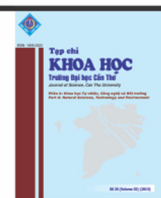




Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ
website: sj.ctu.edu.vn



MẠCH KHUẾCH ĐẠI STRAIN GAUGE DÙNG VI MẠCH CHUYÊN DỤNG 1B31AN

Võ Minh Trí¹

¹Bộ môn Tự động hóa, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ

Thông tin chung:

Ngày nhận: 31/10/2013

Ngày chấp nhận: 28/04/2014

Title:

Design of a strain gauge amplifier using integrated circuit 1B31AN

Từ khóa:

Cảm biến biến dạng, khuếch đại strain gauge, cảm biến trọng lượng

Keywords:

Strain gauge measurement, strain gauge signal conditioning, amplifier

ABSTRACT

Output signals directly from strain gauges have small amplitude expressed in microstrains; therefore, amplifying and processing these signals has always been considered in precise measurement. The aim of this paper is to survey and implement a special integrated circuit designed for strain gauge amplification, namely 1B31AN (Analog Devices), in order to support research and teaching activities at Measurement and Sensors Laboratory, Department of Automation Technology, College of Engineering Technology, Can Tho University. The study results show that this integrated circuit is highly functionable, being suitable for training on the principles and configuration, amplification, and signal processing of strain gauges. This integrated circuit is compatible with strain-gauge configurations of quarter-bridge, half-bridge, and full-bridge circuits. Besides, the amplitude and quality of the output signal from the amplifier can be adjusted depending on the requirements of low pass filtering and gain adjustment.

TÓM TẮT

Tín hiệu ngõ ra trực tiếp từ các cảm biến biến dạng strain gauge có biên độ rất nhỏ tính bằng micro strain, vì vậy việc khuếch đại và xử lý tín hiệu đo từ các train gauge luôn là vấn đề được quan tâm trong đo lường chính xác. Đề tài này nhằm khảo sát và ứng dụng mạch khuếch đại tín hiệu cho cảm biến biến dạng dùng vi mạch 1B31AN của hãng Analog Device để phục vụ cho nghiên cứu và giảng dạy ở phòng thí nghiệm Đo lường và cảm biến, bộ môn Tự động hóa, Khoa Công nghệ, Trường Đại học Cần Thơ. Kết quả cho thấy 1B31AN được thiết kế có tính mô đun hóa rất cao, rất phù hợp dùng cho giảng dạy về nguyên lý và kết nối strain gauge, khuếch đại, và xử lý tín hiệu đo. Vì mạch này được thiết kế để tương thích với các loại cấu hình cầu như đơn, hai nửa, hay toàn cầu. Bên cạnh đó, biên độ và chất lượng của tín hiệu ngõ ra có thể thay đổi được tùy theo yêu cầu dựa vào tính năng lọc hạ thông và điều chỉnh hệ số khuếch đại.

1 GIỚI THIỆU

Strain gauge là những phần tử cảm biến được chế tạo bằng bán dẫn hay kim loại mà điện trở của nó thay đổi khi có tác động của ngoại lực. Cấu tạo của strain gauge là một đoạn dây dẫn kim loại được dán trên một màng mỏng thường là plastic theo hình zigzag. Khi bị kéo hay nén theo chiều tích cực

thì điện trở của strain gauge thay đổi. Strain gauge được sử dụng nhiều trong chế tạo loadcell, cảm biến đo moment, áp suất, lưu lượng như là những phần tử sơ cấp.

Sự thay đổi điện trở của strain gauge là rất nhỏ vì các biến dạng chỉ tính bằng micro-strain. Yêu

cầu đặt ra khi thiết kế mạch khuếch đại tín hiệu cho strain gauge là phải đảm bảo được các yêu cầu:

- Điều chỉnh hệ số khuếch đại theo yêu cầu
- Cho phép loại bỏ các thành phần nhiễu
- Hỗ trợ các loại cấu hình mạch cầu

Thiết kế mạch khuếch đại có thể sử dụng các linh kiện điện tử thông dụng như BJT, OPAMP và kết hợp với các linh kiện thụ động R, L, C. Tuy nhiên độ chính xác không cao do chất lượng linh kiện và khả năng khử nhiễu khi khuếch đại. Vì thế việc sử dụng các vi mạch chuyên dụng để thiết kế mạch khuếch đại cho strain gauge là xu hướng mới hiện nay. Texas Instrument đã phát triển vi mạch INA125 có thể dùng để khuếch đại strain gauge. Tuy nhiên vi mạch này còn nhiều hạn chế về khả năng cấu hình cầu và chống nhiễu.

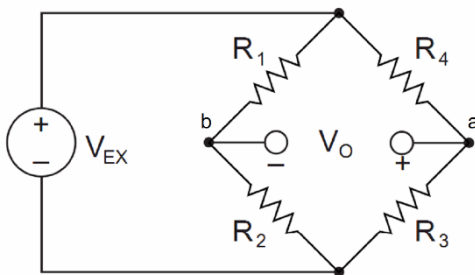
Đề tài này nhằm mục đích khảo sát chức năng và thiết kế mạch khuếch đại tín hiệu cho strain gauge dùng vi mạch 1B31AN để phục vụ cho học tập và giảng dạy môn Đo lường và Cảm biến ở Bộ môn Tự động hóa.

2 PHƯƠNG PHÁP THỰC HIỆN

2.1 Tổng quan

Như đã giới thiệu strain gauge được dùng như những phần tử sơ cấp để chế tạo load cell, cảm biến đo moment, áp suất, lưu lượng,... và hầu hết các cảm biến này đều sử dụng strain gauge ở dạng cầu Wheatstone.

Cầu Wheatstone là một mạch điện được sử dụng để đo một điện trở chưa biết bằng cách cân bằng hai nhánh của một mạch cầu, trong đó có một nhánh chứa các thành phần chưa biết. Hoạt động của nó tương tự như một cầu phân thế. Nó được phát minh bởi Samuel Hunter Christie vào năm 1833 và được cải thiện và phổ biến bởi Charles Wheatstone vào năm 1843. Một trong những mục đích sử dụng ban đầu của cầu Wheatstone là dùng vào việc phân tích và so sánh (Ekelof, 2001).



Hình 1: Mạch căn bản của cầu Wheatstone

Một cách tổng quát, cầu Wheatstone có dạng như Hình 1, các thành phần trở kháng R_1 , R_2 , R_3 , R_4 là các điện trở thuần. Cầu được kích bằng nguồn điện áp V_{EX} , ngõ ra V_O là điện thế chênh lệch giữa hai nút a và b. Điện thế V_O được tính:

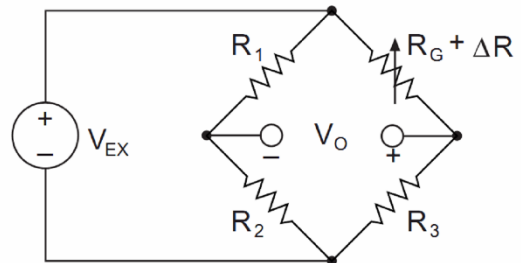
$$V_O = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{EX} \quad (1)$$

R_1 , R_2 , R_3 , R_4 được chọn sao cho khi ở trạng thái cân bằng thì V_O có giá trị 0V.

Thông thường khi thiết kế người ta thường chọn các giá trị điện trở sao cho ở trạng thái cân bằng $R_2 = R_3$, $R_1 = R_4$, hoặc $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$.

Trong các mạch cảm biến, cầu Wheatstone được sử dụng bằng cách thay thế các điện trở R_1 , R_2 , R_3 , R_4 trên Hình 1 bằng các strain gauge, tùy trường hợp mà số strain gauge được mắc vào cầu có thể là 1, 2 hoặc 4. Do đó từ dạng mạch cầu Wheatstone tổng quát ta có các dạng biến thể sau:

a. Quarter-Bridge



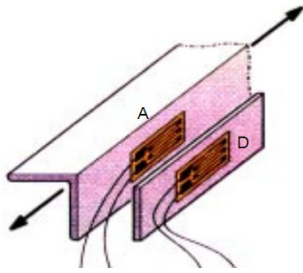
Hình 2: Quarter-Bridge

Ở dạng mạch cầu này, chỉ có một strain gauge được sử dụng, sơ đồ nguyên lý như Hình 2. Do $R_1 = R_2 = R_3 = R_G = R$, với R_G là điện trở của strain gauge khi chưa bị biến dạng. Khi có tác động vào vật chứng, điện trở của strain gauge sẽ thay đổi một lượng ΔR . Khi đó, V_O được tính:

$$V_O = \left(\frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) V_{EX} \quad (2)$$

Ảnh hưởng của nhiệt độ

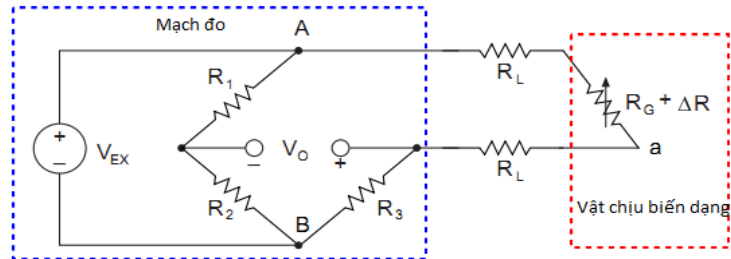
Thực tế, yếu tố nhiệt độ bên ngoài ảnh hưởng trực tiếp lên điện trở của strain gauge làm giảm độ chính xác của kết quả đo. Trong trường hợp này để hạn chế ảnh hưởng của nhiệt độ người ta sử dụng thêm một dummy gauge để dán vào vật chứng nhưng ở trạng thái không hoạt động.



Hình 3: Sử dụng dummy gauge để tránh ảnh hưởng của nhiệt độ

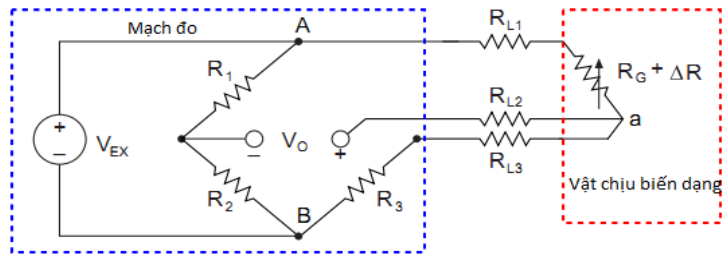
Như trên Hình 3 lúc này strain gauge A là strain gauge được dán lên vật chịu biến dạng, còn strain gauge D không được dán trực tiếp lên vật chịu biến dạng mà dán lên vật không chịu biến dạng ở gần đó. Lúc này cả 2 strain gauge cùng chịu tác động của cùng một điều kiện nhiệt độ nên ảnh hưởng của nhiệt độ được bỏ qua. Tương ứng các strain gauge A và D trên Hình 3 và R_G và R_1 trên Hình 2 với nhau thì công thức tính điện thế V_O vẫn được tính như công thức (2).

Ảnh hưởng của điện trở dây dẫn



Hình 4: Ảnh hưởng của điện trở dây dẫn ở mạch đo dạng Quarter-Bridge

a) Two-Wire Connection



b) Three-Wire Connection

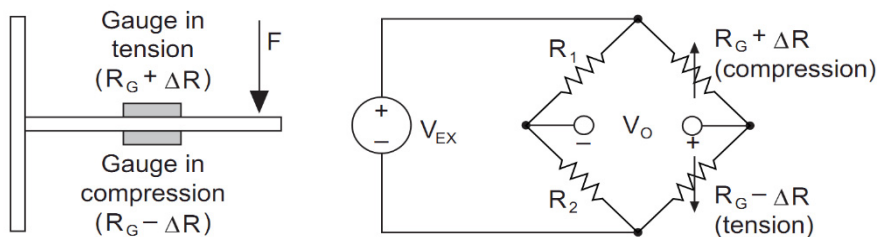
Do mạch đo và vật chịu biến dạng đặt xa nhau ở một khoảng cách nhất định nên cần có dây nối giữa strain gauge và mạch đo. Chính các đoạn dây dẫn này làm xuất hiện thêm thành phần điện trở R_L như trên Hình 4a.

Thành phần điện trở này làm cho cầu bị mất cân bằng ngay cả khi không có tác động làm strain gauge thay đổi điện trở. Mặt khác, điện trở của dây dẫn cũng chịu tác động của nhiệt độ bên ngoài nên khi nhiệt độ thay đổi R_L cũng thay đổi theo làm

cho cầu bị mất ổn định hơn.

Để hạn chế ảnh hưởng của điện trở dây dẫn và nhiệt độ người ta cải tiến bằng cách thay đổi cách đấu dây dẫn như Hình 4b. Lúc này cả 2 đoạn Aa và aB đều được bù điện trở dây dẫn và cùng chịu tác động của nhiệt độ nên cầu sẽ cân bằng khi không có tác động. Đoạn dây dẫn có điện trở R_{L2} mang dòng điện rất nhỏ về mạch đo nên điện thế rơi trên dây dẫn này rất nhỏ và có thể bỏ qua.

b. Half-Bridge



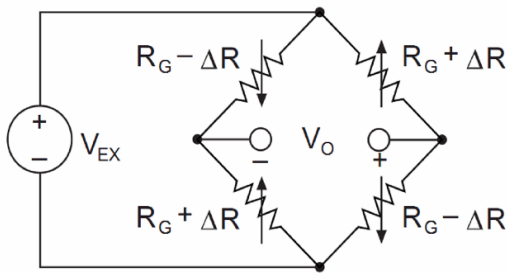
Hình 5: Half-Bridge

Sơ đồ nguyên lý và ứng dụng của mạch đo dạng Half-Bridge được giới thiệu ở Hình 5. Mạch đo Half-Bridge sử dụng 2 strain gauge ở trạng thái tích cực nhưng trong đó có 1 strain gauge chịu nén và 1 strain gauge chịu kéo, độ nhạy tăng gấp đôi so với dạng Half-Bridge. Mạch thiết kế dạng này đã loại bỏ ảnh hưởng của nhiệt độ. Điện áp lệch V_0 được tính theo công thức (3):

$$V_0 = \left(\frac{R - \Delta R}{2R} - \frac{1}{2} \right) V_{EX} \quad (3)$$

c. Full-Bridge

Mạch Full-Bridge sử dụng 4 strain gauge, trong đó có 2 strain gauge chịu nén và 2 strain gauge chịu kéo. Sơ đồ mạch Full-Bridge như Hình 6.



Hình 6: Full-Bridge

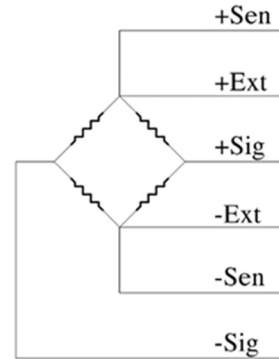
Điện thế V_0 được tính theo công thức (4):

$$V_0 = \left(\frac{R - \Delta R}{2R} - \frac{R + \Delta R}{2R} \right) V_{EX} \quad (4)$$

Như đã điểm qua ở trên, để cầu Wheatstone hoạt động cần phải cấp một điện áp nuôi V_{EX} (excitation voltage). Nguồn điện áp này thường có giá trị trong khoảng 3V – 15V. Nếu điện áp này lớn thì điện dòng điện chạy qua các strain gauge trong các nhánh cũng lớn vì thế sẽ làm ảnh hưởng đến điện trở của strain gauge do ảnh hưởng của nhiệt độ bản thân các strain gauge sinh ra (self-heating).

Điện áp kích thích V_{EX} cũng ảnh hưởng đến điện áp lệch V_0 của cầu (thể hiện trong các công thức (1), (2), (3)), nếu V_{EX} không được giữ ổn định thì V_0 cũng sẽ không ổn định và làm ảnh hưởng đến kết quả đo. Vì thế mạch nguồn nuôi cho cảm biến được thiết kế thêm chức năng remote sensing. Chức năng này cho phép mạch kiểm tra điện áp V_{EX} trên mạch cầu bằng đường hồi tiếp điện thế dùng 2 dây dẫn sense high và sense low tại điểm nối dây cấp điện thể kích thích cho cảm biến. Đường hồi tiếp điện thế này đưa về bộ nguồn để so

sánh và bù thêm lượng điện áp rơi trên dây dẫn. Vì thế những cảm biến loại này trở nên có 6 dây (Hình 7).



Hình 7: Sơ đồ nguyên lý của cầu 6 dây

2.2 Nội dung

2.2.1 IC khuếch đại tín hiệu IB31AN

a. Chức năng

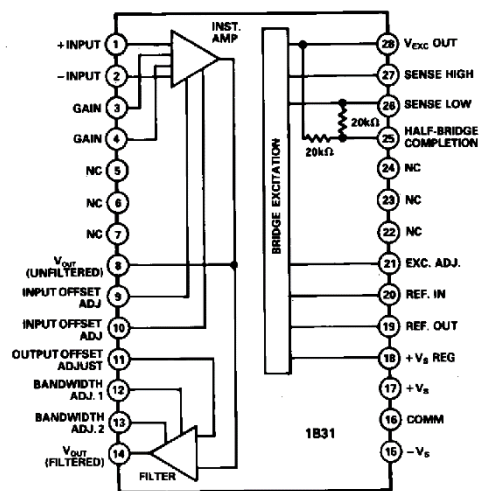
– IC được thiết kế chuyên dùng để khuếch đại tín hiệu cho các cảm biến, mạch đo có dạng cầu và nửa cầu.

– Điện thể kích thích cho cảm biến thay đổi được và chức năng remote sensing hỗ trợ cho các cảm biến 6 dây, 4 dây, nửa cầu.

– Bộ lọc tín hiệu (10 Hz – 20 kHz), cho phép tùy chỉnh.

– Hệ số khuếch đại thay đổi được trong khoảng 2 mV/V – 5.000 mV/V.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

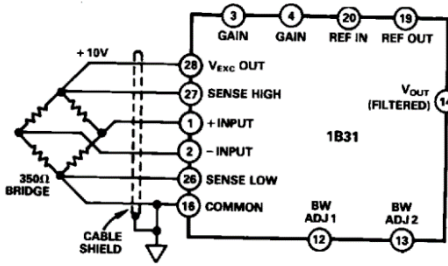


Hình 8: Sơ đồ khối chức năng của IC IB31AN

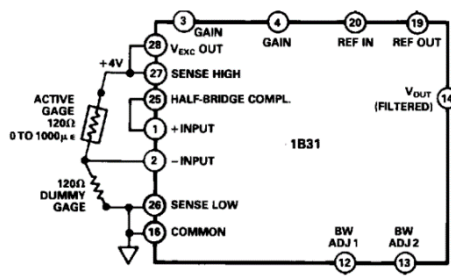
b. Kết nối với cảm biến

IC 1B31 hỗ trợ các loại cảm biến loại 6 dây, 4

dây và mạch đo dạng nửa cầu có trở kháng 120 Ω hoặc lớn hơn (Analog Devices, 1996).



a. Cảm biến 6 dây



b. Đo nửa cầu

Hình 9: Sơ đồ nguyên lý kết nối với cảm biến và strain gauge

c. Điều chỉnh điện áp cấp nguồn cho cảm biến V_{EXC}

Điện áp cấp nguồn cho cảm biến (điện áp kích) V_{EXC} được đặt trước 10 V khi nối chân 19 (REF OUT) với chân 20 (REF IN). Để tăng điện áp V_{EXC} cần mắc thêm điện trở R_{EXT} từ chân 21 (EXC ADJ) tới chân 26 (HALF-BRIDGE COMPL) như Hình 10a.

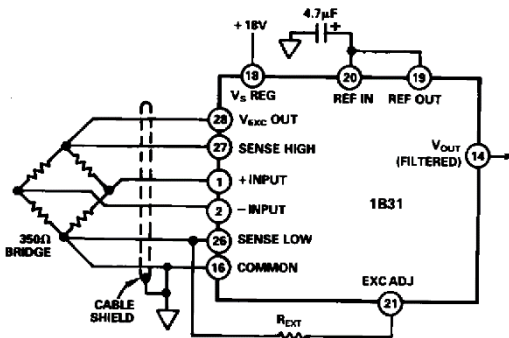
Giá trị điện trở R_{EXT} được tính theo công

thức (5), (6):

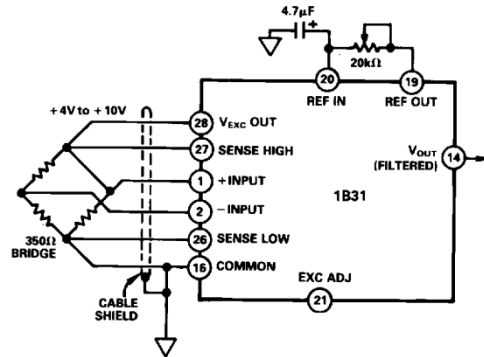
$$R_T = \frac{10k\Omega \times V_{REF_OUT}}{V_{EXC} - V_{REF_OUT}}, \quad (5)$$

$$V_{REF_OUT} = 6,8V$$

$$R_{EXT} = \frac{20k\Omega \times R_T}{20k\Omega - R_T} \quad (6)$$



a. V_{EXC} 10 V – 15 V



b. V_{EXC} 4 V – 10 V

Hình 10: Điện thế cấp nguồn cảm biến V_{EXC}

Để giảm điện thế V_{EXC} thì mắc một biến trở 20 kΩ giữa chân 19 (REF OUT) và chân 20 (REF IN) và một tụ 4.7 μF từ chân 20 tới chân 16 (COMMON) như Hình 10b, lúc này V_{EXC} thay đổi được trong khoảng 4 V – 10 V.

d. Điều chỉnh hệ số khuếch đại

Hệ số khuếch đại G được tính theo công thức:

$$G = 2 + \frac{80k\Omega}{R_G} \quad (7)$$

Trong đó R_G là điện trở nối giữa chân 3 và chân 4. Dựa vào công thức (7) nếu muốn thay đổi hệ số khuếch đại thì chỉ cần thay đổi giá trị điện trở R_G , vì thế nên sử dụng R_G là một biến trở để dễ dàng điều chỉnh khi sử dụng.

e. Điều chỉnh tần số cắt của bộ lọc hạ thông (Low pass filter)

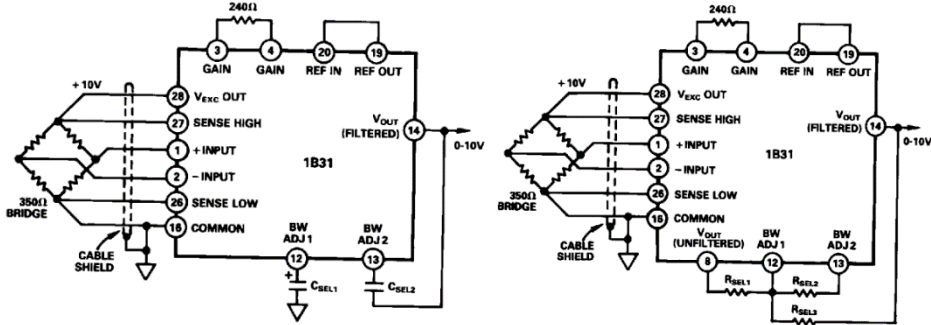
Tần số cắt của bộ lọc hạ thông được thiết kế mặc định ở 1 kHz. Để thay đổi tần số cắt thấp hơn 1 kHz cần mắc thêm 2 tụ điện giữa chân 12 với chân 16 và chân 13 với chân 14 như Hình 11a. Giá trị của các tụ điện được tính theo công thức:

$$C_{SEL1} = 0.015\mu F \left(\frac{1kHz}{f_C} - 1 \right) \quad (8)$$

$$C_{SEL2} = 0.0022\mu F \left(\frac{1kHz}{f_C} - 1 \right) \quad (9)$$

Với f_C là tần số mong muốn ($f_C < 1 \text{ kHz}$).

Đối với tần số cắt lớn hơn 1 kHz thì mắc thêm 3 điện trở R_{SEL1} , R_{SEL2} , R_{SEL3} như Hình 11b.



a. Tần số dưới 1 kHz

b. Tần số trên 1 kHz

Hình 11: Thay đổi tần số bộ lọc tín hiệu

Giá trị của các điện trở này được tính theo công thức (10), (11), (12):

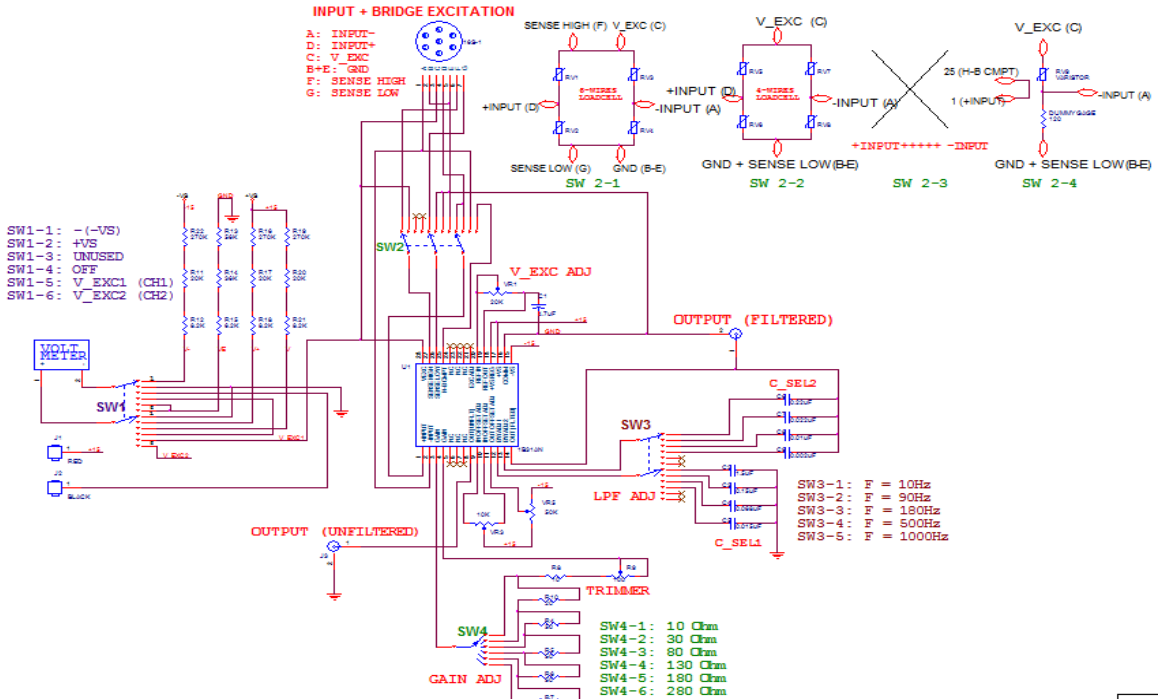
$$R_{SEL1} = 20k\Omega \left/ \left[\frac{f_C}{1kHz} - 1 \right] \right. \quad (10)$$

$$R_{SEL2} = 16k\Omega \left/ \left[\frac{f_C}{1kHz} - 1 \right] \right. \quad (11)$$

$$R_{SEL3} = 40k\Omega \left/ \left[\frac{f_C}{1kHz} - 1 \right] \right. \quad (12)$$

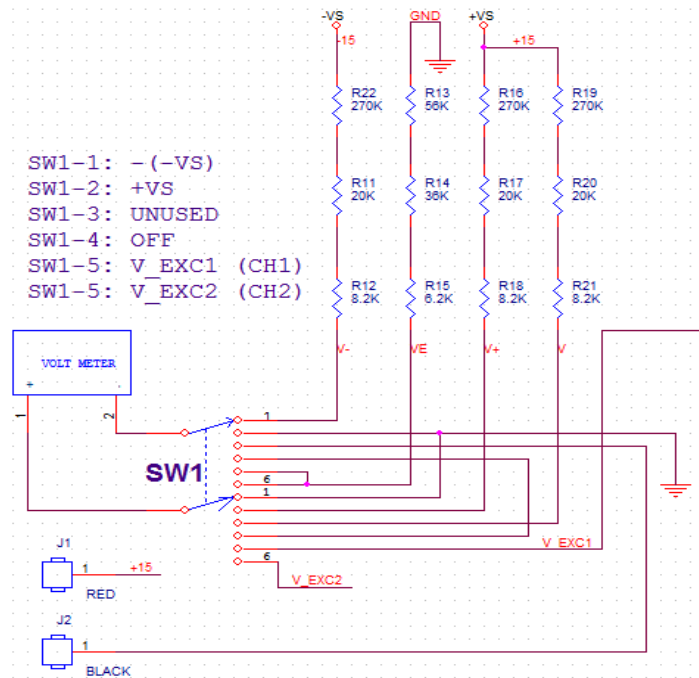
2.2.2 Thiết kế mạch khuếch đại

Chức năng của của từng khối được trình bày cụ thể dưới đây:



Hình 12: Sơ đồ nguyên lý mạch khuếch đại

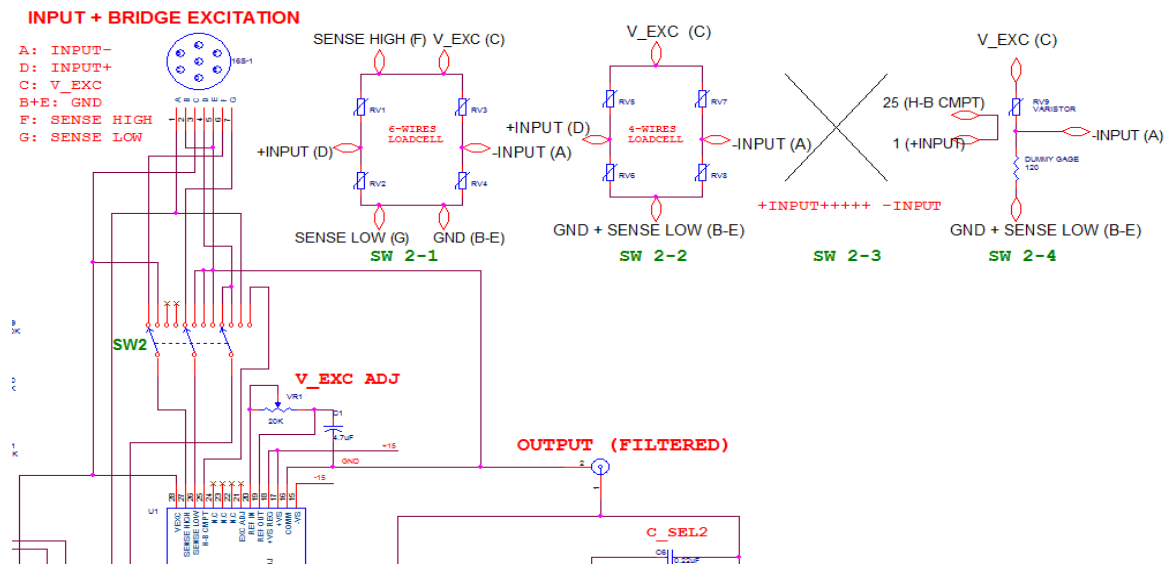
Hình 13: Khối mạch kiểm tra điện áp dùng Voltmeter



Xoay SW1 để thay đổi các vị trí kết nối của chân (+) và chân (-) của Voltmeter với các điểm cần đo điện áp (Hình 13).

- Vị trí 1: đo điện áp -VS
- Vị trí 2: đo điện áp +VS

- Vị trí 3: không dùng
- Vị trí 4: không dùng
- Vị trí 5: đo V_{EXC} của kênh 1
- Vị trí 6: đo V_{EXC} của kênh 2

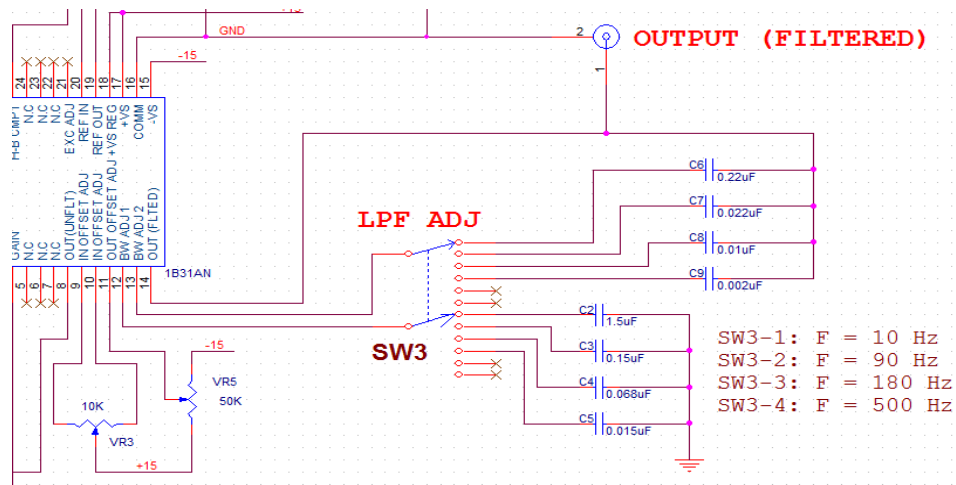


Hình 14: Chọn kiểu kết nối cảm biến

Load cell kết nối với mạch khuếch đại thông qua đầu nối 16S-1. Tùy theo loại cảm biến mà xoay SW2 để chọn cấu hình kết nối cho thích hợp (Hình 14).

- Vị trí 1: kết nối với cảm biến 6 dây

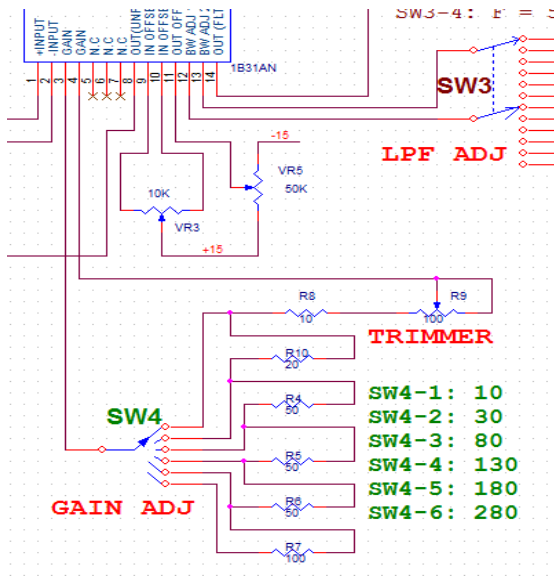
- Vị trí 2: kết nối với cảm biến 4 dây
- Vị trí 3: nối tắt ngõ vào INPUT+ và INPUT- của IC để điều chỉnh input offset
- Vị trí 4: kết nối với mạch nửa cầu



Hình 15: Điều chỉnh tần số cắt của bộ lọc hạ thông

Tần số cắt của mạch lọc hạ thông có thể thay đổi trong khoảng từ 10 Hz đến 1 kHz bằng cách kết hợp các tụ hay điện trở bên ngoài. Tần số cắt của mạch lọc hạ thông được thay đổi bởi SW3 (Hình 15), khi xoay SW3 thì các chân chức năng của mạch lọc được thay đổi vị trí để ghép nối với các giá trị tụ điện khác nhau, từ đó tần số cắt được thay đổi.

- Vị trí 1: tần số cắt 10 Hz
- Vị trí 2: tần số cắt 90 Hz
- Vị trí 3: tần số cắt 180 Hz
- Vị trí 4: tần số cắt 500 Hz
- Vị trí 5: tần số cắt 1000 Hz



Hình 16: Điều chỉnh hệ số khuếch đại

Độ lợi của mạch khuếch đại được điều chỉnh thông qua SW4 và một biến trở tinh chỉnh (Hình 16). Điều chỉnh SW4 sẽ làm thay đổi các giá trị điện trở có giá trị cố định (10 Ω - 280 Ω) và các điện trở này được mắc nối tiếp với biến trở tinh chỉnh có giá trị thay đổi từ 0 Ω - 100 Ω .

Như vậy đối với mạch khuếch đại này độ lợi có thể điều chỉnh trong khoảng:

$$G_{MAX} = 2 + \frac{80k\Omega}{10\Omega + 0\Omega} = 8002 \quad (13)$$

$$G_{MIN} = 2 + \frac{80k\Omega}{280\Omega + 100\Omega} = 212 \quad (14)$$

3 KẾT QUẢ VÀ ĐÁNH GIÁ

Để kiểm tra hoạt động và đánh giá chất lượng của thiết bị ta tiến hành một số thí nghiệm để kiểm tra:

3.1 Thí nghiệm 1: Khảo sát đáp ứng tần số của mạch khuếch đại

- Nối các dây của loadcell vào ngõ vào của mạch khuếch đại
- Xoay núm chỉnh để đặt độ khuếch đại mong muốn
- Điều chỉnh V_{EXC} sao cho giá trị bằng 10 V
- Sử dụng Card NI myDAQ để xem tín hiệu ngõ ra

Thay đổi núm chỉnh tần số cắt của bộ lọc và lưu lại kết quả.

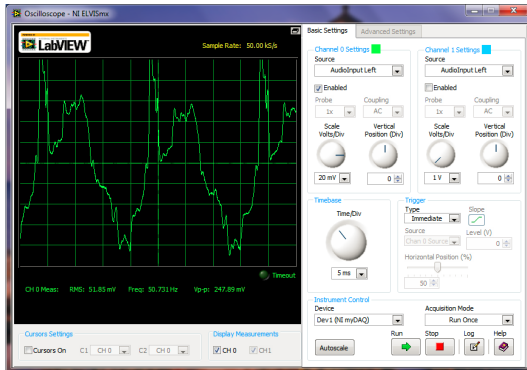
Kết quả thí nghiệm cho thấy khi điều chỉnh núm chỉnh tần số cắt của mạch lọc giảm dần thì các thành phần tần số nhiễu bị triệt tiêu dần và biên độ sóng nhiễu cũng giảm dần. Cụ thể:

Khi $f_c = 1000$ Hz, trong sóng nhiễu có các thành phần:

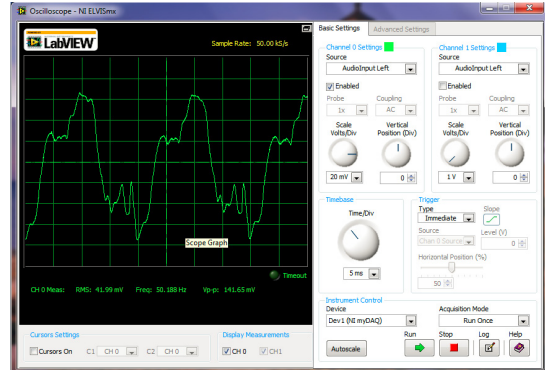
- Chu kì 20 ms: tần số 50 Hz, biên độ khoảng 100 mV
- Chu kì 2.5 ms: tần số 400 Hz

- Chu kì 2 ms: tần số 500 Hz
- Chu kì 1 ms : tần số 1000 Hz

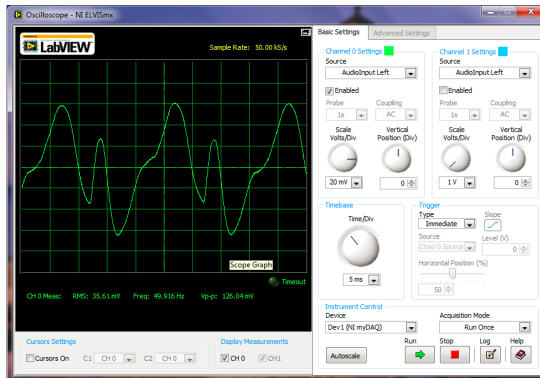
Khi $f_c = 10$ Hz, tín hiệu ngõ ra chỉ còn lại thành phần nhiễu có tần số 50 Hz nhưng biên độ đã suy giảm còn rất nhỏ (khoảng 5 mV).



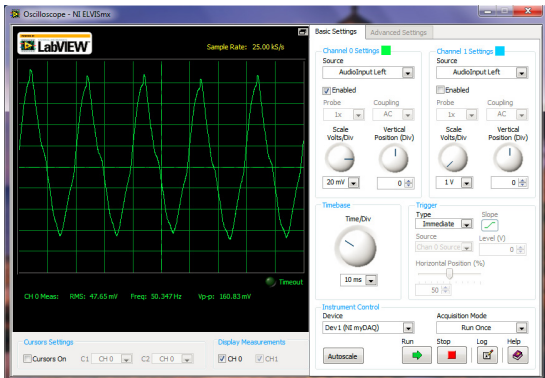
a. $f_c = 1$ kHz



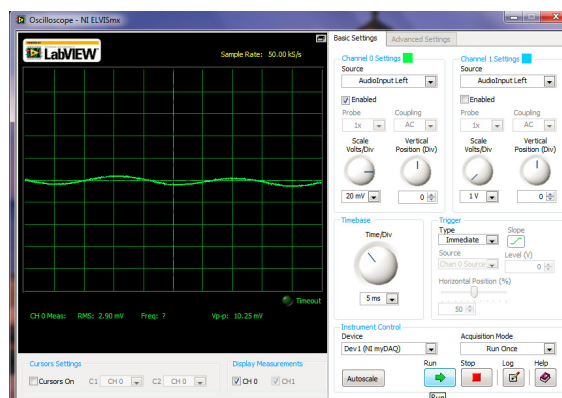
b. $f_c = 500$ Hz



c. $f_c = 180$ Hz



d. $f_c = 90$ Hz



e. $f_c = 10$ Hz

Hình 17: Tín hiệu ngõ ra quan sát trên oscilloscope (myDAQ)

3.2 Thí nghiệm 2: Khuếch đại load cell

- Đầu dây load cell vào mạch khuếch đại

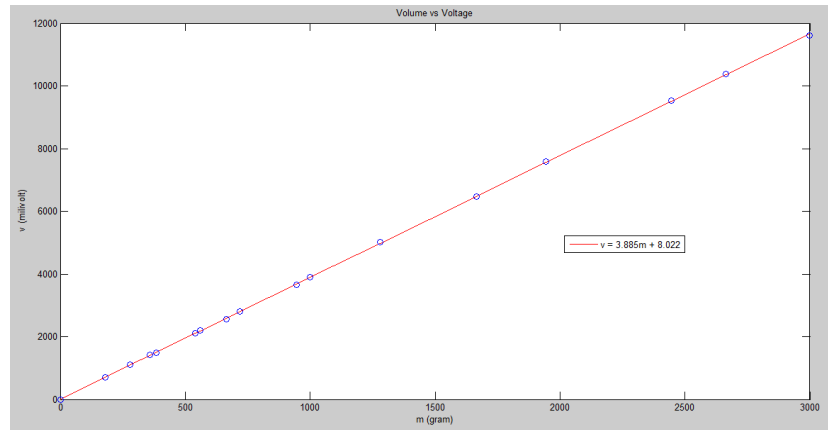
- Lần lượt đặt các tải biết trước trọng lượng lên load cell và ghi lại giá trị đọc được trên MyDAQ. Kết quả thu được như Bảng 1.

Sử dụng MATLAB để vẽ lại các giá trị trên và tìm dạng hàm mô tả mối quan hệ giữa khối lượng và điện thế (Hình 18).

Từ kết quả tính toán ta được phương trình biểu diễn quan hệ v-m như sau:

$$v \text{ (mV)} = 3,885 m + 8,022 \quad (15)$$

Hình 18: Đồ thị mối quan hệ giữa điện thế và khối lượng



Bảng 1: Các cặp giá trị khối lượng, điện thế thu được từ thí nghiệm

Khối lượng m (gram)	Điện thế v (millivolt)
0	0
180	705
280	1108
360	1408
385	1480
540	2110
560	2190
665	2565
720	2805
945	3660
1000	3910
1280	5010
1665	6480
1945	7585
2445	9520
2665	10380
3000	11610

4 KẾT LUẬN VÀ ĐỀ XUẤT

Bằng cách sử dụng IC chuyên dụng 1B31AN để thiết kế mạch khuếch đại tín hiệu cho cảm biến với các thông số kỹ thuật theo đề nghị của nhà sản

xuất đã giảm bớt sự phức tạp trong tính toán và thiết kế phần cứng, đồng thời độ tin cậy và độ chính xác cũng cao hơn so với mạch thiết kế bằng những linh kiện rời. Kết quả của các thí nghiệm cho thấy mạch sau khi thiết kế chế tạo đáp ứng được những yêu cầu đặt ra cho một bài thực hành về bản chất và kỹ thuật xử lý tín hiệu từ một strain gauge. Thiết bị đã được triển khai giảng dạy một cách rất hiệu quả cho thực hành học phần Cảm biến chuyển năng tại phòng thí nghiệm Đo lường và Cảm biến, thuộc Bộ môn Tự động hóa, Khoa Công nghệ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Ekelof, S., 2001. The genesis of the Wheatstone bridge. Engineering Science and Education Journal, ISSN: 0963-7346.
2. John P. Bentley, 2005. Principles of Measurement Systems. NXB Pearson Prentice Hall.
3. Analog Devices, 1996. Wide Bandwidth Strain Gauge Signal Conditioner - 1B31. USA.
4. National Instrument, 2013. Measuring strain with strain gauge. <http://www.ni.com/white-paper/3642/en/> truy cập ngày 10/10/2013.