



FABRICATION OF STRAIN-GAGE INSTRUMENTATION FOR EDUCATION AND RESEARCH OPERATIONS IN UNIVERSITY

Le Manh Tuan, Vo Xuan Ly

Campus in Ho Chi Minh City, University of Transport and Communications, No. 450- 451 Le Van Viet Street, Tang Nhon Phu A Ward, Thu Duc City, Ho Chi Minh City, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 06/11/2022

Revised: 28/11/2022

Accepted: 14/12/2022

Published online: 15/12/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.9.5>

* *Corresponding author*

Email: tuanlm_ph@utc.edu.vn

Abstract. High-precision strain gauges play an important role in engineering, especially in the fields of industry and transportation. However, operated equipment in Vietnam is normally imported with high cost and the accompanying softwares, which export only raw results of the measurement, leads to difficulties in post-processing of studies using strain measurement. Moreover, strain measurement in construction monitoring with long wires would be a huge challenge due to the accuracy of the equipment. In this paper, a solution to design and manufacture a strain measuring device with high accuracy of $\pm 0,2\%$ based on Strain Gauge sensor is presented. The device includes a signal processing circuit that interfaces with the sensor connected to the processor and communicates about the software on the computer to display and record the measurement results. Measurement results verified by the laboratory strain gauge DRA-30A, which shows our equipment operate with the same accuracy to the verified equipment.

Keywords: strainmeter, precision instrument, strain gauge, noise filter.



CHẾ TẠO VÀ THỬ NGHIỆM THIẾT BỊ ĐO BIẾN DẠNG PHỤC VỤ HOẠT ĐỘNG GIẢNG DẠY VÀ NGHIÊN CỨU

Lê Mạnh Tuấn, Võ Xuân Lý

Phân hiệu tại Thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại Học Giao Thông vận tải, 450-451 Đường Lê Văn Việt, Phường Tăng Nhơn Phú A, Thủ Đức, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 06/11/2022

Ngày nhận bài sửa: 28/11/2022

Ngày chấp nhận đăng: 14/12/2022

Ngày xuất bản Online: 15/12/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.9.5>

* Tác giả liên hệ

Email: tuanlm_ph@utc.edu.vn

Tóm tắt. Thiết bị đo biến dạng độ chính xác cao đóng vai trò quan trọng trong kỹ thuật, đặc biệt trong lĩnh vực công nghiệp và giao thông vận tải. Tuy nhiên, các thiết bị trong nước đều là nhập khẩu với giá thành cao và phần mềm đi kèm chỉ hỗ trợ xuất kết quả thô của phép đo dẫn đến khó khăn trong việc xử lý hậu kỳ các nghiên cứu có dùng phép đo biến dạng. Ngoài ra, trong phép đo biến dạng trong quan trắc công trình, việc sử dụng dây dẫn dài là một thách thức lớn đối với độ chính xác của thiết bị. Trong bài báo này, giải pháp thiết kế chế tạo thiết bị đo độ biến dạng với độ chính xác lên tới $\pm 0,2\%$ dựa trên cảm biến Strain Gauge được trình bày. Thiết bị bao gồm mạch chế biến tín hiệu giao tiếp với cảm biến kết nối với bộ xử lý và truyền thông và phần mềm trên máy tính hiển thị và ghi kết quả đo. Kết quả đo được kiểm chứng với máy đo biến dạng DRA-30A, cho thấy thiết bị chế tạo có độ chính xác là tương đương.

Từ khóa: thiết bị đo biến dạng, cảm biến strain gauge, bộ khuếch đại, lọc nhiễu

© 2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thiết bị đo độ biến dạng được dùng phổ biến để phân tích tính toán kết cấu, công tác quan trắc công trình xây dựng [1-8]. Hệ quan quan trắc sức khỏe kết cấu SHM (Structural Health Monitoring) cơ bản được minh họa ở hình 1 [8]. Cấu trúc hệ đo biến dạng gồm 3 phần chính: cảm biến đo biến dạng (Strain Gauge), thiết bị đo lường biến dạng và chương trình máy tính.

Cảm biến biến dạng được sử dụng thường là: sợi quang, strain gauge, áp điện,... Trong đó, strain gauge là hướng tiếp cận kinh tế và phổ biến tại Việt nam hiện nay. Cảm biến đo biến dạng Strain Gauge sử dụng đặc tính chung của vật liệu thép là điện trở của chúng sẽ thay đổi khi vật liệu bị biến dạng. Cảm biến đo biến dạng được ứng dụng nhiều trong thực tế như: hệ thống đo lực, áp suất, quan trắc kết cấu nền đất đắp, quan trắc hầm và công trình ngầm, kiểm soát tải trọng xe...



Hình 1. Cấu trúc hệ đo biến dạng trong SHM.

Trong hệ thống đo biến dạng, mỗi phép đo đều tồn tại sai số [1]. Sai số của phép đo biến dạng là do các yếu tố khác nhau gây ra như: điện áp kích thích, điện trở dây dẫn [2, 3], độ nhạy nhiệt độ, cầu Wheatstone không tuyến tính [4, 5] và nhiễu điện từ. Các nghiên cứu nâng cao độ chính xác phép đo tập trung ở hai phần chính: một là đưa ra các cấu trúc mới cho khâu điều hòa tín hiệu hay xử lý tín hiệu trên miền tương tự; hai là đề xuất các thuật toán xử lý tín hiệu số để loại bỏ các nguồn nhiễu tác động hay xử lý trên phần mềm. Các nghiên cứu xử lý tín hiệu trên miền tương tự đã được nhiều nhóm nghiên cứu thực hiện. Chẳng hạn, với mỗi loại nguồn nhiễu khác nhau sẽ có các phương pháp để loại bỏ nhiễu, trong đó việc phân tích ảnh hưởng của độ lớn điện áp kích thích DC cho cầu Wheatstone đến sai số của phép đo cho kết quả khi điện áp kích thích càng lớn làm sai số phép đo càng lớn. Điện áp kích thích tối ưu là 2,3V với mạch cầu toàn phần [6]. Đối với nhiễu Nyquist thì độc lập với tần số và trải rộng trên toàn bộ miền tần số. Trong khi nhiễu 1/f bắt đầu với giá trị cao ở 0 Hz và sau đó giảm với tần số nghịch đảo. Tại tần số cắt hay góc 1/f là giới hạn giữa nhiễu Nyquist và nhiễu 1/f thường khoảng 100 Hz [7]. Chính vì vậy nếu kích thích cầu dùng điện áp DC sẽ không thể loại bỏ được nhiễu. Từ đó giải pháp kích thích cầu Wheatstone dùng điện áp AC được đề xuất với tần số lớn hơn 100 Hz để loại bỏ nhiễu [8]. Ngoài ra, khi sử dụng điện áp kích thích xoay chiều cho cầu Wheatstone thì độ ổn định của điện áp kích thích ảnh hưởng trực tiếp đến sai số. Mà việc thiết kế nguồn điện áp xoay chiều ổn định cao gặp khó khăn cho cả khâu thiết kế và chi phí [9]. Từ đó giải pháp tỷ lệ hệ thống được đề xuất, nguồn kích thích cho cầu đo sẽ đồng thời được chuyển đổi sang DC để cấp điện áp tham chiếu cho bộ chuyển đổi tương tự/số (ADC) [10]. Nên khi nguồn bị dao động thì điện áp chỉnh lưu từ nguồn cấp cho ADC cũng dao động và được bù trừ. Với phương pháp tỷ lệ hệ thống dùng mạch chỉnh lưu chính xác kết hợp lọc thông thấp chỉ giải quyết vấn đề ổn định điện áp tham chiếu mà chưa thể loại bỏ được nhiễu trong tín hiệu AC. Bộ khuếch đại lock-in kết hợp một bộ giải điều chế và một lọc thông thấp để thu được tín hiệu DC tỷ lệ với tín hiệu ra trên cầu đo đồng thời loại bỏ được nhiễu [11].

Các nghiên cứu ứng dụng xử lý tín hiệu số như cũng mang lại hiệu quả chống nhiễu đáng kể. S. Gu và các cộng sự đã kết hợp phương pháp trung bình dịch chuyển, thuật toán lọc thông thấp kết hợp thuật toán theo dõi điểm 0 để bù độ lệch cho hệ thống trên bộ xử lý MSP430 [12]. Sự kết hợp trên đã loại bỏ các tín hiệu gây nhiễu một cách hiệu quả với sai số

nhỏ hơn 1%. Tuy nhiên, sai số còn tương đối lớn do chưa có mạch xử lý tương tự. Bên cạnh đó Z. Chen [13], đã sử dụng mô đun đo HX711 có sẵn kết hợp với thiết kế bộ lọc số, hàm nội suy tuyến tính điều chỉnh đặc tính phi tuyến của phép đo, để phát triển hệ đo với sai số nhỏ hơn 0,44%, độ phân giải là 1/1000 và ít bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ môi trường. Sai số phép đo giảm đáng kể, tuy nhiên độ phân giải còn tương đối lớn vì độ phân giải của các hệ thống đo biến dạng trong thực tế khoảng từ 1/10.000 đến 1/20.000.

Từ việc xem xét nhiều cách tiếp cận ở trên, rõ ràng là các phương pháp đều có khả năng giảm nhiễu và nâng cao độ tin cậy của phép đo biến dạng. Nhưng mỗi một nghiên cứu chỉ xem xét cải thiện một phần trong hệ thống đo biến dạng, từ đó chưa đánh giá hết được các ưu điểm của mỗi phần khi xét toàn bộ hệ thống. Do đó, một sự kết hợp tất cả các phương pháp trên vào một hệ thống là cơ hội tốt để nâng cao độ chính xác của hệ thống lên tới mức tối đa.

Việc nghiên cứu chế tạo thiết bị đo biến dạng độ chính xác cao đóng vai trò quan trọng trong kỹ thuật, đặc biệt trong lĩnh vực công nghiệp và giao thông vận tải. Như đề cập trên, các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về chế tạo thiết bị đo biến dạng đã và đang được các tác giả quan tâm [1-8]. Tuy nhiên, các thiết bị đang sử dụng trong nước đều là nhập ngoại như hệ thống thiết bị và phần mềm của các hãng nước ngoài Kyowa, Keithley, National Instrument, Tokyo Measuring Instruments Lab... Do đó, nghiên cứu chế tạo các thiết bị phục vụ đo từng bước thay thế các thiết bị của nước ngoài nhằm đáp ứng nhu cầu đổi mới công nghệ trong nước với chi phí thấp; trước mắt là áp dụng vào công tác giảng dạy của giảng viên các trường đại học về đo biến dạng, cũng như nghiên cứu khoa học của sinh viên, sản xuất của các đơn vị liên quan là rất cần thiết.

2. THÍ NGHIỆM

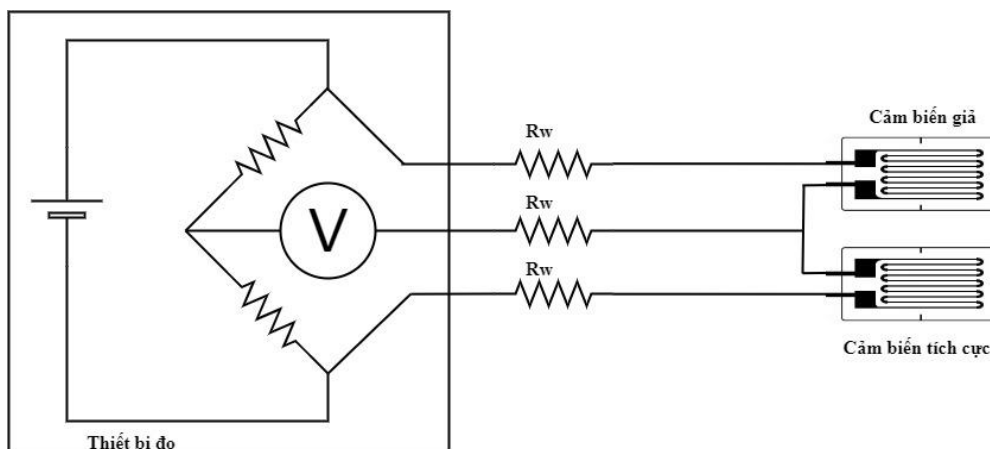
2.1. Yêu cầu kỹ thuật

Chế tạo thiết bị đo biến dạng dùng cho quan trắc công trình chỉ sử dụng cầu $\frac{1}{4}$ do vị trí dán cảm biến chỉ một mặt và dây dẫn dài, phép đo biến dạng tĩnh. Để phân tích được ứng suất và biến dạng kết cấu độ phân giải phải đạt $1 \mu\epsilon$, còn tầm đo tùy thuộc vào từng loại kết cấu phân tích như dầm thép hay bê tông... Để không bị hạn chế về đối tượng kết cấu thì tầm đo 0 - 20.000 $\mu\epsilon$ phổ biến cho nhiều ứng dụng. Về lựa chọn loại cảm biến ten-xơ, với các thông số chính như: hệ số gauge, chiều dài lưới đo (độ dài cảm biến), trở kháng, hệ số nhiệt... Trong đó, hai tham số chiều dài lưới đo và trở kháng gây ảnh hưởng lớn trong ứng dụng quan trắc công trình. Chiều dài lưới đo phụ thuộc vào từng ứng dụng vì kết quả đo biến dạng sẽ là biến dạng trung bình trên lưới đo. Các loại lưới ngắn phù hợp để phát hiện trạng thái biến dạng cục bộ, trong khi đó lưới dài sẽ khắc phục tính không đồng nhất của các loại vật liệu chẳng hạn như bê tông. Còn về trở kháng ten-xơ được phân thành 2 nhóm: nhóm trở kháng thấp (60 Ω , 120 Ω) và nhóm trở kháng cao (350 Ω , 500 Ω , 1000 Ω). Với nhóm trở kháng cao có ưu điểm giảm ảnh hưởng trở kháng dây dẫn và hiện tượng tự nung, nhưng lại ảnh hưởng mạnh của nhiễu điện từ và trở kháng cách ly. Ngược lại, nhóm trở kháng thấp ít bị ảnh hưởng của nhiễu điện từ và trở kháng cách ly, nhưng lại ảnh hưởng mạnh của dòng lớn gây nóng... Trong ứng dụng quan trắc cần dây dẫn dài, nên ưu tiên chọn loại trở kháng ten-xơ thấp để giảm ảnh hưởng nhiễu điện từ và trở kháng cách ly. Với các yêu cầu cho ứng dụng thiết bị chế tạo với các thông số như sau:

- Tầm đo: 0 - 20000 $\mu\epsilon$ ($\mu\epsilon = 10^{-6}$);
- Độ phân giải: 1 $\mu\epsilon$;

- Độ chính xác: $\pm 0,2 \%$;
- Loại gauge phù hợp: 120Ω , hệ số gauge (GF) 2,11, độ dài 67 mm.

Thiết lập sơ đồ đo cho thiết bị chế tạo và máy chuẩn sử dụng cầu $\frac{1}{4}$ với một cảm biến ten-xơ tích cực dùng cho đo biến dạng và một cảm biến ten-xơ giả cho mục đích bù sai số do nhiệt độ môi trường như hình 2.



Hình 2. Sơ đồ đo dùng cầu $\frac{1}{4}$ với một ten-xơ giả.

2.2. Khảo sát thực nghiệm ban đầu

Ước lượng khoảng giá trị đo biến dạng phục vụ lựa chọn bộ khuếch đại và độ phân giải ADC như bảng 1. Với cầu đo $\frac{1}{4}$ điện áp ra là $1,74 \mu\text{V}$ tương ứng với $1 \mu\epsilon$, vậy để đo được cần bộ khuếch đại và ADC có độ phân giải lớn. Để giảm chi phí cũng như tăng độ ổn định, lựa chọn vi mạch chuyên dụng ADS1220 có tích hợp sẵn bộ khuếch đại với độ lợi lập trình được (PGA), ADC độ phân giải 23-bit.

Bảng 1: Ước lượng khoảng đo lường.

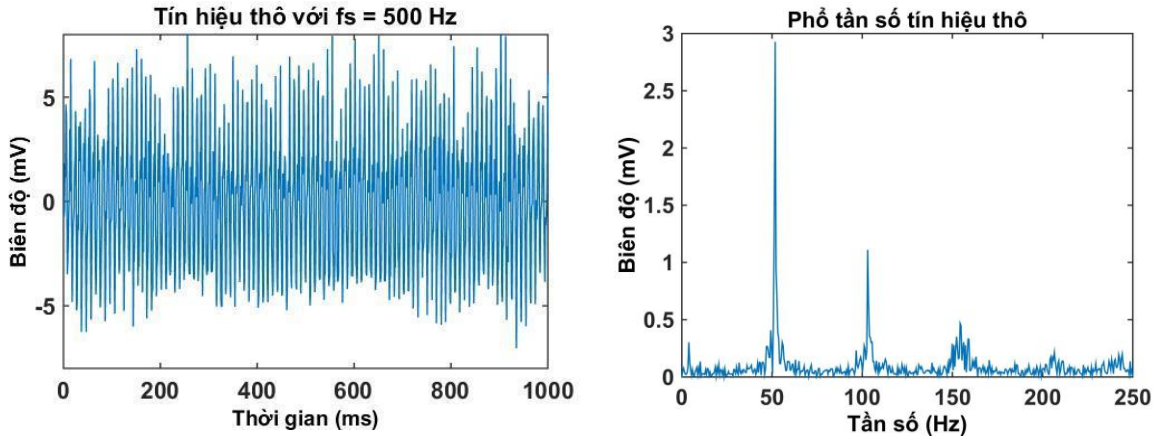
$\Delta L/L$	Hệ số gauge (GF)	ΔR (m Ω)	$V_{ex}(V)$	V_{out} cầu $\frac{1}{4}$ (μV)	Hệ số khuếch đại	$V_{đo}$ (μV)
$1 \mu\epsilon$	2,11	0,2532	3,3	1,74075	128	234,4

Thu thập dữ liệu đo trong khoảng 2 giây với tần số lấy mẫu $f_s = 500 \text{ Hz}$, kết quả hiển thị trên miền thời gian trong hình 3a và phổ tần số được phân tích trên Matlab trong hình 3b. Nhiễu hệ thống khoảng $\pm 6 \text{ mV}$ và lớn gấp 51,2 lần mức tín hiệu $1 \mu\epsilon$ là $234,4 \mu\text{V}$ với tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) khoảng -34 dB. Phổ nhiễu có biên độ lớn và trải rộng với nguồn nhiễu lớn nhất là 50 Hz do hệ thống sử dụng cáp dài và cảm biến strain gauge trong môi trường không được bọc trong khối chống nhiễu như các cảm biến Loadcell.

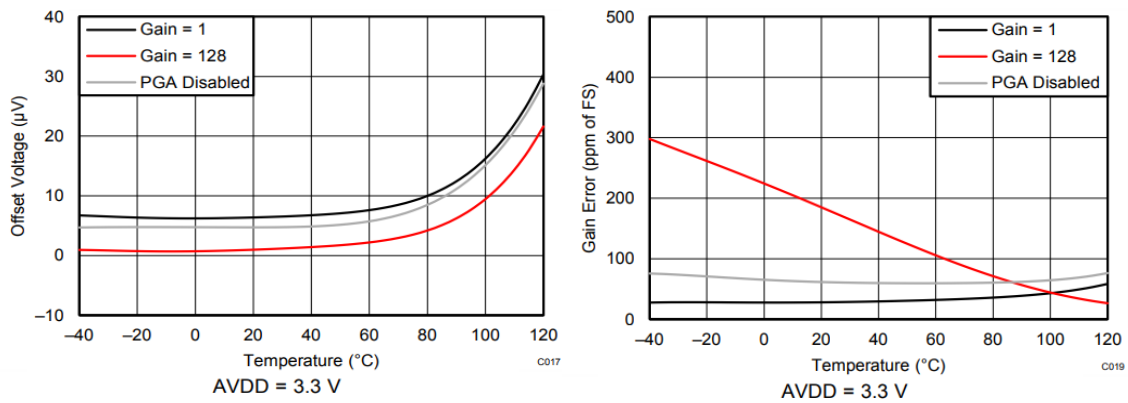
Nguồn nhiễu tác động lên hệ thống có thể phân thành 2 nhóm chính:

- Thứ nhất là ảnh hưởng nhiệt độ môi trường lên cảm biến gauge, điện áp offset bộ khuếch đại, méo hệ số khuếch đại, sai số ADC. Với cấu hình cầu $\frac{1}{4}$ có cảm biến giả đã triệt

tiêu nhiễu nhiệt. Còn điện áp offset và độ phi tuyến sẽ được bù theo đề cử hướng dẫn chip ADS1220 với cảm biến nhiệt on-chip như hình 4.



Hình 3. Tín hiệu đo trên miền thời gian (a) và phổ tần số của tín hiệu (b).

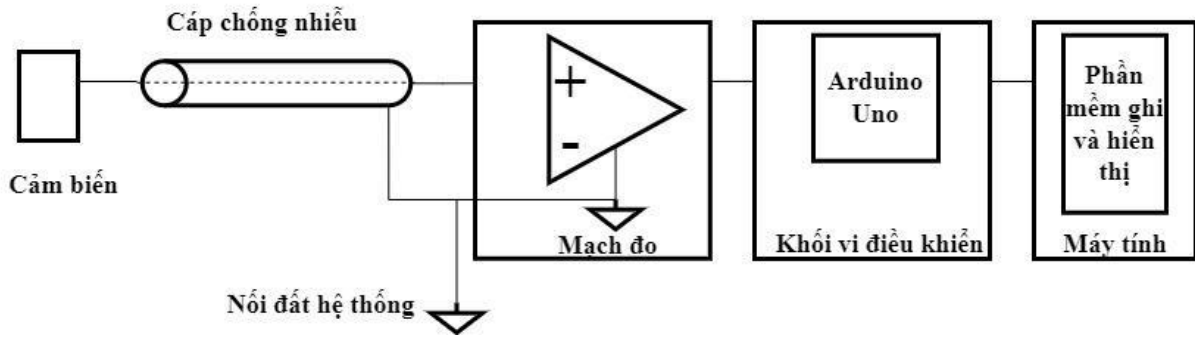


Hình 4. Điện áp offset (a) và méo hệ số khuếch đại (b) theo nhiệt độ.

- Thứ 2 nhiễu điện từ EMI tác động mạnh khi dây đo dài hoạt động như ăng ten thu sóng và nguồn xung clock của hệ thống số. Cần thực hiện lọc nhiễu 50 Hz, cáp có lưới chống nhiễu kết hợp thiết bị có vỏ kim loại

2.3. Thiết kế mạch đo

Sơ đồ khối hệ thống đo biến dạng được mô tả tại Hình 5. Trong đó hệ thống bao gồm: cảm biến, mạch đo, thiết bị đo, khối vi điều khiển và phần mềm ghi/hiển thị được cài đặt trên máy tính. Khối cảm biến sử dụng 2 cảm biến ten-xơ, một cảm biến tích cực dùng để đo biến dạng và một cảm biến giả không đo biến dạng để bù sai lệch do nhiệt độ. Với cấu hình 5 dây, có 2 dây cảm ứng điện áp dùng làm điện áp tham chiếu cho bộ ADC tạo thành hệ thống chuyển đổi tỷ lệ giúp triệt tiêu việc giảm điện áp kích thích do trở kháng dây dẫn. Trong đó khối mạch đo cần kết nối đồng thời lưới chống nhiễu của cáp, vỏ thiết bị và GND của mạch khuếch đại đến hệ thống nối đất giúp giảm nhiễu hệ thống. Cấu hình chip ADS1220 với bộ lọc nhiễu 50 Hz 80 dB giúp giảm khối lượng xử lý cho khối điều khiển. Khối điều khiển sử dụng mạch Arduino Uno thực hiện bộ lọc trung bình dịch chuyển 10 mẫu và gửi dữ liệu lên máy tính.



Hình 5. Sơ đồ kết nối hệ thống.

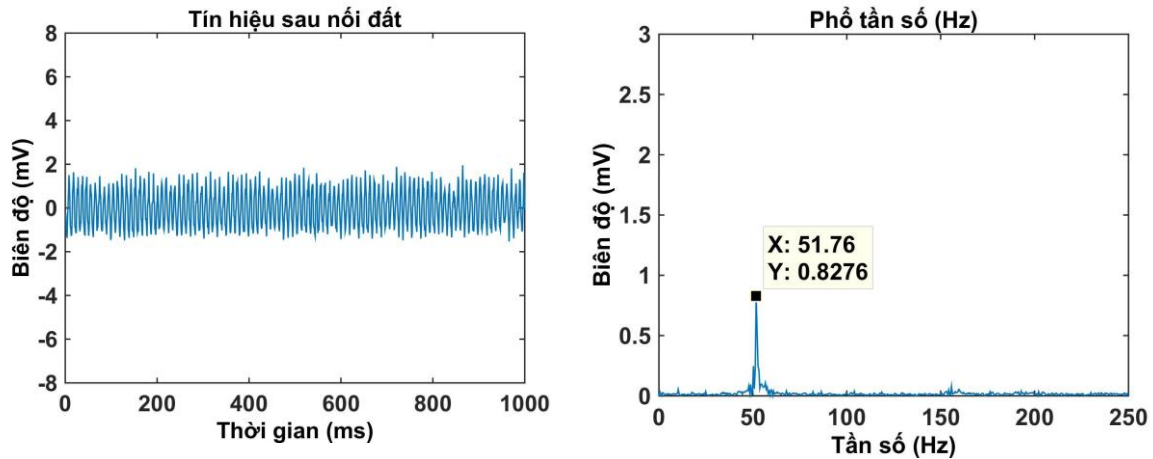


Hình 6. Mạch đo và sơ đồ thiết lập hệ thống đo thực nghiệm.

3. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

Sơ đồ thiết lập hệ thống đo thực nghiệm tại Trường Đại học Giao thông vận tải thể hiện ở Hình 6. Thử nghiệm nối đất giảm nhiễu EMI cho hệ thống cho kết quả triệt nhiễu rất tốt. Biên độ nhiễu giảm đi 4 lần và phổ nhiễu còn chủ yếu tập trung ở 50 Hz kết quả như hình 7.

Áp dụng bộ lọc 50 Hz triệt nhiễu 80 dB on-chip ADS1220 và lọc trung bình dịch chuyển 10 mẫu trên Arduino, kết quả sai số còn khoảng $\pm 0,3 \mu\epsilon$ và trôi đường cơ sở theo thời gian như hình 8. Hiện tượng trôi đường cơ sở do việc mất cân bằng trở kháng ngõ vào bộ khuếch



Hình 7. Tín hiệu đo (a) và phổ tần số của tín hiệu (b) khi thực hiện nối đất triệt nhiễu.

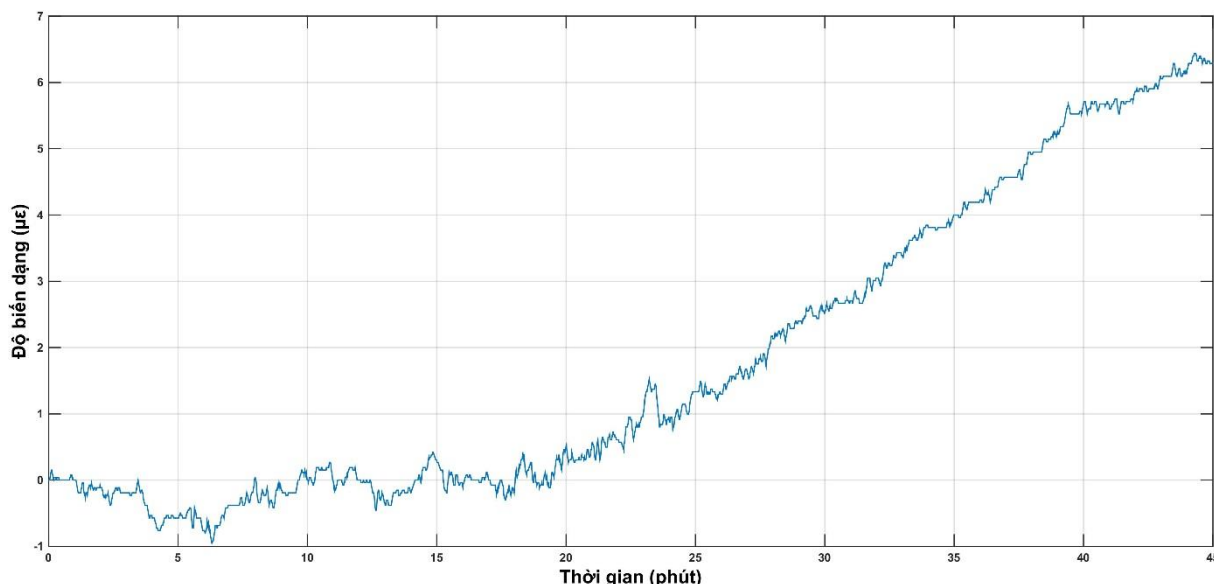
đại vi sai gây trôi offset trong cấu hình cầu $\frac{1}{4}$. Thử nghiệm đo dữ liệu trong 50 phút nhận thấy trong khoảng 20 phút đầu hệ thống không ổn định do nhiệt độ đang tăng nhanh trong chip và ổn định trôi theo thời gian từ sau 20 phút. Các thiết bị đo biến dạng micro-strain như DRA-30A đều khuyến cáo nên khởi động máy đo trước 30 phút để sử dụng.

Sau khi thực nghiệm bù tất cả các nhóm sai số trên, sử dụng thiết bị đo với 5 loại mẫu kết quả so sánh với máy DRA-30A, để đánh giá sai số theo tiêu chuẩn đo lường thì mỗi phép đo phải có tối thiểu 1000 mẫu (ISO/IEC Guide 98-1:2009). Kết quả như bảng 2.

Bảng 2. So sánh kết quả đo 5 loại mẫu giữa thiết bị chế tạo và máy chuẩn.

Mẫu (Tải)	DRA-30A		Thiết bị chế tạo		Sai số (%)
	Trung bình	Phương sai	Trung bình	Phương sai	
1,0 Kg	80,605	0,623	80,3068	0,5988	0,36
2,0 Kg	160,54	0,552	159,577	0,6122	0,59
2,5 Kg	200,56	0,416	199,8257	0,1662	0,36
3,0 Kg	241,19	0,812	240,2614	0,9643	0,38
3,5 Kg	281,40	0,763	281,1399	1,1139	0,09

Dựa vào kết quả ở bảng 2 cho thấy mặc dù thông số kỹ thuật của máy DRA-30A là sai số $\pm 0,2 \%$, nhưng khi đo thử nghiệm tại phòng thí nghiệm thì kết quả cho sai số lớn hơn. Nguyên nhân là điều kiện phòng thí nghiệm chưa đạt chuẩn phòng sạch để đạt sai số nhỏ nhất. Thiết bị chế tạo cũng sẽ đánh giá theo dữ liệu máy DRA-30A.



Hình 8. Khảo sát dữ liệu đo trong khoảng thời gian 50 phút.

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi trình bày quá trình thiết kế, chế tạo thiết bị đo độ biến dạng độ chính xác cao. Thiết bị có cấu trúc gồm mạch đo, bộ xử lý tín hiệu và phần mềm máy tính ghi kết quả. Các kết quả thử nghiệm tại phòng thí nghiệm cho thấy giá trị đo không có sự sai khác so với máy nhập khẩu DRA-30A thể hiện sự hoạt động tốt của thiết bị. Nhờ làm chủ công nghệ, tất cả các thành phần của thiết bị như mạch đo, mạch xử lý tín hiệu, phần mềm giao tiếp đều được nội địa hóa. Điều này cho phép giảm giá thành cho các thiết bị quan trọng trong quan trắc biến dạng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-PHIL_DDT-001. Tác giả xin chân thành cảm ơn các thí nghiệm viên Trung tâm ĐTTH&CGCN GTVT đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. Deshmukh, A. Patange, Experimental and analytical study for uncertainty in strain measurement, Journal of Research and Technology, 3 (2015) 1-5. <https://doi.org/10.17577/IJERTCONV3IS01001>
- [2]. A. Jain, M. A. Maktoomi, M. S. Hashmi, A new circuit to measure resistance variation suitable for strain gauge, International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, 2014, pp. 641-644. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2014.6777032>
- [3]. T. S. Sowmya, C. Prabhavathi, Design and Development of Signal Conditioning Card for Load Cell, 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology, 2018, pp. 439-444. <https://doi.org/10.1109/RTEICT42901.2018.9012233>

- [4]. M. Vopalensky, A. Platil, Temperature drift of Offset and sensitivity in full-bridge magnetoresistive sensors, IEEE Trans. on Mag., 49 (2013) 136-139. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2220535>
- [5]. F. Barisic, K. Spoljaric, H. Hegedus, P. Mostarac, High precision data acquisition system for resistance measurement with Wheatstone bridge, 3rd International Colloquium on Intelligent Grid Metrology, 2020, pp. 104-108. <https://doi.org/10.23919/SMAGRIMET48809.2020.9264015>
- [6]. S. V. Gaikar, N. N. Deshmukh, Effect of excitation voltage and lead wire resistance on strain measurement, 2nd International Conference for Convergence in Technology, 2017, pp. 747-752. <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226228>
- [7]. F. Gruneis, 1/f noise and intermittency due to electron-phonon scattering in semiconductor materials, International Conference on Noise and Fluctuations, 2017, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICNF.2017.7985965>
- [8]. M. Khan, G. Dumstorff, C. Winkelmann, W. Lang, Investigations on Noise Level in AC- and DC-Bridge Circuits for Sensor Measurement Systems, 18th GMA / ITG Conference Sensors and Measurement Systems, 2016, pp. 601 – 605. <http://dx.doi.org/10.5162/sensoren2016/P4.4>
- [9]. S. Liu, C. Tan, H. Wu, F. Dong, J. Jia, Wideband chirp excitation source for bioelectrical impedance spectrum tomography, IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2018, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2018.8409539>
- [10]. J. Zhang, G. Li, Y. Luo, S. Yang, H. Tian, L. Lin, Systematic Proportional Method for Improving the Measurement Accuracy of Passive Sensor Measurement System, IEEE Access, 8 (2020) 3980-3986. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963204>
- [11]. Alexander T. Hristov, Johanna C. Palmstrom, Joshua A. W. Straquadine, Tyler A. Merz, Harold Y. Hwang, Ian R. Fisher, Measurement of elastoresistivity at finite frequency by amplitude demodulation, Review of Scientific Instruments, 89 (2018) 103901. <https://doi.org/10.1063/1.5031136>
- [12]. S. Gu, F. Wang, Z. Chen, L. Zhang, W. Zhang, The research and design of high-precision strain type electronic balance, IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, 2013, pp. 1451-1455. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2013.6566596>
- [13]. Z. Chen, J. Chen, S. Zhou, Embedded electronic scale measuring system based on STM32 single chip microcomputer, 2019 Chinese Automation Congress, 2019, pp. 3062-3065. <https://doi.org/10.1109/CAC48633.2019.8997317>