**PROBLEMA 2**

**Quadro dei dati**

Il motore che causa la vibrazione della struttura meccanica ruota a

4800 giri/min cioè a $f_o = \frac{4800}{60} = 80Hz$

**Strain gauges:**

resistenza $R_S = 100\ \Omega$

Gauge factor G = 2

massima potenza dissipata $P_{dmax} = 2\ \mu W$

**Preamplificatore:**

densita' efficace unilatera di rumore di tensione riferito all'ingresso $S_v^{1/2} = 10\ nV/Hz^{1/2}$

con $f_{cv}$ = 32 kHz

densita' efficace unilatera di rumore di corrente riferito all'ingresso $S_i^{1/2} = 5\ pA/Hz^{1/2}$

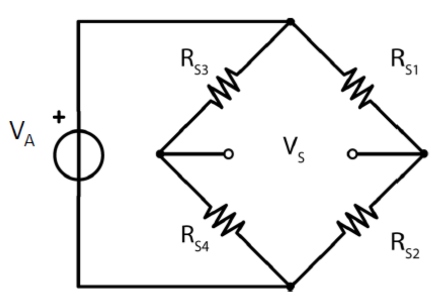
$f_{ci}$ = 32 kHz

Banda larga $f_p$ > 5MHz

**Deformazione**

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ misurata in microstrain $\frac{\Delta l}{l} = 10^{-6} = 1 \cdot \mu\text{strain}$

**(a) Configurazione e fattore di trasduzione**




Si utilizzano dispositivi standard (coppie di strain gauges su uno strato di supporto, disposti ortogonali per la compensazione degli effetti termici) e si dispongono in configurazione a ponte di Wheatstone in modo che

- le deformazioni di flessione producano un segnale $V_S$ di sbilanciamento del ponte
- le deformazioni di trazione o compressione assiale **non** producano segnale $V_S$
- gli effetti di temperatura si compensino e **non** producano segnale $V_S$

Ad esempio, con riferimento alla figura:

coppia $R_{S1}$ assiale e $R_{S2}$ ortogonale su un lato della asticella

coppia $R_{S3}$ assiale e $R_{S4}$ ortogonale sull'altro lato della asticella.

Con alimentazione continua $V_A$ del ponte occorre che

$$\left(\frac{V_A}{2}\right)^2 \frac{1}{R_S} < P_{d\max} \qquad \text{cioè} \qquad V_A < 2\sqrt{P_{d\max} R_S} = 28mV$$

Scegliamo $V_A$= 25 mV.

Alla deviazione del ponte contribuiscono i due sensori assiali posti sopra e sotto l'asticella, perciò il segnale $V_S$ è doppio rispetto al caso in cui varii solo una resistenza

$$V_S = 2 \cdot \frac{V_A}{4} \cdot \frac{\Delta R_S}{R_S} = \frac{V_A}{2} \cdot G\varepsilon = 25mV \cdot \varepsilon$$

il fattore di trasduzione è dunque

$$\frac{dV_S}{d\varepsilon} = \frac{V_A}{2} \cdot G = \frac{25mV}{strain} = \frac{25nV}{\mu strain}$$

**b) <u>Misura della deformazione di flessione oscillante con sensori polarizzati in continua.</u>**

Il contributo del rumore di corrente risulta trascurabile

$$S_v >> S_i R_S^2$$

Nel rumore di tensione

$$S_n = S_v + S_v \frac{f_c}{f}$$

alla frequenza $f_o$ la densità spettrale della componente 1/f è molto maggiore della componente bianca $S_v$

$$S_v \frac{f_c}{f_o} = 400 \cdot S_v >> S_v$$

Pertanto $S_n(f_o) \cong S_v \dfrac{f_c}{f_o} = 400 \cdot S_v$

b1) Misura con filtro risonante a frequenza $f_o$ con fattore di qualità Q=5

Il filtro passa la componente fondamentale del segnale $V_S$ senza attenuarla qualunque sia la sua fase rispetto al segnale di riferimento.

La banda di rumore del filtro risonante è

$$\Delta f_Q = \frac{\pi}{2}\frac{f_o}{Q} \cong 25\text{Hz}$$

quindi il rumore all'uscita del filtro è

$$\sqrt{\overline{n_Q^2}} = S_n(f_o)\sqrt{\Delta f_Q} = S_v^{1/2}\sqrt{\frac{f_c}{f_o}}\sqrt{\Delta f_Q} \cong 1000\text{nV}$$

pertanto il segnale minimo misurabile vale

$$V_{S\min,Q} = \sqrt{\overline{n_Q^2}} \cong 1000\text{nV}$$

e la deformazione minima misurabile risulta

$$\varepsilon_{\min,Q} = \frac{V_{S\min,Q}}{\dfrac{dV_S}{d\varepsilon}} = 40\mu\text{strain}$$

b2) Misura con lock-in amplifier utiliizzando come riferimento il segnale ausiliario sinusoidale sincrono al motore

Impiegando come riferimento il segnale ausiliario sinusoidale sincrono al motore alla frequenza $f_o$ ottieniamo in uscita dal lock-in un segnale continuo con ampiezza determinata dalla componente fondamentale della vibrazione.

Se è certo che il segnale ausiliario è infase con la componente fondamentale della vibrazione, lo si utilizza come riferimento così come è. Se invece questo è incerto, occorre utilizzare il variatore di fase del riferimento (normalmente disponibile negli amplificatori lock-in) per modificare la fase del riferimento fino ad azzerare il suo sfasamento $\varphi$ rispetto alla fondamentale. Questo si ottiene semplicemente osservando l'ampiezza in uscita mentre si varia la fase, dato che l'uscita ha ampiezza proporzionale a $\cos\varphi$ .

Con $\varphi=0$ il rapporto $(S/N)^2$ ottenuto in uscita dal lock-in è dato dal rapporto tra:

- la potenza del segnale sinusoidale $\frac{V_S^2}{2}$
- la metà (la parte mediamente in fase con il riferimento) della potenza media di rumore entro una banda centrata sulla frequenza del riferimento $f_o$ e con ampiezza $\Delta f_L = 2\, f_L$ definita dal filtro passabasso utilizzato entro il lock-in (indicando con con $f_L$ la frequenza di taglio del rumore del passabasso) e cioè $S_n(f_o) \cdot f_L$

Dunque si ha

$$\left(\frac{S}{N}\right)^2 = \frac{V_S^2}{2 \cdot S_n(f_o) \cdot f_L}$$

e pertanto

$$V_{S\min,L} = \sqrt{2 \cdot S_n(f_o) \cdot f_L} = \sqrt{2 \cdot 400 \cdot S_v \cdot f_L}$$

Dato che l'ampiezza dell'oscillazione varia lentamente, su tempi più lunghi di un secondo, scegliamo $f_L = 1$ Hz e otteniamo

$V_{smin,L} = 280$ nV

e quindi una deformazione minima misurabile

$$\varepsilon_{\min,L} = \frac{V_{S\min,L}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} \cong 11 \mu\text{strain}$$

**c) <u>Misura della deformazione di flessione oscillante con sensori polarizzati in alternata.</u>**

Alimentando il ponte di Wheatstone con tensione alternata a frequenza $f_m$ i segnali elettrici che portano l'informazione della deformazione risultano modulati in ampiezza a frequenza $f_m$. Scegliendo per $f_m$ un valore molto maggiore della frequenza d'angolo $f_c$ del rumore 1/f, alla frequenza $f_m$ il rumore 1/f è praticamente trascurabile e i segnali si confrontano solo con il rumore bianco.

Scegliamo $f_m = 300$ kHz.

Per il filtraggio utilizziamo un amplificatore lock-in usando come riferimento la tensione di alimentazione del ponte. Dato che dobbiamo misurare in uscita del lock-in non solo le deformazioni statiche, ma anche la deformazione oscillante a frequenza $f_o$, il filtro passabasso del lock-in dovra' ora avere frequenza di taglio $f_{L2}$ abbastanza maggiore di $f_o$. Scegliamo $f_{L2} = 5\, f_o = 400$Hz.

Otteniamo in questo caso

$$V_{S\min,L2} = \sqrt{2 \cdot S_n(f_m) \cdot f_{L2}} = \sqrt{2 \cdot S_v \cdot f_{L2}} \cong 280\,nV$$

e quindi una deformazione minima misurabile

$$\varepsilon_{\min,L2} = \frac{V_{S\min,L2}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} \cong 11\mu strain$$

Si nota che nonostante che in questo caso abbiamo portato il segnale fuori dalla regione spettrale in cui il rumore 1/f domina, il risultato è equivalente a quello ottenuto in (b2) con segnale immerso nella regione spettrale dominata dal rumore 1/f. Perchè non si ha invece un netto miglioramento?

Questo accade perchè nel caso (b1) abbiamo potuto usare una banda molto più stretta ($f_L$ = 1 Hz ) per il filtro passabasso del lock-in, in quanto il segnale utile da filtrare era un segnale continuo all'ingresso del passabasso. Nel caso qui trattato invece il segnale utile all'ingresso del passabasso è una sinusoide a $f_o$ = 80Hz che ci obbliga ad usare una banda assai più larga ($f_{L2}$ = 400 Hz ) per il passabasso.

**d) <u>Misura di deformazioni statica e oscillante con sensori polarizzati in alternata.</u>**

L'uscita dell'amplificatore lock-in visto in (c) contiene:

- il segnale sinusoidale a frequenza $f_o$ = 80Hz che porta l'informazione relativa alla componente di deformazione oscillante
- il segnale in continua che porta l'informazione relativa alla componente di deformazione statica
- rumore circa bianco limitato in banda a $f_{L2}$ = 400 Hz dal filtro passabasso del lock-in

Si possono utilizzare due diversi ulteriori filtraggi per misurare separatamente ciascuna delle due componenti di segnale. In questo modo si può avere per ciascun filtraggio una banda di rumore più stretta centrata sulla frequenza della componente da misurare.

d1) <u>Misura della deformazione statica</u>

Si può filtrare ulteriormente l'uscita dal lock-in con un ulteriore filtro passabasso con limite di banda $f_{L3}$ = 1 Hz. In questo modo passa il segnale continuo, viene attenuato a livello trascurabile il segnale sinusoidale a $f_o$ = 80Hz e viene ulteriormente ridotto il rumore, ottenendo

$$V_{S\min,L3} = \sqrt{2 \cdot S_n(f_m) \cdot f_{L3}} = \sqrt{2 \cdot S_v \cdot f_{L3}} \cong 14\,nV$$

corrispondente a una deformazione statica minima misurabile

$$\varepsilon_{min,L2} = \frac{V_{S\,min,L3}}{\dfrac{dV_S}{d\varepsilon}} \cong 0{,}6\mu strain$$

d1) Misura della deformazione oscillante a $f_o$

La misura della componente oscillante all'uscita del lock-in si presenta analoga a quella considerata in (b), ma con il vantaggio di essere in presenza di un livello di rumore assai più basso grazie all'azione del lock-in visto in (c). Per migliorare ulteriormente il filtraggio si possono utilizzare gli stessi filtri già visti in (b).

Utilizzando il filtro risonante a $f_o$ con banda

$$\Delta f_Q = \frac{\pi}{2}\frac{f_o}{Q} \cong 25Hz$$

si ottiene

$$V_{S\,min,L4} = \sqrt{2 \cdot S_v \cdot \Delta f_Q} \cong 22nV$$

corrispondente a una deformazione statica minima misurabile

$$\varepsilon_{min,L2} = \frac{V_{S\,min,L4}}{\dfrac{dV_S}{d\varepsilon}} \cong 0{,}9\mu strain$$

Si potrebbe migliorare ulteriormente la misura filtrando l'uscita del lock-in con un secondo lock-in utilizzato come visto in (b), cioè impiegando per esso come riferimento il segnale ausiliario sincrono alla oscillazione e ponendo il limite di banda del suo passabasso a $f_L$ = 1 Hz. Tuttavia ciò comporta un sistema di strumentazione di misura più complicato, che non sembra necessario affrontare visto che il risultato calcolato con il filtro risonante è già ben adeguato.