

DOI:10.22144/ctu.jvn.2022.238

THIẾT KẾ THỬ NGHIỆM HỆ NÂNG VẬT TRONG TỪ TRƯỜNG GIÁ RẺ DÙNG TRONG NGHIÊN CỨU VÀ GIẢNG DẠY

Nguyễn Hoàng Thi¹, Võ Nhi Khang¹, Hồ Vĩnh Thuận², Phan Hồng Toàn¹, Trần Nhựt Thanh¹ và Nguyễn Văn Mướn^{1*}

¹Trường Bách Khoa, Trường Đại học Cần Thơ

²Công ty Cổ phần Tự động hóa SCADA

*Người chịu trách nhiệm về bài viết: Nguyễn Văn Mướn (email: nvmuot@ctu.edu.vn)

ABSTRACT

This paper introduces an experimental controlled model of a low-cost magnetic levitation system for education and research. The hardware model has been built for implementing the theory of control algorithms into real-time. This is to solve the circumstance of inadequate physical devices for testing principles and control theories. According to that, an LQR controller (Linear Quadratic Regulator) and the Kalman filter have been designed to control an iron ball stably at different positions. The Kalman filter is used to estimate state variables supporting the LQR controller for controlling the object to the desired positions. The results have been approached with the effective data transference of a low-cost hardware device that can control the object at different equilibrium points; the maximum steady-state error is around 4%. In addition, by adding noise to the system with the object's mass changed, the position of the object is still controlled stably. The noise from the data of the sensors also influenced the quality of the designed controller LQG (Linear Quadratic Gaussian).

TÓM TẮT

Bài báo nhằm giới thiệu mô hình thực nghiệm điều khiển hệ thống nâng vật trong từ trường với giá rẻ phục vụ cho nghiên cứu và giảng dạy. Mô hình phần cứng đã được xây dựng để áp dụng các giải thuật điều khiển từ lý thuyết mô phỏng vào trong thực tiễn. Việc này giải quyết được tình trạng thiếu thiết bị vật lý để kiểm chứng các nguyên lý, lý thuyết điều khiển. Theo đó, bộ điều khiển LQR (Linear Quadratic Regulator) và bộ lọc Kalman được thiết kế nhằm điều khiển ổn định được viên bi sắt ở các vị trí khác nhau. Bộ lọc Kalman được sử dụng để ước lượng các biến trạng thái của hệ thống giúp hỗ trợ bộ điều khiển LQR nâng giữ vật tại các vị trí mong muốn. Kết quả đạt được là mô hình phần cứng giá rẻ nhưng hoạt động truyền nhận dữ liệu hiệu quả, có khả năng điều khiển giữ được vật ổn định tại các vị trí cân bằng khác nhau với sai số xác lập lớn nhất chỉ khoảng 4%. Ngoài ra, với nhiễu tác động là sự thay đổi khối lượng vật thì vị trí vật vẫn được điều khiển giữ cân bằng ổn định. Nhiễu đo đạt từ các cảm biến cũng có ảnh hưởng đến chất lượng của bộ điều khiển LQG (Linear Quadratic Gaussian) đã thiết kế.

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 13/07/2022

Ngày nhận bài sửa: 01/08/2022

Ngày duyệt đăng: 03/08/2022

Title:

A trial design of a low cost magnetic levitation system for education and research

Từ khóa:

Nâng vật trong từ trường, bộ điều khiển LQR, bộ lọc Kalman, biến trạng thái

Keywords:

Magnetic levitation, linear quadratic regulator (LQR), Kalman filter, state variable

1. GIỚI THIỆU

Hệ nâng vật trong từ trường đã và đang được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như: hệ thống treo trong xe, ổ lăn không ma sát, xe đệm từ trường tốc độ cao. Các hệ thống này đã và đang được quan tâm và trở nên nổi tiếng do đặc tính động học không ma sát và không tiếp xúc trong hệ thống (Dolga et al., 2007). Những đặc tính này giúp tránh được tổn thất, hư hại hệ thống do tránh được ma sát và chuyển động cơ học giữa các chi tiết, từ đó làm tăng hiệu suất hoạt động, giảm hao mòn, tiết kiệm chi phí bảo trì và hệ thống tiêu hao ít năng lượng hơn.

Hệ nâng vật trong từ trường là một hệ thống có tính phi tuyến đặc biệt cao (Ahmad et al., 2010) nên các nhà nghiên cứu cần phải phát triển những giải thuật thích hợp để có thể điều khiển được chính xác vị trí của vật được nâng (Thanh và ctv., 2014). Theo mô hình thực nghiệm của nhóm tác giả này, bộ thu thập dữ liệu đắt tiền PCI-1711U Advantech có sẵn đã được chọn để xử lý truyền nhận dữ liệu đo được. Với bo mạch giao tiếp bằng cổng PCI này, thì độ phân giải analog là 12 bit nhưng tần số hoạt động chỉ đến 10Mhz, giá thành khá đắt, và cấu trúc cổng kèn. Mặt khác, các nhà nghiên cứu đã đề xuất nhiều phương pháp và điều khiển thành công hệ này: Barie and Chiasson (1996) đã thiết kế bộ điều khiển bằng phương pháp hồi tiếp tuyến tính hóa; Kharaajoo et al. (2003) với bộ điều khiển dự báo; Al-Muthairi and Zribi (2004) và Ngón và ctv. (2011) đã thiết kế bộ điều khiển bằng phương pháp trượt có kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo. Trong đó, phương pháp điều khiển trượt được sử dụng để điều khiển hệ thống hiệu quả (Al-Muthairi & Zribi, 2004) nhưng đòi hỏi phải biết được đầy đủ các thông số trạng thái và việc điều khiển phụ thuộc vào mô hình toán của đối tượng.

Bảng 1. So sánh cấu hình các bo điều khiển

Bo mạch	STM32F407	PCI-1711U	Mega 2560
Tần số hoạt động đến	26 Mhz	10 Mhz	16 Mhz
Độ phân giải analog input	12 bit	12 bit	10 bit
Giao thức	USB UART	Cổng PCI	USB
Xuất tín hiệu PWM	Có	Không	Có
Giá thành	dưới 800.000 đồng	trên 8.000.000 đồng	dưới 200.000 đồng

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

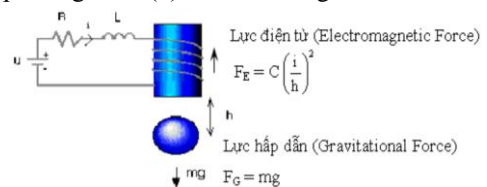
2.1. Mô hình toán học hệ thống

Mô hình được mô tả ở Hình 1 (Al-Muthairi & Zribi, 2004) có điện áp u là ngõ vào của đối tượng điều khiển (nam châm điện), điện áp này thay đổi sẽ điều khiển được viên bi sắt nâng hạ một khoảng h so với nam châm điện. Khoảng cách h này là ngõ ra của đối tượng điều khiển.

Ngoài ra, theo nghiên cứu của Silva and Barbosa (2021), giải pháp sử dụng thiết bị giá rẻ như bộ vi điều khiển Arduino Mega 2560 cũng đã được thử nghiệm tương đối hiệu quả kết hợp mạng nơ-ron nhân tạo. Tuy nhiên, tần số hoạt động của Arduino Mega 2560 chỉ có thể lên đến 16Mhz. Bên cạnh đó cũng có nghiên cứu đã xây dựng hệ nâng vật trong từ trường giá rẻ phục vụ trong nghiên cứu và giảng dạy các ngành kỹ thuật (Pujol-Vázquez et al., 2021). Ngoài ra, nhóm tác giả Subrata et al. (2017) và nhóm Suraj et al. (2018) cũng đã có nghiên cứu chọn bộ vi điều khiển Arduino Uno kết hợp Raspberry-Pi để truyền thông và xử lý dữ liệu đo được, dùng bộ điều khiển PID. Với những nghiên cứu trên, tốc độ xử lý dữ liệu có phần bị hạn chế do cấu hình phần cứng từ nhà sản xuất.

Từ cơ sở đã nêu trên, nghiên cứu nhằm đề xuất xây dựng mô hình vật lý thử nghiệm hệ nâng vật trong từ trường giá rẻ hợp lý dùng vi điều khiển STM32F407 Discovery cho mục đích nghiên cứu và giảng dạy. Ưu điểm nổi bật của bộ vi điều khiển được chọn trong nghiên cứu này là kết nối đơn giản, phần cứng nhỏ gọn, tốc độ xử lý dữ liệu điều khiển cũng như tần số hoạt động nhanh hơn so với việc dùng bo PCI 1711U hay bo Arduino Mega 2560, Arduino Uno. Bảng 1 trình bày số liệu so sánh những đặc điểm cơ bản giữa các bộ vi điều khiển. Giải pháp điều khiển thử nghiệm trên mô hình phần cứng là thiết kế bộ điều khiển LQG (Linear-Quadratic- Gaussian) cho hệ nâng vật trong từ trường. Sau khi thiết kế và mô phỏng bộ điều khiển trên phần mềm MATLAB/Simulink, bộ điều khiển này được áp dụng trên hệ thống thời gian thực để kiểm nghiệm tính hiệu quả của bộ điều khiển đã thiết kế và phân tích tính ổn định của hệ thống.

Theo nghiên cứu của Barie and Chiasson (1996), hệ phương trình (1) là mô tả động học của hệ thống.



Hình 1. Mô hình hệ nâng vật bằng từ trường

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = v \\ u = Ri + \frac{d(L(h)i)}{dt} \\ m \frac{dv}{dt} = mg_c - C \left(\frac{i}{h}\right)^2 \end{cases} \quad (1)$$

Trong đó:

h: Vị trí của vật (m),

v: Vận tốc của vật (m/s),

i: Dòng điện qua cuộn dây (A),

u: Điện áp cung cấp cho cuộn dây (V),

R: Điện trở của cuộn dây (Ω),

L(h): Điện cảm của cuộn dây (H),

C: Hằng số lực từ (Nm^2/A^2),

m: Khối lượng của viên bi (kg),

gc: Gia tốc trọng trường (m/s^2).

Điện cảm của cuộn dây là một hàm phi tuyến phụ thuộc vào vị trí của vật được nâng (Al-Muthairi & Zribi, 2004):

$$L(h) = L_i + \frac{2C}{h}, \quad (2)$$

trong đó L_i là điện cảm của cuộn dây khi vật ở rất xa lõi thép.

Các biến trạng thái được chọn như sau:

$$\begin{cases} x_1 = h \\ x_2 = v \\ x_3 = i \end{cases} \quad (3)$$

Vec-tơ trạng thái hệ thống $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$.

Phương trình trạng thái của hệ được viết lại từ (1), (2), và (3) như sau:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = g_c - \frac{C}{m} \left(\frac{x_3}{x_1}\right)^2 \\ \dot{x}_3 = -\frac{R}{L} x_3 + \frac{2C}{L} \left(\frac{x_2 x_3}{x_1^2}\right) + \frac{1}{L} u \end{cases} \quad (4)$$

Giả sử điểm cân bằng x_e của hệ thống là nghiệm của hệ phương trình (5):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \\ \dot{x}_3 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Từ (4) và (5) suy ra: $x_e = [x_{1e} \ 0 \ x_{3e}]^T$, (6)

với x_{3e} thỏa mãn phương trình sau:

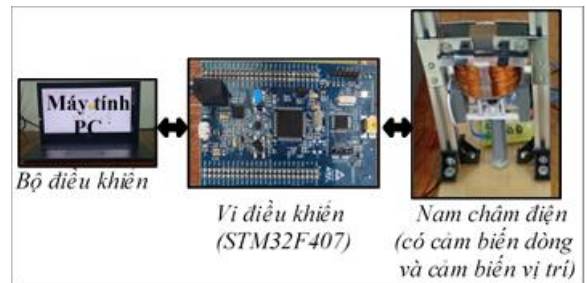
$$x_{3e} = x_{1e} \sqrt{\frac{g_c m}{C}}. \quad (7)$$

Gọi $x_d = [x_{1d} \ x_{2d} \ x_{3d}]^T$ là vec-tơ trạng thái mong muốn.

Mục tiêu của nghiên cứu này là điều khiển được trạng thái x_1 của hệ thống về trạng thái mong muốn x_{1d} đã đặt trước.

2.2. Xây dựng mô hình phần cứng

Cấu trúc phần cứng tổng quát hệ thống nâng vật trong từ trường được xây dựng và mô tả ở Hình 2. Theo đó, máy tính (PC) được sử dụng để thực thi giải thuật điều khiển hồi tiếp trạng thái LQG. Bộ điều khiển LQG được thiết kế và trình bày chi tiết ở mục 2.3. Bo mạch vi điều khiển STM32F407 thông qua module giao tiếp USB/UART được dùng để xử lý dữ liệu truyền nhận với máy tính và với nam châm điện. Thông tin ở Bảng 1 cho thấy bo mạch STM32F407 có giá thành rẻ phù hợp trong nghiên cứu thử nghiệm và giảng dạy, nên nó được chọn để xây dựng mô hình phần cứng kết nối đối tượng điều khiển. Đối tượng điều khiển là nam châm điện kết hợp cảm biến vị trí và mạch cảm biến dòng điện để điều khiển vị trí viên bi sắt. Thông tin trạng thái đo được từ các cảm biến là tín hiệu phản hồi về bộ điều khiển nhờ sự kết nối truyền thông với bo vi điều khiển STM32F407 đưa về máy tính xử lý.



Hình 2. Cấu trúc phần cứng hệ thống

Các thiết bị và linh kiện chính được sử dụng bao gồm: Nguồn điện áp DC, Máy tính PC, bo vi điều khiển STM32F407 Discovery, cảm biến đo vị trí bằng hồng ngoại RPR 220, nam châm điện và viên bi sắt, module truyền thông USB UART TTL FT232RL. Nam châm điện được cấu tạo từ cuộn dây đồng có đường kính 0,7 mm quấn quanh lõi thép để tạo ra hệ số tự cảm là 1,38 H. Các thông số chi tiết của nam châm điện được trình bày trong Bảng 2, với vị trí ban đầu của viên bi sắt là 0,025 (m). Hình 3 là mô hình thực nghiệm của hệ thống đã được xây dựng hoàn chỉnh.



Hình 3. Mô hình thực nghiệm hệ thống

Bảng 2. Thông số thiết kế của nam châm điện

Thông số	Giá trị Đơn vị
Số vòng dây quấn	2136 Vòng
Đường kính dây đồng	0,7 mm
Điện trở cuộn dây	29,1 Ω
Dòng điện tối đa	0,84 A
Độ từ cảm cuộn dây	1,38 H
Hằng số lực điện từ	$2,6 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2/\text{A}^2$
Kích thước nam châm điện	45 x 25 x mm x mm
	70 x mm
Khối lượng viên bi sắt	15 g

2.3. Thiết kế bộ điều khiển LQG

2.3.1. Bộ điều khiển LQR (Linear-Quadratic-Regulator)

Một cách tổng quát, đối tượng tuyến tính bậc n được mô tả bởi hệ phương trình (Ogata, 2010):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \tag{8}$$

Trong đó:

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ là véc-tơ trạng thái.

$u(t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]^T$ là véc-tơ tín hiệu điều khiển.

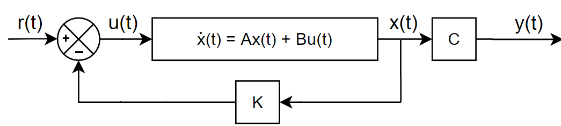
A là ma trận trạng thái, và B là ma trận ngõ vào.

Bộ điều khiển LQR tính toán tín hiệu điều khiển u để tối thiểu hóa hàm mục tiêu dạng toàn phương:

$$J = \int_0^\infty (X^T Q X + Ru^2) dt \tag{9}$$

Trong đó: Q là ma trận bán xác định dương, và $R > 0$ chứa các hệ số được chọn trước.

Tín hiệu điều khiển $u(t) = r(t) - Kx$ được thiết kế theo nguyên lý phản hồi trạng thái như Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ điều khiển phản hồi trạng thái

Kết hợp giữa (8) và tín hiệu điều khiển $u(t)$, giả sử $r(t) = 0$, ta được:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t), \tag{10}$$

với K được lấy ra từ biểu thức:

$$J = K = R^{-1}B^T P. \tag{11}$$

Và P là nghiệm của phương trình đại số Riccati:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0. \tag{12}$$

Hàm Hamilton để tìm lời giải tối ưu:

$$H = \frac{1}{2} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] + \lambda^T(t) [Ax(t) + Bu(t)]. \tag{13}$$

Điều kiện cần để có lời giải tối ưu là phương trình đồng trạng thái:

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H}{\partial x} = -Qx(t) - A\lambda(t) \tag{14}$$

có điểm dừng: $\frac{\partial H}{\partial u} = Ru(t) + B^T \lambda(t) = 0 \tag{15}$

$$\Rightarrow u(t) = -R^{-1}B^T \lambda(t). \tag{16}$$

Thay (16) vào (8), ta được:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BR^{-1}B^T \lambda(t). \tag{17}$$

Kết hợp (17) và (14), ta được:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{\lambda}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ \lambda(t) \end{bmatrix}. \tag{18}$$

Giải phương trình vi phân trên ta tìm được $x(t)$ và $\lambda(t)$. Sau đó, ta thay $\lambda(t)$ vào (16) để tìm được lời giải tối ưu.

Lúc này ta được luật điều khiển tối ưu:

$$u^*(t) = -K(t)x(t) \tag{19}$$

Trong đó, $K(t) = R^{-1}B^T P(t)$, $P(t)$ là nghiệm bán xác định dương của phương trình Riccati:

$$\dot{P} = PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P. \tag{20}$$

Từ lý thuyết đã nêu ở trên, bộ điều khiển LQR được thiết kế cho hệ nâng vật trong từ trường.

Tuyến tính hóa hệ thống nâng vật trong từ trường ở lân cận điểm cân bằng $x_e = [x_{1e} \ 0 \ x_{3e}]^T$ với x_{3e} thỏa mãn điều kiện $x_{3e} = x_{1e} \sqrt{\frac{gcm}{C}}$.

Từ hệ phương trình phi tuyến (4), mô hình không gian trạng thái tuyến tính hóa của hệ được viết là

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u} \\ \tilde{y} = C\tilde{x} \end{cases} \tag{21}$$

Trong đó:
$$\begin{cases} \tilde{x} = x - x_e \\ \tilde{y} = y - y_e \\ \tilde{u} = u - u_e \end{cases}$$

Các ma trận trạng thái của hệ tuyến tính hóa là

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 2Cx_{3e}^2 & 0 & -2Cx_{3e} \\ mx_{1e}^3 & 0 & -mx_{1e}^2 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ L \end{bmatrix};$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0].$$

Hệ thống nâng vật trong từ trường có thể được điều khiển với bộ LQR đã thiết kế (Benomair & Tokhi, 2016). Tuy nhiên, trong thực nghiệm hệ thống có độ phi tuyến cao nên cần sự phản hồi đầy đủ trạng thái, tức là có thể đo được 3 biến trạng thái vị trí, vận tốc của vật và cường độ dòng điện của hệ thống. Do đây là một phương pháp điều khiển tối ưu nên rất dễ bị ảnh hưởng từ các điều kiện ban đầu được thiết lập, sự sai lệch trong các giá trị tham số hệ thống và nhiễu. Do đó, bộ lọc Kalman được đề xuất để ước lượng các biến trạng thái của hệ thống.

2.3.2. Bộ lọc Kalman cho bộ điều khiển LQR

Bộ lọc Kalman là thuật toán sử dụng chuỗi các giá trị đo lường có nhiễu và sai số trong một khoảng thời gian xác định để ước lượng dự báo và hiệu chỉnh biến trạng thái để tăng độ chính xác (Brown & Hwang, 1997), (Duy và ctv., 2018). Bộ lọc Kalman được đề xuất từ năm 1960 bởi giáo sư Kalman, bộ lọc này thực hiện phương pháp truy hồi đối với chuỗi các giá trị đầu vào và đầu ra có nhiễu, nhằm tối ưu hóa giá trị ước lượng trạng thái của hệ thống (Nguyen et al., 2018).

Xét hệ phương trình trạng thái có bao gồm nhiễu:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + w(t) \\ y(t) = Cx(t) + v(t) \end{cases} \quad (22)$$

Trong đó: $w(t)$ là đại diện nhiễu hệ thống, $v(t)$ là đại lượng nhiễu ở ngõ ra.

Giả sử nhiễu hệ thống và nhiễu ngõ ra có phân bố Gauss, không tương quan, có trị trung bình bằng 0 và hiệp phương sai là

$$E[ww^T] = Q_N; \quad E[vv^T] = R_N. \quad (23)$$

Phương trình trạng thái và phương trình ngõ ra ước lượng dùng bộ lọc Kalman được viết là

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = [A\hat{x}(t) + Bu(t)] + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (24)$$

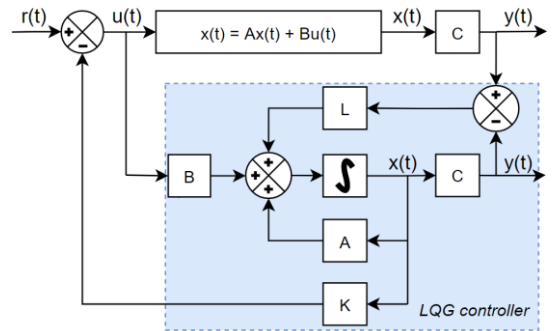
Trong đó, L là độ lợi của bộ lọc Kalman:

$$L = PC^T R_N^{-1} \quad (25)$$

Với P là nghiệm của phương trình Ricatti:

$$AP + PA^T - PC^T R_N^{-1} CP + Q_N = 0. \quad (26)$$

Kết hợp bộ điều khiển LQR với bộ lọc Kalman ta sẽ có được bộ điều khiển LQG. Hình 5 là mô tả sự kết hợp của bộ điều khiển LQR và bộ lọc Kalman, trạng thái ngõ ra của hệ thống sẽ được so sánh với bộ ước lượng dùng bộ lọc Kalman, sau đó trọng số K của bộ điều khiển LQR sử dụng các thông số trạng thái ước lượng đó để đưa vào điều khiển hệ thống.



Hình 5. Sơ đồ mô tả bộ điều khiển LQG

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mô hình thực nghiệm đã được hoàn thiện như trình bày ở Hình 3, bộ điều khiển LQG được tích hợp trong MATLAB\Simulink từ máy tính để xử lý số liệu và tính toán xuất tín hiệu điều khiển.

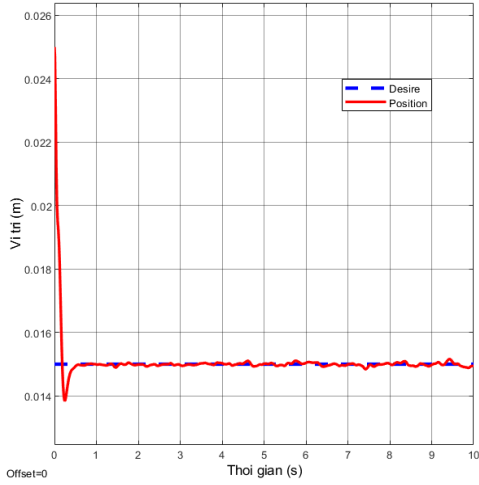
Khi cấp nguồn DC thích hợp cho hệ thống và kết nối với máy tính chứa bộ điều khiển trên phần mềm MATLAB, bộ vi điều khiển đọc thông số cảm biến để đưa về tính toán trên máy tính, và máy tính sẽ tính toán tín hiệu điều khiển là mức điện áp truyền qua nam châm điện để điều khiển dòng điện qua cuộn dây tạo lực điện từ hút vật là viên bi sắt ổn định ở vị trí cân bằng mong muốn.

3.1. Kết quả mô phỏng

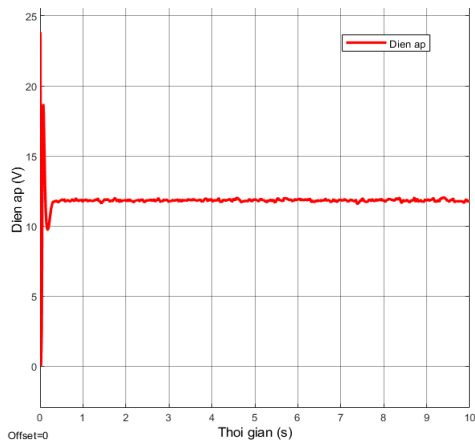
Hệ nâng bi trong từ trường đã được xây dựng và mô phỏng thử nghiệm trên MATLAB\Simulink với bộ điều khiển đã thiết kế. Vị trí cân bằng mong muốn của viên bi đã được đặt tại 0,015 (m) và các thông số mô phỏng được chọn như ở Bảng 2 đã thiết kế cho mô hình thực nghiệm. Lúc này véc-tơ trạng thái của hệ thống mong muốn là $x_e = [0,015 \quad 0 \quad 0,356]^T$.

Đáp ứng ngõ ra là vị trí của viên bi sắt được điều khiển (position) ở Hình 6 cho thấy hệ thống mô phỏng đáp ứng tốt với bộ điều khiển LQG và sai số xác lập gần như bằng 0 khi có tín hiệu nhiễu ở ngõ

ra vị trí vật được điều khiển. Thời gian xác lập của hệ thống khoảng 0,7 (giây). Hình 7 là tín hiệu điện áp từ ngõ ra của bộ điều khiển.



Hình 6. Đáp ứng vị trí của vật được điều khiển

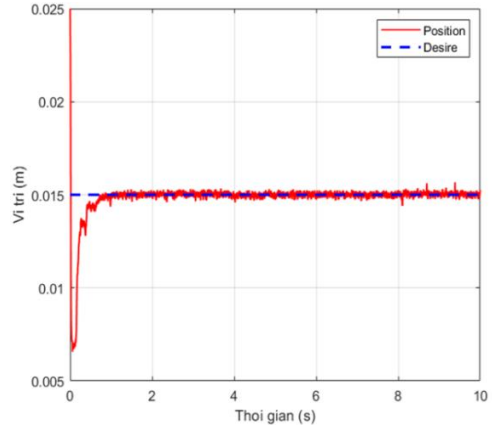


Hình 7. Tín hiệu điện áp điều khiển của hệ

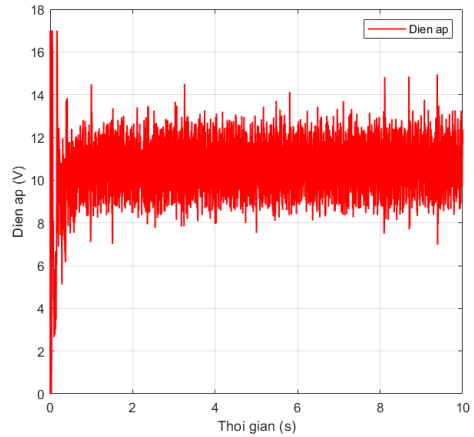
3.2. Kết quả thực nghiệm

Từ kết quả mô phỏng trên, bộ điều khiển LQG đã được thử nghiệm trên mô hình thực nghiệm để kiểm chứng thông số bộ điều khiển đã thiết kế. Với vị trí cân bằng được đặt tại 0,015 (m), kết quả đáp ứng như Hình 8. Hình 9 là tín hiệu điện áp điều khiển trên thực nghiệm hệ thống tại vị trí cân bằng 0,015 (m).

Đáp ứng ngõ ra của hệ thống có thời gian xác lập vào khoảng 0,9 (giây), sai số xác lập gần như không có và vị trí mong muốn của viên bi được giữ ổn định.



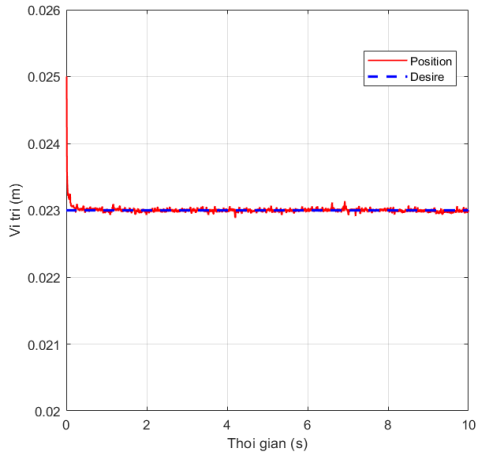
Hình 8. Vị trí của vật được điều khiển trong thực nghiệm tại 0,015 m



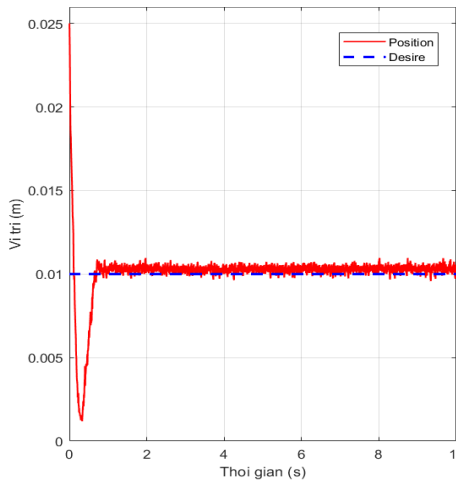
Hình 9. Tín hiệu điều khiển của hệ thống trong thực nghiệm

Ngoài ra, hệ thống cũng đã được khảo sát tính ổn định thêm tại một số vị trí mong muốn khác của vật trong từ trường để kiểm tra đáp ứng của bộ điều khiển đã thiết kế. Kết quả ở Hình 10 (vị trí vật là 0,023 m) và ở Hình 11 (vị trí vật là 0,01 m) cho thấy đáp ứng hệ thống vẫn được giữ ổn định.

Ở vị trí cân bằng mong muốn là 0,023 m (trường hợp 2), hệ thống cho đáp ứng ngõ ra cũng gần như không có sai số xác lập và có phần tốt hơn ở vị trí cân bằng 0,015 m (trường hợp 1) với thời gian xác lập ở trường hợp 2 là khoảng 0,35 giây.



Hình 10. Đáp ứng vị trí của vật trong thực nghiệm tại 0,023 m



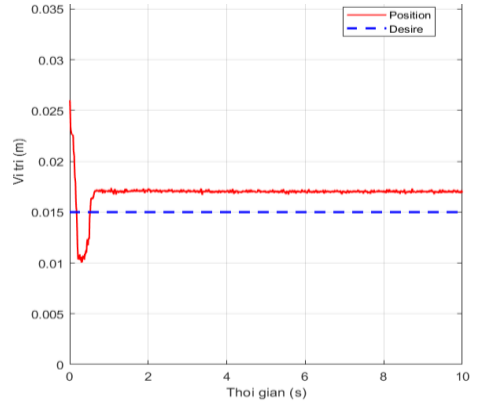
Hình 11. Đáp ứng vị trí của vật trong thực nghiệm tại 0,01 m

Thông qua tín hiệu ngõ ra ở hai trường hợp trên, kết quả cho thấy được biên độ nhiễu của cảm biến ở trường hợp 2 được giảm đáng kể so với trường hợp 1 (biên độ nhiễu giảm gần 20%). Nguyên nhân của kết quả này là do việc bố trí cảm biến của hệ thống, khi khoảng cách giữa nam châm điện và vật càng xa thì đồng nghĩa với việc vật được điều khiển lúc này nằm càng gần cảm biến. Tức là cảm biến đọc được vị trí vật ổn định hơn từ đó việc điều khiển trở nên chính xác hơn.

Kết quả điều khiển hệ thống đối với vị trí cân bằng mong muốn là 0,01 (m) cũng bị ảnh hưởng bởi sai số đo đạt vị trí vật (Hình 11). Lúc này sai số xác lập khoảng 4%, thời gian xác lập khoảng 1 giây.

Ngoài ra, để khảo sát tính bền vững và ổn định của bộ điều khiển, hệ thống cũng được thử nghiệm

với sự tăng thêm đến 10% khối lượng vật được nâng. Vị trí cân bằng mong muốn được đặt tại 0,015 m. Kết quả thực nghiệm ở Hình 12 cho thấy bộ điều khiển có thể giữ cho vật ổn định và không có dao động, tuy nhiên lúc này vị trí vật có sai số xác lập vào khoảng 13%.



Hình 12. Đáp ứng ngõ ra của hệ thống thực tế khi khối lượng viên bi tăng 10%

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

4.1. Kết luận

Với việc sử dụng bộ vi điều khiển STM32F407 giá thành tương đối rẻ hợp lý và tốc độ xử lý dữ liệu nhanh, kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đáp ứng được mục tiêu điều khiển. Hệ thống hoàn toàn sử dụng được cho mục đích nghiên cứu và giảng dạy các học phần điều khiển, gắn kết lý thuyết vào trong mô hình thực nghiệm. Kết quả mô phỏng điều khiển trên MATLAB\Simulink cho thấy đáp ứng của hệ thống ổn định dưới tác động của nhiễu ở ngõ ra (vị trí vật). Phương pháp điều khiển LQG được thiết kế đã giữ được vật ở vị trí mong muốn đặt trước trong thực nghiệm. Ở phương pháp này, bộ lọc Kalman được dùng để ước lượng các biến trạng thái hệ thống (vị trí, vận tốc của vật, cường độ dòng điện đi qua nam châm điện) trong khi thực nghiệm chỉ có thể đo được một biến trạng thái là vị trí của vật. Do đó, độ chính xác của cảm biến vị trí vật cũng phần nào ảnh hưởng trực tiếp đến đáp ứng của hệ thống.

Tuy nhiên, khi tăng nhiễu từ bên ngoài bởi việc thay đổi từ 10% khối lượng bi sắt trở lên thì sai số xác lập vẫn còn trên 10%, chưa được giảm thiểu.

4.2. Kiến nghị

Từ những kết quả và hạn chế của nghiên cứu này, hướng phát triển tiếp theo được đề xuất là:

- Khắc phục sai số đo lường từ cảm biến để điều khiển chính xác hơn khi vật cách xa cảm biến.

– Tiếp tục nghiên cứu và thử nghiệm với các bộ điều khiển khác có các biến trạng thái được ước lượng bằng bộ lọc Kalman đã thiết kế cho hệ thống. Đề xuất cụ thể là có thể áp dụng phương pháp điều

khiển thích nghi (Zhao et al., 2014), (Duy và ctv, 2018), điều khiển trượt, hoặc một số giải thuật điều khiển thông minh như: mạng nơ-ron nhân tạo, mờ (De et al., 2017),... để tăng tính ổn định và bền vững của hệ thống dưới tác động của nhiễu từ bên ngoài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Barie, W. & Chiasson, J. (1996). Linear and non-linear state-space controllers for magnetic levitation. *International Journal of Systems Science*, 27(11), pp. 1153-1163.
- Kharaajoo, M. J., Rahmati, A. & Farzan Rashidi, F. (2003). Steering control of an automatic drive using predictive control strategy. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics*, pp. 828-831, IEEE, 2003. Doi: 10.1109/ICSMC.2003.1243917
- Al-Muthairi, N. F. & Zribi, M. (2004). Sliding mode control of a Magnetic Levitation System. *Mathematical Problems in Engineering*, 2, 93-107.
- Silva, B. E. & Barbosa, R. S. (2021). Experiments with Neural Networks in the Identification and Control of a Magnetic Levitation System Using a Low-Cost Platform. *Applied Sciences*, 11(6), 2535. <https://doi.org/10.3390/app11062535>.
- Pujol-Vázquez, G., Vargas, A.N., Mobayen, S. & Acho, L. (2021). Semi-Active Magnetic Levitation System for Education. *Applied Sciences*, 11(12), 5330. <https://doi.org/10.3390/app11125330>.
- Subrata, R. H., Hardenberg, J. L. & Gozali, F. (2017). The use of PID controller to get the stable floating condition of the objects in magnetic levitation system. *15th International Conference on Quality in Research (QIR): International Symposium on Electrical and Computer Engineering*, pp. 321-324. Doi: 10.1109/QIR.2017.8168504
- Suraj, G., Jonathan L., Sukanta D. & Pabitra K. B. (2018). Closed Loop Control Of Active Magnetic Bearing Using PID Controller. *International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, pp. 686-690. Doi: 10.1109/GUCON.2018.8675123
- Dolga, V. & Dolga L. (2007). Modeling and Simulation of a Magnetic Levitation System. *Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume VI (XVI).
- Brown, R. G., & Hwang, P. Y. C. (1997). Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. *Third Edition by John Wiley & Sons, Inc.* New York, pp. 190 - 391.
- Ahmad, I. & Javaid, M. A. (2010). Nonlinear Model & Controller Design for Magnetic Le- vitation System. *International Conference on signal Processing, robotics and automation*, University of Engineering and Technology Taxila Pakistan.
- Ngôn, N. C., Tùng, P. T. & Nghĩa, D. H. (2011). Điều khiển trượt dùng mạng nơron hệ nâng vật bằng từ trường. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 17b, 140-147.
- Thanh, T. N., Trí, H. M. & Nghiê, N. C., (2014). Thiết kế bộ điều khiển trượt cho hệ thống nâng của tàu đệm từ trường. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 32, 57-64.
- Ogata, K. (2010). Modern control engineering. *Prentice Hall, 5th Edition*, pp. 648 - 720.
- Benomair, A. M. & Tokhi, M. O. (2016). Nonlinear full-order observer-based controller design for active magnetic levitation via LQR-feedback linearisation, *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 26(1) 59-67.
- Duy, L. N., Hiếu, P. Đ., Tú, N. A. & Hải, L. V. (2018). Nghiên cứu lọc thích nghi – Kalman cho cảm biến gia tốc trên xe lăn điện, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, số đặc biệt, 42-46.
- Nguyen, V. M., Smolinski, E. C., Benkmann, A., Drewelow, W. & Jeinsch, T. (2018). An application of pressure estimation in minimally invasive surgery. *4th International Conference on Green Technology and Sustainable Development*, IEEE, pp. 658-662.
- Zhao, S. T. & Gao, X. W. (2014). Neural network adaptive state feedback control of a magnetic levitation system. *In Proceedings of the 26th Chinese Control and Decision Conference*, CCDC, pp. 1602-1605
- De, J. R. J., Zhang, L., Lughofe, E., Cruz, P., Alsaedi, A. & Hayat, T. (2017). Modeling and control with neural networks for a magnetic levitation system. *Neurocomputing*, 227, 113–121.