

Nguồn phát cho máy hàn siêu âm sử dụng màng rung gồm áp điện ứng dụng hàn trên chất liệu vải không dệt

Trần Văn Hiệp^{1*}, Vũ Minh Thoại¹, Nguyễn Huy Khấn¹, Vũ Xuân Mạnh¹,
Nguyễn Huy Công¹, Nguyễn Đăng Co², Bùi Đình Tứ², Nguyễn Hải Bình³

¹Trung tâm Công nghệ Vi điện tử và Tin học, Viện Ứng dụng Công nghệ, C6, phường Thanh Xuân Bắc, quận Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam

²Khoa Vật lý Kỹ thuật và Công nghệ Nano, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 144 Xuân Thủy, phường Dịch Vọng Hậu, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

³Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, quận Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 3/7/2023; ngày chuyển phản biện 6/7/2023; ngày nhận phản biện 27/7/2023; ngày chấp nhận đăng 31/7/2023

Tóm tắt:

Bài báo trình bày việc thiết kế và chế tạo nguồn phát cho máy hàn siêu âm sử dụng màng rung gồm áp điện ứng dụng hàn trên chất liệu vải không dệt. Một màng rung siêu âm (UVB) được đo đặc khảo sát các thông số làm cơ sở cho việc chế tạo bộ dao động cơ khí cho đầu hàn siêu âm (USTW). Nguồn phát siêu âm (USPG) được chế tạo bằng các linh kiện cao tần và linh kiện công suất để cấp nguồn dao động điện cho UVB. Nguồn phát dao động này phải phù hợp với USTW thì mới có thể hoạt động với hiệu suất tối đa. Do ảnh hưởng của quá trình sản xuất và môi trường sử dụng USTW, nên trong quá trình hoạt động, tần số cộng hưởng (f_r) sẽ bị thay đổi. Vì vậy, USPG cần phải theo dõi tần số của USTW tự động. Việc kết hợp trở kháng của USTW và USPG là rất quan trọng để có thể sử dụng tối đa công suất USPG. Kết quả chế tạo cho thấy, việc sử dụng ngoại vi đếm thời gian độ phân giải cao (HRTIM) để tạo tần số điều khiển cho USPG đạt độ chính xác cao với sai số lớn nhất là 0,006% ở 18401,12 Hz khi được khảo sát ở dải 18-22 kHz. Các thông số về độ trễ tín hiệu điều khiển giữa hai pha và độ rộng xung cũng cho kết quả rất tốt. Mạng phối hợp trở kháng (IM) cũng cho thấy khả năng khai thác tốt USPG khi được so sánh với USPG không sử dụng IM.

Từ khóa: gồm áp điện, hàn siêu âm, nguồn cho máy hàn siêu âm.

Chỉ số phân loại: 2.3

1. Đặt vấn đề

Kỹ thuật chuyển đổi điện năng thành dao động bằng sóng siêu âm được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khác nhau như xử lý nước [1, 2], y tế [3], kiểm tra vật liệu [4], định vị và hướng dẫn [5], hình ảnh quang âm [6]..., một ứng dụng phổ biến sử dụng kỹ thuật này là trong các hệ thống hàn siêu âm. Hàn siêu âm là một kỹ thuật nối nhanh, hiệu quả và không cần chất bổ sung. Mỗi nối được hình thành bằng cách sử dụng năng lượng siêu âm để nóng chảy cục bộ vật liệu liên kết, tạo ra một khớp nối bền và chắc chắn. Quá trình này nhanh hơn nhiều so với các kỹ thuật nối khác, chẳng hạn như hàn điện hoặc hàn khí và không yêu cầu sử dụng các vật liệu bổ sung. Điều này dẫn đến giảm chi phí và tăng năng suất. Do vậy trong những năm gần đây, kỹ thuật hàn bằng công nghệ siêu âm cho các phân tử nhựa, lá kim loại mỏng và vải không dệt đã phát triển nhanh chóng và được ứng dụng nhiều trong công nghiệp sản xuất [7, 8]. Các hệ thống máy hàn siêu âm thường có công suất vài kW và hoạt động ở tần số 20-70 kHz. Trong một hệ thống hàn siêu âm ngoài USPG và USTW thì còn đi kèm với nó là các hệ cơ khí, thủy lực và hệ thống điều áp, tuy nhiên USPG và USTW vẫn là thành phần quan trọng của hệ thống máy hàn. Nghiên cứu của I. Jones (2013) [9] chỉ ra rằng, trong hệ thống hàn siêu âm thì USTW được coi là linh kiện cốt lõi của công nghệ này vì chúng đóng vai trò chuyển đổi năng lượng điện từ USPG thành các rung động cơ học. Tuy nhiên, trong các nghiên cứu khác thì cho rằng, USPG là thiết bị cốt lõi của hệ thống hàn siêu âm công suất cao [10] và

yếu tố quan trọng nhất là khả năng theo dõi tần số của USPG [11, 12]. Ngoài ra các yếu tố khác như: độ phân giải của tần số, hiệu suất truyền tải giữa USPG và USTW cũng đóng vai trò quan trọng trong một thiết bị USPG.

Nghiên cứu này trình bày thiết kế của một thiết bị USPG, bao gồm bộ tạo tần số bằng HRTIM có độ giải cao kết hợp với mạch khuếch đại công suất sử dụng cho khuếch đại dạng sóng cấp nguồn dao động cho USTW; IM được đặt giữa USPG và USTW để tối ưu hiệu suất truyền tải; USPG được tích hợp một phương pháp kiểm soát tần số mới bằng cách sử dụng ngoại vi PWM (Pulse - width modulation) và các Input capture trên vi điều khiển để theo dõi tần số cộng hưởng của USTW một cách chính xác.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

Thiết kế này gồm 5 phần chính bao gồm: đo đặc khảo sát vòng gồm áp điện và trở kháng UTW (Unbalanced termination wave), tạo tần số bằng HRTIM, mạch công suất, IM và theo dõi tần số tự động. Cụ thể, thông số khảo sát vòng gồm áp điện và trở kháng đầu dò siêu âm được đo bằng máy đo chuyên dụng, trong khi bộ khuếch đại công suất và mạng phối hợp được thiết kế với linh kiện bán dẫn công suất lớn. Tần số mạch điều khiển được lập trình thông qua vi xử lý STM32, kết hợp với các mạch xử lý tín hiệu để theo dõi tần số cộng hưởng của đầu dò thông qua độ lệch pha của điện áp và dòng điện.

*Tác giả liên hệ: Email: hieptv58@vnu.edu.vn

Design ultrasonic power generators for welding machines using piezoelectric ceramic materials for welding on non-woven fabrics

Van Hiep Tran^{1*}, Minh Thoai Vu¹, Huy Khan Nguyen¹,
Xuan Manh Vu¹, Huy Cong Nguyen¹, Dang Co Nguyen²,
Dinh Tu Bui², Hai Binh Nguyen³

¹Center for Microelectronics and Information Technology,
National Center for Technological Progress, Ministry of Science and Technology,
C6, Thanh Xuan Bac Ward, Thanh Xuan District, Hanoi, Vietnam

²Faculty of Engineering Physics and Nanotechnology, University of Engineering
and Technology, Vietnam National University, Hanoi,

144 Xuan Thuy Street, Dich Vong Hau Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

³Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology,
18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Received 3 July 2023; revised 27 July 2023; accepted 31 July 2023

Abstract:

This paper presents the design and manufacture of ultrasonic emitters for welding machines using piezoelectric ceramic materials for welding on non-woven fabrics. The ultrasonic vibrating membrane (UVB) used for the transducer is investigated to ensure that there are no cracks in the material structure. These parameters serve as the basis for evaluating the quality of the ultrasonic vibrating membrane in the fabrication of an oscillator for ultrasonic transducer welding (USTW). The ultrasonic power generator (USPG) is made of high-frequency components and power components to supply electrical oscillations to the UVB. This vibrating source must be compatible with the USTW to operate at maximum efficiency. Due to the influence of the manufacturing process and USTW usage environment, after operating for a long time, the resonant frequency (f_r) will be changed. Therefore, the USPG needs to monitor the frequency of the USTW automatically. Matching the impedance of USTW and USPG is very important to get the most out of USPG power. The fabrication results show that the use of high-resolution timer to generate the control frequency for USPG achieves high accuracy, with the largest error of 0.006% at 18401.12 Hz when surveyed in the range of 18 to 22 kHz. The parameters of control signal delay between two phases and pulse width also give very good results. Impedance-matching (IM) networks also show good exploitation of USPG when compared to USPG without IM.

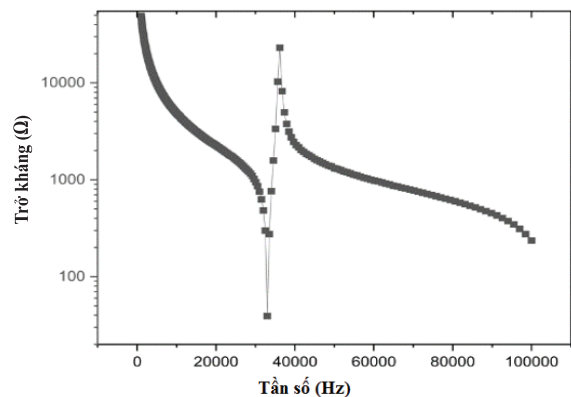
Keywords: piezoelectric ceramic, ultrasonic power generator, ultrasonic welding.

Classification number: 2.3

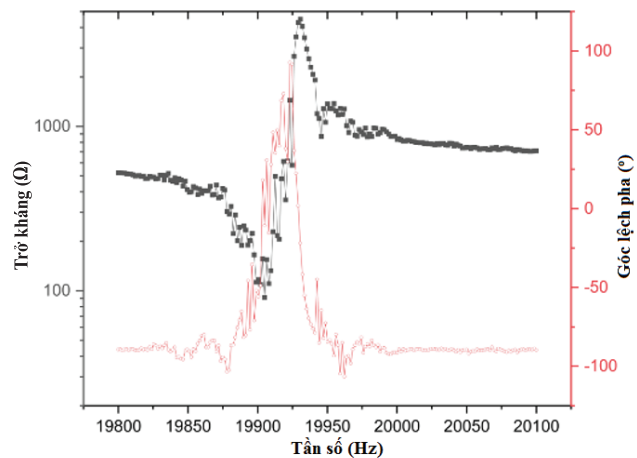
2.1. Đo đặc khảo sát vòng gồm áp điện và trở kháng đầu dò siêu âm

Dựa trên kết quả khảo sát sự phụ thuộc của trở kháng vào tần số của vòng gồm áp điện trên máy TEGAM Programmable LCR Meter 3550 trong khoảng 1-100 kHz (hình 1A), nhận thấy rằng, tấm gồm áp điện chỉ có một điểm cộng ở tần số 33 kHz và không có bất kỳ điểm cộng hưởng nào khác, điều này cho thấy tấm gồm áp điện không bị nứt gãy bên trong cấu trúc và đạt yêu cầu để dùng cho việc lắp ráp vào UTW. Từ kết quả đo (hình 1B), tần số cộng hưởng của UTW được xác định là $f_r \approx 19,905$ kHz, trở kháng $\approx 80 \Omega$ và giá trị dung tích C_0 của đầu dò được đo ở tần số 1 kHz là 10 nF, các thông số của UTW làm cơ sở để tính toán mạch IM và công suất của USPG.

(A)



(B)



Hình 1. Kết quả phân tích tính chất trở kháng theo tần số trên máy đo TEGAM Programmable LCR Meter 3550. (A) Sự phụ thuộc của trở kháng theo tần số của vòng gồm áp điện; (B) Sự phụ thuộc của trở kháng và góc lệch pha theo tần số của UTW.

2.2. Tạo tần số bằng HRTIM

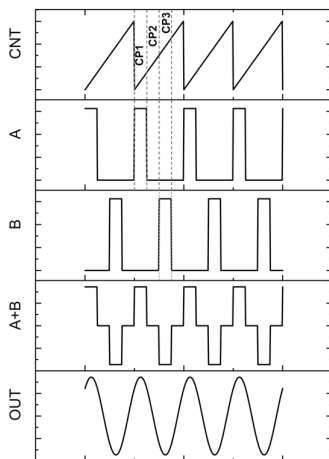
HRTIM là một ngoại vi đếm thời gian cao độ phân giải trong một số dòng vi điều khiển STM32 của STMicroelectronics. Nó được thiết kế để cung cấp các tín hiệu PWM và các tín hiệu đếm thời gian khác, có độ chính xác và phân giải cao.

Để tạo tín hiệu tần số bằng HRTIM, cần sử dụng chế độ Output compare của ngoại vi này. Output compare cho phép so sánh giá trị đếm của timer với một giá trị định trước và sinh ra một tín hiệu PWM tương ứng. Nguyên lý tạo tần số bằng phương pháp này được mô tả ở hình 2, sử dụng các giá trị CP_1 , CP_2 , CP_3 để tạo ra xung có độ trễ và độ rộng xung khác. Giá trị đếm (Counter - CNT) trong HRTIM xác định theo tần số (f) và tỷ lệ công suất (duty) là:

$$CNT = \frac{HRTIM_{CLK}}{f}; CP_1 = \frac{CNT \times \text{duty}}{2 \times 100}; CP_2 = \frac{CNT}{2}; CP_3 = CP_2 + CP_1$$

Độ phân giải của phương pháp tạo tần số bằng HRTIM theo tính toán lý thuyết là $3 \times 10^{-5} \times f \times 0,3442$ với f là tần số mong muốn, như vậy độ phân giải của tần số trong khoảng 18-22 kHz là 0,3-0,5 Hz. Do sử dụng thanh ghi 32 bit và $HRTIM_{CLK} = 1,152 \text{ GHz}$ nên độ rộng xung có thể điều khiển ở độ chính xác rất cao.

Độ chính xác của tần số của phương pháp này được kiểm nghiệm cách đo tín hiệu tần số trên máy hiện sóng Agilent DSO8064A.



Hình 2. Minh họa dạng sóng của phương pháp tạo tần số bằng HRTIM với CNT là chu kỳ đếm của HRTIM. A và B là tín hiệu ra kênh A, B; A+B là dạng tín hiệu đầu ra trên mạch cầu IGBT khi kết hợp 2 kênh điều khiển; OUT là dạng sóng qua mạch IM.

2.3. Mạch công suất

Do thiết bị xác định với một loại đầu dò ở tần số cố định trong dải nhỏ và sử dụng phương pháp tạo tần số bằng HRTIM với tần số chuyển mạch ở mức trung bình. Mặt khác, các thành phần cảm kháng trong IM có thể gây ra dòng điện ký sinh với điện áp cao, do vậy các IGBT được sử dụng để làm thiết bị chuyển mạch trong phần công suất. IGBT với model là STGW40H120DF2 từ STMicroelectronics được lựa chọn trong thiết kế mạch công suất. Với điện áp cho mạch công suất là 320 VDC, dòng định của IGBT $I_p = 160 \text{ A}$, $I_f = 80 \text{ A}$ (25°C) thì mạch công suất là an toàn cho các ứng dụng yêu cầu công suất nguồn $\leq 2000 \text{ W}$.

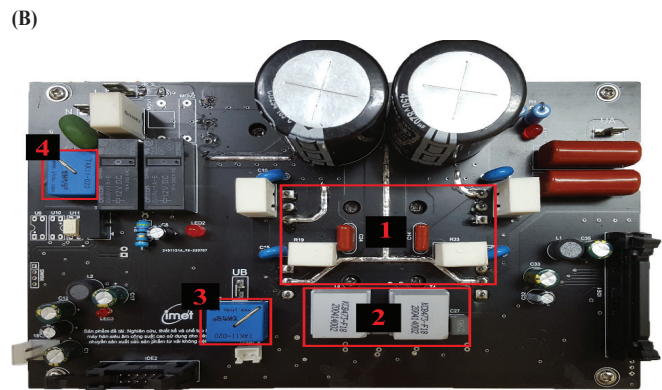
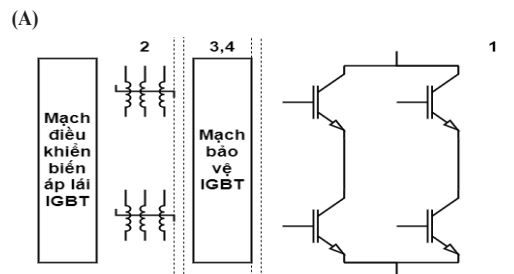
Mạch công suất sử dụng IGBT cầu H được điều khiển bởi tín hiệu đầu ra của MCU qua mạch điều khiển. Các yếu tố cần được xem xét trong thiết kế mạch điều khiển cầu H như sau:

Điều khiển nửa phía cao: Điều khiển nửa cầu thấp dễ hơn vì cực phát (E) kết nối trực tiếp với GND. Tuy nhiên, ở nửa cầu H phía cao, E của IGBT bên cao kết nối với cực thu (C) của bên thấp, do đó cần tạo nguồn điện chênh giữa G và E của IGBT phía nửa cao, với giá trị $15 \pm 20 \text{ V}$ để đảm bảo IGBT có thể đóng mở hiệu quả.

Kiểm soát thời gian trễ: Nếu mạch không có điều khiển thời gian trễ, có thể xảy ra hiện tượng ngắn mạch giữa phía cao và phía thấp của mạch cầu H. Khi xảy ra hiện tượng này, hai IGBT trở thành dẫn điện đồng thời, làm tăng dòng điện và tạo ra một lượng lớn nhiệt gây hư hỏng các IGBT.

Kiểm soát dòng IGBT cho mạch cầu H: Tình trạng này thường xảy ra khi thiết bị đang hoạt động trong tình trạng quá tải hoặc khi xảy ra sự cố trong mạch điện. Nếu không có phương pháp kiểm tra và bảo vệ khỏi tình trạng quá dòng điện, sẽ gây hư hỏng các linh kiện trong mạch và làm hỏng động cơ.

Để tăng độ an toàn và tuổi thọ cho mạch điều khiển công suất, hai biến áp điều khiển kênh đôi KCB 473-F18 từ BingZi được sử dụng để điều khiển mạch cầu H. KCB 473-F18 cho phép điều khiển công IGBT cách ly với điện áp cấp cho mạch công suất, do sử dụng kênh đôi ngược nhau nên thời gian trễ được kiểm hoàn toàn. Hai biến áp điều khiển kênh đôi được điều khiển bằng 4 mạch tích hợp chuyên dụng MIC4420 từ Micrel.

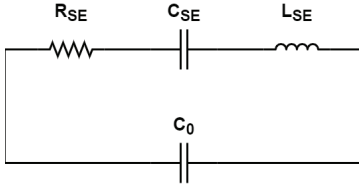


Hình 3. Mạch công suất của thiết bị. (A) Sơ đồ khối; (B) Mạch công suất.

Hình 3B là mạch công suất sau khi đã ráp đủ linh kiện. Mạch này bao gồm các thành phần sau: 4 IGBT STGW40H120DF2 (vị trí 1) được hàn ở mặt đáy và kết nối với tản nhiệt; 2 biến áp lái đôi KCB 473-F18 (vị trí 2); cảm biến dòng của nguồn đầu ra (vị trí 3); cảm biến dòng của nguồn đầu vào (vị trí 4); mạch tích hợp MIC4420 (được đặt ở mặt sau của mạch).

2.4. Mạng phối hợp trở kháng

Mạch phối hợp trở kháng là một vấn đề lớn trong thiết kế mạch tần số cao, nó liên quan đến việc kết hợp một phần của mạch với phần khác để đạt được sự truyền năng lượng tối đa giữa hai phần [13]. Cụ thể trong trường hợp này là sự truyền tải năng lượng giữa nguồn và đầu hàn, do vậy giữa hai thành phần này cần có một IM.



Hình 4. Mô hình điện Butterworth-Van-Dyke (BVD) tương đương của đầu hàn ở tần số cộng hưởng [14]. R_{SE} biểu thị cho sự mất mát trong dao động trong tinh thể; L_{SE} biểu thị cho dao động của gốm áp điện; C_{SE} biểu thị cho độ đàn hồi của tấm gốm; C_0 ở nhánh tĩnh là điện dung ký sinh của gốm.

Với mô hình điện BVD tương đương của đầu hàn ở tần số cộng hưởng như hình 4, ta có trở kháng đầu vào tương đương của mạch là:

$$Z = R + jX = \frac{[R_{SE} + j(X_{L_{SE}} - X_{C_{SE}})] j(-X_{C_0})}{R_{SE} + j(X_{L_{SE}} - X_{C_{SE}}) + j(-X_{C_0})} \quad (1)$$

Với:

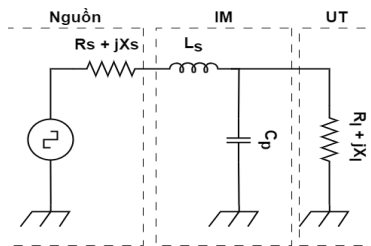
$$R = \frac{R_{SE}}{\omega^2 C_0^2 R_{SE}^2 + [\omega C_0 (\omega L_{SE} - \frac{1}{\omega C_{SE}}) - 1]^2} \quad (2)$$

$$X = \frac{(\omega L_{SE} - \frac{1}{\omega C_{SE}}) - \omega C_0 [R_{SE}^2 + (\omega L_{SE} - \frac{1}{\omega C_{SE}})^2]}{\omega^2 C_0^2 R_{SE}^2 + [\omega C_0 (\omega L_{SE} - \frac{1}{\omega C_{SE}}) - 1]^2} \quad (3)$$

Khi đầu rung siêu âm xảy hiện tượng cộng hưởng thì $\omega = 1/\sqrt{L_{SE}C_{SE}}$, khi đó:

$$R = \frac{R_{SE}}{\omega^2 C_0^2 R_{SE}^2 + 1} \quad (4)$$

$$X = \frac{-\omega C_0 R_{SE}^2}{\omega^2 C_0^2 R_{SE}^2 + 1} \quad (5)$$



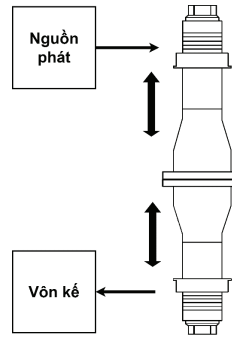
Hình 5. Mô hình IM loại L với lọc thông thấp. UT: ultrasonic transducer - đầu dò siêu âm.

Để đạt được hiệu suất truyền tải tốt nhất thì trở kháng của nguồn phải bằng trở kháng của tải, tuy nhiên trong thực tế thì cần sử dụng mạch IM (hình 5). Do trở kháng của nguồn được sử dụng ở đây nhỏ hơn trở kháng của tải nên IM sử dụng ở đây là loại L với lọc thông thấp [15] nên lựa chọn mức công suất tối đa của nguồn là 2.000 W ta có $R_S \approx 52 \Omega$.

$$R_S = \frac{R_{SE}}{\omega^2 (C_0 + C_P)^2 R_{SE}^2 + 1} \quad (6)$$

$$L_S = \frac{(C_0 + C_P) R_{SE}^2}{\omega^2 (C_0 + C_P)^2 R_{SE}^2 + 1} \quad (7)$$

Từ các thông số C_0 và R_{SE} đã đo được, lựa chọn giá trị $R_S = 50 \text{ nF}$ và $L_S = 280 \text{ }\mu\text{H}$. IM được đánh giá dựa trên mô hình điện được bố trí như ở hình 6.



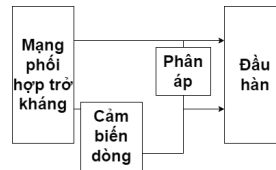
Hình 6. Cấu hình thử nghiệm dao động [16].

Kết quả đo từ máy LRC cho thấy tần số cộng hưởng của đầu dò trong mô hình này là $f_r \approx 19974 \text{ kHz}$ và góc lệch pha là 23° .

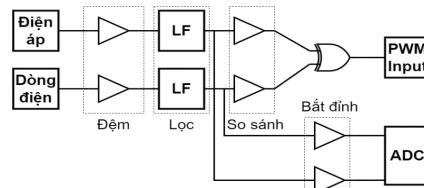
2.5. Theo dõi tần số tự động

Đầu dò siêu âm là một hệ thống thay đổi phi tuyến theo thời gian. Ở tần số hoạt động khác nhau, sự khác biệt giữa các đặc tính trở kháng và rung cơ học là rất lớn. Khi tần số hoạt động bằng với tần số cộng hưởng, đầu dò có tổn thất điện năng thấp nhất, biên độ dao động lớn nhất và tần số hoạt động tốt nhất. Vì vậy, việc lựa chọn thông số mạch phối hợp phù hợp có ý nghĩa hết sức quan trọng [17].

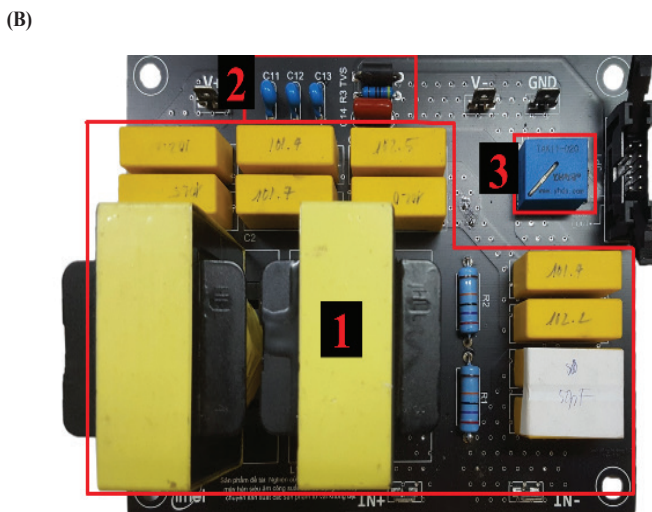
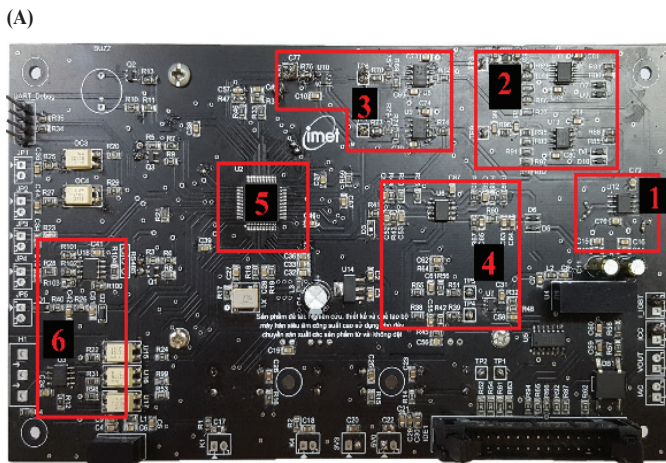
Phương pháp theo dõi tần số tự động được thực hiện bằng cách lấy mẫu đỉnh của điện áp và dòng điện cấp cho đầu dò kết hợp với góc lệch pha của điện áp và dòng điện. Sau đó dựa vào kết quả tính toán độ lệch pha mà MCU điều chỉnh tần số đầu ra và tìm tần số cộng hưởng của đầu dò (hình 7, 8). Một tín hiệu góc lệch pha giả lập tạo ra bằng máy tạo sóng đa năng BK Precision - 4070 A được sử dụng để đánh giá khả năng phát hiện chính xác góc lệch pha giữa điện áp và dòng điện, giá trị tính toán được MCU truyền ra bằng UART.



Hình 7. Mô hình lấy mẫu của dòng điện và điện áp cho đầu dò.



Hình 8. Mô hình xử lý tín hiệu dòng điện và điện áp để tính toán tần số cộng hưởng.

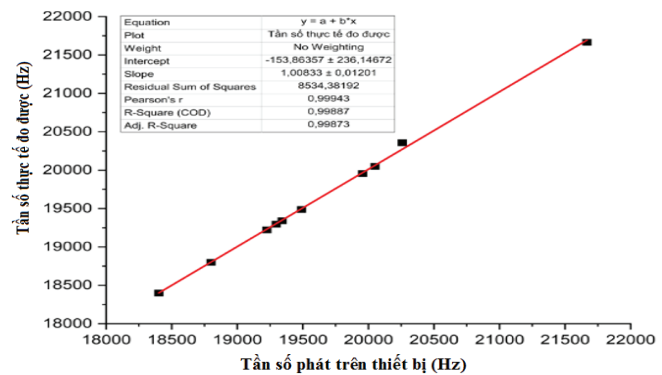


Hình 9. Hình ảnh mạch điều khiển và tạo tần số (A); mạch IM của USPGB (B).

Hình 9A cho thấy, mạch điều khiển và tạo tần số sau khi đã ráp linh kiện. Mạch này bao gồm các thành phần: mạch đệm và lọc (vị trí 1) sử dụng vi mạch TLC2272; mạch bắt đỉnh tần số cao (vị trí 2) sử dụng 2 vi mạch TLC2272; mạch xử lý pha (vị trí 3) gồm 2 vi mạch LM311 dùng so sánh và vi mạch XOR SN74LVC1G86; mạch phát hiện quá dòng, quá áp (vị trí 4); MCU và RS485 (vị trí 5, 6). Hình 9B cho thấy, mạch phối hợp trở kháng (vị trí 1), mạch phân áp với tỷ lệ điện áp vào trên điện áp ra là 1000:1 (vị trí 2) và cảm biến dòng (vị trí 3).

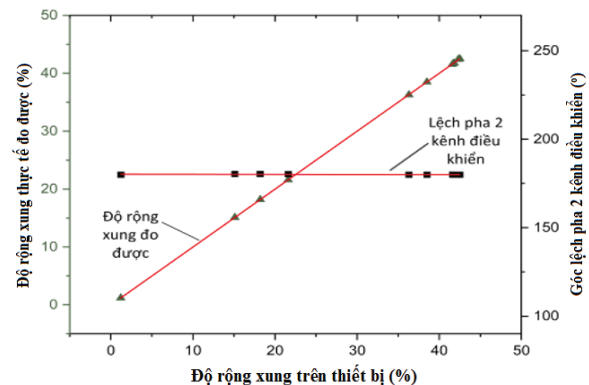
3. Kết quả và bàn luận

Kết quả phân tích độ chính xác của phương pháp tạo tần số bằng HRTIM (hình 10) cho thấy, ngoại vi này có thể tạo tần số với độ ổn định và chính xác cao với sai số lớn nhất trong phép thử nghiệm này là 0,006% ở 18401,12 Hz. Kết quả đo cũng cho thấy ở các tần số thấp sai số của tần số có xu hướng cao hơn khi phát ở tần số cao. Điều này có thể lý giải do sai số của bộ xung đồng trong HRTIM, khi ở tần số thấp HRTIM phải đếm nhiều giá trị hơn nên dẫn đến sai số lũy kế.

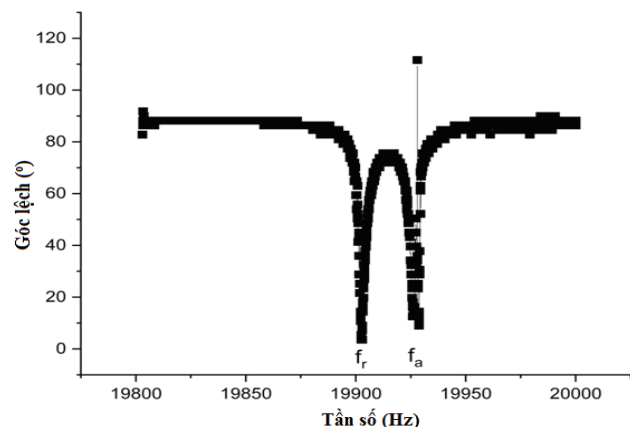


Hình 10. Sai khác giữa giá trị tần số phát trên thiết bị và giá trị tần số đo được trên máy hiện sóng Agilent DSO8064A.

Theo như tính toán lý thuyết cho thấy, với độ phân giải 32 bit của HRTIM thì việc điều khiển công suất bằng độ rộng xung có thể đạt chính xác rất cao cho nên các giá trị tính toán điều khiển độ rộng xung gần như khớp với kết quả đo trên máy (hình 11). Yếu tố độ lệch pha giữa hai kênh tín hiệu điều khiển cũng được kiểm chứng, kết quả cho thấy độ lệch nhỏ nhất là 179,9° và lớn nhất là 180,4°, việc độ lệch pha có sai lệch có thể gây ra hiện tượng đoạn mạch do thời gian trễ quá thấp, do vậy để đảm bảo độ trễ cho thời gian đóng ngắt IGBT, thiết bị được giới hạn ở mức <49%.

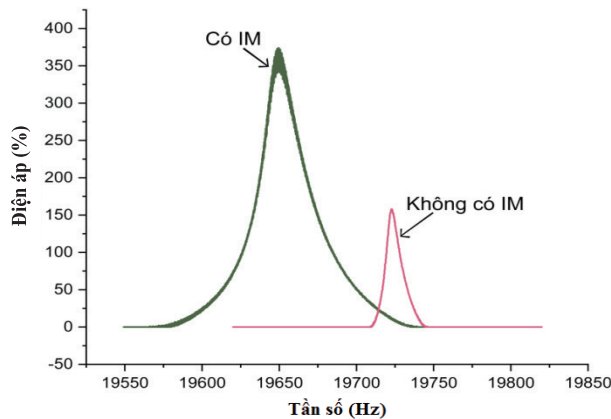


Hình 11. Kết quả kiểm nghiệm độ chính xác trong việc điều khiển độ rộng xung của HRTIM và sự ổn định của góc lệch pha giữa 2 kênh tín hiệu A và B.



Hình 12. Sự phụ thuộc của góc lệch pha theo tần số khi quét trên thiết bị.

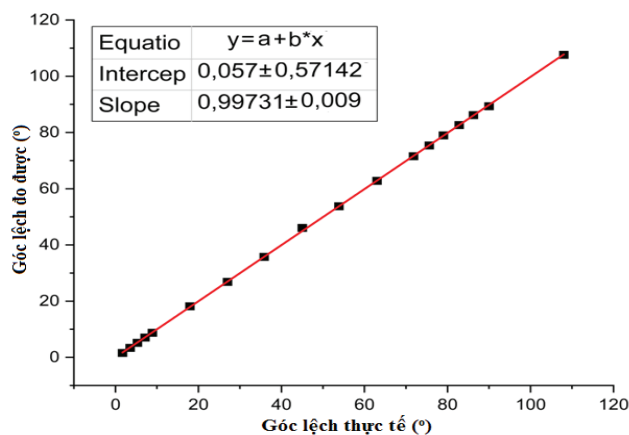
Kết quả quét tần số cộng hưởng dựa trên góc lệch pha (hình 12) cho thấy, thiết bị có thể tìm được khá chính xác tần số cộng hưởng theo góc lệch pha giá trị f_r tìm được bằng thiết bị vào khoảng 19902,5 Hz với góc lệch pha là $3,6^\circ$ khớp với giá trị f_r trong hình 1. Giá trị f_a đạt 19928,7 Hz với góc lệch pha là 9° , giá trị f_a thường khó xác định hơn do trở kháng của đầu dò tại điểm này vô cùng lớn, do vậy điểm này thường được bỏ qua nếu không cần tính toán các thông số khác liên quan (hình 13).



Hình 13. Sự khác biệt giữa biên độ điện áp đo được trong cấu hình thử nghiệm dao động khi sử dụng IM và không sử dụng IM.

Cấu hình thử nghiệm dao động điện cơ của đầu dò cho thấy, ở cùng một thông số cài đặt của thiết bị là độ rộng xung 40%, tần số 19-21 kHz thì nguồn phát với mạch có sử dụng IM cho biên độ dao động lớn so với không sử dụng IM, điều này thể hiện bằng biên độ điện áp thu được trên đầu dò tải ghép nối đầu dò phát (hình 6) trong tính chất cơ - điện. Tần số đỉnh khi sử dụng IM có xu hướng thay đổi, điều này là do các thông số trong IM được tính toán cho UTW mà không phải mô hình này dẫn đến sự dịch chuyển này và có thể chưa khai thác hết hiệu suất của nguồn [18].

Giá trị lệch pha giữa tín hiệu điện áp và dòng điện mô phỏng là 0-60%, tương ứng với góc lệch 0-108° (hình 14) cho thấy ngoại vi có thể đọc độ rộng xung có giá trị 1-60%, với sai số lớn nhất là 5,3% ở 1%, tương ứng với $1,8^\circ$ và sai số trung bình là 1,1%.



Hình 14. Sai số của giá trị pha thực tế tạo bởi máy tạo sóng đa năng BK Precision - 4070 A và góc lệch pha đo được trên mạch điều khiển.

4. Kết luận

Thiết bị nguyên mẫu được chế tạo với phương pháp tạo tần số cho việc điều khiển mạch công suất bằng HRTIM cho thấy, độ chính xác là 0,006% trong dải 18-22 kHz, khả năng điều khiển tần số và độ rộng xung dễ dàng. Kết quả thử nghiệm dao động trên UST cho thấy tầm quan trọng của mạng IM. Theo dõi tần số tự động bằng cách lấy mẫu đỉnh của điện áp và dòng điện cấp cho đầu dò kết hợp với góc lệch pha của điện áp và dòng điện cho thấy độ ổn định cao dễ dàng thực hiện. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn nhược điểm do tối ưu việc đo góc lệch ở gần điểm cộng hưởng có sai số khá cao lên đến 5,3% và sai số trung bình là 1,1%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Mahvi (2009), "Application of ultrasonic technology for water and wastewater treatment", *Iran J. Public Health*, **38**(2), pp.1-17.
- [2] A. Bakhtiari, T. Berberashvili, P. Kervalishvili (2017), "Water treatment improvement by ultrasonic approach", *American Journal of Condensed Matter Physics*, **7**(4), pp.81-86, DOI: 10.5923/j.ajcmp.20170704.01.
- [3] A. Carovac, F. Smajlovic, D. Junuzovic, et al. (2011), "Application of ultrasound in medicine", *Acta. Inform. Med.*, **19**(3), pp.168-171, DOI: 10.5455/aim.2011.19.168-171.
- [4] A. Vladisaukas, R. Sliteris, R. Raisutis, et al. (2009), "Application of ultrasonic transducers for investigation of composite materials", *Ultrasonics (e-Journal of Nondestructive Testing)*, **64**(4), pp.36-43.
- [5] K. Mannay, J. Urena, A. Hernandez, et al. (2020), "Characterization of an ultrasonic local positioning system for 3D measurements", *Sensors*, **20**(10), DOI: 10.3390/s20102794.
- [6] R. Manwar, K. Krutkiewicz, K. Avnaki, et al. (2020), "Overview of ultrasound detection technologies for photoacoustic imaging", *Micromachines*, **11**(7), DOI: 10.3390/mi11070692.
- [7] L. Quintino (2013), "Introduction to joining methods in medical applications", *Joining and Assembly of Medical Materials and Devices*, **2013**, pp.28-46, DOI: 10.1533/9780857096425.1.28.
- [8] A. Benatar, M. Marcus (2015), "Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites", *Power Ultrasonics*, **2**(1), pp.295-312, DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00006-3.
- [9] I. Jones (2013), "Ultrasonic and dielectric welding of textiles", *Joining Textiles*, **2013**, pp.374-397, DOI: 10.1533/9780857093967.3.374.
- [10] K. Zhang, G. Gao, C. Zhao, et al. (2023), "Review of the design of power ultrasonic generator for piezoelectric transducer", *Ultrasonics Sonochemistry*, **96**, DOI: 10.1016/j.ulsonch.2023.106438.
- [11] J. Moon, S. Park, S. Lim (2022), "A novel high-speed resonant frequency tracking method using transient characteristics in a piezoelectric transducer", *Sensors* **2022**, **22**(17), DOI: 10.3390/s22176378.
- [12] Z. Hongjie, W. Fujun, Z. Dawei, et al. (2015), "A new automatic resonance frequency tracking method for piezoelectric ultrasonic transducers used in thermosonic wire bonding", *Sensors and Actuators A: Physical*, **235**(1), pp.140-150, DOI: 10.1016/j.sna.2015.09.040.
- [13] M. Tse (2003), "Impedance matching for high-frequency circuit design elective", *Technical Report*, **1**, pp.1-53.
- [14] M.G. Rodriguez, J.G. Alvarez, Y. Yanez, et al. (2010), "Low cost matching network for ultrasonic transducers", *Phys. Procedia*, **3**, pp.1025-1031, DOI: 10.1016/j.phpro.2010.01.132.
- [15] V.T. Rathod (2019), "A review of electric impedance matching techniques for piezoelectric sensors", *Actuators and Transducers Electronics*, **8**(2), DOI: 10.3390/electronics8020169.
- [16] C.P. Christopher (2010), *Failure Analysis of a 30kHz Ultrasonic Welding Transducer*, Thesis master of Science, University of Illinois, **1**, 103pp.
- [17] I. Barbi, J.C.O. Bolacell, D.C. Martins, et al. (1990), "Buck quasi-resonant converter operating at constant frequency: Analysis, design, and experimentation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, **5**(3), pp.276-283, DOI: 10.1109/PESC.1989.48572.
- [18] M.H. Hasan, F.M. Alsaleem, N. Jaber, et al. (2018), "Simultaneous electrical and mechanical resonance drive for large signal amplification of micro resonators", *AIP Advances*, **8**(1), pp.1-7, DOI: 10.1063/1.5018321.