PROBLEMA 2

Quadro dei dati

Strain gauges:
$R_S = 100\ \Omega$ resistenza
$G = 2$ Gauge factor
$P_{dmax} = 4\ \mu W$ massima potenza dissipata
Coefficiente di temperatura $\alpha = \frac{\Delta R_S}{R_{S0}} = 4 \cdot 10^{-3}\ C^{-1}$

Differenza di temperatura tra sensori non controllabile, con valore massimo $\Delta T_{\max} \approx \pm 1\, C$

Preamplificatore differenziale:

$\sqrt{S_V}$ = 10 nV/Hz$^{1/2}$ densità efficace (unilatera) di rumore di tensione riferito all'ingresso differenziale

$\sqrt{S_i}$ = 5 pA/Hz$^{1/2}$ densità efficace (unilatera)
di rumore di corrente riferito all'ingresso differenziale

Banda larga f_p > 100MHz

Per la domanda C
Deformazione meccanica oscillante sinusoidale a frequenza f_o = 100Hz con ampiezza ε_o da misurare quasi costante (varia su tempi >10s).
È disponibile un segnale elettrico di riferimento con frequenza e fase eguali alla oscillazione meccanica

Per la domanda D

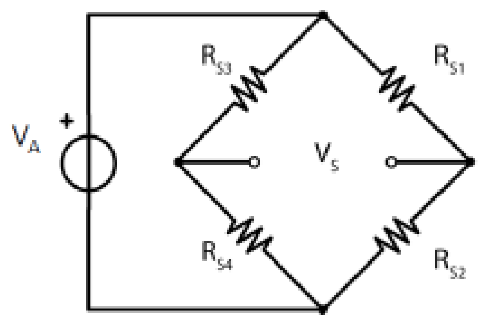
Nel rumore del preamplificatore tener conto anche di componenti a spettro *1/f* con frequenza d'angolo

f_{cv} = 40 kHz per il rumore di tensione

f_{ci} = 40 kHz per il rumore di corrente

(A) Configurazione, fattore di trasduzione ed errore dato da differenza di temperatura

Configurazione standard a ponte di Wheatstone con resistenze eguali; un solo sensore soggetto a deformazione; imperfetta compensazione dell'effetto di temperatura con sensore di deformazione a temperatura diversa del sensore di compensazione (R_{S2} sensore attivo, R_{S1} sensore di compensazione).



Tensione di alimentazione continua del ponte:

$$\left(\frac{V_A/2}{R_S}\right)^2 \le P_{d,\max} \qquad V_A \le 2\sqrt{P_{d,\max} R_S} = 40mV \qquad \text{scegliamo} \qquad V_A = 40mV$$

Una piccola variazione ΔR_S della resistenza R_{S2} causa una piccola tensione di uscita del ponte, che valutiamo con approssimazione al 1° ordine

$$V_S = \frac{V_A}{4} \cdot \frac{\Delta R_S}{R_S}$$

Una deformazione $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ causa una variazione di resistenza $\Delta R_S = G\varepsilon R_{S0}$ e quindi

$$V_S = \frac{V_A}{4} \cdot \frac{\Delta R_S}{R_{S0}} = \frac{V_A}{4} \cdot G\varepsilon = 20mV \cdot \varepsilon$$

il fattore di trasduzione da deformazione a tensione è pertanto

$$\frac{dV_S}{d\varepsilon} = \frac{V_A}{4} \cdot G = \frac{20mV}{strain} = \frac{20nV}{\mu strain}$$

Il sensore attivo ha temperatura che differisce da quella del sensore di compensazione e la differenza ΔT può arrivare a $\Delta T_{\max} \approx \pm 2\, C$. Questa differenza di temperatura causa una variazione di resistenza $\Delta R_S = \alpha\, \Delta T \cdot R_{S0}$ e quindi produce in uscita una tensione

$$V_{ST} = \frac{V_A}{4} \cdot \frac{\Delta R_S}{R_S} = \frac{V_A}{4} \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

che simula un segnale dovuto a una deformazione ε_T tale che

$$V_{ST} = \frac{V_A}{4} \cdot G\varepsilon_T$$

Per lo sperimentatore è come se vi fosse una deformazione

$$\varepsilon_T = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{G}$$

con andamento nel tempo eguale a quello della differenza di temperatura ΔT. Nelle misura di deformazioni statiche questo segnale spurio lentamente variabile comporta un errore notevole e rappresenta un notevole problema

$$\varepsilon_{T\max} = \frac{\alpha \cdot \Delta T_{\max}}{G} = \pm\, 2 \cdot 10^{-3}\, strain = \pm\, 2000\ \mu strain$$

(B) <u>Misura di deformazione statica con ponte alimentato in continua</u>

Confrontando le componenti di rumore viste come tensione all'ingresso del preampilificatore differenziale si nota che il rumore di tensione del preamplificatore

$$\sqrt{S_V} = 10nV/\sqrt{Hz}$$

è dominante rispetto

al rumore di corrente $\quad R_S\sqrt{S_i} = 0,5nV/\sqrt{Hz}$

e al rumore delle resistenze del ponte $\quad \sqrt{4kT \cdot R_S} \approx 1,26\,nV/\sqrt{Hz}$

La deformazione da misurare varia su tempi lunghi >10s, quindi per filtrare il rumore bianco possiamo usare un filtro passabasso con frequenza di taglio

$f_h = 1Hz$

ottenendo un rumore in uscita

$$\sqrt{\overline{n_V^2}} = \sqrt{S_V f_h} = 10\mu V$$

Il minimo segnale misurabile limitato dal rumore è

$$V_{S\min} = \sqrt{\overline{n_V^2}} = 10\mu V$$

e la corrispondente minima deformazione è

$$\varepsilon_{\min} = \frac{V_{S\min}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} = 0,5\mu strain$$

Si nota quindi che il limite posto dalla imperfetta compensazione termica è molto più stringente di quello posto dal rumore: la misura di deformazione statica risulta risulta quindi condizionata e limitata non dal rumore, ma dalla imperfetta compensazione termica.

Utilizzare una alimentazione in alternata del ponte non è utile al fine di separare l'effetto della differenza di temperatura da quello della deformazione statica. Le due variazioni non vengono affatto separate: entrambe vengono modulate alla stessa frequenza (frequenza della alimentazione) e entrambe passate da un filtraggio selettivo a quella frequenza, sia usando un filtro accordato che usando un LIA (Lock-in Amplifier).

(C) <u>Misura della deformazione dinamica a 100Hz in assenza di rumore 1/f con ponte alimentato in continua</u>

Si può utilizzare un LIA (Lock-in Amplifier) utilizzando come riferimento il segnale ausiliario sincrono con l'oscillazione meccanica. Dato che l'ampiezza dell'oscillazione varia su tempi lunghi >10s, nel LIA possiamo usare un filtro passabasso con frequenza di taglio

$f_L = 1Hz$

Il rapporto S/N è dato dal rapporto tra la potenza del segnale (che è in fase con il riferimento) e metà della potenza di rumore (le cui componenti hanno fasi casuali) nella banda passante $\Delta f=2f_L$ centrata sulla frequenza f_o dell'oscillazione meccanica

$$\left(\frac{S}{N}\right)_o = \frac{V_S^2/2}{S_V f_L}$$

Il minimo segnale misurabile è ora

$$V_{S\min} = \sqrt{2}\sqrt{S_V}\sqrt{f_L} \approx 14,1nV$$

e corrisponde a una minima ampiezza misurabile della deformazione oscillante

$$\varepsilon_{\min} = \frac{V_{S\min}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} = 0,7\,\mu strain$$

In questo caso l'errore portato dalla differenza di temperatura è trascurabile, dato che essa produce un segnale lentamente variabile (con componenti a frequenze inferiori a 0,1Hz) che viene facilmente separato dal segnale oscillante e rigettato dal LIA.

(D) <u>Misura della deformazione dinamica a 100Hz in presenza di rumore 1/f</u>

Anche in presenza di componenti 1/f il rumore di tensione del preamp S_V è dominante

La frequenza d'angolo f_{cv} è molto maggiore della frequenza f_o dell'oscillazione e quindi la densità efficace di rumore a questa frequenza risulta ora molto più elevata

$$\sqrt{S_n(f_o)} = \sqrt{S_V + S_V\frac{f_C}{f_o}} \approx \sqrt{\frac{f_C}{f_o}} \approx 20\sqrt{S_V} = 200\,nV/\sqrt{Hz}$$

Utilizzando lo stesso schema visto in (C) (ponte alimentato in continua e filtraggio con LIA con il riferimento sincrono all'oscillazione meccanica) il rumore nella banda selezionata dal LIA è molto più elevato e quindi si alza notevolmente il livello minimo misurabile. Il minimo segnale è ora

$$V_{S\min} = \sqrt{2}\sqrt{S_n(f_o)}\sqrt{f_L} \approx 282nV$$

e corrisponde a minima ampiezza della deformazione oscillante è

$$\varepsilon_{\min} = \frac{V_{S\min}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} = 14,1\mu strain$$

Poichè il rumore 1/f viene immesso dal preamplificatore, utilizzando prima del preamplificatore una alimentazione del ponte in alternata (a frequenza abbastanza elevata da avere rumore 1/f trascurabile rispetto al rumore bianco) si può portare il segnale utile fuori dalla banda in cui prevale il rumore 1/f e quindi praticamente in presenza solo della densità di rumore bianco S_V. Scegliamo perciò una alimentazione in alternata a frequenza

$f_h = 10 f_{cv} = 400kHz$

Utilizzando un LIA con riferimento l'alimentazione del ponte riportiamo in banda base il segnale di deformazione oscillante a f_o =100Hz. Per passare all'uscita del LIA questo segnale occorre utilizzare nel LIA un filtro passabasso con frequenza di taglio f_{La} più elevata

$f_{La} >> f_o$ =100Hz

Scegliamo perciò $f_{La} = 1kHz$ e otteniamo un segnale minimo

$$V_{S\min} = \sqrt{2}\sqrt{S_V}\sqrt{f_{La}} \approx 446nV$$

al quale corrisponde una ampiezza minima

$$\varepsilon_{\min} = \frac{V_{S\min}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} = 22,3\mu strain$$

A causa del limite di banda elevato f_{La} questo risultato non è soddisfacente, ma si può migliorare filtrando ulteriormente a banda stretta l'uscita del Lock-in Amplifier detto (che indichiamo con LIA1).

Per valutare il risultato ottenibile occorre tener presente accuratamente come è l'uscita di LIA1, tenendo conto che la demodulazione effettuata con LIA1

a) riporta il segnale oscillante in banda base alla sua frequenza f_o,

b) riporta in banda base centrato su $f=0$ il rumore S_V che all'ingresso di LIA1 si trova nella banda centrata su f_h . Per l'effetto noto come "spectrum folding" viene riportata in banda base una densità di potenza raddoppiata a 2 S_V .

Per filtrare a banda stretta l'uscita di LIA1 possiamo utilizzare un altro LIA (che indichiamo come LIA2) usando come suo riferimento il segnale ausiliario sincrono con l'oscillazione meccanica e con filtro passabasso interno con limite di banda come visto in C

$f_L = 1Hz$

Si ottiene così

$$V_{S\min} = 2\sqrt{S_V}\sqrt{f_L} \approx 20nV$$

corrispondente a una ampiezza minima

$$\varepsilon_{\min} = \frac{V_{S\min}}{\frac{dV_S}{d\varepsilon}} = 1\mu strain$$