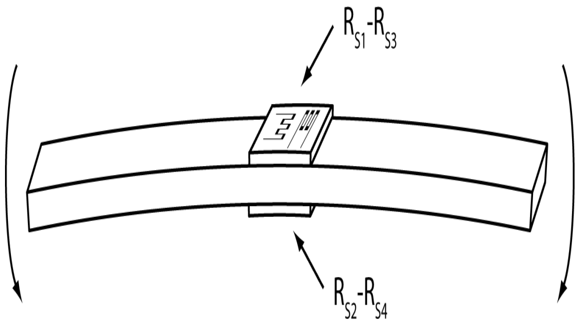
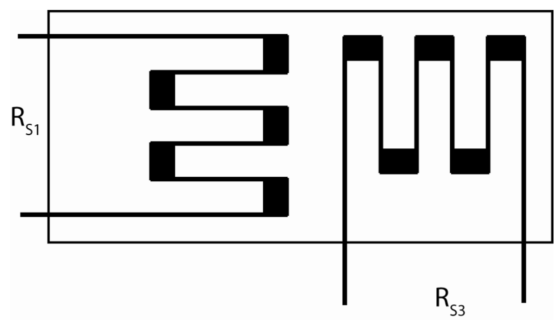
Problema 2

$R_S = 250\ \Omega$ $G = 2$ $P_{dmax} = 5\ \mu W$ $\alpha = 6\ 10^{-3}\ °C^{-1}$	$(S_V)^{1/2} = 20\ nV/(Hz)^{1/2}$ (unilatera) con $f_c = 10$ kHz $(S_i)^{1/2} = 5\ pA/(Hz)^{1/2}$ (unilatera) con $f_c = 10$ kHz $A_p = 100$ $f_{pa} = 150$ MHz



Listello vibrante con strain gauges montati per rilevare la deformazione di flessione

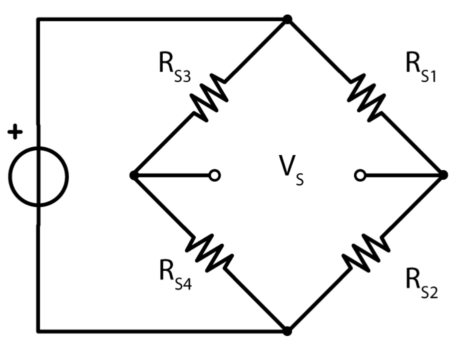


Coppia di strain gauges identici accoppiati per la compensazione dell'effetto di temperatura

- deformazione del sensore $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$
- conseguente variazione di resistenza del sensore $\frac{\Delta R_s}{R_s} = G\varepsilon$

a) Configurazione circuitale impiegata

- Strain gauges connessi in configurazione a ponte di Wheatstone, con tensione di alimentazione V_A e tensione di uscita differenziale V_s.
  A riposo (cioè senza deformazione) $R_{S1}=R_{S2}=R_{S3}=R_{S4}$ e il ponte è azzerato $V_s = 0$.



- Il sensore è una resistenza metallica con coefficiente di temperatura α, pertanto una variazione di temperatura ΔT produce in R_S una variazione di resistenza
  - $\left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)_T = \alpha \Delta T$
- Se la temperatura di R_{S2} differisce di ΔT da quella di R_{S1} il ponte si sbilancia e si ha una tensione di uscita differenziale V_{sT}
  - $V_{sT} = \frac{V_A}{4}\left(\frac{\Delta R_s}{R_s}\right)_T$
- Con deformazione di trazione assiale le $\Delta R_S / R_S$ di R_{S1} e R_{S2} sono identiche, il ponte rimane bilanciato e la tensione di uscita differenziale rimane nulla
  - $V_{sl} = 0$
- Con deformazione di flessione e sensori R_{S1} e R_{S2} disposti sul listello come indicato in figura le ΔR_S di R_{S1} e R_{S2} hanno segno opposto ed uguale valore, pertanto il ponte si sbilancia e si ha una tensione di uscita differenziale V_{sF}
  - $V_{sF} = \frac{V_A}{2}\frac{\Delta R_s}{R_s} = \frac{V_a}{2} G\varepsilon$

Limitazione alla tensione di alimentazione per limitare l'autoriscaldamento

- con alimentazione in continua V_A
  - $P_d = \left(\frac{V_A}{2}\right)^2 \frac{1}{R_s} < P_{d\,max}$
  - $V_A \leq 2\sqrt{P_{d\,max} R_s} = 2\sqrt{5 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = 70\text{mV}$
- con alimentazione in alternata di ampiezza massima V_A
  - $P_d = \frac{1}{2}\left(\frac{V_A}{2}\right)^2 \frac{1}{R_s} < P_{d\,max}$
  - $V_A \leq 2\sqrt{2P_{d\,max} R_s} = 2\sqrt{2 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 250} = 100\text{mV}$

Tensione di uscita dal ponte in funzione della deformazione ε per flessione

$$V_{sF} = \frac{V_a}{2} G\varepsilon$$

- con V_A = 70 mV continua
  - $V_{sF} = \frac{70}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon[\mu\text{strain}] = 7 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon[\mu\text{strain}]$
- con V_A = 100 mV alternata
  - $V_{sF} = \frac{100}{2} \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon[\mu\text{strain}] = 10^{-7} \cdot \varepsilon[\mu\text{strain}]$

Massima differenza di temperatura ammissibile tra R_{S1} e R_{S2}

- $V_{sT\,max} = V_{sF}\left(100\mu strain\right)$
- $\frac{V_A}{4}\alpha\Delta T_{max} = \frac{V_A}{2}G\varepsilon\left(100\mu strain\right)$
- $\Delta T_{max} = 2\frac{G}{\alpha}\varepsilon\left(100\mu strain\right) = 2\cdot\frac{2}{6\cdot 10^{-3}}\cdot 100\cdot 10^{-6} = 0{,}07C$

N.B. Il segnale dovuto alla differenza di temperatura ΔT è lentamente variabile (è sensibile su tempi di parecchi secondi) e quindi è bene distinguibile da quello dovuto alla vibrazione indotta dal motore rotante a 60giri/min.

b) Minima deformazione misurabile senza filtraggio

S_V è il rumore dominante, al confronto $S_iR_S^{\mathbf{2}}$ e il rumore della resistenza $4kTR_S$ risultano trascurabili.

Trascurando per ora il contributo di rumore *1/f* :

$$\overline{\left(n_{pa}^{2}\right)}^{1/2} = S_v^{1/2}\cdot\sqrt{\frac{\pi}{2}\cdot f_{pa}} = 20\cdot 10^{-9}\cdot\sqrt{\frac{\pi}{2}\cdot 150\cdot 10^{-6}} = 300\mu V$$

Il minimo valore misurabile è

$$V_{sF\,min} = \overline{\left(n_{pa}^{2}\right)}^{1/2} = 300\mu V$$

che risulta molto elevato a causa della banda molto larga del preamplificatore.

Con alimentazione continua massima V_A = 70 mV

$$V_{sF} = 7\cdot 10^{-8}\cdot\varepsilon\left[\mu strain\right]$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{V_{sF\,min}}{7\cdot 10^{-8}} = \frac{300\cdot 10^{-6}}{7\cdot 10^{-8}} = 4300\mu strain$$

Con alimentazione alternata massima V_A = 100 mV

$$V_{sF} = 10^{-7}\cdot\varepsilon\left[\mu strain\right]$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{V_{sF\,min}}{10^{-7}} = 3000\mu strain$$

Per ridurre la componente *1/f* consideriamo di utilizzare anche un filtraggio passa-alto moderato, come ad esempio ottenibile con un azzeramento della continua ogni 15 min ≈ 1000 s, cioè un passaalto con taglio $f_i = 10^{-3}$ Hz.

Con questo filtraggio si valuta un contributo del rumore *1/f*

$$\overline{\left(n_{1/f}^{2}\right)}^{1/2} = S_v^{1/2}\cdot f_c^{1/2}\cdot\left[\ln\left(\frac{f_{pa}}{f_i}\right)\right]^{1/2} = 2\mu V\cdot\left[\ln\left(\frac{150\cdot 10^{6}}{10^{-3}}\right)\right]^{1/2} \simeq 10\mu V$$

Non usando alcun filtraggio passabasso dopo il preamplificatore, il contributo del rumore a larga banda risulta elevatissimo e il contributo del rumore *1/f* , pur essendo elevato, risulta al confronto trascurabile.

c) Minima deformazione misurabile con filtraggio

La vibrazione è indotta dal motore che gira a 60giri/min, quindi ha frequenza fondamentale f_V=60 / 1 min = 1 Hz. Si tratta però di un motore a scoppio, quindi la vibrazione non è semplicemente sinusoidale, ma contiene anche varie armoniche superiori. Pertanto se si vuole rilevare bene la forma d'onda occorre misurare bene anche queste armoniche molto alte, diciamo fino a 100 Hz. Per ottenere questo occorre usare una banda passante ancora più alta: decidiamo quindi di usare una banda passante di 1 KHz.

c1) Con alimentazione del ponte in continua

Con filtraggio passabasso con taglio a f_{PB} = 1 Khz

- contributo di rumore bianco
  - $\overline{\left(n_{pB}^2\right)}^{1/2} = S_v^{1/2} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot f_{pB}} = 20 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot 10^3} = 0,8\mu V$
- che con V_A=70 mV corrisponde a
  - $\varepsilon_{min} = \frac{V_{sF\,min}}{7 \cdot 10^{-8}} = 11,5\mu strain$
- contributo di rumore *1/f*, valutato considerando di usare un filtraggio passa-alto con taglio f_i a 1/100 della frequenza fondamentale della vibrazione $f_i = f_v/100 = 0,01$ *Hz*
  - $\overline{\left(n_{1/f}^2\right)}^{1/2} = S_v^{1/2} \cdot f_c^{1/2} \cdot \left[\ln\left(\frac{f_s}{f_i}\right)\right]^{1/2} = 20 \cdot 10^{-9} \sqrt{10000} \cdot \left[\ln\left(\frac{1000}{0,01}\right)\right]^{1/2} \simeq 6,8\mu V$

Il contributo del rumore 1/f in queste condizioni risulta dominante rispetto al rumore bianco e limita la deformazione minima misurabile a:

- $\varepsilon_{min} = \frac{V_{sF\,min}}{7 \cdot 10^{-8}} = \frac{6,8 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 10^{-8}} \simeq 100\mu strain$

c2) Con alimentazione del ponte in alternata

È vantaggioso usare una frequenza di alimentazione del ponte f_a molto più alta della frequenza d'angolo f_c del rumore *1/f*. In questo modo il segnale di uscita del ponte viene portato fuori dalla zona di spettro in cui il rumore *1/f* è dominante. Il segnale può essere quindi bene misurato con un amplificatore lock-in.

- Scegliamo f_a notevolmente maggiore di quella delle armoniche del segnale di cui si vuole tener conto nella misura: f_a = 1 MHz
- Usiamo la tensione alternata di alimentazione V_A come riferimento per il lock-in
- Scegliamo per il filtro passabasso del lock-in una frequenza di taglio f_{PB} = 1 Khz

Grazie alla selezione in frequenza e fase operata, in uscita dal lock-in si ottiene:

- $\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{V_s}{\sqrt{2\overline{\left(n_{pB}^2\right)}}}$

Ricordando che al paragrafo **c1** abbiamo già fatto la valutazione del contributo di rumore bianco $\overline{n_{pB}^2}$ con filtraggio passabasso avente taglio a f_{PB} = 1 Khz, si ottiene immediatamente

- $V_{sF\,min} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{\overline{n_{pB}^2}} = \sqrt{2} \cdot 0,8\mu V = 1,3\mu V$

a cui corrisponde una deformazione minima misurabile

- $\varepsilon_{min} = \dfrac{V_{sF\,min}}{10^{-7}} = \dfrac{1,3 \cdot 10^{-6}}{10^{-7}} = 13\mu strain$