,1%, sai số góc nghiêng trong khoảng ± 3 độ.

Cùng mô hình hệ con lắc ngược nhưng lại sử dụng phương pháp MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) và APSO (Adaptive Particle Swarm Optimization) [5] để tinh chỉnh các thông số bộ điều khiển PID (Proportional Integral Derivative), đã điều khiển hệ con lắc ngược duy trì ở vị trí cân bằng với khoảng thời gian đáp ứng ngắn từ $1,7s \pm 2,5s$. Tuy nhiên, sự đáp ứng hệ thống lại xuất hiện hiện tượng dao động Chattering.

III. NỘI DUNG

A. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng được áp dụng trong quá trình nghiên cứu của bài viết này là hệ con lắc ngược đơn. Con lắc ngược là một hệ thống phi tuyến điển hình trong lĩnh vực điều khiển tự động và đã được sử dụng nhiều trong quá trình nghiên cứu khoa học trong và ngoài nước. Các giải thuật hay phương pháp điều khiển được nghiên cứu trên mô hình con lắc ngược nhằm tìm ra các giải pháp tốt nhất trong các ứng dụng điều khiển thiết bị tự động trong thực tế: điều khiển tốc độ động cơ, giảm tổn hao công suất, điều khiển vị trí, điều khiển nhiệt độ, điều khiển cân bằng hệ thống... Mô hình toán của hệ con lắc ngược được xác định dựa theo tài liệu [6].



Hình 1: Mô hình động lực học hệ con lắc ngược

Mô hình toán hệ con lắc ngược phi tuyến được xác định bởi:

$$\ddot{x} = \frac{F + m.l.(sin\theta).\dot{\theta}^2 - m.g.sin\theta.cos\theta}{M + m + m.cos^2\theta} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{F.cos\theta - (M + m).g.sin\theta + m.l.(sin\theta.cos\theta).\dot{\theta}^2}{m.l.cos^2\theta - (M + m).l} \quad (2)$$

Để tuyến tính hóa hệ con lắc ngược, ta giả sử góc θ nhỏ để có thể xấp xỉ: $sin\theta \approx \theta$; $cos\theta \approx 1$; $\dot{\theta}^2 \approx 0$. Ta được phương trình tuyến tính hóa hệ thống như sau:

$$\ddot{x} = \frac{F}{M} - \frac{m.g.\theta}{M} \quad (3)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-F}{M.l} - \frac{(M + m).g.\theta}{M.l} \quad (4)$$

Trong đó:

M: khối lượng xe (kg)

m: khối lượng con lắc (kg)

l: chiều dài con lắc (m)

F: lực tác động vào xe (N)

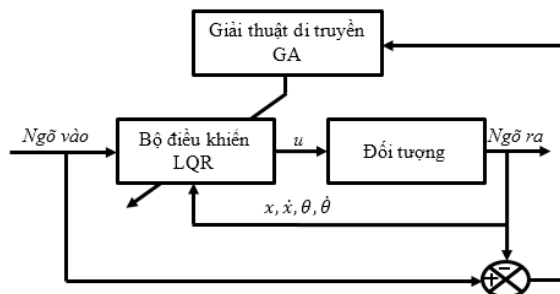
g: gia tốc trọng trường (m/s^2)

x: vị trí xe con lắc (m)

θ góc lệch giữa con lắc và phương thẳng đứng (rad)

Nhiệm vụ chính của nghiên cứu là kết hợp giải thuật di truyền GA và bộ điều khiển LQR để xác

định các hệ số ma trận tối ưu của bộ điều khiển LQR nhằm điều khiển cân bằng và ổn định mô hình con lắc ngược. Quy trình tổng quát của toàn bộ hệ thống được mô tả như Hình 2:

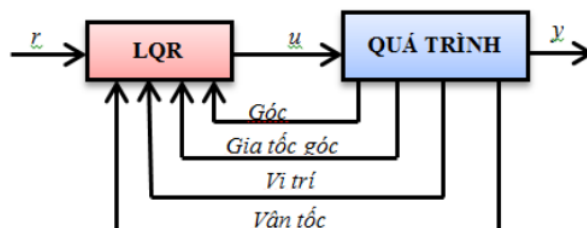


Hình 2: Quy trình chỉnh định thông số LQR dùng giải thuật di truyền GA

B. Bộ điều khiển LQR

LQR (Linear Quadratic Regulator) [7], [8] là thuật toán điều khiển được xây dựng dựa trên cơ sở nguyên lý phản hồi trạng thái, còn gọi là phương pháp tuyến tính hóa dạng toàn phương. Bộ điều khiển LQR thường được áp dụng trên các hệ phi tuyến với nhiều ngõ vào ra. Bộ điều khiển nhận tín hiệu vào là trạng thái của hệ thống và tín hiệu mẫu sau đó tính toán và chuyển thành tín hiệu điều khiển cho hệ thống.

Một hệ điều khiển được thiết kế ở chế độ làm việc tốt nhất là hệ luôn ở trạng thái tối ưu theo một tiêu chuẩn chất lượng nào đó (đạt giá trị cực trị). Trạng thái tối ưu có đạt được hay không tùy thuộc vào yêu cầu chất lượng đặt ra, sự hiểu biết về đối tượng và các tác động lên đối tượng, điều kiện làm việc của hệ... Cấu trúc của bộ điều khiển LQR điển hình cho hệ con lắc ngược đơn được thể hiện một cách tổng quát trong Hình 3.



Hình 3: Cấu trúc bộ điều khiển LQR

Trong đó, r là tín hiệu ngõ vào cần điều khiển, u là tín hiệu điều khiển hệ thống, y là tín hiệu ngõ ra.

Xét hệ thống có tác động ngoài ($u \neq 0$):

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (5)$$

Chúng ta cần tìm ma trận K của vector điều khiển tối ưu: $u(t) = -Kx(t)$ thỏa mãn chỉ tiêu chất lượng J đạt giá trị cực tiểu:

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (6)$$

Trong đó, Q là ma trận xác định dương (hoặc bán xác định dương), R là ma trận xác định dương.

Ma trận K tối ưu được xác định từ phương trình Riccati có dạng:

$$K = R^{-1} B^T P \quad (7)$$

Như vậy, luật điều khiển tối ưu cho bài toán điều khiển tối ưu dạng toàn phương với chỉ tiêu chất lượng là phương trình tuyến tính và có dạng:

$$u(t) = -Kx(t) = R^{-1} B^T P x(t) \quad (8)$$

Ma trận P khi đó phải thỏa mãn phương trình Riccati:

$$P.A + A^T P + Q - P B R^{-1} B^T P = \dot{P} \quad (9)$$

Khi P không thay đổi theo thời gian $\dot{P}=0$, ta có phương trình đại số Riccati sau:

$$P.A + A^T P + Q - P B R^{-1} B^T P = 0 \quad (10)$$

Theo phương pháp LQR thông thường, ta xét tại điểm làm việc xác lập của hệ thống đã được tuyến tính hóa ($x=0, \dot{x}=0, \theta=0, \dot{\theta}=0$ và $u=0$), sau đó dựa vào các biểu thức toán học và được hỗ trợ của những phần mềm chuyên dụng như Matlab để tìm ra các ma trận trạng thái A, B và chọn ma trận Q, R trong hàm mục tiêu J . Cuối cùng, ta xác định được thông số của ma trận tối ưu K , đây là ma trận hệ số chứa các thông số điều khiển chính đến hệ thống (k_1, k_2, k_3, k_4).

Tác giả sử dụng giải thuật di truyền GA (Genetic Algorithm) kết hợp với bộ điều khiển LQR nhằm xác định các hệ số trong ma trận tối ưu K , các hệ số này có tác động trực tiếp đến mô hình toán của hệ thống. Điểm khác biệt chủ yếu là sử dụng giải thuật di truyền thông qua nhiều thế hệ lai ghép, đột biến, chọn lọc trên mô hình phi tuyến của hệ thống nhằm tìm ra các thông số tối ưu nhất để đảm bảo tính ổn định của hệ thống.

C. Sử dụng giải thuật di truyền (GA)

Thuật toán di truyền (GA) [7] là phương pháp tìm kiếm toàn cục ngẫu nhiên dựa trên cơ chế chọn lọc tự nhiên và di truyền học tự nhiên. Chúng lặp đi lặp lại việc tìm kiếm và được sử dụng rộng rãi trong các bài toán tối ưu hóa ở một số ngành khoa học và công nghệ. Chúng ta có thể xem tiến trình trên như là một quy trình vòng kín (tạo ra các thế hệ mới). Quá trình lai ghép, đột biến, chọn lọc bắt đầu lại từ điểm cơ sở và các mẫu tốt nhất sẽ được chọn. Việc lựa chọn cá thể di truyền (sản phẩm của sự kết hợp giữa 2 cá thể cha mẹ) là một quá trình ngẫu nhiên nhưng nó được định hướng bởi việc lựa chọn các mẫu tốt nhất trong quần thể. Thực tế, để kết thúc quá trình GA sau khi số lượng thế hệ được tạo ra và các giai đoạn tiếp theo, chúng ta tiến hành kiểm tra chất lượng của tập hợp đó. Nếu không tìm thấy giải pháp tối ưu, GA có thể được khởi động lại hoặc tìm kiếm mới bắt đầu.

Trong hệ điều khiển vòng kín con lắc ngược với $e(t)$ là sai biệt giữa tín hiệu mong muốn $r(t)$ và tín hiệu đáp ứng $y(t)$ của hệ thống, thì:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (11)$$

Hàm mục tiêu của quá trình tinh chỉnh bộ điều khiển LQR trong bài viết này được định nghĩa như sau:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \{e_j(t) * e'_j(t)\} \quad (12)$$

Khi đó, giá trị hàm thích nghi [6] được xác định như sau:

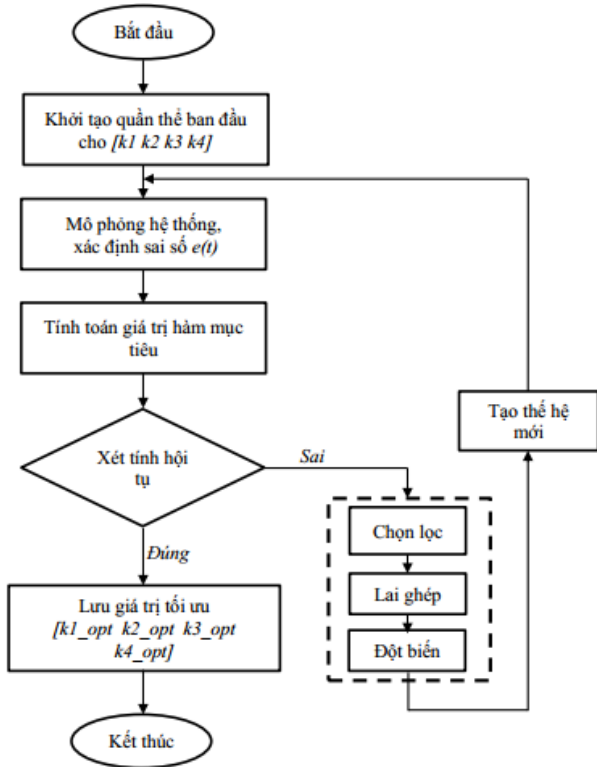
$$fitness = \frac{1}{J + eps} \quad (13)$$

Các tham số của giải thuật GA trong nghiên cứu này được chọn lựa như sau: quá trình tiến hóa qua 100 thế hệ (generations = 100), kích thước quần thể là 30 cá thể (pop_size = 30), hệ số lai ghép 0,62 (cross_prob = 0,62), hệ số đột biến (mutate_prob = 0,4), số gen trong mỗi cá thể là 4 tương ứng với các hệ số ma trận $K=[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$, kết quả lựa chọn các gen tốt nhất phải thỏa mãn hàm mục tiêu.

Nhiệm vụ của giải thuật GA được áp dụng là tìm kiếm các giá trị $[k_1_opt \ k_2_opt \ k_3_opt \ k_4_opt]$ của ma trận tối ưu K trong bộ điều khiển

LQR, mà ở đó giá trị hàm mục tiêu J đạt giá trị cực tiểu. Từ các thông số trên ta tiến hành chạy mô hình ứng dụng sao cho hệ thống hoạt động ổn định cả vị trí xe và góc nghiêng con lắc.

Quy trình tìm kiếm giá trị tối ưu của bộ điều khiển LQR bằng giải thuật GA [1] được mô tả tóm tắt bằng lưu đồ ở Hình 4:

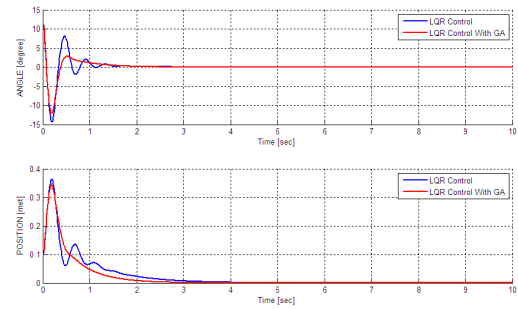


Hình 4: Lưu đồ giải thuật di truyền xác định thông số bộ điều khiển LQR

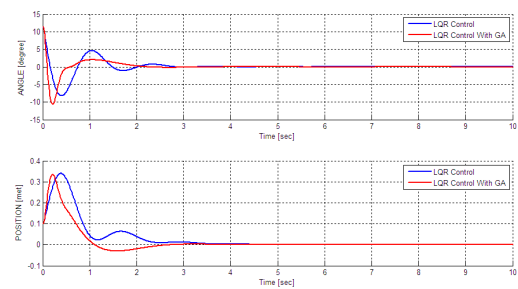
D. Kết quả mô phỏng áp dụng trên mô hình con lắc ngược

Sau đây là kết quả mô phỏng dùng phần mềm Matlab cho hai thuật toán đã nghiên cứu trong đề tài là bộ điều khiển LQR và tối ưu hóa ma trận hệ số bộ điều khiển LQR dùng giải thuật di truyền GA cho hệ con lắc ngược, tham khảo Hình 5, 6. Các giá trị ban đầu [8] của hệ được cho như sau:

- Vị trí xe con lắc: $x = 0,1$ m
- Vận tốc xe con lắc: $\dot{x} = -0,02$ m/s
- Góc nghiêng con lắc: $\theta = 0,2$ rad (≈ 10 độ)
- Giá tốc góc nghiêng: $\dot{\theta} = 0,024$ rad/s



Hình 5: Đáp ứng góc lệch và vị trí con lắc ngược với $m=0,1$ kg



Hình 6: Đáp ứng góc lệch và vị trí con lắc ngược với $m=0,2$ kg

Kết quả mô phỏng cho thấy các thông số tối ưu đã được chỉnh định nhờ giải thuật di truyền GA có đáp ứng ngõ ra tốt hơn bộ điều khiển LQR thông thường. Đáp ứng vị trí và góc nghiêng con lắc đã cân bằng ổn định trong khoảng thời gian gần bằng 2,5s. Kết quả được so sánh trong Bảng 1

Bảng 1. Thông số đánh giá kết quả mô phỏng với Matlab

Phương pháp	Hệ số ma trận tối ưu K	Thời gian đáp ứng
LQR	[113,034 53,229 102,185 -49,64]	3,0s
LQR kết hợp GA	[266,73 201,37 497,1 139]	2,5s

Kết quả nghiên cứu đã khắc phục được hiện tượng chattering so với phương pháp MOGA và APSO [5]. Bên cạnh đó, thời gian đáp ứng của vị trí và góc nghiêng con lắc cũng đã nhanh hơn 10% so với phương pháp kết hợp giữa giải thuật di truyền GA cùng với bộ điều khiển PID [2] và giảm lên đến 28% so với giải thuật bầy đàn PSO [4].

Với việc kết hợp giải thuật di truyền vào việc chỉnh định thông số các hệ số ma trận của bộ điều khiển LQR giúp việc điều khiển cân bằng hệ con lắc ngược trở nên dễ dàng hơn, hệ thống đạt độ ổn định cần thiết, độ vọt lố thấp. Đặc biệt, nếu phương pháp truyền thống phải điều khiển ma trận tối ưu hệ tuyến tính hóa phụ thuộc vào các hệ số ma trận A, B, Q, R, ... thông qua mô hình toán và kinh nghiệm của người lập trình thì với GA kết hợp LQR, việc lựa chọn các thông số tốt nhất thông qua các thế hệ cá thể có các gen trội, tiến hành lai ghép và loại bỏ các cá thể không phù hợp. Kết quả cuối cùng là chọn ra các thông số tối ưu nhất theo yêu cầu đặt ra là sai số hệ thống đạt giá trị cực tiểu và được áp dụng trực tiếp trên mô hình toán phi tuyến hệ con lắc ngược.

IV. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy ưu điểm vượt trội của giải thuật di truyền GA trong việc chỉnh định thông số các bộ điều khiển là rất tốt. Sự khác biệt chủ yếu khi sử dụng giải thuật di truyền GA là các thông số tìm được rất tối ưu và được chạy trên mô hình hoàn toàn phi tuyến, trong khi đối với bộ điều khiển LQR thông thường, ta phải tiến hành tuyến tính hóa các hệ thống phi tuyến và mất rất nhiều thời gian trong việc chỉnh định các thông số ma trận tối ưu sao cho hệ thống đạt trạng thái ổn định nhất. Việc nghiên cứu và ứng dụng giải thuật GA kết hợp với một số phương pháp điều khiển hiện đại khác sẽ giúp ta dễ dàng ước lượng các thông số mô hình phi tuyến hoặc tìm kiếm các thông số tối ưu của hệ điều khiển như: PID (Proportional Integral Derivative), LQG (Linear Quadratic Gaussian), điều khiển trượt, logic mờ, ...

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Chí Ngôn. Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền. *Tạp chí Khoa học, Trường Đại học Cần Thơ*. 2008;9:244 – 245. Nhà Xuất bản Đại học Cần Thơ.
- [2] Moghaddas M, Dastranj M R, Changizi N, Khoori N. Design of Optimal PID Controller for Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. August 2012;4(3).
- [3] Wu B, Liu Ch, Song X, Wang X. Design and implementation of the inverted pendulum optimal controller based on hybrid genetic algorithm. In: International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering; 2015. .
- [4] Sen M A, Kalyoncu M. Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm. *Journal of Automation and Control Engineering*. October 2016;5(4).
- [5] Sudarshan K Valluru, Madhusudan Singh. Stabilization of nonlinear inverted pendulum system using MOGA and APSO tuned nonlinear PID controller. *cogent engineering*. October 2016;1357314(4).
- [6] Huỳnh Thái Hoàng. *Hệ thống điều khiển thông minh*. NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh; 2006; tr. 178-179.
- [7] Nguyễn Thị Phương Hà. *Lý thuyết điều khiển hiện đại*. NXB Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh; 2012; tr. 163-170, 484 – 490.
- [8] Nguyễn Văn Đông Hải. *Xây dựng bộ điều khiển nhúng tuyến tính hóa vào ra cho hệ con lắc ngược* [Luận văn Thạc sĩ]. Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh; 2011. Tr. 39–41, 47–62.