

## Thiết kế cảm biến lực với dải đo lớn kiểm soát tải trọng cho cầu trục

Design of Force Sensor with Large Range for Load Control of Cranes

Vũ Văn Quang\*, Vũ Toàn Thắng

Trường Đại học Bách khoa Hà Nội – Số 1, Đại Cồ Việt, Hai Bà Trưng, Hà Nội

Đến Tòa soạn: 18-7-2018; chấp nhận đăng: 18-01-2019

### Tóm tắt

Nghiên cứu chế tạo các hệ thống đo lực luôn nhận được sự quan tâm đáng kể của các nhà khoa học, các nhóm nghiên cứu trên thế giới. Các hệ thống này được xây dựng dưới nhiều nguyên lý đo khác nhau và được ứng dụng trong các lĩnh vực khác nhau. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tập trung vào việc thiết kế đơn giản một cảm biến lực, dạng tế bào lực loadcell sử dụng các áp điện trở để kiểm soát tải trọng cho đối tượng là cầu trục. Cảm biến lực được thiết kế cho phép đo lực có độ lớn đến 10000 N với sai số tuyến tính không quá 2%. Bài báo cũng đưa ra các phân tích tính toán các thông số thiết kế cho phép tạo ra các cảm biến lực với dải đo khác nhau.

Từ khóa: Cảm biến lực, loadcell, tải trọng lớn

### Abstract

Researches of designing and producing force measurement systems are receiving considerable attention of scientists and research groups over the world. Such systems are built under various principles and applied into different industrial fields. In this research, the authors are focused on designing a simple load cell by using force sensors in order to control the load of cranes. The measurement range of the sensor is up to 10000 N, with the nonlinearity under 2%. The paper also provides analysis and calculation of important parameters, thus, it is allows to manifest various sensors with similar designs but with different measured ranges.

Keywords: force sensor, loadcell, large load capacity

### 1. Đặt vấn đề

Lực là một trong những đại lượng rất quan trọng trong cơ học mà theo đó các đại lượng khác như áp suất, gia tốc được tính toán theo. Vì vậy, đo lường lực có ảnh hưởng lớn trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật. Nhiều nhóm nghiên cứu đã thiết kế chế tạo hệ thống đo lực cho các ứng dụng khác nhau [1 - 6]. Millward và Rossiter [1] đã chế tạo hệ thống đo lực nhiều thành phần sử dụng cảm biến biến dạng strain gauge cho các thí nghiệm trên các kênh nước. Molland đã thiết kế và xây dựng một hệ thống đo lực 5 thành phần để thử nghiệm trong hầm gió [2] với tải thiết kế tối đa cho lực nâng và lực kéo tương ứng là 756 N và 378 N; mô men trục  $x$ ,  $y$  và  $z$  lần lượt là 463 Nm, 237 Nm và 136 Nm. Joo [5] đã xây dựng một quy trình thiết kế một tổ hợp 6 phân tử loadcell nhỏ gọn cho các ứng dụng rô bốt sử dụng cấu trúc tám song song với tải trọng tối đa cho các lực và mô men là 196 N và 19.6 Nm. Kim [6] đã sử dụng FEM để thiết kế một cảm biến lực/ mô men 6 bậc tự do cho cánh tay rô bốt. Ở nước ta hiện nay, nghiên cứu chế tạo các hệ thống đo lực chưa nhận được sự quan tâm đúng mức. N. Đ. Mạnh [7] đã mô phỏng thiết kế và chế tạo cảm biến lực – mô men 3 bậc tự do. Tuy

nhien, phạm vi đo lực còn nhỏ,  $0 \div 200$  N, và chưa đưa ra được địa chỉ có thể ứng dụng cụ thể.

Việc giám sát và kiểm soát lực là rất quan trọng đối với các máy móc, các thiết bị làm việc với tải trọng lớn, trong đó có cầu trục, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến sự an toàn của thiết bị. Trong các cầu trục, việc nâng hạ vật nặng được thực hiện bởi hệ thống bơm áp lực dầu, thông qua một hệ thống dây cáp và ròng rọc. Việc kiểm soát lực nâng của các cầu trục chủ yếu sử dụng hệ thống đo áp suất dầu [8]. Ưu điểm của phương pháp này là đo chính xác giá trị tải trọng động biến thiên liên tục theo thời gian và tận dụng đối tượng đo chính là áp suất dầu mà cầu trục sử dụng để nâng hạ vật nặng. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp kiểm soát tải trọng thông qua áp lực dầu là bộ phận cảm biến thường có tuổi thọ không cao. Đặc biệt, trong điều kiện cụ thể ở Việt Nam hiện nay, việc sửa chữa hay thay thế cụm cảm biến này rất khó khăn và tốn nhiều thời gian, chi phí. Tuna Balkan [8] trong nghiên cứu của mình cũng đề xuất phương án sử dụng áp điện trở, theo đó, giá trị tải trọng có thể dễ dàng thu được theo vị trí góc gập và đo sự biến dạng trên khớp nối gập. Phương án này đòi hỏi việc bố trí hợp lý các áp điện trở tại những điểm biến dạng của cơ cấu và nó thể hiện một cách trực tiếp

\* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 939226822

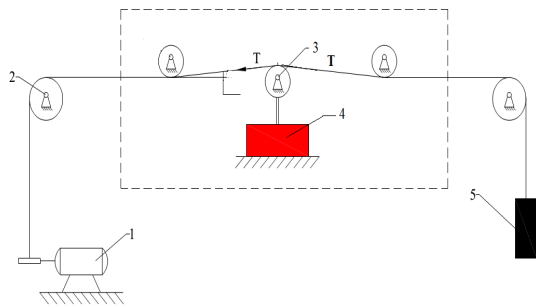
Email: quang.vuvan1@hust.edu.vn

hoặc gián tiếp tải trọng của cầu trục. Việc chế tạo và ứng dụng cảm biến sử dụng áp điện trở cho phép việc kiểm soát tải trọng của cầu trục được mô-đun hóa, theo đó, việc bảo dưỡng sửa chữa hệ thống cũng trở nên khả thi và dễ dàng hơn.

Bài báo này trình bày một thiết kế và các tính toán cho cảm biến loadcell sử dụng áp điện trở với dải đo lực tác động trực tiếp từ 0 đến 10000 N. Việc bố trí cảm biến dưới lực tỷ của ròng rọc mang dây cáp kéo vật nặng cho phép ứng dụng cảm biến vào hệ kiểm soát tải trọng lớn hơn nhiều so với dải đo lực tác động trực tiếp. Thiết kế đảm bảo độ vững chắc của cảm biến khi tải trọng đạt tối đa. Các áp điện trở được dán tại các vị trí tối ưu trên thân cảm biến – nơi sự biến dạng xảy ra rõ rệt nhất, giúp tăng độ nhạy của cảm biến và đảm bảo độ phi tuyến của cảm biến không vượt quá 2%.

**2. Thiết kế cảm biến**

Lợi dụng nguyên lý nâng vật nặng của cầu trục, cảm biến được thiết kế bố trí chịu áp lực của ròng rọc dưới tác dụng của sức căng dây cáp kéo vật nặng (Hình 1).



**Hình 1.** Sơ đồ bố trí loadcell dưới tác dụng của lực căng dây của cầu trục

1. Hệ thống áp lực dầu kéo giữ dây cáp.
2. Ròng rọc cố định lắp trên thân cầu trục.
3. Ròng rọc cố định đặt tỳ lên thân cảm biến lực.
4. Cảm biến lực.
5. Tải trọng cần nâng M.

Theo sơ đồ bố trí cảm biến, loadcell thay vì chịu tác dụng trực tiếp trọng lượng của vật nâng M, với giả thiết sự co giãn của dây cáp là không đáng kể, lực tác dụng lên loadcell  $F_n$  được xác định :

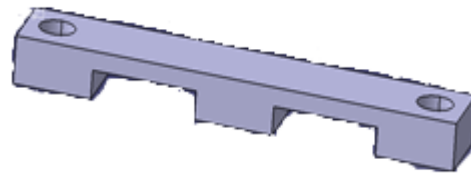
$$F_n = 2T \sin \alpha$$

Trong đó: T - lực căng dây, bằng trọng lượng của vật nặng; M - khối lượng của vật nặng; g – gia tốc trọng trường;  $\alpha$  – góc nâng dây.

Như vậy, thay vì đo trực tiếp trọng lượng của vật nặng, với việc thiết lập góc nâng dây  $\alpha$  hợp lý, cảm biến loadcell được thiết kế vẫn có thể áp dụng cho các

hệ giám sát tải trọng lớn hơn rất nhiều so với dải đo hạn chế của cảm biến.

Hình 2 thể hiện mô hình 3D của cảm biến loadcell với dạng 2 dầm cố định đối xứng nhau. Mô hình có kết cấu đơn giản, không hạn chế việc thiết kế các bộ kích thước nhằm phục vụ các nhu cầu tải trọng lớn tùy ý. Lực tỷ của ròng rọc tác động vào chính giữa mặt trên của loadcell. Bởi vì có 2 ngàm nằm đều 2 bên cho lực tác dụng lên giữa thân loadcell, lực sẽ chia đều cho 2 ngàm, do đó mô hình có độ cứng vững cao hơn. Việc lắp đặt loadcell trên mặt phẳng tạo thế chắc chắn và ổn định cho loadcell. Mô hình thiết kế tạo ra 2 cặp kéo nén trên thanh dầm giống nhau nên có thể sử dụng các áp điện trở để thu được sự biến dạng của thanh dầm. Bốn áp điện trở strain gauge sẽ được dán lên 4 vị trí ứng với các vùng kéo nén lớn nhất trên loadcell, sau đó kết nối mạch điện theo nguyên lý mạch cầu Wheatstone để thu được độ nhạy tốt nhất.



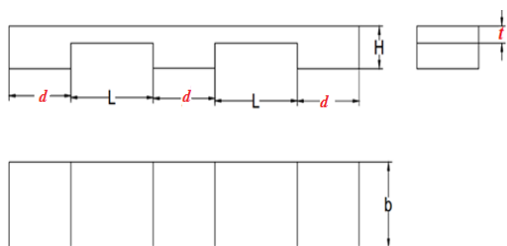
**Hình 2.** Mô hình 3D của cảm biến loadcell

**3. Xây dựng mô hình tính toán thiết kế cảm biến lực**

Mục này đưa ra các phân tích tính toán nhằm xác định độ biến dạng của loadcell khi có lực tác dụng và đưa ra các thông số hình học, các vị trí lý tưởng cho việc dán các áp điện trở.

Một số ký hiệu dùng trong tính toán, tương ứng các thông số hình học được mô tả ở Hình 3.

- E - Mô đun Young,  $N/m^2$ .
- F - Lực đặt lên dầm vào điểm cuối, N.
- $F_{overload}$  - Lực quá tải lớn nhất, N.
- $F_{rating}$  - Lực đánh giá của loadcell, N.
- M - Mô men đặt lên dầm tại điểm cuối, Nm.
- $M_b(x)$  - Mô men đặt trên dầm tại khoảng cách x, Nm.
- I - Mô men quán tính,  $kgm^2$ .
- H - Chiều cao của dầm, m.
- L - Chiều dài dầm, m.
- b - Chiều rộng của dầm, m.
- h - Tỷ lệ giữa chiều rộng dầm b với chiều dài dầm L.
- d - Chiều dài của 2 thành bên và dầm giữa, m.
- t - Chiều dày của dầm, m.



**Hình 3.** Các thông số kích thước hình học trong thiết kế loadcell

Việc xác định các thông số hình học được thực hiện thông qua việc tính toán chuyên vị lớn nhất của loadcell khi chịu tải trọng tối đa, sao cho, dầm tự do ở giữa cao hơn dầm hai bên một lượng đúng bằng chuyển vị lớn nhất nhằm chống quá tải.

Hình 4 thể hiện sơ đồ biểu diễn độ biến dạng uốn cong của mỗi dầm [9]. Theo đó, mỗi dầm được chịu một lực  $F/2$  và  $M$  là mô men điểm cuối. Mô men uốn trên dầm ứng với giá trị  $x$  chạy từ 0 đến  $L$  được tính theo công thức :  $M_b(x) = \frac{1}{2}Fx - M$ . Phương trình vi phân chuyển vị của của dầm, theo [10], là :

$$y''(x) = \frac{1}{EI}(\frac{1}{2}Fx - M) \quad (1)$$

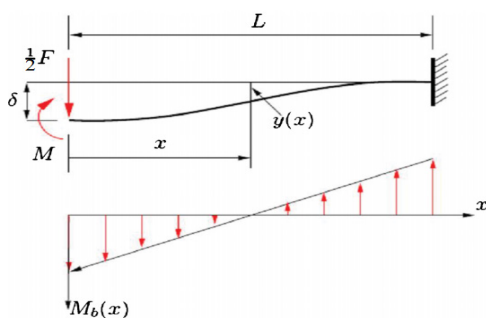
với điều kiện biên :  $y'(0) = y'(L) = 0$

Dầm có mặt cắt hình chữ nhật với chiều rộng  $b$ , chiều dày  $t$ , do đó mô men quán tính được xác định theo công thức :

$$I = \frac{bt^3}{12} \quad (2)$$

Cũng theo sơ đồ Hình 4, mô men  $M$  được tính bằng [9] :

$$M = \frac{1}{4}FL \quad (3)$$



**Hình 4.** Sơ đồ biến dạng uốn cong của mỗi dầm

Kết hợp các điều kiện  $y(L) = 0$  và tích phân 2 lần của (1), thu được độ lệch điểm cuối của dầm  $\delta_{max} = y(0)$  bằng:

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{24EI} \quad (4)$$

Biến dạng dọc theo dầm là một hàm theo khoảng cách, được xác định như sau :

$$\varepsilon(x) = -\frac{M_b(x)t}{2EI} = \frac{Ft}{4EI}(\frac{1}{2}L - x) \quad (5)$$

Theo công thức (4), hàm  $\varepsilon(x)$  đối xứng qua điểm  $x = L/2$ , nhận giá trị lớn nhất và nhỏ nhất tại hai điểm tương ứng  $x = 0$  và  $x = L$ . Tại hai điểm này, giá trị biến dạng  $\varepsilon(x)$  bằng nhau nhưng khác nhau về dấu. Như vậy biến dạng lớn nhất trên một dầm xảy ra tại hai điểm: điểm đầu và điểm cuối của dầm. Đây chính là hai vị trí tối ưu để bố trí các cảm biến áp điện trở.

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon(0) = \frac{FtL}{8EI}; \quad \varepsilon_{min} = \varepsilon(L) = -\frac{FtL}{8EI} \quad (6)$$

Trong trường hợp lực tác dụng đạt tới giới hạn của dải đo cho phép  $F = F_{rating}$ , ta có :

$$\varepsilon_{max} = \frac{tL}{8EI}F_{rating} \quad (7)$$

Mặt khác các áp điện trở luôn tồn có một giá trị biến dạng cho phép tối đa  $\varepsilon_{allow}$ . Đối với các áp điện trở công nghiệp, giá trị biến dạng tương đối cho phép tối đa thường là 3% [9]. Mục đích thiết kế là làm cho cảm biến có độ nhạy tối đa, nên  $\varepsilon_{max} = \varepsilon_{allow}$ , hay:

$$\varepsilon_{allow} = \frac{tL}{8EI}F_{rating} \quad (8)$$

Thay (2) vào (8), ta có :

$$\varepsilon_{allow} = \frac{3L}{2Ebt^2}F_{rating} \quad (9)$$

Suy ra, chiều dày  $t$  của dầm được xác định :

$$t = \sqrt{\frac{3F_{rating}}{2h\sigma_{allow}}} \quad (10)$$

với  $h = b/L$ ;  $\sigma_{allow} = E\varepsilon_{allow}$ ;  $\sigma_{allow}$  - ứng suất tối đa.

Thay (10) và (2) vào (4) ta được :

$$\delta_{max} = \frac{2L^2\varepsilon_{allow}}{9} \sqrt{\frac{2h\sigma_{allow}}{3F_{rating}}} \quad (11)$$

Để đạt được độ cứng dạng tối đa của phần tử biến,  $\delta_{max}$  nhỏ nhất có thể. Do đó, đối với một chiều dày cho

trước  $\delta_{max}$ , độ dài thanh dầm  $L$  và chiều dày  $t$  có thể được tính từ :

$$L = \left( \frac{2F_{rating}}{3h\sigma_{allow}} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{9\delta_{max}}{2\varepsilon_{allow}}} \quad (12)$$

$$\frac{t}{L} = \frac{2\varepsilon_{allow}}{9\delta_{max}} \quad (13)$$

Mặt khác, với cấu trúc của cảm biến, toàn bộ lực tác dụng chuyển hoàn toàn vào lực gây uốn thanh dầm với  $F < F_{rating}$ . Trong trường hợp quá tải,  $F = F_{overload}$ , phần dôi  $F_{overload} - F_{rating}$  được dồn vào thành giữa của cảm biến.

$$F_{overload} - F_{rating} = \sigma_{allow}db$$

Do đó, khả năng chịu tải của cảm biến được xác định theo công thức :

$$\eta = \frac{F_{overload}}{F_{rating}} = 1 + \frac{\sigma_{allow}db}{F_{rating}} \quad (14)$$

Từ (14), chiều dài của hai thành bên và thành giữa  $d$  được xác định thông qua hệ số khả năng chịu tải của cảm biến theo mong muốn.

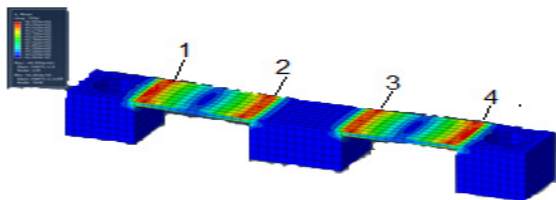
$$d = \frac{(\eta - 1)F_{rating}}{\sigma_{allow}b} \quad (15)$$

Thiết kế cảm biến phụ thuộc vào các yêu cầu kỹ thuật về dải đo  $F_{rating}$ , tỷ lệ quá tải  $\eta$ , độ biến dạng tối đa đối với áp điện trở  $\varepsilon_{allow}$ . Các tham số  $\{h, L, t/L, d\}$  có thể được xác định bằng phương trình (11), (12), (13) và (15). Chọn vật liệu là thép không gỉ với  $E = 200 \text{ GPa}$ , áp điện trở có biến dạng tối đa  $\varepsilon_{allow} = 3\%$  chiều dài áp điện trở. Bộ thông số kích thước hình học được đề xuất như ở Bảng 1.

**Bảng 1.** Các thông số thiết kế của cảm biến

$L, \text{ mm}$	$d, \text{ mm}$	$b, \text{ mm}$	$t, \text{ mm}$	$\delta_{max}, \text{ mm}$
40	30	30	6	0.18

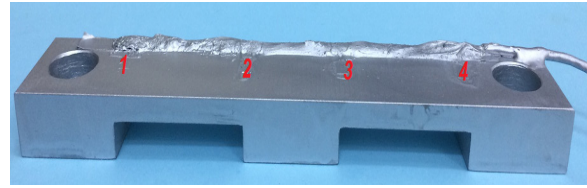
Phần mềm Ansys được sử dụng để kiểm tra biến dạng của loadcell với kích thước và thông số vật liệu đã có. Kết quả biểu đồ phân bố ứng suất trên thanh được thể hiện ở Hình 5. Các điểm gắn ngàm chịu ứng suất kéo nén lớn nhất, trong đó: vị trí 1, 4 là vị trí chịu kéo lớn nhất; vị trí 2, 3 là vị trí chịu nén lớn nhất.



**Hình 5.** Phân bố ứng suất khi loadcell chịu lực tác dụng

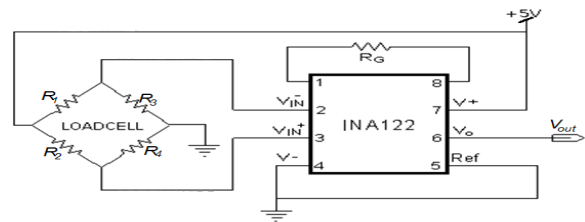
#### 4. Thử nghiệm kiểm tra

Một mô hình loadcell (Hình 6) được chế tạo với các kích thước được thể hiện ở Bảng 1.



**Hình 6.** Mô hình loadcell được chế tạo với dải đo 0 ÷ 10000N 1, 2, 3, 4 – Vị trí dán áp điện trở

Các áp điện trở strain gauge SK-06-125DR-175 [11] được dán tại các vị trí gắn ngàm được dán tại các vị trí gắn ngàm 1, 2, 3, 4 (Hình 5), kết nối với nhau tạo thành một mạch cầu Wheatstone. Mạch cầu được cung cấp một nguồn điện 5 VDC ổn định. Hiệu điện thế đầu ra của mạch cầu được khuếch đại 285 lần, sử dụng khuếch đại đo lường INA122 [12]. Sơ đồ mạch điện biến đổi tín hiệu được thể hiện ở Hình 7, theo đó hệ số khuếch đại được tùy chỉnh theo giá trị của điện trở  $R_G$ . Thí nghiệm sử dụng máy kiểm tra tải trọng GOTECH AI-7000M với lực nén tối đa 20 kN, sai số không quá 0.25 % để kiểm soát và thay đổi lực, trong dải từ 0 đến 10000 N, tác dụng lên điểm chính giữa của loadcell với diện tích tiếp xúc 1 cm<sup>2</sup>.



**Hình 7.** Sơ đồ mạch điện biến đổi tín hiệu

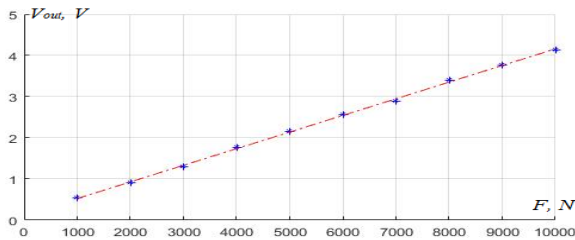
Giá trị điện áp đầu ra của mạch điện biến đổi tín hiệu tương ứng với lực tác dụng lên loadcell được thể hiện ở Bảng 2.

**Bảng 2.** Bảng giá trị hiệu chuẩn cho cảm biến lực với dải đo đến 10000 N

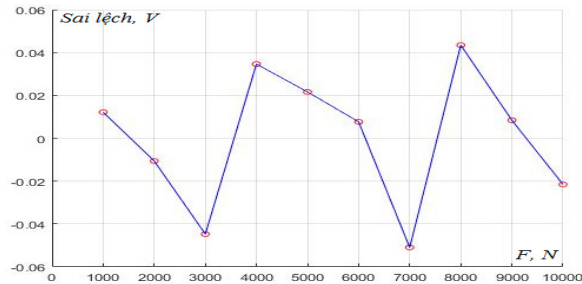
Tải trọng đầu vào, N	Điện áp đầu ra, V
1000	0.536
2000	0.917
3000	1.287
4000	1.770
5000	2.161
6000	2.551
7000	2.897
8000	3.395
9000	3.764
10000	4.138

Sau khi thực hiện tuyến tính hóa dựa trên kết quả thực nghiệm sử dụng phương pháp bình phương tối

thiếu, độ dốc của đường thẳng tốt nhất (Hình 8) - đặc trưng độ nhạy của hệ thống cảm biến lực, được xác định thực nghiệm là  $4.0399 \times 10^{-4} V/N$ . Độ phi tuyến trên dải đo không vượt quá 2% (Hình 9). Độ phi tuyến xuất hiện liên quan đến nhiều yếu tố: vị trí dán của các áp điện trở không chính xác, tính đồng nhất vật liệu không đạt 100%, nguồn điện nuôi không ổn định, v.v. Tuy nhiên các khó khăn này đều có thể được loại bỏ thông qua quá trình hiệu chuẩn cảm biến, tương tự như việc thực hiện thu nhận các giá trị điện áp ở Bảng 2.



**Hình 8.** Đồ thị mối quan hệ điện áp đầu ra và lực tác dụng của cảm biến



**Hình 9.** Sai lệch tuyến tính của cảm biến trên dải đo

## 5. Kết luận

Bài báo đã cung cấp các tính toán và thiết kế cho một cảm biến lực loadcell với dải đo lực đến 10000 N. Phân tích tính toán lý thuyết đã đưa ra bộ thông số thiết kế hợp lý tương thích với dải đo và độ nhạy tối ưu cho cảm biến. Các phân tích này cũng cho phép tạo ra các cảm biến với thiết kế tương tự với dải đo lực thay đổi. Thực nghiệm với mô hình cảm biến được chế tạo cho thấy, độ phi tuyến của cảm biến được kiểm soát ở mức dưới 2% trong toàn bộ dải đo với độ nhạy  $4.0399 \times 10^{-4} V/N$ . Thiết kế đơn giản và các thông số đo lực của cảm biến phù hợp với việc lắp đặt trên các thiết bị cấu trúc

sử dụng hệ thống ròng rọc, dây cáp và áp lực dầu để nâng hạ vật nặng.

## Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hỗ trợ bởi đề tài mã số T2016-PC-072 - trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

## Tài liệu tham khảo

- [1] A. Millward, J. Rossiter, The design of a multi-purpose multi-component strain gauge dynamometer, *J. Strain* (1983) 27–30.
- [2] A.F. Molland, A five-component strain gauge wind tunnel dynamometer, *J. Strain* 12 (1) (1978) 7–13.
- [3] R.A.B. Almeida, D.C. Vaz, A.P.V. Urgueira, A.R. Janeiro Borges, using ring strainsensors to measure dynamic forces in wind-tunnel testing, *J. Sens. Actuators A* 185 (2012) 44–52.
- [4] M. Dubois, Six-component strain-gauge balances for large wind tunnels, *J. Exp. Mech.* 21 (1981) 401–407.
- [5] J.W. Joo, K.S. Na, D.I. Kang, Design and evaluation of a six-component load cell, *J. Meas.* 32 (2002) 125–133.
- [6] G.S. Kim, Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot, *J. Sens. Actuators Phys.* 133 (2007) 27–34.
- [7] N. Đ. Mạnh, P. P. Khánh, B. V. Trung, B. V. Thành và P. X. Khải, Mô phỏng thiết kế và chế tạo cảm biến lực - momen 3 bậc tự do, Hội nghị khoa học kỹ thuật đo lường toàn quốc lần thứ VI, ngày 21-22 tháng 5/2015, Hà Nội.
- [8] Tuna Balkan, A load control system for mobile cranes, *Mechanics Research*, Vol.23, No.4, pp. 395-400, 1996.
- [9] Farhad Aghili, Design of a load cell with large overload capacity, *Transactions – Canadian Society for Mechanical Engineering* 34 (3), 2010.
- [10] Lê Ngọc Hồng, Lê Ngọc Thạch, Sức bền vật liệu, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, tháng 10-2017.
- [11] Datasheet strain gauge N11-FA-5-120-11.
- [12] Datasheet khuếch đại đo lường INA122.