PROBLEMA 2

Quadro dei dati

Termoresistenza PT100

Valore di riferimento a 0°C (273 K) R_{T0} =100 Ω

Coefficiente di temperatura $\alpha = 3{,}9\cdot 10^{-3}$ / °C

Potenza max dissipabile $P_d < 5\mu W$

Preamplificatore differenziale

Limite di banda da polo semplice a f_{pa} = 1MHz (costante di tempo T_n = 0,16µs)

densità efficace di rumore

$S_{vA}^{1/2}$ = 25 nV/Hz$^{1/2}$ bianca (unilatera) e componente 1/f con f_c = 10 kHz

$S_{iA}^{1/2}$ = 10 pA/Hz$^{1/2}$ bianca (unilatera) e componente 1/f con f_c = 10 kHz

(A) Introduzione

A1 Alimentazione del ponte

Generando il segnale del ponte di Wheatstone è a frequenza ben superiore alla frequenza d'angolo f_c del rumore 1/f risulta possibile estrarlo senza raccogliere un contributo significativo di rumore 1/f. Perciò scegliamo per il ponte una tensione di alimentazione sinusoidale a frequenza f_m=10f_c =100kHz

Nella configurazione con 4 resistenze uguali (1 termoresistenza + 3 resistenze costanti)

con tensione di alimentazione sinusoidale di ampiezza V_A , la potenza dissipata nel sensore Pt100 è

$$\left(\frac{V_A}{2}\right)^2 \frac{1}{2R_{T0}} < P_{d\max} = 5\mu\text{W} \qquad \text{pertanto occorre usare} \qquad V_A < \sqrt{8P_{d\max}R_{T0}} = 63mV$$

Adottiamo tensione di <u>alimentazione sinusoidale V_A=60mV a f_m=100kHz</u>

A2 Fattore di conversione

Una variazione di temperatura ΔT produce variazione di resistenza $\frac{\Delta R_T}{R_{T0}} = \alpha\,\Delta T$

e quindi una variazione della tensione di uscita del ponte $\Delta V_S = \frac{V_A}{4}\cdot\frac{\Delta R_T}{R_{T0}} = \frac{V_A}{4}\alpha\,\Delta T$

Il <u>fattore di conversione</u> è $\frac{dV_S}{dT} = \frac{V_A}{4}\alpha = 58{,}5\,\mu V/K$

A3 Rumore riferito all'ingresso del preamplificatore

Il rumore riferito all'ingresso del preamplificatore (uscita del ponte) è dominato dalla componente rumore di tensione del preamplificatore $S_{vA}^{1/2} = 25$ nV/Hz$^{1/2}$. Si verifica infatti che le altre componenti risultano in confronto trascurabili:

- rumore delle resistenze del ponte: la resistenza totale vista all'uscita del ponte è eguale a una singola resistenza R_{T0} =100 Ω , quindi $\sqrt{S_{vR}} = \sqrt{4kTR_{T0}} \approx 1,3\, nV/\sqrt{Hz}$

- generatore di rumore di corrente del preamplificatore convertito in tensione $R_{T0}\sqrt{S_{iA}} \approx 1\, nV/\sqrt{Hz}$

A4 Tipo di filtraggio da adottare

(Suggerimento: consultare le slides BPF1 per spiegazioni su segnali a banda stretta e loro misura)

L'andamento della temperatura è lentamente variabile e viene rilevato correttamente eseguendo una misura ogni secondo. Quindi in frequenza si tratta di un segnale a banda stretta, con componenti in frequenza significative fino a circa $f_S \approx 0,5$Hz. Con alimentazione sinusoidale del ponte esso viene portato a segnale modulato a f_m=100kHz con componenti contenute entro una banda $\Delta f_S = 2 f_S$ =1Hz. Per misurarlo filtrando efficientemente il rumore si può quindi utilizzare un filtro passabanda centrato su f_m con larghezza di banda Δf_n la più stretta possibile, ma con il limite di non attenuare le frequenze entro la banda del segnale, altrimenti verrebbe attenuato non solo il rumore, ma anche il segnale

(B) <u>Misura con filtro passabanda a parametri costanti</u>

(Suggerimento: consultare le slides BPF2 per dati e spiegazioni sui filtri accordati)

Utilizziamo un filtro risonante centrato alla frequenza f_m=100kHz. A questa frequenza i filtri normalmente disponibili hanno fattore di qualità Q≈ da 5 a 10; consideriamo di poter utilizzare Q=10 (con un pò di ottimismo!).

Il segnale in ingresso del filtro è sinusoidale e alla frequenza di risonanza del filtro e pertanto il segnale in uscita è identico al segnale di ingresso. Per misurarlo non si può utilizzare direttamente un ADC, ma occorre utilizzare uno dei metodi noti per la misura di segnali sinusoidali. Ad esempio si può usare un misuratore asincrono basato su un rettificatore della sinusoide seguito da un filtraggio passabasso.

La banda di rumore del filtro accordato è molto piùampia di quella del segnale

$$\Delta f_n = \frac{\pi}{2}\frac{f_m}{Q} \approx 15,7kHz$$

Il rumore in uscita dal filtro è

$$\sqrt{\overline{v_n^2}} = \sqrt{S_{vA}} \cdot \sqrt{\Delta f_n} \approx 3{,}13\mu V$$

Il minimo segnale misurabile dunque è $\Delta V_{S\min} = \sqrt{\overline{v_n^2}} \approx 3{,}13\mu V$

e corrisponde alla minima variazione di temperatura misurabile

$$\Delta T_{\min} = \frac{\Delta V_{S\min}}{\frac{dV_S}{dT}} \approx 0{,}05K = 50mK$$

Non si raggiunge il livello di precisione 10mK richiesto per la misura di temperatura.
Con le tecnologie attuali di realizzazione dei filtri accordati a parametri costanti non si riesce a raggiungere i valori molto elevati di Q che sarebbero necessari. Sono disponibili però filtri passabanda di diversa struttura, che sono in grado di realizzare una banda di filtraggio molto più stretta, quindi è possibile migliorare il risultato.

(C) <u>Misura con filtraggio passabanda realizzato con Lock-in Amplifier (LIA)</u>

(Suggerimento: consultare le slides BPF3 e BPF4 per dati e spiegazioni su Lock-in-Amplifier)

Per filtrare segnale e rumore in uscita dal preamplificatore possiamo utilizzare un Lock-in-Amplifier (LIA) al quale forniamo un segnale di riferimento (che individua frequenza e fase del segnale da misurare) dato dallo stesso generatore sinusoidale che produce la tensione di alimentazione del ponte.

Il LIA effettua una demodulazione riportando il segnale in banda base (cioè attorno a f=0) e poi filtra con il filtro passabasso interno, che determina la banda di filtraggio del rumore. Indicando con f_L il limite di banda di rumore (unilatera) del filtro passabasso interno, il rapporto S/N in uscita dal LIA è

$$\frac{S}{N} = \frac{V_S}{\sqrt{2 S_{vA}\, f_L}} = \frac{V_S}{S_{vA}^{1/2}\sqrt{2 f_L}}$$

Si può utilizzare un valore di f_L molto basso, dato che si tratta di un filtro passabasso, realizzabile bene in pratica. Ricordiamo però che f_L deve essere ben superiore al limite di banda del segnale $f_S \approx 0{,}5Hz$. Con il LIA possiamo utilizzare $f_L = 10\ Hz$ e notiamo che per realizzare un filtraggio equivalente con un filtro risonante occorrerebbe avere $Q \approx f_m/f_L \approx 10000$.

La minima variazione di ampiezza misurabile ΔV_{Smin} (corrispondente a S/N=1) è ora

$$\Delta V_{S\min} = S_{vA}^{1/2}\sqrt{2 f_L} = 0,11\mu V$$

La corrispondente minima variazione di temperatura misurabile è

$$\Delta T_{\min} = \frac{\Delta V_{S\min}}{\frac{dV_S}{dT}} \approx 2mK$$

Il risultato ottenuto è bene adeguato a quanto richiesto grazie alle vantaggiose caratteristiche del LIA, che permette non solo di realizzare un filtraggio a banda strettissima, ma anche di utilizzarlo agevolmente in pratica. Infatti il LIA mantiene comunque la frequenza centrale del filtraggio accuratamente allineata alla frequenza del segnale, anche quando questa non è ben stabile, ma subisce lente variazioni nel tempo.