NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ, CHẾ TẠO CẢM BIẾN ĐO LỰC TÍCH HỢP VI MẠCH SỬ DỤNG TRONG THỬ NGHIỆM ĐỘNG CƠ TÊN LỬA

Phạm Nhật Quang[1*], Nguyễn Đức Thành[1], Nguyễn Văn Tiến[2]

Tóm tắt: *Bài báo trình bày phương pháp thiết kế, chế tạo cảm biến đo lực trên cơ sở hiệu ứng áp trở có tích hợp vi mạch điện tử để gia công, xử lý tín hiệu. Các tham số của vi mạch tích hợp được tính toán, thiết kế phù hợp với các đặc tính của cảm biên đảm bảo độ chính xác cao. Việc sử dụng các cảm biến tích hợp vi mạch điện tử giúp cho hệ thống đo nhỏ gọn, nâng cao độ chính xác, độ tin cậy trong quá trình hiệu chuẩn cũng như sử dụng thiết bị. Ngoài ra, có thể dễ dàng ghép nối các cảm biến này với các hệ đo vô tuyến, hệ đo ghi tự động (dữ liệu được lưu vào thẻ nhớ).*

Từ khóa: Cảm biến đo động lực; Cảm biến đo tích hợp vi mạch điện tử.

1. MỞ ĐẦU

Các cảm biến đo lực sử dụng trong thử nghiệm động cơ tên lửa thuộc hệ đồng dạng bậc hai, hoạt động trên cơ sở hiệu ứng áp trở, sử dụng mạch cầu Wheatstone để lấy tín hiệu điện ở đầu ra. Mạch cầu hoạt động như một bộ chiết áp, điện áp đầu ra tỷ lệ với biến đổi điện trở, mỗi dạng phần tử đàn hồi sẽ sử dụng một loại mạch cầu tương ứng, do đó, điện áp ra của mỗi loại mạch cầu sẽ không giống nhau. Các cảm biến đo đặc trưng bởi: Dải đo, độ nhạy, độ chính xác, độ ổn định, độ lặp lại,... Như vậy, mỗi cảm biến sẽ cần một bộ gia công tín hiệu với hệ số khuếch đại tương ứng sao cho với tải cực đại, điện áp ra của bộ gia công tín hiệu đạt cực đại trong khoảng điện áp vào của bộ ADC. Thông thường bộ gia công tín hiệu có thể thay đổi hệ số khuếch đại đại phù hợp với từng loại cảm biến khác nhau, nghĩa là khi hiệu chuẩn cần chọn một hệ số khuếch đại tối ưu đối với từng cảm biến, khi một bộ khuếch đại dùng cho nhiều cảm biến rất dễ bị nhầm hệ số dẫn đến làm sai kết quả phép đo. Cảm biến đo tích hợp vi mạch điện tử đảm bảo đầu ra tối ưu nhất cho cảm biến đó và hệ số khuếch đại của bộ gia công tín hiệu được thiết lập sẵn nên không xảy ra tình trạng bị nhầm hệ số của cảm biến khác.

2. NỘI DUNG

2.1. Cảm biến đo lực trong hệ thống đo lực đẩy động cơ tên lửa

Trong mô hình cấu tạo của phần tử hệ bậc hai có sự liên kết giữa các tham số khối lượng M, độ cứng của lò xo K, và hằng số giảm chấn D. Phương trình vi phân mô tả hệ như sau [3, 4]:

$$F(t) = M\frac{d^2x_M(t)}{dt^2} + D\frac{dx_M(t)}{dt} + K_s x_M(t) \quad (1)$$

Trong đó, F(t): Lực tác dụng vào phần tử nhạy cảm; D: Hệ số giảm chấn;

$x_M(t)$: Độ dịch chuyển; K_s: Hằng số lò xo.

Tỷ lệ biến đổi Laplace giữa đầu ra và đầu vào của cảm biến gọi là hàm truyền [4], có dạng:

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2+Ds+K_s} \quad (2)$$

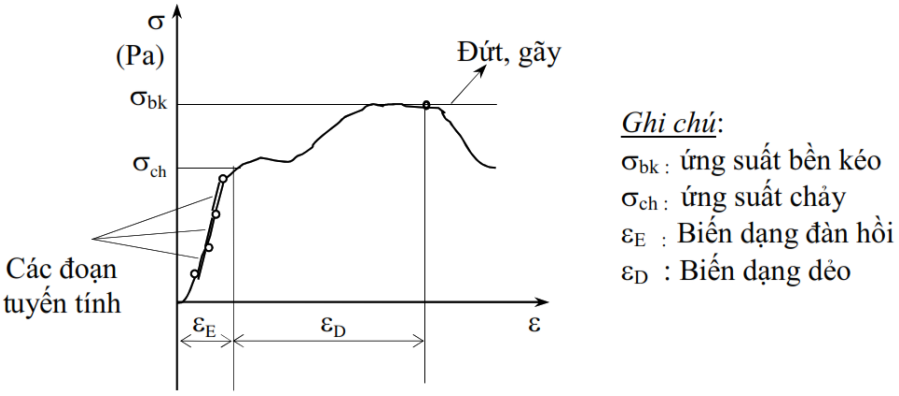
$$G(s) = \frac{\frac{K_S}{M}}{(s^2+\frac{D}{M}s+\frac{K_S}{M})}\frac{1}{K_S} \quad (3)$$

Thay thế $\omega_n = \sqrt{\frac{Ks}{M}}$ và $\alpha = \frac{D}{2\sqrt{MKs}}$

$$G(s) = (\frac{1}{K_s})(\frac{\omega_n^2}{s^2+2\xi\omega_n s+\omega_n^2} \quad (4)$$

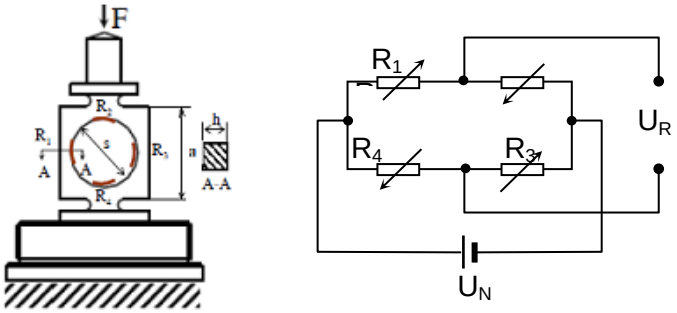
Trong đó, ω_n: Tần số dao động riêng; ξ: Hệ số tắt của hệ;

Dải đo của cảm biến được chọn sao cho phần tử đàn hồi phải được chọn trong đoạn tuyến tính như trên hình vẽ. Qua các điều kiện đầu vào, ta sẽ xác định được vùng tuyến tính thực tế của cảm biến đo. Gán vùng tuyến tính thực tế này làm dải đo và cũng chính là giới hạn đo cho phép của cảm biến.

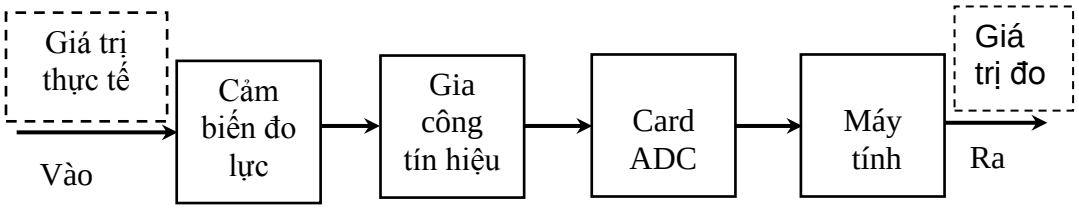


Hình 1. *Biểu đồ ứng suất - biến dạng của thép Các-bon được chọn để thiết kế phần tử đàn hồi của cảm biến.*

Cảm biến đo lực đẩy với dải đo < 10 kN, với điện áp nuôi cầu (U_N), điện áp ra của mạch cầu (U_R) rất nhỏ (mV), phần tử đàn hồi được thiết kế dạng hình vuông rỗng [1, 5] có cấu trúc như trên hình vẽ.



Hình 2. *Phần tử đàn hồi và mạch cầu Wheatstone trong cảm biến đo lực.*



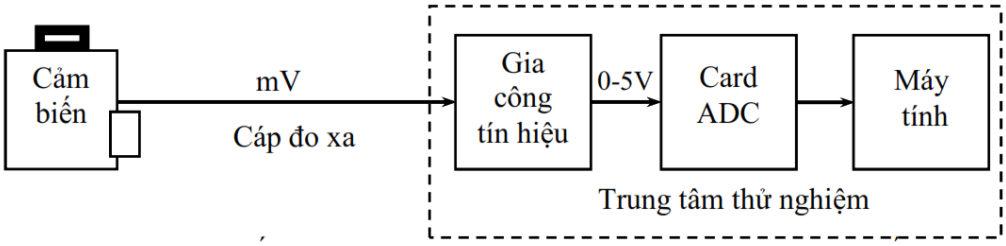
Hình 3. *Sơ khối hệ thống đo lực kết nối với máy tính.*

Trên hình 3 là sơ đồ khối của một cảm biến đo lực kết nối với hệ thống đo. Tín hiệu từ cảm biến được khuếch đại qua bộ gia công tín hiệu sau đó được truyền, lưu trữ và xử lý trên máy tính hoặc các thiết bị đo ghi khác.

2.2. Tích hợp vi mạch điện tử trong cảm biến

2.2.1. Sơ đồ khối của cảm biến thông thường và cảm biến tích hợp trong quá trình thử nghiệm

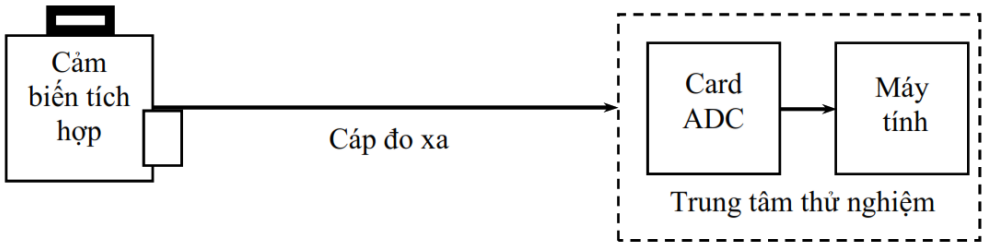
Trong hệ thống đo lực đẩy động cơ tên lửa, khi sử dụng các cảm biến thông thường (không tích hợp vi mạch điện tử), tín hiệu từ cảm biến được truyền qua cáp đo xa (khoảng 200 mét) đến trung tâm đo. Tại trung tâm đo bộ gia công tín hiệu sẽ khuếch đại các tín hiệu này phù hợp với bộ thu thập dữ liệu để hiển thị và lưu trữ trên máy tính hoặc các bộ đo ghi. Sơ đồ khối như trên hình 4.



Hình 4. *Cảm biến đo lực không tích hợp vi mạch điện tử trong hệ thống đo lực.*

Với cảm biến đo lực tích hợp vi mạch điện tử, bộ gia công tín hiệu được tích hợp vào bên trong cảm biến và hiệu chỉnh phù hợp (0-5 V hoặc 0-10 V) để truyền đến trung tâm đo qua cáp đo xa.

Chống nhiễu cho hệ thống đo bằng cách: Sử dụng bộ lọc thông thấp khoảng 500 Hz để lọc nhiễu trong mạch tích hợp, cáp truyền tín hiệu từ cảm biến đến trung tâm đo là cáp chuyên dụng, có bọc kim để chống nhiễu trong quá trình truyền tín hiệu. Sử dụng bộ lọc số trong phần mềm thu thập dữ liệu trên máy tính. Hệ thống đo sau khi được tính toán, hiệu chuẩn hệ số, chống nhiễu sẽ được chuẩn hệ thống để đánh giá độ ổn định, độ chính xác, khả năng chống nhiễu,… Sơ đồ khối như trên hình vẽ.



Hình 5. *Cảm biến đo lực có tích hợp vi mạch điện tử trong hệ thống đo lực.*

Sử dụng các cảm biến đo tích hợp có ý nghĩa quan trọng trong hệ thống đo đa năng, làm tăng khả năng cơ động, giảm thời gian hiệu chuẩn thiết bị đo và đặc biệt là tránh được việc nhầm các hệ số hiệu chuẩn. Các cảm biến tích hợp vi mạch có hình dạng và dải đo khác nhau nhưng đầu ra của chúng được chuẩn hóa dưới dạng điện áp trong khoảng (0÷10 V hoặc 0÷5 V) phù hợp với hầu hết các loại ADC rất thuận lợi trong quá trình kiểm tra, hiệu chuẩn, và sử dụng.

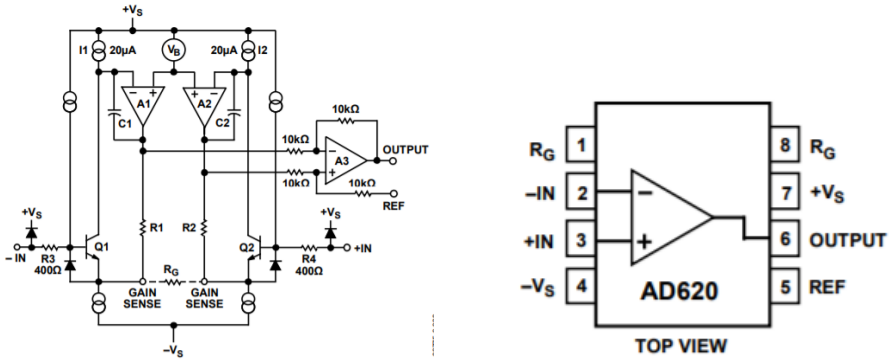
2.2.2. Vi mạch tích hợp và hiệu chỉnh các thông số trong mạch tích hợp

Với đầu ra của cảm biến cỡ mV, để thu thập được tín hiệu này, cần khuếch đại với hệ số đủ lớn. Vi mạch sử dụng AD620 với các thông số chính như sau:

- Có khả năng khuếch đại tín hiệu điện áp thấp (cỡ µV), độ chính xác và độ tuyến tính cao, điện áp sau khuếch đại có thể lên đến ±10 V.

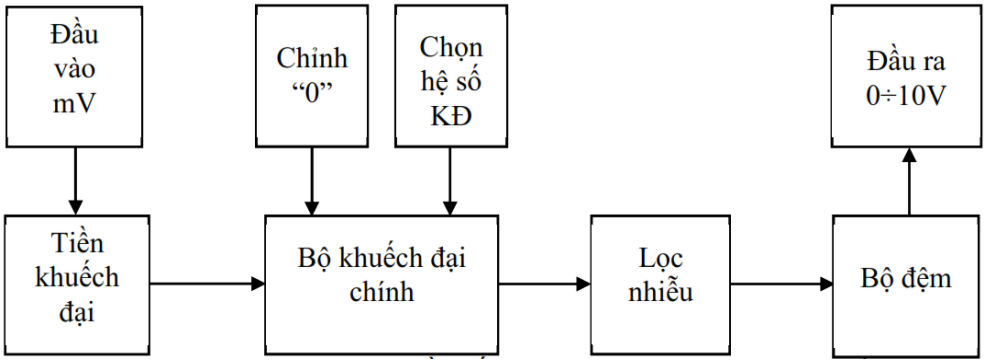
- Hệ số khuếch đại điều chỉnh được lên đến 1000 lần điện áp vào, điều chỉnh được điện áp lệch "0". Độ trôi điện áp tối đa 0,6 µV/ºC

- Nguồn nuôi: ±2,3 V đến ±18 V, dòng tiêu thụ thấp (max 1,3 mA)



Hình 6. *Sơ đồ cấu cấu trúc AD620.*

Sơ đồ khối vi mạch tích hợp sử dụng trong cảm biến đo lực đẩy như trên hình vẽ.



Hình 7. *Sơ đồ khối vi mạch tích hợp trong cảm biến.*

Bộ khuếch đại chính sử dụng AD620 với hệ số khuếch đại được điều chỉnh chính xác với cảm biến đo, đảm bảo điện áp lớn nhất khi tải cực đại.

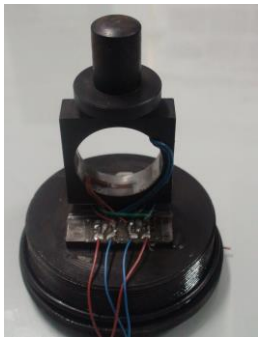
Khối chỉnh "0": Hiệu chỉnh điện áp đầu vào bằng không khi không có tải tác động.

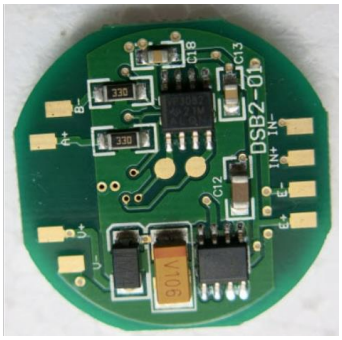
Các bộ khuếch đại: Khuếch đại tín hiệu điện áp từ cảm biến tương đương với tải tác động ra điện áp quy chuẩn để qua các bộ lọc nhiễu tín hiệu.

Lọc nhiễu: Sử dụng bộ lọc thông thấp phù hợp với các cảm biến áp trở (khoảng 200 Hz – 500 Hz).

Bộ đệm: Hoạt động như một bộ lặp điện áp để phối hợp trở kháng với các bộ biến đổi tương tự - số.

Như vậy, vi mạch tích hợp có đầy đủ chức năng như một thiết bị gia công tín hiệu chuyên dụng, vi mạch được hiệu chỉnh với một bộ tham số chuẩn theo cảm biến đảm bảo được các yêu cầu về độ chính xác, độ ổn định, độ tin cậy khi kết nối với hệ thống đo.

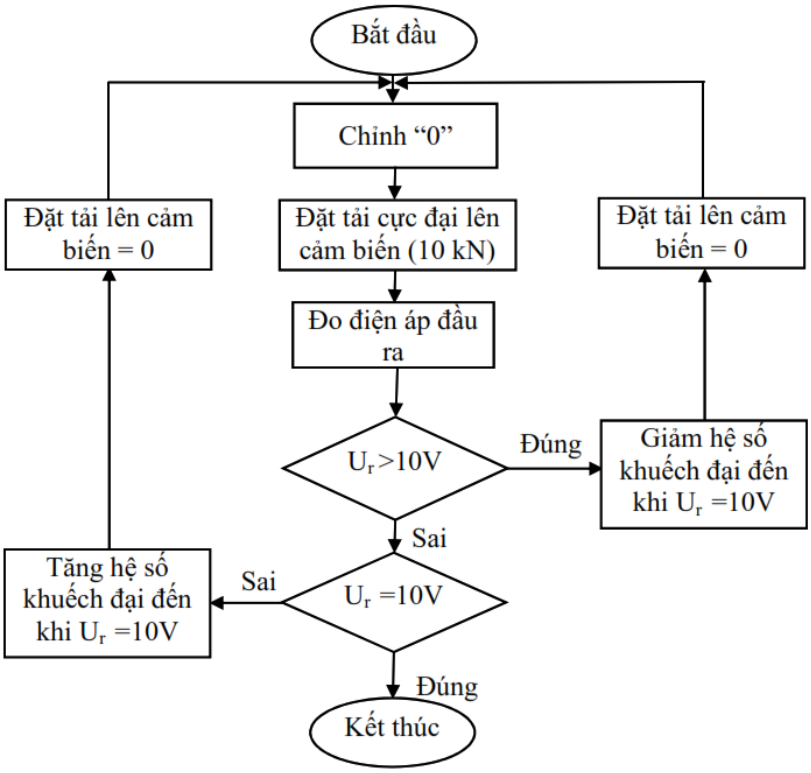




E+: Nguồn nuôi cầu (+);
E-: Nguồn nuôi cầu (–);
IN+: Tín hiệu vào (+);
IN-: Tín hiệu vào âm (-);
V+, V-: Nguồn nuôi vi mạch.

Hình 8. *Phần lõi cảm biến và vi mạch tích hợp sau khi chế tạo.*

Sơ đồ khối quá trình hiệu chỉnh hệ số khuếch đại như trên hình vẽ (giả sử đầu ra của vi mạch tích hợp là 10 V)

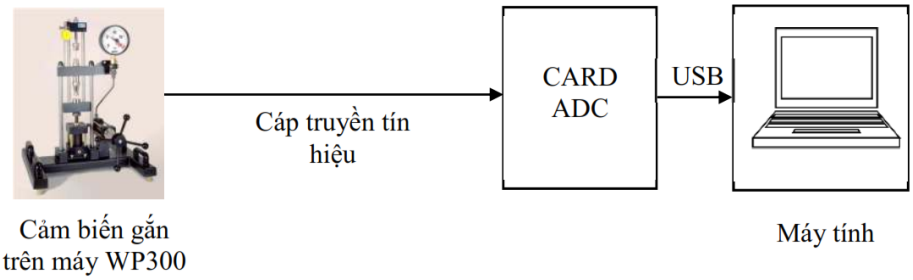


Hình 9. *Sơ đồ hiệu chỉnh hệ số khuếch đại của vi mạch.*

Trên thực tế quá trình điều chỉnh, điện áp đầu ra khi tải cực đại càng tiến đến 10 V càng tốt.

2.3. Thử nghiệm, hiệu chuẩn cảm biến

Cảm biến đo lực tích hợp sau khi được hiệu chỉnh với hệ số phù hợp sẽ được kiểm tra độ ổn định, độ tuyến tính. Cảm biến được gá lắp lên máy tạo lực chuẩn WP 300, sử dụng cáp truyền tín hiệu 200 mét, card ADC 16 bit (USB 1608FS) kết nối với máy tính qua cổng USB. Sử dụng phần mềm DasyLab để hiển thị giá trị đo được, vẽ đường cong lực đo được trên máy tính. Tạo lực chuẩn và ghi lại kết quả đo được, từ đo đánh giá sự hoạt động của cảm biến và các thành phần cấu hành hệ thống đo. Sơ đồ khối như trên hình vẽ.

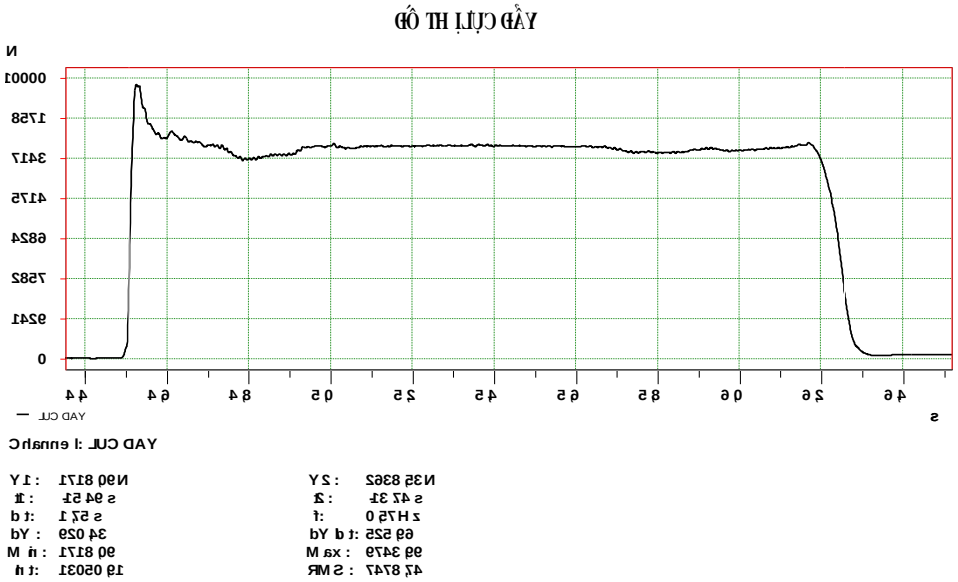


Hình 10. *Sơ đồ thử nghiệm khi gắn cảm biến với máy tạo lực chuẩn.*

Bảng giá trị đặt lực chuẩn lên cảm biến và giá trị hiển thị trên máy tính như sau:

Kết quả thử nghiệm với máy tạo lực chuẩn WP300				
TT	$F_{đặt}$ *(N)*	*F đo được (N)*		
		Lần 1	*Lần 2*	*Lần 3*
1	0	0,0	0,0	0,0
2	2000	2005,2	2006,7	2004,6
3	4000	4006,3	4007,1	4005,2
4	6000	6004,9	6006,6	6005,9
5	8000	8008,1	8009,0	8011,2
6	10000	1009,5	10011,5	10013,8

Sau nhiều lần đặt giá trị lực chuẩn vào cảm biến và đọc giá trị hiển thị trên máy tính ta thấy giá trị đo được rất tuyến tính, ổn định và chính xác. Tạo lực tác động vào cảm biến ta thấy dạng tín hiệu rõ nét, không bị nhiễu, giá trị hiển thị không bị trễ so với quá trình tác dụng lực. Như vậy, cảm biến tích hợp vi mạch điện tử hoạt động tốt. Cảm biến thử nghiệm tốt trong phòng thí nghiệm.



Hình 11. *Đồ thị lực đẩy khi thử nghiệm.*

Hình 11 là một kết quả đo lực đẩy trong quá trình thử nghiệm, đồ thị đo được cho ta thấy được dạng đường cong lực đẩy theo thời gian, các giá trị đo được đọc sau khi di

chuyển hai con trỏ ở các vị trí phù hợp. Như trên đồ thị ta thấy các thông số như lực đẩy cực đại: 9743,99 N, lực đẩy trung bình: 7478,74 N, thời gian giữa 2 con trỏ: 1,75 s, tổng xung lực đẩy: 13050,91 N.s. Ngoài ra, có thể đọc các giá trị tức thời ở vị trí bất kỳ trên đồ thị.

3. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày cấu trúc, hàm truyền, dải tuyến tính và những đặc trưng cơ bản của cảm biến đo lực đẩy động cơ tên lửa. Trên cơ sở đó xây dựng, tính toán để tích hợp vi mạch điện tử vào trong cảm biến. Cảm biến tích hợp vi mạch điện tử có nhiều ưu điểm vượt trội so với các cảm biến không được tích hợp về tính cơ động, độ chính xác, làm giảm độ cồng kềnh của thiết bị đo, thuận tiện khi sử dụng cảm biến trong các hệ thống đo đa năng động lực tên lửa. Hệ thống được đồng bộ từ việc lựa chọn, hiệu chỉnh các thông số của vi mạch tích hợp, kết nối hệ thống và thử nghiệm đạt kết quả tốt.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Đào Mộng Lâm, Phạm Quang Minh, Phạm Nhật Quang. *"Đo lường các tham số động cơ phản lực với phần mềm DASYLAB"*. Sách chuyên khảo sử dụng giảng dạy sau đại học. Nhà xuất bản QĐND, 2009 pp(41-64)

[2]. Đào Mộng Lâm, Lê Vĩnh Hà, Phạm Quang Minh, Phạm Nhật Quang, *"Cảm biến áp điện và các hệ thống đo lường động học vũ khí"*, NXB QĐND, 2015;

[3]. Klaus Janschek. *"Mechatronic Systems Design. Methods, Models, Concepts, Multi-port modeling, Kirchhoff network"*, pp(89-101). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

[4]. Tai-Ran Hsu. ME 130 Applied Engineering Analysis; Chapter 5. *"Review of Laplace Transform and Its Applications in Mechanical Engineering Analysis"*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. San Jose State University, California, USA, 2015.

[5]. Dharma Prakash Agrawal, *"Embedded Sensor Systems"*, Springer, Singapore, 2017;

ABSTRACT

RESEARCHING, DESIGNING, MANUFACTURING INTEGRAL MICROCHIP FORCE MEASUREMENT SENSORS USED IN ROCKET ENGINE TESTING

In this paper, a method of designing and manufacturing a force measurement sensor based on the piezoresistive effect with integrated electronic circuitry for signal processing and processing is presented. The parameters of the integrated circuit are calculated and designed in accordance with the characteristcs of the inductor to ensure high accuracy. The use of them with electronic circuits makes the measuring system compact, improving accuracy and reliability during calibration as well as instrument use.

Keywords: Dynamic measuring sensor; Measuring sensor integrated with electronic circuit.

Nhận bài ngày 20 tháng 8 năm 2021
Hoàn thiện ngày 14 tháng 9 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 24 tháng 9 năm 2021

Địa chỉ: [1] Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;
[2]Viện Tích hợp hệ thống, Học viện Kỹ thuật quân sự.
[*]Email: quangnhatbkhn@gmail.com.