



DESIGN OF DC-DC CONVERTER, DATA ACQUISITION AND FEEDBACK CONTROL FOR PIEZOELECTRIC ACTUATOR: AN EXPERIMENTAL APPROACH

Nguyen Duy Khanh, Cao Van Kien, Nguyen Ngoc Son*

Industrial University of Ho Chi Minh City, No 12 Nguyen Van Bao Street, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 05/08/2024

Revised: 25/10/2024

Accepted: 10/12/2024

Published online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.6>

* *Corresponding author*

Email: nguyenngocson@iuh.edu.vn

Abstract. Piezoelectric actuators (PEA) are gaining increasing attention due to their broad potential applications in fields such as micro-robots, micro-electromechanical systems, and biomedical engineering. However, designing effective control and data acquisition circuits for PEA, along with implementing feedback control algorithms to ensure accurate operation, remains a significant challenge. This paper focuses on the experimental research aspect, presenting a design solution for the control and data acquisition circuit of the PZS001 piezoelectric actuator. The hardware circuit consists of the main functional blocks: a boost converter, a buck converter, signal processing for feedback from the integrated Wheatstone bridge in the PZS001, and a control signal amplifier. The design process involves theoretical calculations, schematic design, component selection, simulation, and practical measurements to evaluate the circuit's performance and reliability. Then, a PID controller is applied to accurately control the displacement position of the PEA system. Experimental control results demonstrate the efficiency and stability of the system, opening up broad application prospects in precision control systems.

Keywords: Piezoelectric Actuators, DC-DC converter, signal processing and amplifier, PZS001 actuator, TI TMS320F28379D.

@ 2024 University of Transport and Communications



THIẾT KẾ BỘ BIẾN ĐỔI DC-DC, THU THẬP DỮ LIỆU VÀ ĐIỀU KHIỂN PHẢN HỒI CHO THIẾT BỊ TRUYỀN ĐỘNG ÁP ĐIỆN: TIẾP CẬN THỰC NGHIỆM

Nguyễn Duy Khanh, Cao Văn Kiên, Nguyễn Ngọc Sơn*

Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh, Số 12 Nguyễn Văn Bảo, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 05/08/2024

Ngày nhận bài sửa: 25/10/2024

Ngày chấp nhận đăng: 10/12/2024

Ngày xuất bản Online: 15/12/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.9.6>

* Tác giả liên hệ

Email: nguyennhocson@iuh.edu.vn

Tóm tắt. Thiết bị truyền động áp điện (PEA) đang nhận được sự quan tâm ngày càng tăng nhờ tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực như robot siêu nhỏ, hệ thống vi cơ điện tử và kỹ thuật y sinh. Tuy nhiên, việc thiết kế mạch điều khiển và thu thập dữ liệu hiệu quả cho PEA, đồng thời triển khai thuật toán điều khiển phản hồi để đảm bảo hoạt động chính xác vẫn là một thách thức đáng kể. Bài báo này tập trung vào khía cạnh nghiên cứu thực nghiệm gồm trình bày một giải pháp thiết kế mạch điều khiển và thu thập dữ liệu cho thiết bị truyền động áp điện PZS001. Mạch phần cứng bao gồm các khối chức năng chính là nâng áp, hạ áp, xử lý tín hiệu hồi tiếp từ cầu Wheatstone tích hợp trong PZS001 và khuếch đại tín hiệu điều khiển. Quá trình thiết kế gồm tính toán lý thuyết, thiết kế mạch nguyên lý và lựa chọn linh kiện, mô phỏng và đo kiểm thực tế để đánh giá về khả năng hoạt động, tính tin cậy của mạch. Sau đó, bộ điều khiển PID được áp dụng để điều khiển vị trí dịch chuyển của hệ PEA. Kết quả điều khiển thực nghiệm đã chứng minh hiệu quả và độ ổn định của hệ thống, mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển chính xác.

Từ khóa: Thiết bị truyền động áp điện, Bộ biến đổi DC-DC, Khuếch đại và xử lý tín hiệu, Thiết bị PZS001, TI TMS320F28379D.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các thuộc tính của vật liệu Piezoelectric được tìm ra năm 1980 [1]. Việc phát hiện các thuộc tính này đến từ thí nghiệm đo điện tích trên một lớp tinh thể khi các tinh thể này chịu một

lực về cơ học. Với sự thay đổi áp suất, hiệu ứng áp điện xuất hiện ngay khi áp một lực cơ học lên bề mặt vật thể. Ngược lại, khi cung cấp điện áp vào cấu trúc tinh thể, các tế bào trong mạng tinh thể này sẽ bị thay đổi về kích thước gây ra sức căng trên bề mặt vật thể. Các ứng dụng chính của vật liệu này đó là cảm biến áp điện [2], [3], và thiết bị truyền động áp điện PEA (Piezoelectric Actuators) [4].

Thiết bị truyền động áp điện PEA đã và đang nhận được nhiều quan tâm to lớn, do có nhiều ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực micro robot [5], [6], [7], hệ vi cơ điện tử [8], [9] và kỹ thuật y sinh [10] và nhiều ứng dụng công nghiệp khác [11]. Do đó, vấn đề xây dựng mô hình thực nghiệm đi từ tính toán lý thuyết, thiết kế sơ đồ nguyên lý đến thiết kế bo mạch, kiểm thử và áp dụng điều khiển thiết bị truyền động áp điện là vấn đề thực tiễn, còn nhiều thách thức.

Để thiết kế bo mạch điều khiển và thu thập dữ liệu cho thiết bị PEA, các khối chức năng chính bao gồm bộ biến đổi DC-DC, khối xử lý tín hiệu từ cầu Wheatstone tích hợp trong PEA, khối khuếch đại tín hiệu điều khiển. Các nghiên cứu liên quan đến triển khai một bộ biến đổi nâng áp [12], [13], [14] và hạ áp [15] điều khiển thiết bị truyền động PEA. Các nghiên cứu [16], [17] trình bày thiết kế mạch xử lý tín hiệu cảm biến, lọc nhiễu dùng điện trở, tụ điện cũng như khuếch đại tín hiệu điều khiển dùng OpAmp.

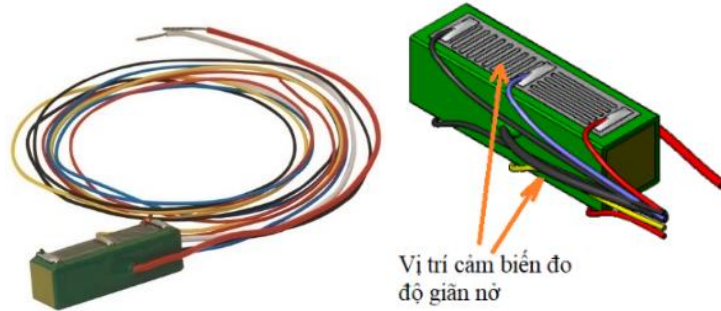
Để điều khiển dịch chuyển thiết bị truyền động áp điện PEA, các nghiên cứu tập trung vào khía cạnh điều khiển hệ hở và điều khiển hệ kín. Với điều khiển hệ hở, đầu tiên cần phải nhận dạng đặc tính phi tuyến và đặc tính trễ của thiết bị PEA. Sau đó, mô hình ngược được sử dụng để thiết kế bộ điều khiển hệ hở [18]. Nhược điểm của phương pháp này đó là khi tín hiệu tham chiếu thay đổi, hoặc dưới tác động của nhiễu thì sai số điều khiển bám sẽ lớn. Để khắc phục hạn chế này, cách tiếp cận điều khiển hệ kín có phản hồi được đề xuất. Các bộ điều khiển phản hồi thường được sử dụng để kiểm soát dịch chuyển hệ truyền động áp điện như PID [19], điều khiển tuyến tính [20], điều khiển trượt (sliding mode control) [21], điều khiển mờ thích nghi [22], điều khiển mờ thích nghi [23]. Trong bài báo này, bộ điều khiển PID được sử dụng để kiểm soát độ dịch chuyển của thiết bị truyền động PEA vì đơn giản, giảm chi phí tính toán và phù hợp để kiểm chứng bo mạch phần cứng.

Tóm lại, bài báo tập trung vào khía cạnh nghiên cứu thực nghiệm bao gồm hai nội dung chính đó là đề xuất giải pháp thiết kế mạch điều khiển và thu thập dữ liệu cho thiết bị truyền động áp điện PZS001 của công ty ThorLabs. Bo mạch bao gồm các khối nâng áp, hạ áp, xử lý tín hiệu hồi tiếp từ cầu Wheatstone tích hợp trong PZS001 và khuếch đại tín hiệu điều khiển. Quá trình thiết kế mạch bao gồm tính toán lý thuyết, lựa chọn linh kiện, thiết kế sơ đồ nguyên lý đến thiết kế bo mạch in, đo kiểm thử để kiểm tra hiệu suất. Sau đó, bo mạch đã thiết kế sẽ kết hợp với bộ xử lý TMS320F28379D để cài đặt hệ truyền động áp điện PEA. Thuật toán PID được lập trình nhúng để điều khiển thiết bị PEA. Các kết quả đo kiểm bo mạch, thực nghiệm điều khiển thiết bị truyền động PEA đã chứng minh hiệu quả và độ ổn định của bo mạch.

2. THIẾT KẾ MẠCH THU THẬP DỮ LIỆU VÀ ĐIỀU KHIỂN THIẾT BỊ PEA

2.1. Thiết bị truyền động áp điện PEA (Piezo-electric Actuator)

Trong phần này, thiết bị truyền động áp điện PZS001 mô tả ở hình 1 được sử dụng để triển khai nghiên cứu. PZS001 là một bộ truyền động áp điện tích hợp một cầu đo biến dạng được sử dụng để đo dịch chuyển. Nhờ thời gian đáp ứng nhanh của cầu đo làm cho thiết bị PZS001 trở nên phù hợp cho các ứng dụng đòi hỏi dịch chuyển chính xác micro mét. Các thông số kỹ thuật của PZS001 được mô tả ở bảng 1.



Hình 1. Hình dạng thực tế của thiết bị piezo PZS001 (nguồn ThorLabs).

Bảng 1. Các thông số kỹ thuật thiết bị PZS001 (nguồn ThorLabs).

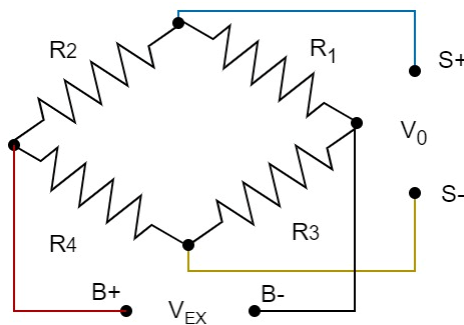
STT	Thiết bị	Thông số kỹ thuật
1	PZS001	Điện áp cấp nguồn: 0-150 VDC Độ dịch chuyển tối đa: $17,4\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ Điện trở cầu đo: 350Ω Gauge Factor: $2 \pm 2\%$ Piezo Capacitance: $1,4\mu\text{F}$ Điện áp ngõ ra khi cầu cân bằng: $\pm 6\text{mV}$

Độ giãn của một vật thể dưới tác dụng của lực được tính bằng công thức:

$$Strain (\epsilon) = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\mu\text{m}/\mu\text{m}) \quad (1)$$

Trong đó: ΔL là độ lệch chiều dài của thiết bị PZS001 (μm); L_0 là chiều dài ban đầu của vật (mm). Công thức tính độ nhạy của phép đo được biểu diễn bởi hệ số phép đo GF (gauge factor), là tỉ số giữa trở kháng với chiều dài, được tính như sau:

$$GF = \left[\frac{\Delta R}{R} \right] = \left[\frac{\Delta R}{R \epsilon} \right] \quad (2)$$



Hình 2. Các chân kết nối cầu Wheatstone.

Trong đó: ΔR là độ thay đổi giá trị điện trở, R là điện trở của vật. Theo thông số nhà sản xuất đưa ra thì hệ số GF của PZS001 là gần bằng 2. Để đo thông số về sự dịch chuyển của piezo, ta sử dụng cầu đo Wheatstone như mô tả ở hình 2, bằng cách cấp một điện áp V_{EX} vào cầu đo, áp dụng định luật Ohm ta có giá trị điện áp ngõ ra V_0 được tính như sau:

$$V_0 = \left[\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4} \right] V_{EX} \quad (3)$$

Trong công thức trên ta thấy rằng khi $R_1/R_2 = R_3/R_4$ thì giá trị điện áp ngõ ra sẽ bằng không, tức là lúc này cầu đo đang được cân bằng. Khi có bất kỳ sự thay đổi trở kháng của thành phần nào thì điện áp ngõ ra sẽ thay đổi theo. Với mô hình cầu đo của PZS001 thì R_2 và R_3 là hai điện trở giả, còn R_1 và R_4 là giá trị trở kháng của cảm biến đo. Ta có công thức tính độ chênh lệch trở kháng của cảm biến như sau:

$$\Delta R = R_G G_F \mathcal{E} \quad (4)$$

Trong đó: ΔR : Độ chênh lệch trở kháng của cảm biến. R_G : Trở kháng thông thường của cảm biến. Khi đó với độ chênh lệch trở kháng ΔR thì công thức (4) được viết lại như sau:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \left[\frac{(R_1 + \Delta R)}{(R_1 + \Delta R) + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + (R_4 + \Delta R)} \right] \quad (5)$$

Giả sử rằng $R_2 = R_4 = R_1 = R_3 = R_G$ và thế công thức (4) vào (5) ta được như sau:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \left[\frac{R_G + \Delta R}{2R_G + \Delta R} - \frac{R_G}{2R_G + \Delta R} \right] = \left[\frac{\Delta R}{2R_G + \Delta R} \right] = \left[\frac{R_G G_F \mathcal{E}}{2R_G + R_G G_F \mathcal{E}} \right] \quad (6)$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = \frac{2V_0}{G_F(V_{EX} - V_0)} \quad (7)$$

Với giá trị $G_F=2$ đã cho bởi nhà sản xuất, V_{EX} đã biết, như vậy với giá trị V_0 đo được ta hoàn toàn tính được độ giãn của PZS001.

2.2. Tính toán, thiết kế và mô phỏng mạch

Mạch điều khiển và thu thập dữ liệu thiết bị PZS001 gồm 4 phần chính: Khối nâng áp; khối hạ áp; khối xử lý tín hiệu cho tín hiệu hồi tiếp từ cầu Wheatstone; khối khuếch đại tín hiệu để cấp tín hiệu điều khiển PZS001. Vì lý do công suất tiêu thụ của PZS001 và các linh kiện khác thấp, nên việc sử dụng nguồn +24VDC là hợp lý và phù hợp với nguồn điện hiện có.

2.2.1. Mạch nâng áp

Dựa vào thông số kỹ thuật thiết bị PZS001 ở bảng 1, mạch nâng áp được thiết kế để cung cấp tín hiệu điều khiển thiết bị truyền động áp điện PZS001 có các yêu cầu thiết kế được trình bày ở bảng 2.

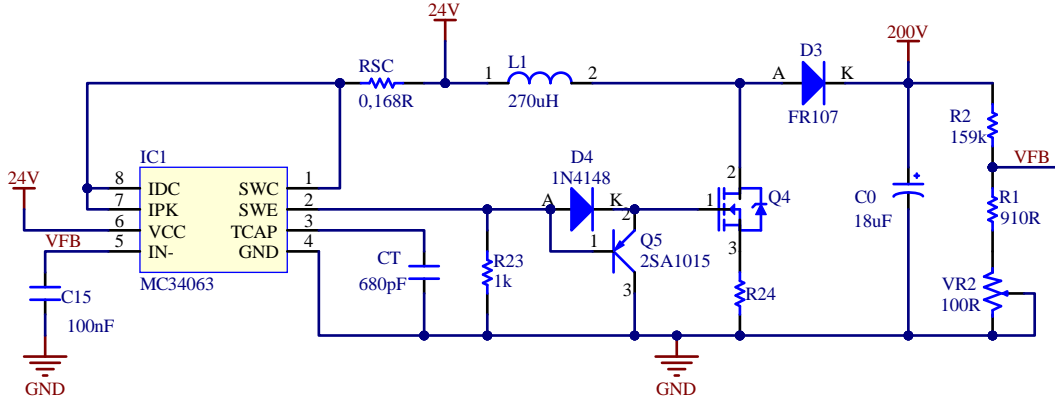
Bảng 2. Bảng thông số thiết kế của mạch nâng áp.

STT	Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Điện áp ngõ ra	Vout	200	V
2	Dòng điện ngõ ra	Iout	100	mA
3	Tần số nhỏ nhất	Fmin	50	kHz
4	Điện áp vào nhỏ nhất	Vin(min)	23	V
5	Điện áp vào	Vin	24	V
6	Độ gợn sóng ngõ ra	Vripple(p-p)	1 (0,5% Vout)	V
7	Điện áp trên diode	V _F	1,3	V
8	Điện áp bão hòa Mosfet	Vsat	0,5	V

Trong đó: Vsat: Điện áp bão hòa của Mosfet; V_F: Điện áp dẫn của diode chỉnh lưu ngõ ra; Vin(min): Điện áp ngõ vào nhỏ nhất; Vout: Điện áp ngõ ra; Iout: Dòng điện ngõ ra; f: Tần số chuyển mạch, được chọn theo giá trị của Vin và Iout; Vripple(pp): Điện áp nhấp nhô đỉnh-đỉnh của ngõ ra.

Với các yêu cầu thiết kế trên, IC MC34063A được lựa chọn với tính năng dễ sử dụng, IC đã có mạch nâng áp bên trong và độ chính xác điện áp ngõ ra là 2%. Thêm vào đó, IC này có

thêm những chức năng khác như hạn chế quá nhiệt, bộ so sánh điện áp, bộ dao động, và bộ điều khiển PWM được giới hạn dòng tải ngõ ra. Sơ đồ nguyên lí mạch nâng áp được mô tả ở hình 3.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lí mạch nâng áp.

Quá trình tính toán thiết kế mạch bao gồm các bước:

Bước 1: Tính toán tỉ số chuyển mạch ton/toff

$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{V_{out} + V_F - V_{in(min)}}{V_{in(min)} - V_{sat}} = \frac{200 + 1,3 - 23}{23 - 0,5} = 7,924 \quad (8)$$

Bước 2: Tính toán chu trình thời gian cho mạch LC (ton(max)+toff)

$$t_{on(max)} + t_{off} = \frac{1}{f_{min}} = \frac{1}{50 \times 10^3} = 20 \quad (\mu s/cycle) \quad (9)$$

Bước 3: Tính toán thời gian ton và toff được suy ra từ bước 1 và bước 2

$$t_{off} = \frac{20 \times 10^{-6}}{7,924 + 1} = 2,241 \quad (\mu s) \quad (10)$$

$$t_{on} = 20 \mu s - 2,241 \mu s = 17,759 \quad (\mu s) \quad (11)$$

Bước 4: Tính toán giá trị tụ điện CT cho bộ dao động

$$C_T = 4 \times 10^{-5} t_{on} = 4 \times 10^{-5} (17,759 \times 10^{-6}) = 710 \quad (\rho F) \quad (12)$$

Chọn giá trị tụ điện phù hợp là tụ 680 pF.

Bước 5: Tính toán dòng tối đa trên Mosfet

$$I_{pk(sw)} = 2I_{out} \left(\frac{t_{on}}{t_{off}} + 1 \right) = 2(100 \times 10^{-3})(7,924 + 1) = 1,785 \quad (A) \quad (13)$$

Bước 6: Tính toán giá trị nhỏ nhất của cuộn cảm dựa trên ton(max) và I_{pk(sw)}

$$L_{min} = \left(\frac{V_{in(min)} - V_{sat}}{I_{pk(sw)}} \right) t_{on} = \left(\frac{23 - 0,5}{1,785} \right) 17,759 \times 10^{-6} = 223,87 \quad (\mu H) \quad (14)$$

Chọn giá trị cuộn cảm phù hợp thực tế là 270 μH .

Bước 7: Tính toán giá trị điện trở hạn dòng R_{sc}

$$R_{sc} = \frac{0,33}{I_{pk(sw)}} = \frac{0,33}{1,785} = 0,168 \quad (\Omega) \quad (15)$$

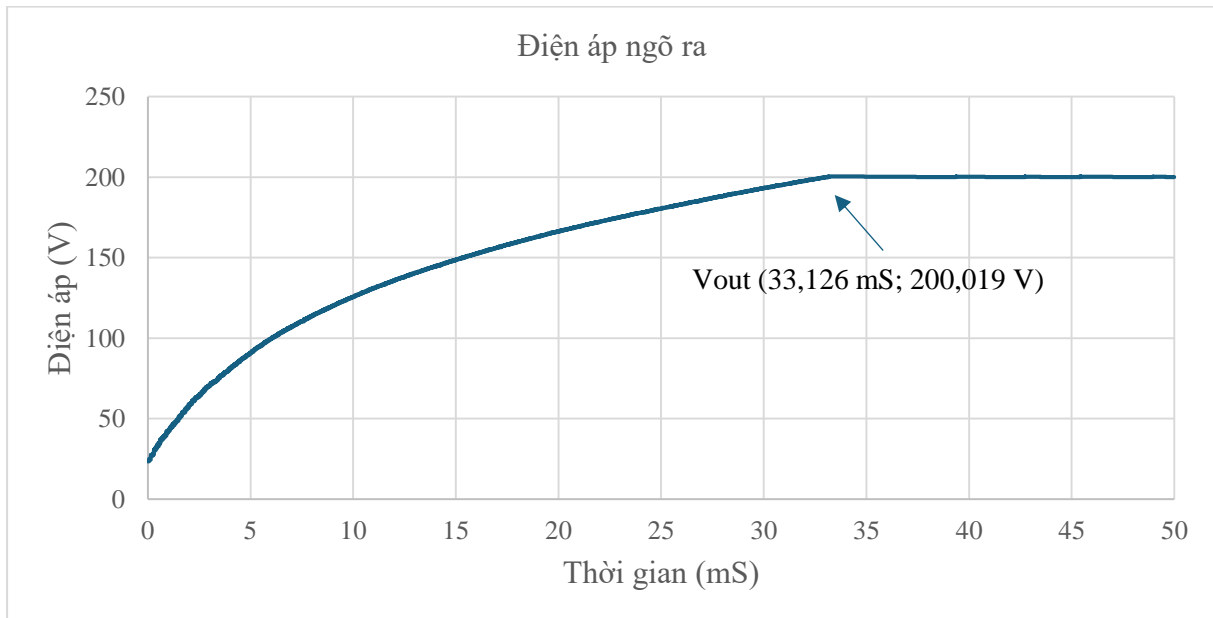
Bước 8: Tính toán giá trị tụ lọc ngõ ra

$$C_o = \frac{I_{out}t_{on}}{V_{ripple(pp)}} = \left(\frac{100 \times 10^{-3} \times 17,759 \times 10^{-6}}{1} \right) = 16 \quad (\mu F) \quad (16)$$

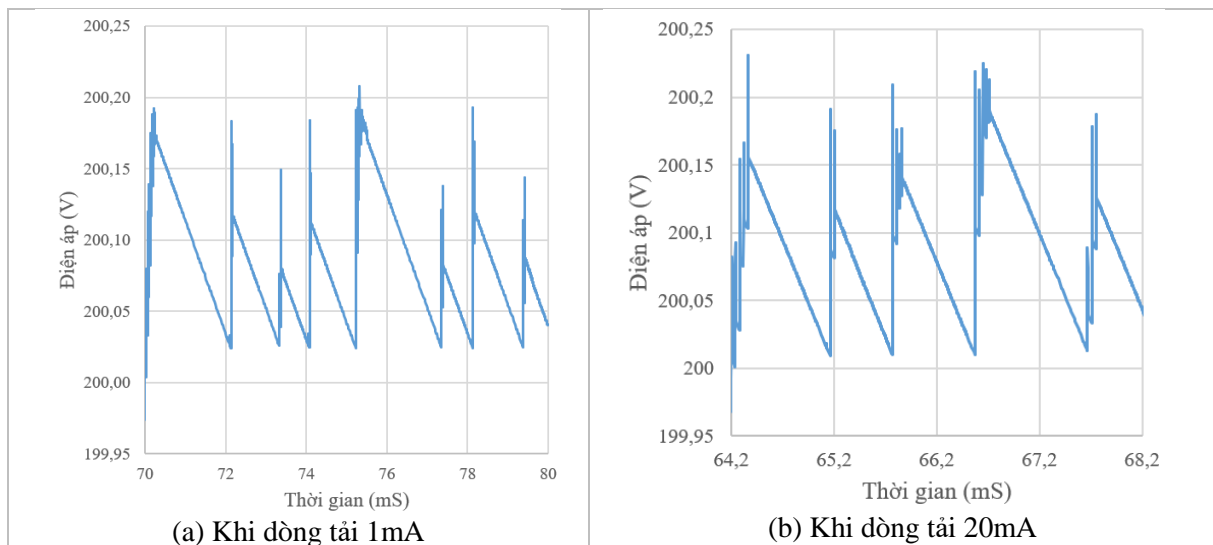
Chọn giá trị tụ lớn hơn và gần nhất là 18 μF .

Bước 9: Tính toán cầu phân áp, hồi tiếp áp ngõ ra 200V, chọn $R_1=1000 \Omega$, tính giá trị R_2 theo công thức như sau:

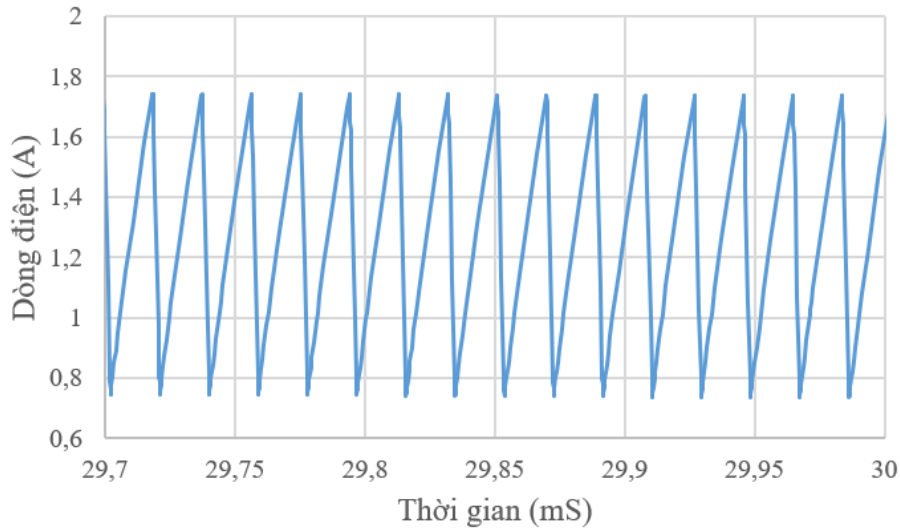
$$R_2 = \frac{R_1}{\left(\frac{V_o}{1,25} - 1\right)} = \frac{1000}{\left(\frac{200}{1,25} - 1\right)} = 159 \quad (k\Omega) \quad (17)$$



Hình 4. Điện áp ngõ ra của mạch nâng áp +200 VDC.



Hình 5. Độ gợn sóng điện áp ngõ ra của mạch nâng áp.

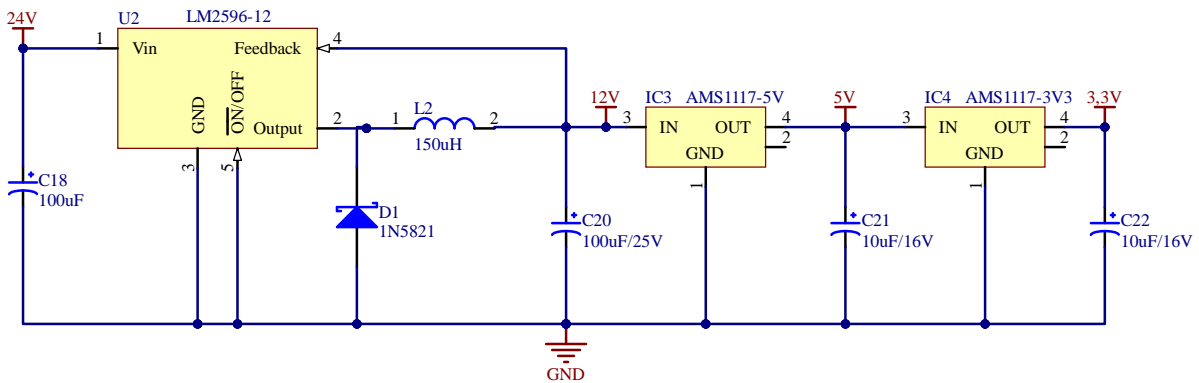


Hình 6. Dòng điện qua cuộn dây L1.

Kết quả mô phỏng mạch nâng áp từ +24V lên +200V như mô tả ở hình 4. Từ kết quả mô phỏng ta thấy điện áp ngõ ra đạt tới mức +200V trong khoảng thời gian từ 33ms đến 64ms phụ thuộc vào dòng tải ngõ ra tương ứng từ 1mA đến 20mA. Hình 5 cho thấy với độ gợn sóng ngõ ra trong khoảng $\pm 0,3V$, (a) biểu thị khi dòng tải 1mA thì độ gợn sóng ngõ ra dao động trong khoảng từ 199,95V đến 200,25 V. (b) biểu thị khi dòng tải 20mA thì độ gợn sóng ngõ ra dao động trong khoảng từ 199,95V đến 200,25 V. Hình 6 cho thấy dòng điện qua cuộn dây Ipeak tối đa khoảng 1,75A.

2.2.2. Mạch hạ áp

Mạch hạ áp được thiết kế để điện áp + 24V giảm xuống thành các điện áp +12V với dòng tải ngõ ra $I_{out(max)}=500mA$. Sơ đồ mạch nguyên lý được trình bày ở hình 7. Trong đó, IC ổn áp LM2596 với dải điện áp ngõ vào rộng từ 5-40V, dòng điện tối đa 3A, tần số xung chuyển mạch 150kHz giúp cho độ ổn áp ngõ ra được tốt hơn.



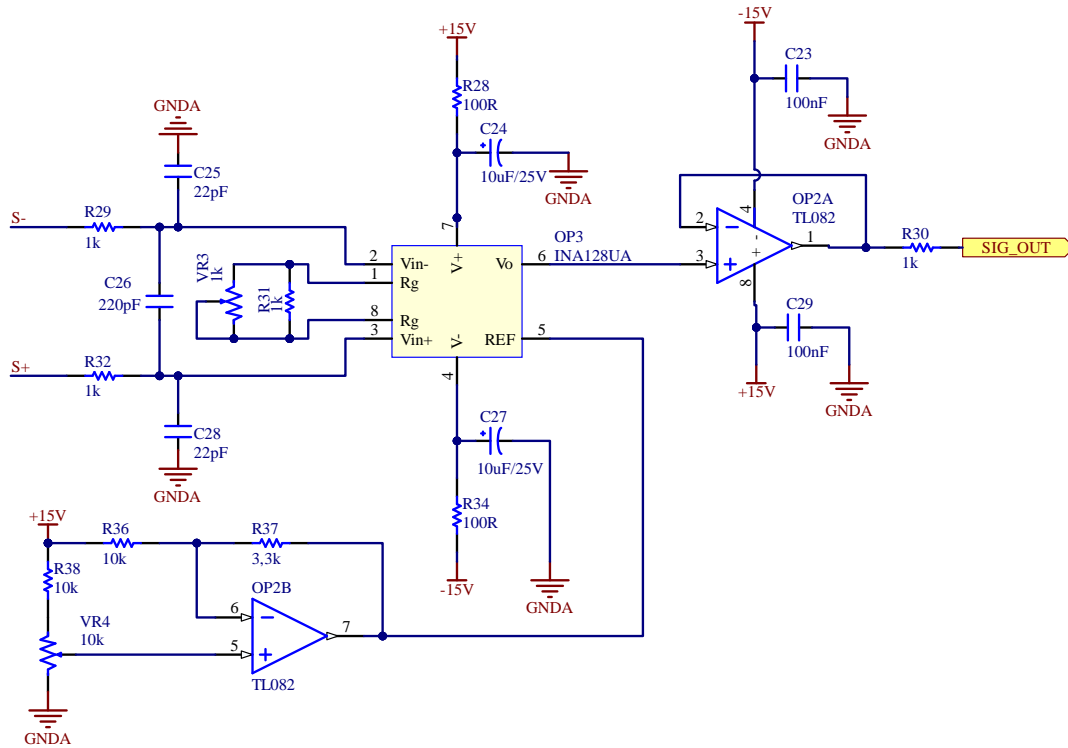
Hình 7. Sơ đồ nguyên lý mạch hạ áp.

Dựa vào datasheet mô tả về cách chọn thông số cuộn cảm lọc ngõ ra, với điện áp ngõ vào $V_{in}=24V$, dòng tải ngõ ra $I_{out(max)}=500mA$, giá trị cuộn cảm tương ứng là $150\mu H$. Tương ứng với giá trị cuộn cảm, giá trị tụ điện ngõ ra là $82\mu F$ (hoặc $100\mu F$) với giá trị điện áp của tụ theo khuyến nghị là gấp 1,5 lần giá trị điện áp ngõ ra. Tiếp theo, chọn giá trị diode schottkey cho mạch hạ áp, giá trị dòng điện trên diode gấp 1,3 lần giá trị dòng tải lớn nhất (I_{out_max}), chọn diode 1N5821 là phù hợp. Ngõ ra +12V của IC LM2596 sẽ được giảm xuống thành các

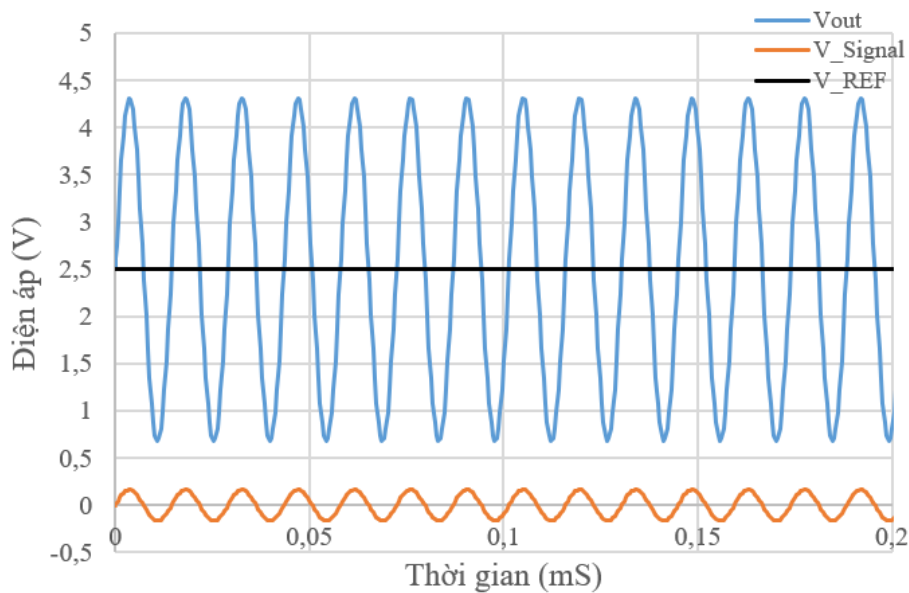
điện áp +5V và +3,3V thông qua IC ổn áp AMS1117.

2.2.3. Khối xử lý tín hiệu sử dụng cầu Wheatstone

Mạch đo điện áp vi sai từ cầu Wheatstone của PZS001 sử dụng op-amp INA128. Đặc điểm của op-amp là tiêu thụ công suất thấp, cung cấp độ lợi từ 1 đến 10000, với độ hoạt động chính xác cao ít bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ ($0,5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$). Sơ đồ nguyên lý mạch xử lý tín hiệu được mô tả ở hình 8, và sơ đồ các chân kết nối của cầu Wheatstone hình 2.



Hình 8. Sơ đồ mạch khối xử lý tín hiệu sử dụng cầu Wheatstone.

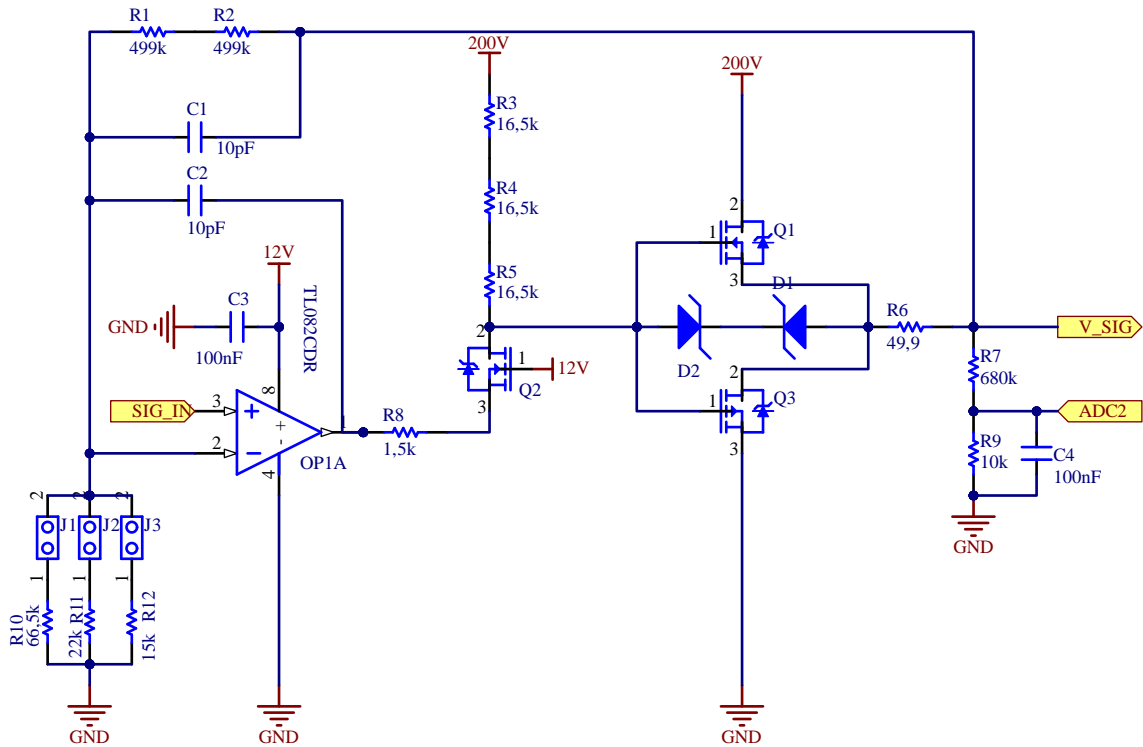


Hình 9. Tín hiệu điện áp ngõ ra của mạch khi PZS001 cho giá trị tối đa.

Trong hình 2, các chân S+ và S- là các tín hiệu hồi tiếp từ cầu Wheatstone, các chân B+ và B- là các chân nguồn +3,3V. PZS001 cho điện áp ngõ ra 6mV – 33mV, như vậy với điện áp nguồn +3,3V thì sẽ cho ra điện áp ngõ ra V_O là 33mV. Điện áp V_O sẽ được đưa vào bộ khuếch đại, sử dụng OP3 để khuếch đại tín hiệu lên 50 lần. Sau đó, tín hiệu này được đưa đến bộ đệm OP2A để tăng trở kháng ngõ ra. Op-amp OP2B được sử dụng để điều chỉnh offset cho op-amp OP3. Đồng thời để giảm thành phần nhiễu điện trong môi trường, một bộ lọc thông thấp bởi các linh kiện: R29, R32, C25, C26 và C28 để loại bỏ nhiễu tần số cao ảnh hưởng đến tín hiệu. Với các giá trị: $R=1k\Omega$, $C=220pF$, thì tần số cắt $f_c = 1/2\pi RC \cong 723 kHz$. Kết quả mô phỏng mạch đã thiết kế được trình bày ở hình 9 cho thấy độ chính xác mạch thiết kế.

2.2.4. Khối khuếch đại tín hiệu điều khiển

Khi nhận được tín hiệu điều khiển từ bộ vi xử lý, tín hiệu này khá nhỏ cần được khuếch đại. Sơ đồ nguyên lý mạch khuếch đại tín hiệu được trình bày ở hình 10. Trong đó, Op-amp OP1A hoạt động như một bộ so sánh và nhận tín hiệu điều khiển từ bộ vi xử lý với điện áp thay đổi từ 0v đến 10 V, đồng thời ngõ ra OP1A sẽ có dạng sóng xung tam giác tại tần số 1kHz.



Hình 10. Sơ đồ mạch khối khuếch đại tín hiệu điều khiển.

Điện áp ngõ ra của mạch V_SIG được đi qua cầu phân áp R_1 , R_2 và $R_{10}/R_{11}/R_{12}$ để chia điện áp 150V xuống thành 10V, 5V và 3V, điện áp này được đưa vào OP1A và được so sánh với tín hiệu input+ (SIG_IN). Với điện áp ngõ ra của OP1A là 0V và +10V, cấp cho Mosfet Q2 tạo ra một nguồn áp ổn định để cấp cho khối khuếch đại điện áp +200V bởi hai Mosfet Q1 và Q3. Tại ngõ ra của mạch được kết nối bởi 2 diode D1 và D2 giúp bảo vệ mạch khi xảy ra trường hợp ngắn mạch. Điện áp điều khiển PZS001 cao nhất là +150V và dòng điều khiển khá nhỏ, dòng điện này phải đủ nạp và xả cho tụ điện của piezo là 1,4 μ F. Giá trị điện tích nạp/xả cho tụ điện này được tính bởi công thức sau:

$$Q = I \times t = C \times V \quad (18)$$

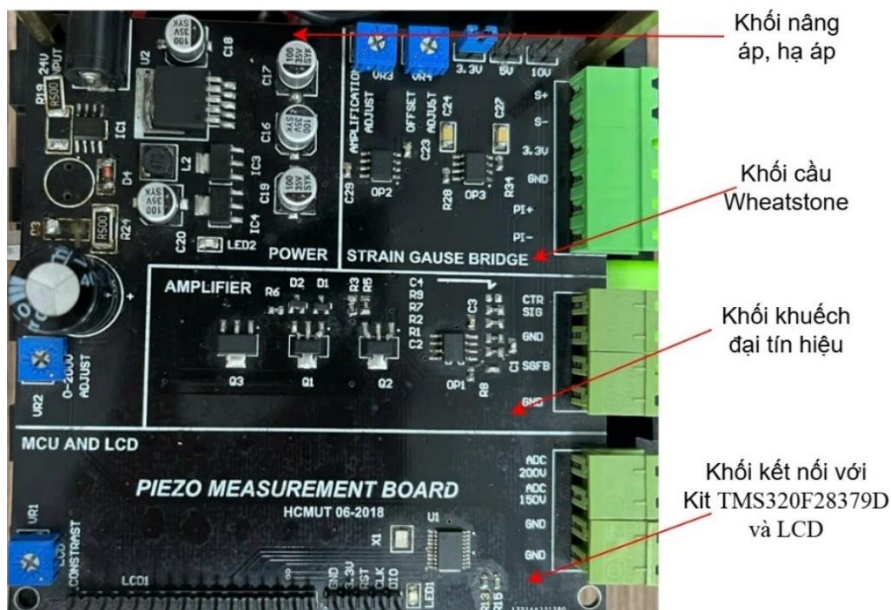
Trong đó: I: dòng nạp/xả. t: thời gian nạp. C: giá trị tụ điện. V: điện áp. Với $t=1ms$, và các

thông số của piezo PZS001: $C=1,4\mu\text{F}$ và $V=150\text{V}$ ta tính được dòng điện như sau:

$$I = \frac{C \times V}{t} = \frac{1,4\mu\text{F} \times 150/1\text{ms}}{1\text{ms}} = 210\text{mA} \quad (19)$$

2.3. Kết quả thực nghiệm

Dựa trên kết quả tính toán lý thuyết, thiết kế mạch nguyên lý và lựa chọn linh kiện ở trên, bo mạch thu thập dữ liệu và điều khiển thiết bị truyền đồng áp điện PEA sau thi công như hình 11. Các kết quả đo kiểm thực tế dạng sóng của mạch nâng áp, dạng sóng giữa ngõ ra và ngõ vào của mạch mô tả ở hình 12. Trong hình 12 (a) là dạng sóng đo được tại chân số 3 của IC1 ở hình 2 – mạch nâng áp. Với dạng sóng đo được là xung tam giác, với biên độ điện áp đỉnh-đỉnh của xung là 704mV, với tần số dao động là 28,44 KHz theo đúng yêu cầu của thiết kế. Dao động tần số này chính là tần số cấp cho IC1 để điều khiển điện áp ngõ ra, tần số này rất quan trọng, nó ảnh hưởng trực tiếp đến thông số các linh kiện trong mạch nâng áp và ảnh hưởng đến điện áp ngõ ra của mạch.

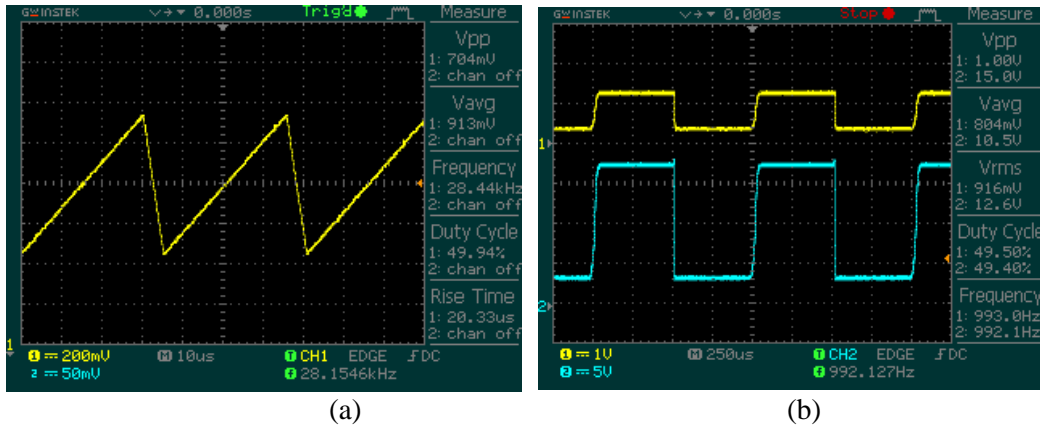


Hình 11. Hình ảnh bo mạch đã thiết kế.

Kết quả đo được trong hình 12 (b) là kết quả thể hiện mối tương quan giữa ngõ vào và ngõ ra của bo mạch điều khiển. Để kiểm tra mạch, tín hiệu ngõ vào là dạng sóng vuông với biên độ điện áp từ 0V đến 10V, tần số 1kHz; được biểu thị bằng kênh 1 của ossilcope, điện áp này đã được thu nhỏ xuống 1/10 so với thực tế để hiển thị được trên ossilcope. Điện áp ngõ ra để điều khiển Piezo, được đo tại kênh 2 của ossilcope, trong hình 12 (b) thể hiện điện áp đỉnh-đỉnh của kênh 2 là 15V tương ứng là 150V với thực tế vì đã được thu nhỏ xuống với tỉ lệ 1/10. Kết quả cho thấy, mạch điều khiển cho Piezo đã hoạt động theo đúng thiết kế, tức là khi cho một tín hiệu điều khiển có điện áp từ 0V đến 10 V thì ngõ ra của mạch sẽ đưa ra một điện áp tương ứng 0V đến 150V để điều khiển mức độ co giãn của thiết bị Piezo.

Tóm lại, chúng tôi đã thiết kế mạch điều khiển nâng áp từ 0 đến 150VDC và mạch thu thập dữ liệu từ Piezo với mức độ nhiễu thấp. Mạch nâng áp từ 24VDC lên 150VDC với dòng điện tải gần 20mA với điện áp nhấp nhô thấp dưới 5%. Mạch khuếch đại nhiễu thấp sử dụng Op-amp có độ khuếch đại với độ nhiễu thấp, loại bỏ được nhiễu phát sinh trong quá trình đo đạc, để có được dữ liệu chính xác. Các dữ liệu đo đạc trên mô hình thực tế được so sánh với những

thông số trong mô phỏng để đánh giá về khả năng hoạt động, tính tin cậy của mạch.

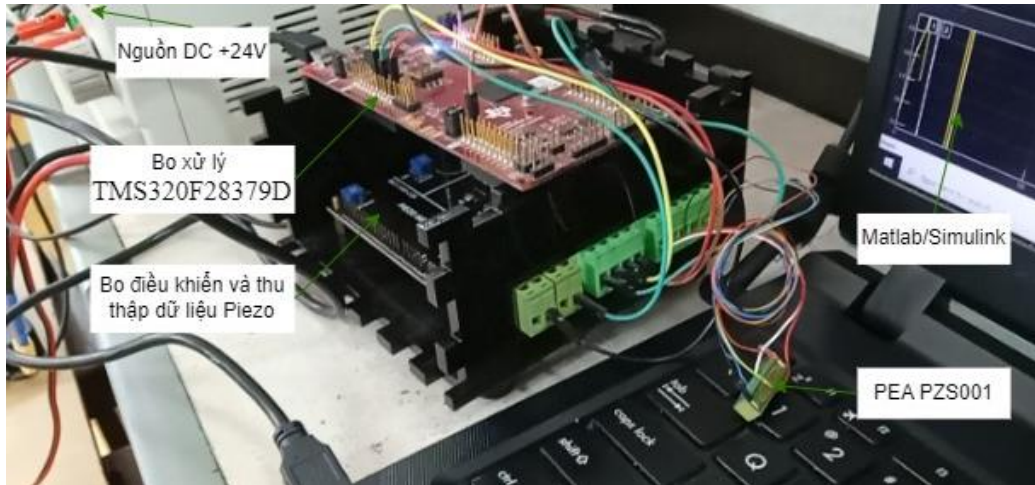


Hình 12. Dạng sóng đo mạch nâng áp (a) và đo được giữa ngõ vào ngõ ra (b).

3. ĐIỀU KHIỂN PID BỘ TRUYỀN ĐỘNG ÁP ĐIỆN

3.1. Cài đặt mô hình thực nghiệm

Hệ truyền động áp điện PEA được cài đặt bao gồm các khối như mô tả hình 13 gồm thiết bị PZS001, mạch điều khiển và thu thập dữ liệu, bo vi xử lý TI TMS320F28379D, máy tính cài đặt Matlab/Simulink để thiết kế chương trình nhúng.



Hình 13. Hình ảnh mô hình thực nghiệm hệ truyền động PEA.

3.2. Kết quả điều khiển thực nghiệm

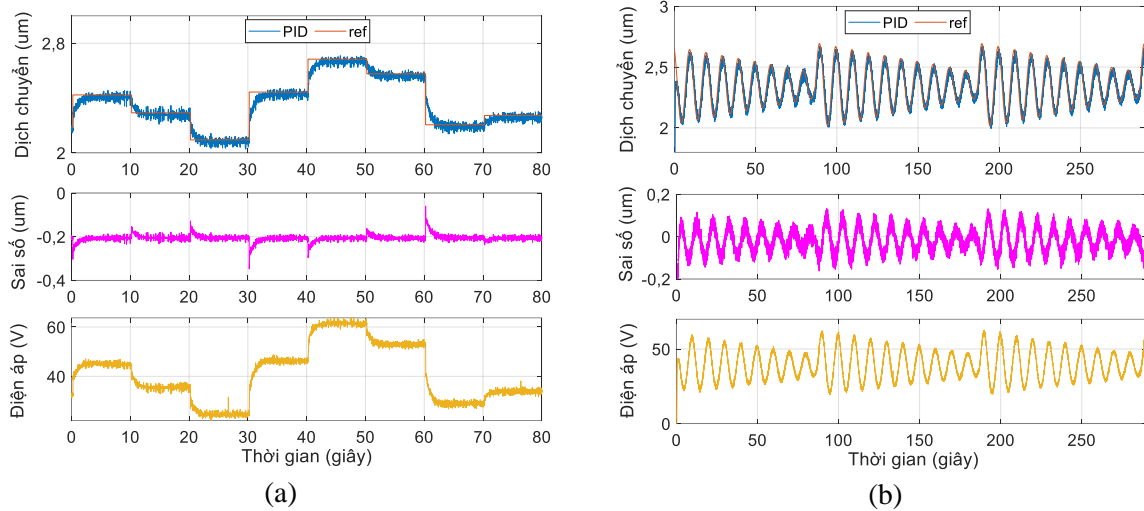
Trong phần này, thuật toán PID được sử dụng để điều khiển độ dịch chuyển của thiết bị truyền động PEA. Chất lượng của bộ điều khiển được đánh giá qua 2 tiêu chí sai số trung bình bình phương MSE (mean squared error) như mô tả công thức (20) và độ lệch chuẩn sai số trung bình NMSE (normalized mean squared error) như mô tả công thức (21).

$$MSE(y_d, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_d - y)^2 \quad (20)$$

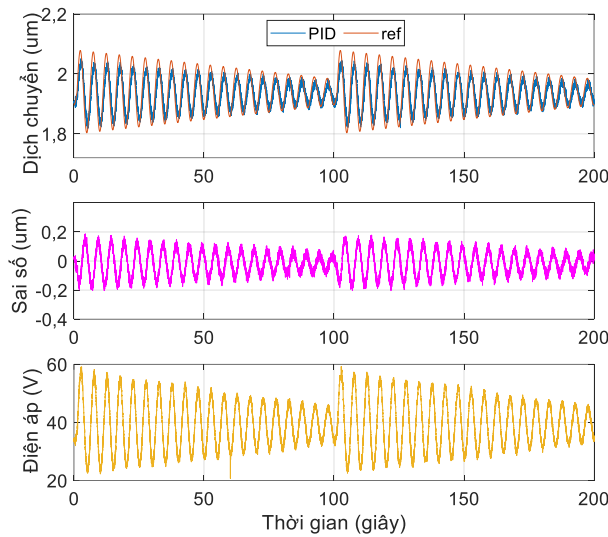
$$NMSE = \frac{MSE(y_d, y)}{MSE(y_d, 0)} \quad (21)$$

Trong đó, n là số mẫu, y là giá trị dịch chuyển của PZS001, y_d là giá trị mong muốn. Các tham số PID được lựa chọn bằng phương pháp thử sai $K_p = 2, K_i = 5$ và $K_d = 0$.

Các tín hiệu tham chiếu được sử dụng để đánh giá gồm tín hiệu dạng nấc có biên độ thay đổi (TH1), tín hiệu dạng sin biên độ thay đổi tần số 0,628 rad/s (TH2) và tần số 1,256 rad/s (TH3). Hình 14 và hình 15 mô tả chất lượng điều khiển bám theo tín hiệu tham chiếu hệ PEA trong các trường hợp TH1, TH2 và TH3. Bảng 3 định lượng sai số điều khiển bám theo các tiêu chí MSE và NMSE.



Hình 14. Chất lượng điều khiển bám trong TH1 (a) và TH2 (b).



Hình 15. Chất lượng điều khiển bám trong TH3.

Bảng 3. Sai số điều khiển bám trong 3 trường hợp.

STT	BĐK PID	
	MSE	NMSE
TH 1	0,0014	2,47e-04
TH 2	0,0094	0,0017
TH 3	0,0068	0,0012

Kết quả trên cho thấy bộ điều khiển PID đã điều khiển vị trí độ dịch chuyển của thiết bị truyền động áp điện PEA. Trong TH 1, tín hiệu đo bám tốt tín hiệu đặt dạng nấc với biên độ thay đổi, và đạt trạng thái xác lập sau khoảng 3 giây, sai số trung bình MSE đạt 0,0014, NMSE đạt $2,47e-04$. Trong TH2, tín hiệu đo bám sát tín hiệu đặt với sai số dao động trong khoảng (-0,16 đến 0,13), sai số trung bình MSE đạt 0,0094 và NMSE đạt 0,0017. Trong TH3 khi tăng tần số tín hiệu tham chiếu thì sai số dao động lớn hơn trong khoảng (-0,2 đến 0,18), sai số trung bình MSE đạt 0,0068 và NMSE đạt 0,0012. Giá trị MSE và NMSE đạt được khá nhỏ, điều đó chứng tỏ bộ điều khiển PID cho chất lượng tốt và có độ ổn định cao.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày các bước từ tính toán lý thuyết, lựa chọn linh kiện, thiết kế sơ đồ nguyên lý và kiểm chứng thực tế bo mạch điều khiển và thu thập dữ liệu cho thiết bị truyền động áp điện PZS001. Các khối chức năng gồm nâng áp, hạ áp, xử lý tín hiệu hồi tiếp từ cầu Wheatstone tích hợp trong PZS001 và khuếch đại tín hiệu điều khiển được thiết kế hoàn chỉnh, có chất lượng đảm bảo. Sau đó, bo mạch đã thiết kế kết hợp với bộ xử lý TI TMS320F28379D được sử dụng để cài đặt hệ truyền động áp điện PEA thực tế. Thuật toán điều khiển phản hồi PID được lập trình nhúng để điều khiển dịch chuyển thiết bị truyền động PEA. Các kết quả thực nghiệm đo kiểm bo mạch, thực nghiệm điều khiển dịch chuyển thiết bị truyền động PEA đã chứng minh hiệu quả và độ ổn định của hệ thống, mở ra triển vọng ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống điều khiển chính xác.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2021.92.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. Uchino, The development of piezoelectric materials and the new perspective, *Advanced Piezoelectric Materials*, Woodhead Publishing, (2017) 1-92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1>
- [2]. Thien, Duong Quang, Nguyen Thi Hai Van, Bond-Graph based simulation of sensors and piezoelectric beams' ranges in the energy recovery circuit, *VNUHCM Journal of Engineering and Technology*, (2019) SI22-SI27. <https://doi.org/10.32508/stdjet.v3iSI1.718>
- [3]. Đào Thanh Toàn, Thiết bị thu thập dữ liệu không dây sử dụng cảm biến áp điện ứng dụng trong đo dao động kết cấu cầu, *Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải*, 71 (2020) 135-144. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.2.8>
- [4]. L.T. Truyen, N.T. Tai, Modeling and controlling a rotary piezo actuator, *Sensors and Actuators A: Physical*, 364 (2023) 114761. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114761>
- [5]. J. Shen et al., Piezoelectric Planar Parallel Microrobot With High Bandwidth and Precision for Micromanipulation, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, (2024) 1-9. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3405347>
- [6]. G. Wu, Z. Wang, J. Zhao, F. Cui, X. Cai, A piezoelectrically driven microrobot using a novel monolithic spatial parallel mechanism as its hip joint, *J Bionic Eng*, 21.2 (2024) 803–820. <https://doi.org/10.1007/s42235-024-00484-9>
- [7]. J. Guan et al., Development of a Monopod Piezoelectric Robot for Small Parasitic Displacement and Planar Cross-Scale Locomotion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 71 (2024) 14653 – 14662. <https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3379637>

- [8]. S.M.R, Rasid, A. Michael, H.R Pota, Dynamic modeling of a piezoelectric micro-lens actuator with experimental validation, *Sensors and Actuators A: Physical*, 356 (2023) 114344. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114344>
- [9]. Q. Su, J. Sun, J. Deng, Y. Liu, S. Zhang, Su, Qi, Implementation of cross-scale plane micro-scratching process driven by hybrid piezoelectric actuation, *Smart Materials and Structures*, 32(9) (2023) 095007. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ace814>
- [10]. Y. Wang, J. Deng, H. Li, X. Tian, W. Chen, Y. Liu, A resonant-type thin plate piezoelectric actuator inspired by koala's locomotion, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 70 (2023) 8235–8243. <https://doi.org/10.1109/TIE.2023.3237874>
- [11]. X. Ma, J. Liu, S. Zhang, J. Deng, Y. Liu, Recent trends in bionic stepping piezoelectric actuators for precision positioning: a review, *Sens Actuators A Phys*, 364 (2023) 114830. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114830>
- [12]. M. Edla, Y. Y. Lim, D. Mikio, R. V. Padilla, A single-stage rectifier-less boost converter circuit for piezoelectric energy harvesting systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 37(1) (2021) 505–514. <https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3103879>
- [13]. Y. Jiang, C. Hu, H. Wu, Y. Lu, X. Liu, J. Jiang, A Battery to 70-V Hybrid Boost Converter Achieving 14-to-20 VCR for Piezoelectric Actuators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 70 (2023) 3857-3861. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2023.3289910>
- [14]. S. Han, H. Jiang, J. Ma, X. Wu, T. Ren, Ultrahigh step-up coupled-inductor DC-DC converter with soft-switching for driving piezoelectric actuators, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 68 (2021) 2902–2906. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3072206>
- [15]. L. Wang, K. Sun, R. Burgos, Planar piezoelectric transformer-based high step-down voltage-ratio DC–DC converter, *IEEE Trans Power Electron*, 37 (2022) 10833–10848. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3163427>
- [16]. H. Dong, T. Li, Z. Wang, Y. Ning, Design and experiment of a piezoelectric actuator based on inchworm working principle, *Sens Actuators A Phys*, 306 (2020) 111950. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.111950>
- [17]. L. Wang, J. Jin, H. Zhang, F. Wang, Z. Jiang, Theoretical analysis and experimental investigation on a novel self-moving linear piezoelectric stepping actuator, *Mech Syst Signal Process*, 135 (2020) 106183. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.06.001>
- [18]. D. V Sabarianand, P. Karthikeyan, T. Muthuramalingam, A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems, *Mech Syst Signal Process*, 140 (2020) 106634. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106634>
- [19]. J. Y. Peng, X. B. Chen, Integrated PID-based sliding mode state estimation and control for piezoelectric actuators, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 19 (2012) 88–99. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2222428>
- [20]. K. R. Kumar, S. Narayanan, Active vibration control of beams with optimal placement of piezoelectric sensor/actuator pairs, *Smart Mater Struct*, 17 (2008) 055008. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/5/055008>
- [21]. S. Zhang, Z. Li, H. Wang, T. Xiong, Fractional order sliding mode control based on single parameter adaptive law for nano-positioning of piezoelectric actuators, *IET Control Theory & Applications*, 15 (2021) 1422–1437. <https://doi.org/10.1049/cth2.12132>
- [22]. J. Ma, M. Xie, P. Chen, S. Yu, H. Zhou, Motion tracking of a piezo-driven cell puncture mechanism using enhanced sliding mode control with neural network, *Control Eng Pract*, 134 (2023) 105487. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105487>
- [23]. C. Napole, O. Barambones, M. Derbeli, I. Calvo, Design and experimental validation of a piezoelectric actuator tracking control based on fuzzy logic and neural compensation, *Fuzzy Sets Syst*, 464 (2023) 108449. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2022.12.005>