

## **Áp dụng giải thuật di truyền hỗ trợ tối ưu hóa cho bộ điều khiển LQR đối với hệ bóng thanh: Mô phỏng và Thực nghiệm**

### **Application of Using Genetic Algorithm in Supporting LQR Control Optimization for Ball and Beam: Simulation and Experiment**

**Huỳnh Ngọc Thảo\*, Đinh Công Tuấn Anh, Nguyễn Đoàn Tấn Kha, Lý Bảo Long, Vũ Đình Hải, Nguyễn Văn Nghĩa, Văn Thiên Diễm Quỳnh, Dương Minh Trí, Phạm Ngọc Phúc, Lê Thanh Hậu**

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP HCM

\* hoanglitt@hcmute.edu.vn

Ngày nhận bài:

08/9/2023

Ngày chấp nhận đăng:

24/11/2023

**Keywords:** Ball and beam, genetic algorithm, optimal control, LQR control.

#### **ABSTRACT**

*This paper aims at studying algorithms on Ball and Beam with middle axis – a classical SIMO system. In this research, we applied GA to finding linear control parameters which are close to those suitable to the subject. In simulation, GA showed the revolution through generations, LQR controller which was not optimized was also examined to find best control parameters. Because of the uncertainty of system parameters, values of control matrix were calibrated more to get better values. Linear controller which was calibrated after GA optimization proved its outstanding ability over normal LQR controller. Our result is a confirmation of suitability of using searching algorithms in controller optimization.*

#### **TÓM TẮT**

*Trong bài báo này, nhóm tác giả nghiên cứu giải thuật trên đối tượng bóng thanh trục giữa (BTTG) - một hệ thống một vào – nhiều ra (single input - multi output – SIMO) kinh điển. Trong nghiên cứu này, chúng tôi áp dụng giải thuật di truyền (genetic algorithm – GA) để hỗ trợ tìm một bộ thông số điều khiển tuyến tính sát với thông số điều khiển phù hợp với đối tượng. Ở mô phỏng, GA cho thấy sự tiến hóa tốt dần qua các thế hệ, BDK LQR không được tối ưu bởi GA cũng được thử nghiệm để tìm ra bộ thông số tốt nhất. Do có sự không chính xác hoàn toàn của thông số chính xác của mô hình, giá trị ma trận điều khiển cần được hiệu chỉnh thêm để đạt được giá trị tối ưu nhất. BDK tuyến tính được phát triển và hiệu chỉnh thêm từ BDK LQR thông qua GA đã chứng minh khả năng vượt trội của mình so với BDK LQR. Kết quả nghiên cứu là một xác nhận của việc áp dụng giải thuật tìm kiếm để tối ưu hóa BDK.*

**Từ khóa:** Bóng thanh, giải thuật di truyền, điều khiển tối ưu, điều khiển LQR.

## 1. Giới thiệu

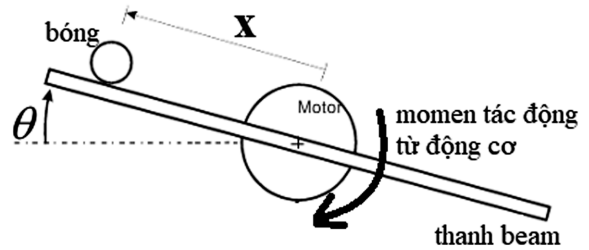
BTTG là một đối tượng SIMO rất thông dụng trong ngành điều khiển tự động (ĐKTD) (S. K. Valluru và cộng sự, 2016, trang 1-6). Mô hình này được dùng như một mô hình chuẩn trong phòng thí nghiệm (PTN) để kiểm chứng và đào tạo về các giải thuật điều khiển. Mô hình này là gần gũi với nhiều cấu trúc thực tế như hệ cân bằng bánh máy bay chống dao động không khí (Đặng Ngọc Trung, Trần Thị Hải, 2014, trang 90-93). Việc nghiên cứu thành công giải thuật cho hệ BTTG ở PTN sẽ hỗ trợ cho việc phát triển các giải thuật trong tương lai trên các mô hình tương tự trong ứng dụng thực tế. Trong nghiên cứu (Đặng Ngọc Trung, Trần Thị Hải, 2014, trang 90-93), một giải thuật LQR được thử nghiệm để cân bằng thành công cho BTTG. Tuy nhiên, chỉ có kết quả mô phỏng được thể hiện. Việc khảo sát điều chỉnh giải thuật LQR cũng chưa được trình bày trên nghiên cứu trên. Một giải thuật LQR đã được thử nghiệm thành công trên cả thực nghiệm và mô phỏng để có thể phát triển thành giải thuật mờ ở nghiên cứu (Nguyễn Tuấn, 2017). Tuy vậy, nghiên cứu trên chỉ đề cập đến việc chứng minh giải thuật mờ ANFIS là có thể xây dựng được từ LQR nên BDK gốc vẫn là LQR. Bên cạnh việc áp dụng giải thuật thông minh để mô tả một BDK đã hoạt động tốt, một hướng đi khác là áp dụng các giải thuật tìm kiếm để tối ưu hóa offline một BDK để sau đó áp dụng cho đối tượng thực nghiệm. Ở nghiên cứu (Phạm Trường Tùng và cộng sự, 2018), việc chuyển hóa 1 quy trình công nghệ về một dạng bài toán và được dùng GA để tìm lời giải đã được thực hiện thành công. Tuy nhiên, quá trình chứng minh thực nghiệm là chưa có mà chỉ trên mô phỏng. Ở nghiên cứu (Nguyễn Chí Ngôn, 2008, trang 241-248), GA cũng đã được dùng để tối ưu hóa một hệ rất kinh điển là hệ lò nhiệt. Tuy vậy, kết quả kiểm chứng cũng chỉ trên mô phỏng. Vấn đề thực nghiệm của tối ưu hóa BDK tuyến tính thông qua GA là khó khăn do sự tìm kiếm offline của GA phải được đặt trên cơ sở mô hình mô tả hệ thống trên mô phỏng phải sát hoàn toàn với thực tế. Đây là một điều rất khó thực hiện được trong thực tế. Trong bài báo này, chúng tôi áp dụng GA để tối ưu hóa nhất có thể BDK LQR. Và, trên cơ sở BDK tuyến tính tìm ra được từ GA, một sự hiệu chỉnh trực tiếp ma trận điều khiển được thực hiện sẽ cho ra BDK có đáp ứng tốt hơn BDK LQR chỉ được tìm kiếm qua thử sai. Việc sử dụng

GA trong trường hợp này đã làm giảm công sức tìm kiếm và giúp khoanh vùng thu hẹp lại khoảng tìm kiếm trước khi thông số thực sự tốt được chỉ ra. Ưu điểm của nghiên cứu của bài báo này là các kết quả đều được thử nghiệm trên mô hình thực do nhóm chúng tôi tự chế tạo – một mô hình rẻ tiền nhưng vẫn đáp ứng nhu cầu học tập và nghiên cứu về giải thuật của sinh viên ở các trường đại học.

## 2. Mô hình toán học

### 2.1. Mô hình phi tuyến

Hình 1: Mô hình toán của hệ BTTG



BTTG sử dụng quả bóng và thanh dẫn trực để duy trì vị trí của quả bóng trên thanh. Mục tiêu là duy trì quả bóng ở vị trí mong muốn bằng cách điều chỉnh độ nghiêng của thanh dẫn trực thông qua cảm biến và BDK.

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{K_t \frac{e - K_b \omega}{R_m} - 2x\dot{\theta} + mgx \cos \theta}{mx^2 + J_b} \\ \ddot{x} = \frac{mx\dot{\theta}^2 - mg \sin \theta}{m + \frac{J_B}{R^2}} \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó  $J_b = \frac{2}{5} R^2 m$ ;  $J_B = \frac{1}{12} L^2 m_b$ ;  $K_t$  là hằng số momen (Nm/A);  $K_b$  là hằng số phản điện (V/(rad/sec));  $R_m$  là điện trở động cơ (Ohm);  $\omega$  là vận tốc motor (rad/s);  $x$  là vị trí bóng trên thanh (m);  $\theta$  là góc lệch thanh (rad);  $m$  là khối lượng bóng (kg);  $R$  là bán kính bóng (m);  $L$  là chiều dài thanh beam (m).

### 2.2. Mô hình phi tuyến

Phương trình toán học dạng phi tuyến (Nguyễn Ngô Anh Quân, Hòa Đắc Bình, 2020, trang 66-73) :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (2)$$

Trong đó:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ \dot{p} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad f(x) = \begin{bmatrix} x_2 \\ f_1(x) \\ x_4 \\ f_2(x) \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1(x) \\ 0 \\ g_2(x) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ta xem xét điểm làm việc tĩnh đã được mô tả như sau:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0, u = 0 \quad (4)$$

Khi đó, hệ thống có thể được xấp xỉ tương đương hệ tuyến tính khi làm việc tại điểm (4) như sau

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

Trong đó, ma trận A và B được tính như sau

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \end{bmatrix}_{x=0, u=0}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 \\ 0 \\ g_2 \end{bmatrix}_{x=0} \quad (6)$$

Thông số mô hình được đo đạc từ mô hình thực nghiệm ở Hình 11 như sau

$$R_m = 6.83; K_t = K_b = 0.065; L_m = 0.251; \quad (7)$$

$$J_m = 13 \times 10^{-5}; C_m = 4 \times 10^{-5}; m = 0.09;$$

$$M = 0.45; L = 0.37; R = 0.2$$

Từ (6) và (7), ta có

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -7.0071 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -74.7060 & 0 & 0 & -0.1801 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2.5729 \end{bmatrix} \quad (8)$$

### 3. Giải thuật điều khiển

#### 3.1. Điều khiển LQR

Đối với hệ cân bằng có điểm làm việc tĩnh như ở (4), tín hiệu điều khiển LQR cho hệ thống được quy định như sau:

$$u = -Kx \quad (9)$$

Việc tính toán ma trận K từ việc giải phương trình Ricatti là rất phức tạp. Do đó, Matlab đã hỗ trợ công cụ để tính ma trận K thông qua lệnh sau:

$$K = \text{lqr}(A, B, Q, R) \quad (10)$$

#### 3.2. Giải thuật GA

Ở phần này, nhóm tác giả sử dụng GA để chứng minh việc áp dụng giải thuật tìm kiếm này có làm BDK trên mô phỏng tốt dần lên, và hướng đến giá trị tối ưu. Nếu giá trị thông số mô hình trên mô phỏng là rất sát giá trị thông số mô hình thực nghiệm, việc vận dụng kết quả tìm kiếm trên mô phỏng là phù hợp với giá trị áp dụng cho thực nghiệm. Các thông số của GA được chọn như sau:

Số thế hệ tối đa: 200	Hệ số đột biến: 0.7
Số lượng cá thể: 100	Kiểu mã hóa: mã hóa thập phân
Số lượng nhiễm sắc thể trong một cá thể: 5	Kiểu chọn lọc: chọn lọc sắp hạng tuyến tính
Hệ số lai ghép: 0.3	Kiểu lai ghép: lai ghép hai điểm

Sau lần chạy GA đầu tiên thu được, kết quả thu được ở thế hệ thứ 100 như sau:

$$Q = \begin{bmatrix} 41.4169 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 37.3126 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 24.2706 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 50.7724 \end{bmatrix}; R = 97.8159; J_{\min} = 4.087 \quad (11)$$

$$K_{GA3} = [-56.4963 \quad -13.6066 \quad 22.9667 \quad 4.2661] \quad (12)$$

Tiếp theo lần chạy GA thứ 2, kết quả thu được ở thế hệ thứ 1000 như sau:

$$Q = \begin{bmatrix} 6.6843 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 808.4864 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 87.0172 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 957.9585 \end{bmatrix}; R = 10.9929; J_{\min} = 2.1621 \quad (13)$$

$$K_{GA2} = [-56.5183 \quad -13.4789 \quad 22.6666 \quad 4.2274] \quad (14)$$

Lần chạy GA cuối cùng, kết quả thu được ở thế hệ thứ 1000 như sau:

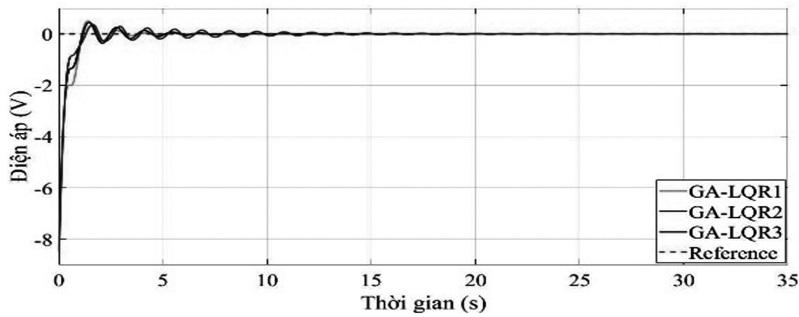
$$Q = \begin{bmatrix} 3949.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5554 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1157.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6880.1 \end{bmatrix}; R = 334.1794; J_{\min} = 1.4093 \quad (15)$$

$$K_{GA1} = [-56.6232 \quad -12.8060 \quad 20.3459 \quad 3.9108] \quad (16)$$

### 4. Kết quả mô phỏng

#### 4.1. Kết quả mô phỏng GA\_LQR

**Hình 2: Điện áp cấp cho động cơ (V)**

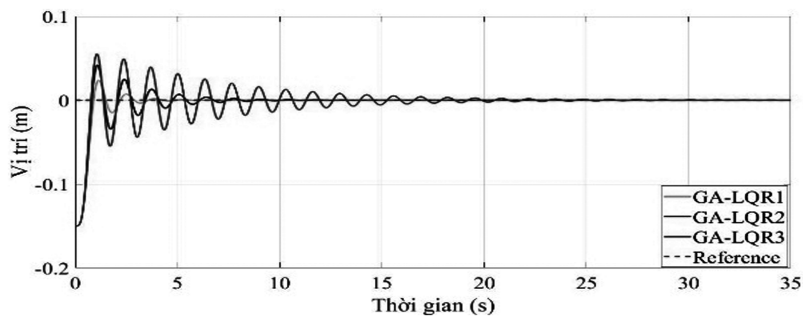


**Bảng 1: So sánh điện áp cấp cho động cơ trong các trường hợp**

	GA-LQR1	GA-LQR2	GA-LQR3
Txl (s)	5.14	9.15	25.56
POT (%)	0	0	0
Exl (V)	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **GA1**, và sau đó là **GA2**, và cuối cùng là **GA3**

**Hình 3: Vị trí bóng (m)**

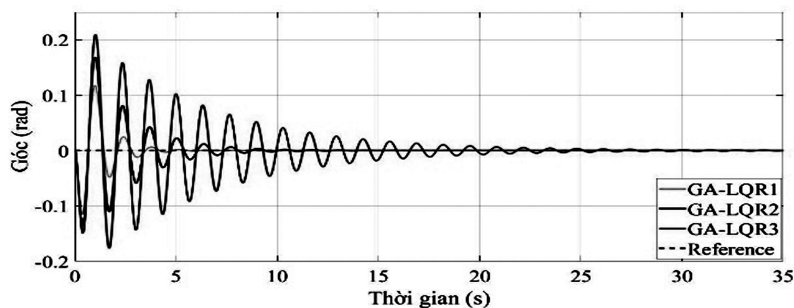


**Bảng 2: So sánh vị trí quả bóng**

	GA-LQR1	GA-LQR2	GA-LQR3
Txl (s)	5.02	9.42	26.44
PO (%)	∅	∅	∅
Exl (m)	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **GA1**, và sau đó là **GA2**, và cuối cùng là **GA3**

**Hình 4: Góc thanh beam (rad)**



**Bảng 3: So sánh góc lệch thanh beam**

	GA-LQR1	GA-LQR2	GA-LQR3
Txl (s)	5.78	11.56	31.27
POT (%)	∅	∅	∅
Exl (rad)	0	0	0

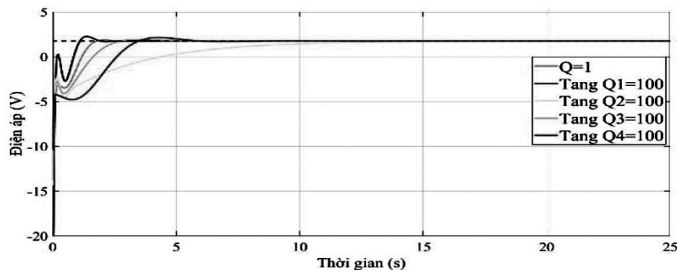
Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **GA1**, và sau đó là **GA2**, và cuối cùng là **GA3**. Điều này chứng tỏ việc chạy GA có tối ưu hóa hơn BDK LQR đối với nhiều thể hệ được chạy hơn. Như vậy, các thông số được tối ưu thông qua GA1 sẽ được đem đi so sánh với BDK LQR vốn được hiệu chỉnh thông qua tinh chỉnh theo lý thuyết LQR

**4.2. Mô phỏng thử sai LQR**

Để có thể so sánh LQR tìm kiếm thông qua thử sai và LQR được tối ưu hóa thông qua GA, nhóm tác giả sẽ tiến thử sai cho BDK LQR để đưa ra giá trị thử sai tốt nhất để so sánh với BDK LQR đã được tối ưu hóa thông qua GA.

Kết quả mô phỏng thử sai Q được thể hiện như sau:

**Hình 5: Đồ thị mô phỏng điện áp thử sai Q**

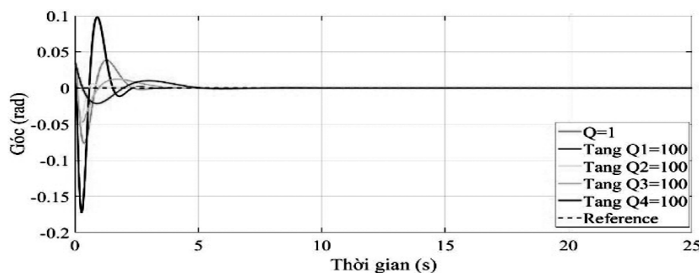


**Bảng 4: So sánh điện áp cấp cho động cơ khi thử sai Q**

Q	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1=100</sub>	Q <sub>2=100</sub>	Q <sub>3=100</sub>	Q <sub>4=100</sub>
Txl (s)	3.6	2.5	14.6	7.53	9.82
POT (%)	0.3	0.06	0	0.09	0.21
Exl (V)	0	0	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **Q<sub>1</sub>**, và sau đó lần lượt là **Q<sub>0</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>2</sub>**

**Hình 6: Góc thanh beam (rad)**



**4.2.1. Thử sai Q**

Chọn **Q<sub>0</sub>** là ma trận đơn vị, R=0.01:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R = 0.01 \tag{17}$$

$$\Rightarrow K_{Q_0} = [-55.2948 \quad -22.4053 \quad 56.3987 \quad 10.7196] \tag{18}$$

Sau đó, ta lần lượt thay đổi các giá trị **Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>** (chọn giá trị là 100) và giữ nguyên R để tìm ra được Q tốt nhất

Sau khi thay lần lượt giá trị Q, ta sẽ có các kết quả K tương ứng với giá trị Q, R đó:

$$K_{Q_1} = [-116.9362 \quad -46.9051 \quad 84.3384 \quad 11.5776] \tag{19}$$

$$K_{Q_2} = [-54.5081 \quad -88.3955 \quad 125.1175 \quad 12.7311] \tag{20}$$

$$K_{Q_3} = [-54.6679 \quad -29.5513 \quad 108.7362 \quad 12.3197] \tag{21}$$

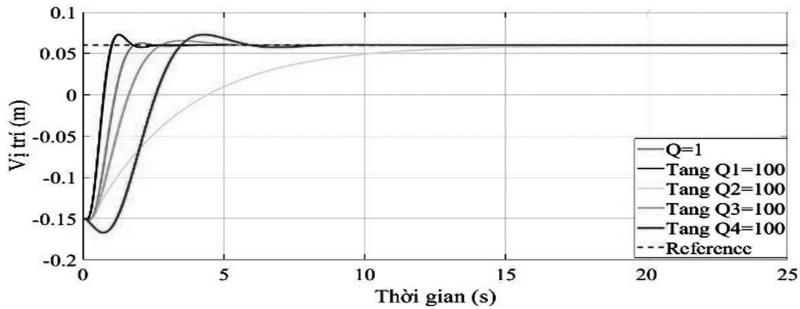
$$K_{Q_4} = [-39.4405 \quad -16.8133 \quad 89.9334 \quad 34.8221] \tag{22}$$

**Bảng 5: So sánh góc thanh beam khi thử sai Q**

Q	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1=100</sub>	Q <sub>2=100</sub>	Q <sub>3=100</sub>	Q <sub>4=100</sub>
Txl (s)	3.47	3.33	2.02	4.6	6.68
OT (%)	∅	∅	∅	∅	∅
Exl (rad)	0	0	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **Q<sub>1</sub>**, và sau đó lần lượt là **Q<sub>0</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>**

**Hình 7: Vị trí bóng (m)**



**Bảng 6: So sánh vị trí bóng khi thử sai Q**

Q	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1=100</sub>	Q <sub>2=100</sub>	Q <sub>3=100</sub>	Q <sub>4=100</sub>
Txl (s)	4.07	2.84	17.5	8.87	8.8
POT (%)	0.04	0.21	0	0.08	0.20
Exl (m)	0	0	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **Q<sub>1</sub>**, và sau đó lần lượt là **Q<sub>0</sub>, Q<sub>3</sub>, Q<sub>4</sub>, Q<sub>2</sub>**

**4.2.2. Thử sai R**

Chọn **Q** là ma trận đơn vị:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\Rightarrow K = [-55.2948 \quad -22.4053 \quad 56.3987 \quad 10.7196] \quad (24)$$

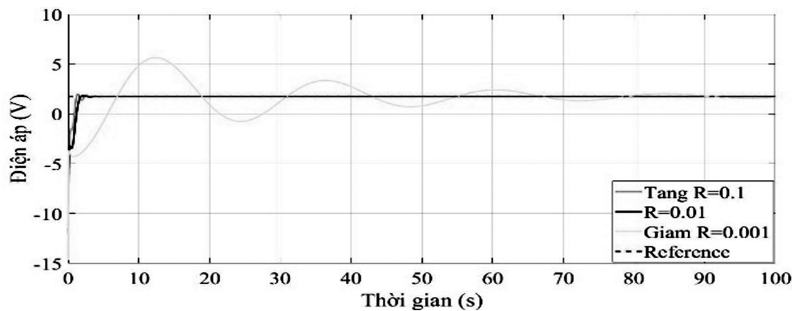
Sau đó, ta lần lượt tăng giảm R, giữ nguyên Q. Ta sẽ tăng R= 0.1, giảm R=0.001 và thu được 2 giá trị K lần lượt như sau:

$$K = [-56.2840 \quad -16.4305 \quad 32.9965 \quad 6.1520]_{(R=0.1)} \quad (25)$$

$$K = [-58.9923 \quad -38.5050 \quad 115.2674 \quad 24.2690]_{(R=0.001)} \quad (26)$$

Kết quả mô phỏng thử sai R được thể hiện như sau

**Hình 8: Điện áp cấp cho động cơ (V) khi thử sai R**

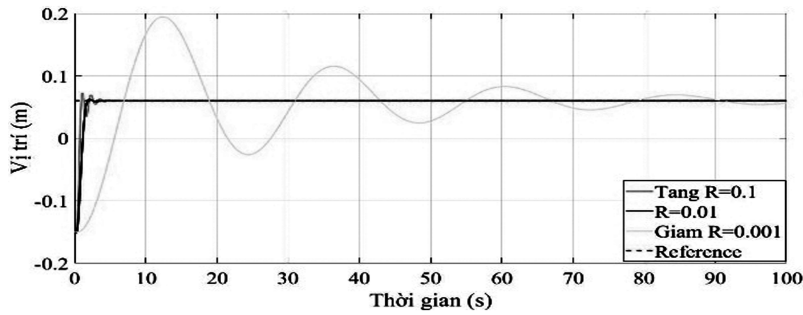


**Bảng 7: So sánh đáp ứng điện áp (V) khi thử sai R**

R	Tăng R=0.1	R=0.01	Giảm R=0.001
Txl (s)	4.47	2.46	93.92
POT (%)	0.159	0.06	2.24
Exl (V)	0	0	0.07

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **R=0.01**, sau đó là **R=0.1**, và cuối cùng là **R=0.001**

**Hình 9: Vị trí bóng (m) khi thử sai R**

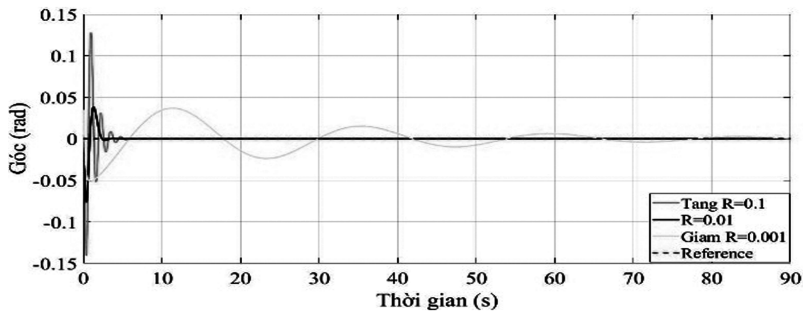


**Bảng 8: So sánh vị trí bóng khi thử sai R**

R	Tăng R=0.1	R=0.01	Giảm R=0.001
Txl (s)	5	3.67	95.11
POT (%)	0.204	0.037	2.2
Exl (m)	0	0	0.005

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **R=0.01**, sau đó là **R=0.1**, và cuối cùng là **R=0.001**

**Hình 10: Góc lệch thanh beam khi thử sai R**



**Bảng 9: Nhận xét mô phỏng góc thanh thử sai R**

Q	Q <sub>0</sub>	Q <sub>1=100</sub>	Q <sub>2=100</sub>	Q <sub>3=100</sub>	Q <sub>4=100</sub>
Txl (s)	3.47	3.33	2.02	4.6	6.68
POT (%)	∅	∅	∅	∅	∅
Exl (rad)	0	0	0	0	0

Đồ thị đáp ứng tốt nhất các chỉ tiêu đánh giá chất lượng (txl, POT, exl nhỏ nhất) là **R=0.01**, sau đó là **R=0.1**, và cuối cùng là **R=0.001**

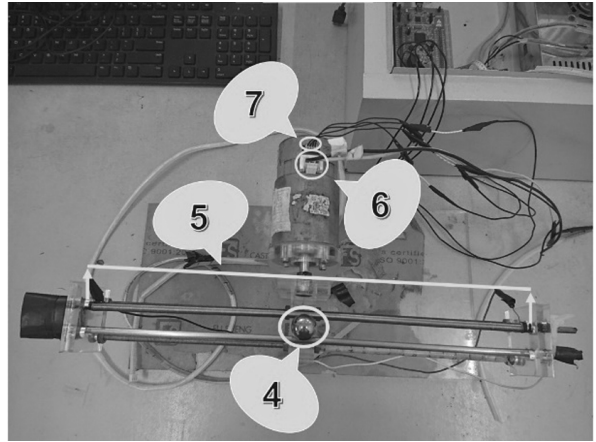
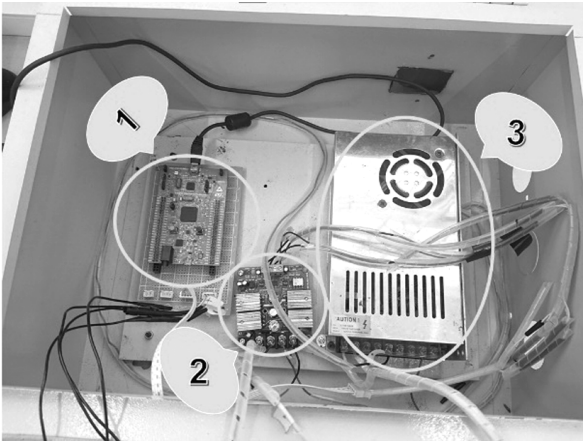
Sau khi mô phỏng thử sai Q, R, chúng tôi đã chọn lọc ra thông số có đáp ứng tốt nhất để chạy thực nghiệm như sau:

$$K_{Q_0} = [-55.2948 \quad -22.4053 \quad 56.3987 \quad 10.7196] \quad (27)$$

## 5. Kết quả thực nghiệm

### 5.1. Mô hình thực tế

Hình 11: Mô hình thực tế hệ thống

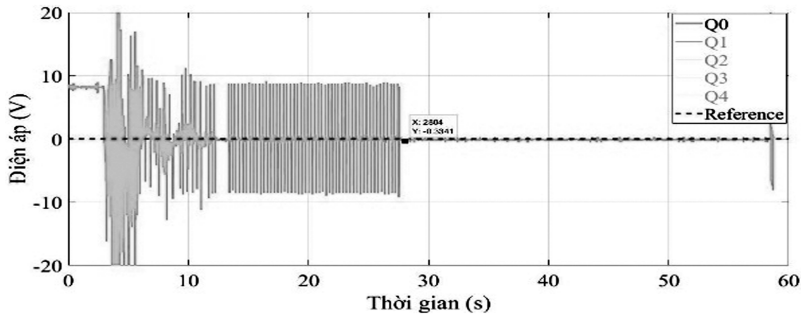


- (1): Vi điều khiển STM32F407
- (2): Driver cầu H công suất
- (3): Nguồn tổ ong
- (4): Quả bóng

- (5): Cảm biến dây điện trở quấn quanh thanh kim loại
- (6): Motor
- (7): Encoder

### 5.2. Kết quả thực nghiệm thử sai LQR

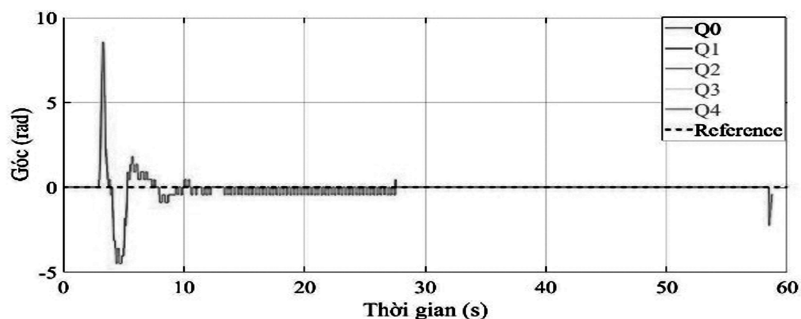
Hình 12: Đồ thị chạy thực nghiệm điện áp  $Q_0$



Bảng 10: Nhận xét đồ thị chạy thực nghiệm điện áp thử sai

	$Q_0$	$Q_1$
Txl (s)	28.03	7.06
POT (%)	∅	∅
Exl (V)	0.135	7.63 – 11.21

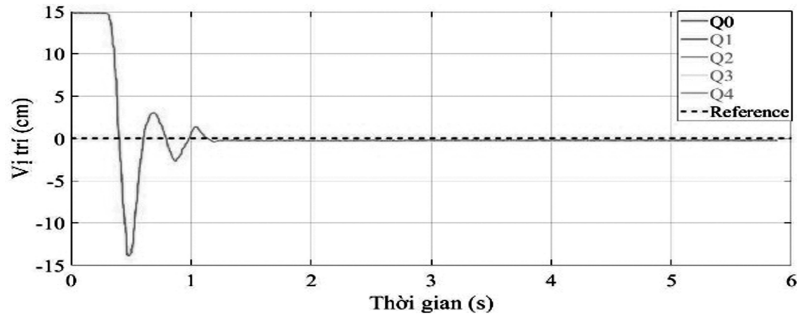
Hình 13: Đồ thị chạy thực nghiệm góc thanh  $Q_0$



**Bảng 11: Nhận xét đồ thị chạy thực nghiệm góc thanh thử sai**

	$Q_0$	$Q_1$
Txl (s)	27.93	6.94
POT (%)	∅	∅
Exl (rad)	0	3.6

**Hình 14: Đồ thị chạy thực nghiệm vị trí bóng  $Q_0$**



**Bảng 12: Nhận xét đồ thị chạy thực nghiệm vị trí bóng thử sai**

	$Q_0$	$Q_1$
Txl (s)	12.02	7.57
POT (%)	∅	∅
Exl (cm)	0.003	5.79

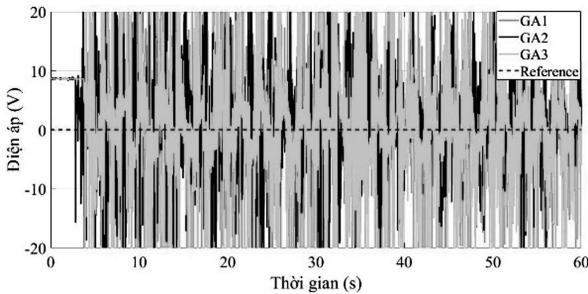
Sau khi chạy thực nghiệm thử sai lần lượt các giá trị Q, R, nhóm tác giả chọn thông số này cho BDK LQR

$$Q_{LQR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; R_{LQR} = 0.01 \quad (28)$$

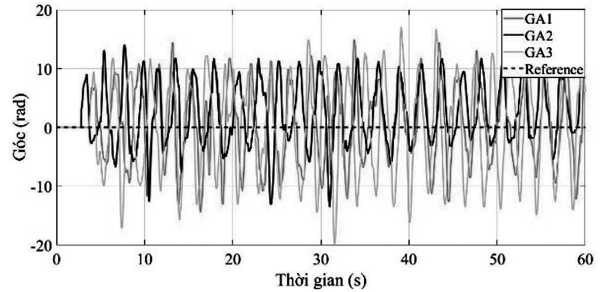
$$\Rightarrow K_{LQR} = [-55.2948 \quad -22.4053 \quad 56.3987 \quad 10.7196] \quad (29)$$

### 5.3. Thục nghiệm LQR-GA

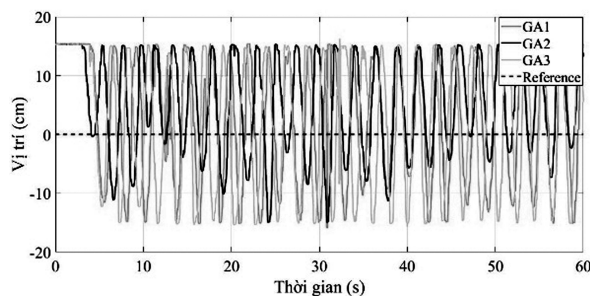
**Hình 15: Điện áp cấp cho động cơ (V)**



**Hình 16: Góc lệch thanh beam (rad)**



**Hình 17: Vị trí bóng (cm)**



Thông qua Hình 15 đến Hình 17, ta thấy thông số LQR do GA tìm ra giúp hệ thống hoạt động thành công trên đối tượng BTTG thực nghiệm. Tuy nhiên, việc áp dụng được giải thuật GA cũng đã làm thông số điều khiển sát hơn đến giá trị phù hợp. Chất lượng chưa tốt của thực nghiệm là do thông số mô hình chưa được đo đạc chính xác hoàn toàn. Bên cạnh đó, nhiều giả lập được mô tả như “thanh beam đồng

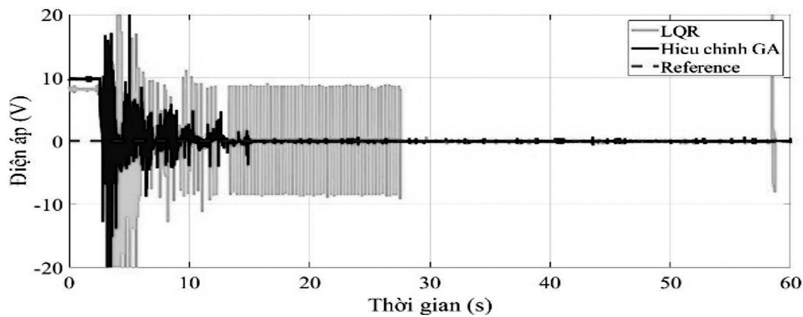
chất”, “không có ma sát trượt giữa hòn bi và thanh beam”... là không hoàn toàn chính xác. Do đó, GA đã giúp đưa bộ thông số điều khiển về khoảng chấp nhận được. Để hoàn thiện hơn, việc chỉnh sửa thông số trực tiếp đối với thông số K của BDK LQR được tối ưu hóa ở (16) được nhóm tác giả tiếp tục thực hiện. Thông số được hiệu chỉnh với các giá trị gần với giá trị tối ưu ở (16) có giá trị như sau:

$$K_{HC3} = [-65.1659 \quad -25.1824 \quad 50.8966 \quad 5.2049] \quad (30)$$

#### 5.4. So sánh LQR-GA đã được hiệu chỉnh và LQR

Kết quả so sánh BDK LQR thử sai từ (29) và LQR-GA được hiệu chỉnh từ (30) được hiển thị từ Hình 18 đến Hình 20, từ Bảng 12 đến Bảng 14.

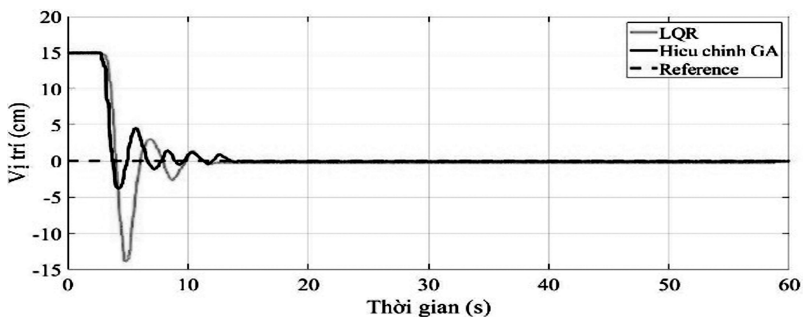
**Hình 18: So sánh điện áp cấp cho động cơ (V) giữa LQR và LQR-GA sau khi hiệu chỉnh**



**Bảng 13: So sánh điện áp cấp cho động cơ (V) giữa LQR và LQR-GA hiệu chỉnh**

	LQR	LQR-GA Hiệu chỉnh
Txl (s)	28.03	16.05
POT (%)	∅	∅
Exl (V)	0.135	0.25

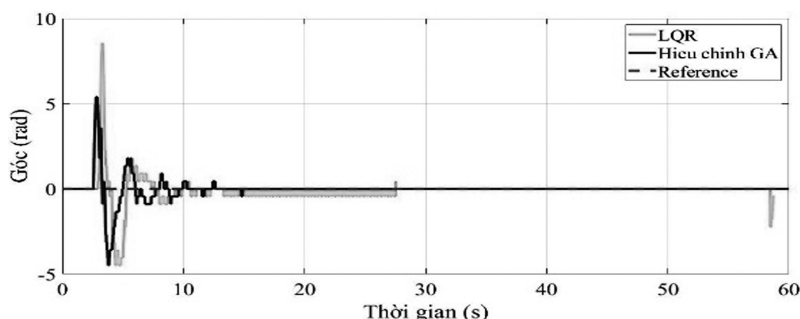
**Hình 19: So sánh vị trí quả bóng LQR và LQR-GA sau khi hiệu chỉnh**



**Bảng 14: So sánh vị trí bóng (m) giữa LQR và LQR-GA hiệu chỉnh**

	LQR	LQR-GA Hiệu chỉnh
Txl (s)	12.02	14.05
POT (%)	∅	∅
Exl (cm)	0.05	0.03

**Hình 20: So sánh góc lệch thanh beam (rad) giữa LQR và LQR-GA sau khi hiệu chỉnh**



**Bảng 15: So sánh góc thanh beam (rad) giữa LQR VÀ LQR-GA hiệu chỉnh**

	LQR	LQR-GA Hiệu chỉnh
Txl (s)	27.93	15.34
POT (%)	∅	∅
Exl (rad)	0	0

Nhìn chung, cả 3 thông số quan trọng của hệ thống là: điện áp, góc, vị trí bóng của  $K_{LQR-GA}$  sau khi hiệu chỉnh tốt hơn  $K_{LQR}$  (đặc biệt là thời gian xác lập sớm hơn), ít bị nhiễu dao động hơn, và chuyển động mượt hơn.

### 6. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác giả dùng GA để hỗ trợ tối ưu hóa BDK LQR. Nhờ sự tối ưu hóa thông qua các thế hệ, thông số tìm ra là điều khiển được hệ thống. Tuy nhiên, do sự sai lệch giữa thông số mô hình trên mô phỏng và trong thực tế, do sự giả định chưa sát thực tế trong việc xây dựng hệ phương trình toán của hệ thống, thông số

do GA tối ưu hóa vẫn chưa đạt chất lượng tốt hoàn toàn. Nhóm tác giả đã trên cơ sở thông số LQR-GA, hiệu chỉnh thêm để bù trừ cho sự sai lệch đó, có được BDK tuyến tính cho hệ và có chất lượng hơn hẳn BDK LQR chỉ thông qua tinh chỉnh thủ sai. Như vậy, GA tối ưu hóa kết hợp sự hiệu chỉnh bù trừ sai lệch mô hình là một phương án áp dụng được cho các đối tượng được tự chế tạo thủ công trong các PTN ở điều kiện Việt Nam.

### Lời cảm ơn

Chúng em chân thành cảm ơn thầy TS. Nguyễn Văn Đông Hải, khoa Điện - Điện tử, Đại học SPKT TPHCM đã hỗ trợ, góp ý để hoàn thành nghiên cứu này

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- S. K. Valluru và cộng sự (2016). *Prototype design and analysis of controllers for one dimensional ball and beam system*, 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, India, pp. 1-6.
- Đặng Ngọc Trung, Trần Thị Hải. (2014). *Nghiên cứu và ứng dụng phương pháp điều khiển tối ưu LQR cho hệ ball and beam*, Kỷ yếu Hội thảo cấp trường kỷ niệm 42 năm ngày truyền thống khoa Điện 30/10/1972 - 30/10/2014, Đại học Công nghiệp Thái Nguyên, trang 90-93.
- Nguyễn Tuấn. (2017). *Điều khiển mờ cho hệ Ball and Beam*, Luận văn thạc sĩ, ngành Kỹ thuật điện, Đại học Sư phạm kỹ thuật TPHCM.
- Nguyễn Ngô Anh Quân, Hòa Đắc Bình. (2020). *Thiết kế và đánh giá thực nghiệm bộ điều khiển PID ổn định hệ thống cân bằng bóng trên thanh*, Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Duy Tân, trang 66-73.
- Nguyễn Ngô Anh Quân, Hòa Đắc Bình. (2020). *Thiết kế và đánh giá thực nghiệm bộ điều khiển PID ổn định hệ thống cân bằng bóng trên thanh*, Tạp chí khoa học và công nghệ Đại học Duy Tân,

trang 66-73.

Phạm Trường Tùng và cộng sự. (2018). *Tối ưu tiến trình công nghệ bằng giải thuật di truyền*, Tạp chí khoa học và Công nghệ, Đại học Đà Nẵng, số 5 (126), quyển 1.

Nguyễn Chí Ngôn. (2008), *Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền*, Tạp chí khoa học, 2008:9, trang. 241-248.