

PROBLEMA 2

Quadro dei dati

TERMOCOPPIA

V_T tensione della termocoppia
 $dV_T/dT = 11 \mu V/^\circ C$ termocoppia di tipo R
 Fili da $15 \Omega/m$ e $30 \Omega/m$

CABINA DI CONTROLLO ELETTRONICA

$L=10$ m distanza dal termostato
 $V_{CM} \approx 25$ V differenza di potenziale di massa tra termostato e cabina di controllo

PREAMPLIFICATORE DIFFERENZIALE

$R_D = 50$ M Ω resistenza di ingresso differenziale
 $R_C = 200$ M Ω resistenza di ingresso verso massa
 CMRR = 110 dB

$\sqrt{S_v} = 20$ nV/Hz^{1/2} bianca unilatera e componente 1/f con frequenza d'angolo $f_{cv} = 1$ MHz

$\sqrt{S_i} = 0,01$ pA/Hz^{1/2} bianca unilatera e componente 1/f con frequenza d'angolo $f_{ci} = 10$ kHz

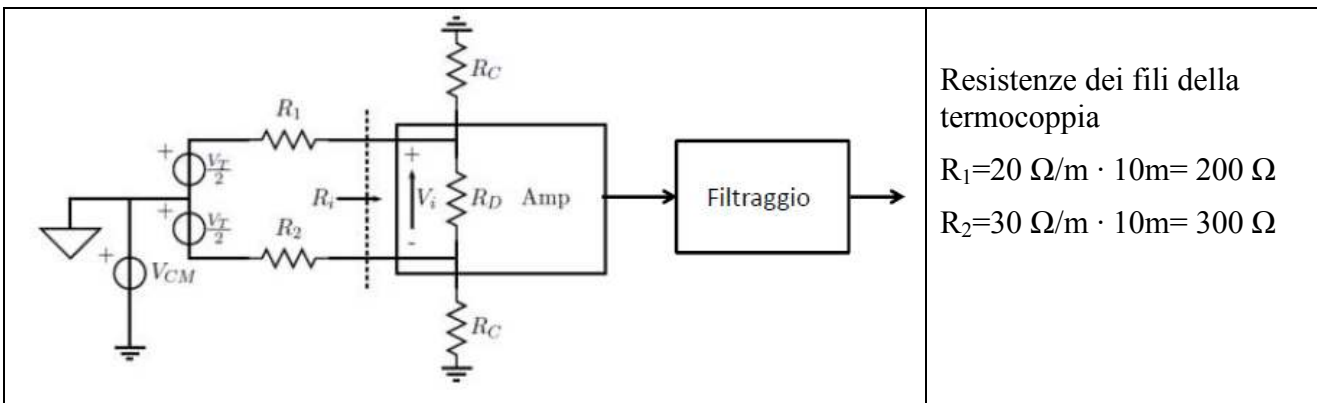
$V_o = 100$ μ V tensione di offset
 $dV_o/dT = 5$ μ V/ $^\circ C$ deriva termica di offset

Riferimento di temperatura (contatti dell'amplificatore) monitorata con precisione $\pm 0,1$ $^\circ C$

OPERAZIONI DI MISURA

$T_C = 20$ min durata di un ciclo di misura
 $T_I = 10$ min intervallo di riposo tra cicli successivi
 Durante il ciclo di misura la temperatura del forno è variabile tra $300^\circ C$ e $400^\circ C$ e la temperatura della cabina elettronica può variare di $\pm 2^\circ C$
 Occorre rilevare le variazioni di temperatura del forno che avvengono su tempi di 1s o più lunghi.

(A) Configurazione circuitale di sensore ed elettronica



La termocoppia ha giunzione la termometrica a contatto con il forno e i terminali dei fili collegati all'ingresso differenziale del preamplificatore.

La temperatura di riferimento è quella dei contatti di ingresso del preamplificatore (temperatura ambiente in cabina).

Dopo il preamplificatore utilizziamo un filtraggio passabasso con limite di banda scelto per tagliare il rumore e passare il segnale. Del segnale di temperatura occorre rilevare le componenti in

frequenza fino a $f_T \approx 1 \text{ Hz}$, quindi scegliamo una frequenza di taglio passabasso un pò maggiore $f_s = 10 \text{ Hz}$.

Cause di errore nella misura di temperatura:

a) Valore finito della resistenza di ingresso differenziale R_D .

Il segnale V_i all'ingresso differenziale è minore del segnale V_T della termocoppia a causa della partizione di tensione nella maglia R_1 , R_2 e R_D , se le cadute di tensione su R_1 , R_2 non sono trascurabili

b) Valore finito del CMRR

La differenza di potenziale di massa V_{CM} è un segnale di modo comune e va valutato il suo contributo all'uscita

c) Valore finito della resistenza R_C verso massa di ciascun ingresso.

La differenza di potenziale di massa V_{CM} genera un falso segnale differenziale perchè porta tensioni diverse sui due terminali di ingresso del preamplificatore. Infatti V_{CM} passa attraverso due diversi partitori di tensione per i due ingressi, rispettivamente:

R_1 ed R_C per l'ingresso +

R_2 ed R_C per l'ingresso -

d) Offset di tensione di linea di base $V_o \approx 100 \mu\text{V}$ e sua deriva termica $dV_o/dT = 5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Deviazioni fino a $V_o \approx 100 \mu\text{V}$ comporterebbero forti errori in temperatura, che però vengono eliminati con l'operazione di azzeramento dell'offset all'inizio del ciclo di misura. Durante il ciclo di misura tuttavia la deriva termica agisce sull'offset, dato che la temperatura del circuito può variare.

e) Rumore del sensore e del preamplificatore.

Nel caso qui considerato è particolarmente intensa la componente di rumore 1/f del preamplificatore. Per limitarla viene introdotto un taglio passabasso effettuando un azzeramento dello offset di linea di base prima di iniziare un ciclo di misura. La frequenza di taglio però risulta molto bassa e quindi poco efficace: occorre valutare il risultato.

(B) Valutazione quantitativa di errori nella misura di temperatura

a) Valore finito della resistenza di ingresso differenziale $R_D = 50 \text{ M}\Omega$.

La perdita relativa di segnale è

$$\frac{\Delta V}{V_T} = \frac{V_T - V_i}{V_T} \approx \frac{R_1 + R_2}{R_D} = 10^{-5}$$

V_T è circa proporzionale alla differenza tra temperatura del forno T e temperatura di riferimento T_R , quindi per l'errore in temperatura ΔT abbiamo

$$\frac{\Delta V}{V_T} \approx \frac{\Delta T}{T - T_R} \approx \frac{\Delta T}{T} = 10^{-5} \quad \text{cioè} \quad \Delta T \approx 10^{-5} T$$

Si nota che nel nostro caso l'errore è trascurabile, dato che al massimo (con temperatura $T=400^\circ\text{C}$) abbiamo

$$\Delta T \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$$

b) Valore finito del CMRR = 110dB = $3,16 \cdot 10^5$

La tensione V_{CM} equivale a un segnale differenziale spurio

$$\Delta V = \frac{V_{CM}}{\text{CMRR}} \approx 79 \mu\text{V}$$

cioè un errore di temperatura

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{dV/dT} \approx 7,2^\circ C$$

c) Valore finito della resistenza verso massa di ciascun ingresso $R_C = 500M\Omega$.

Dato che $R_C \gg R_1$ ed $R_C \gg R_2$, nelle resistenze R_1 e R_2 scorre praticamente uguale corrente $I_C = V_{CM} / R_C$. Le due resistenze però sono diverse e quindi le cadute di tensione sono diverse. La loro differenza costituisce un segnale differenziale spurio all'ingresso del preamplificatore

$$\Delta V \approx I_C (R_2 - R_1) = V_{CM} \frac{R_2 - R_1}{R_C} = 12,5 \mu V$$

che porta un errore di temperatura

$$\Delta T = \frac{\Delta V}{dV/dT} \approx 1,13^\circ C$$

d) Offset di tensione di linea di base $V_o \approx 100 \mu V$ e sua deriva termica $dV_o/dT = 5 \mu V/^\circ C$

Una deviazione $V_o \approx 100 \mu V$ comporterebbe un forte errore in temperatura $\Delta T \approx 9^\circ C$, ma esso viene eliminato dall'operazione di azzeramento dell'offset all'inizio del ciclo di misura. Durante il ciclo di misura agisce la deriva termica e dato che la temperatura può deviare fino a $2^\circ C$ da quella iniziale si può sviluppare una deviazione di offset fino a

$$\Delta V_o = \frac{dV_o}{dT} \cdot 2^\circ C \approx 10 \mu V \quad \text{che porta un errore di temperatura} \quad \Delta T = \frac{\Delta V}{dV/dT} \approx 0,9^\circ C$$

e) Rumore del sensore e del preamplificatore.

Il sensore è una resistenza metallica $R_T = R_1 + R_2 = 500 \Omega$ quindi ha rumore Johnson

$$\sqrt{S_{VR}} = \sqrt{4kTR_T} \approx 2,8 nV/\sqrt{Hz}$$

che risulta trascurabile rispetto al rumore di tensione del preamplificatore $\sqrt{S_V} = 20 nV/\sqrt{Hz}$.

Il rumore di corrente del preamplificatore ha effetto trascurabile rispetto a quello di tensione

$$\sqrt{S_i(R_1 + R_2)} \ll \sqrt{S_V}$$

Il rumore di tensione S_V del preamplificatore subisce il filtraggio passabasso con frequenza di taglio $f_s = 10 Hz$. Subisce inoltre il filtraggio passalto dato dall'azzeramento dello offset a inizio del ciclo di misura. Il ciclo dura 20min, quindi la frequenza di taglio risulta $f_i \approx 1/20min \approx 0,001 Hz$.

Il contributo del rumore bianco è

$$\sqrt{n_B^2} = \sqrt{S_V (f_s - f_i)} \approx \sqrt{S_V f_s} \approx 63 nV$$

Esso comporta un errore di temperatura trascurabile, ma c'è anche la componente $1/f$. Dato che $f_s \gg f_i$ si può bene valutare il suo contributo con l'approssimazione a taglio netto in frequenza

$$\sqrt{n_f^2} = \sqrt{S_V f_{cv}} \sqrt{\ln \left(\frac{f_s}{f_i} \right)} \approx 61 \mu V$$

che corrisponde a un errore rms in temperatura

$$\Delta T \approx 5,5^\circ C$$

Graduatoria delle cause di errore

Riassumendo quello che abbiamo visto, gli errori valutati risultano maggiori di quello dovuto alla imprecisione di $0,1^\circ C$ con cui viene rilevata la temperatura di riferimento della termocoppia (cioè dei contatti tra fili della termocoppia e terminali di ingresso dell'amplificatore), eccettuato l'errore dovuto al valore finito della resistenza di ingresso differenziale che risulta trascurabile.

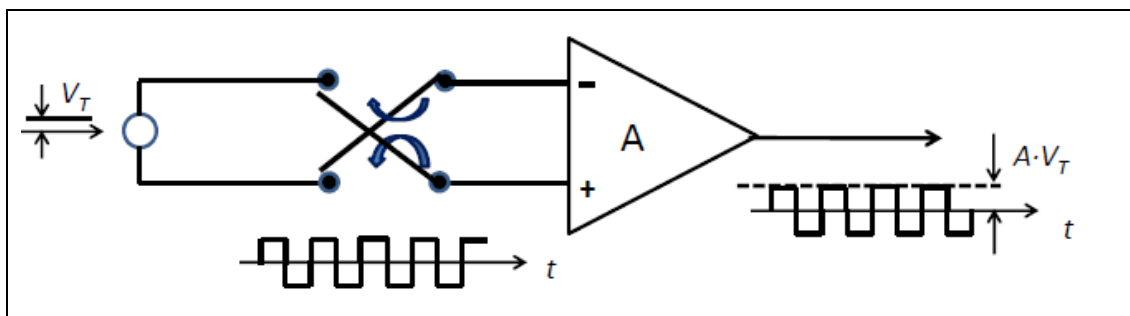
Nella situazione esaminata, la graduatoria di questi errori in ordine decrescente di importanza risulta

1. CMRR limitato: errore di temperatura $\Delta T \approx 7,2^\circ C$
2. Rumore 1/f del preamplificatore: errore di temperatura $\Delta T \approx 5,5^\circ C$
3. Resistenza di ingresso verso massa del preamplificatore: errore di temperatura $\Delta T \approx 1,13^\circ C$
4. Deriva termica di offset del preamplificatore: errore di temperatura $\Delta T \approx 0,9^\circ C$
5. Resistenza ingresso differenziale del preamplificatore: errore di temperatura trascurabile $\Delta T \approx 0,006^\circ C$

(C) Modulazione del segnale della termocoppia e misura del segnale modulato

Modulazione

Azionando gli switch in modo da invertire periodicamente i collegamenti tra i due terminali della termocoppia e i due terminali del preamplificatore si modula il segnale a onda quadra.



La figura riassume sinteticamente questo funzionamento, mostrando che la modulazione così ottenuta trasforma il segnale di tensione continua V_T della termocoppia in un segnale di tensione a onda quadra oscillante a frequenza f_m tra ampiezza V_T positiva e ampiezza $-V_T$ negativa. Mentre il segnale V_T originale ha banda stretta (circa 1Hz) centrata sulla continua ($f=0$), il segnale modulato ha eguale banda stretta ma centrata sulla frequenza di modulazione f_m (e sulle sue armoniche dispari). Utilizzando frequenza di modulazione abbastanza elevata, ad esempio $f_m = 1\text{MHz}$, si può portare il segnale in una zona spettrale dove il rumore 1/f è assai meno intenso. Infatti il rumore 1/f viene generato all'interno del preamplificatore e perciò non viene modificato dalla modulazione effettuata prima del preamplificatore.

Nota esplicativa dei comandi dettagliati da dare agli switch

Per ottenere il funzionamento detto utilizzando gli switch integrati descritti, occorre avere due segnali di comando complementari (quando uno è al livello alto l'altro è al livello basso) a onda quadra simmetrica e distribuirli agli switches in modo che

- ogni switch è chiuso (corto circuito) in un semiperiodo e aperto (circuito aperto) nell'altro semiperiodo dell'onda quadra
- ogni terminale del preamplificatore veda sempre un solo switch chiuso (in corto circuito)
- ogni terminale della termocoppia veda sempre un solo switch chiuso (in corto circuito)

Filtraggio

Per filtrare il segnale estraendolo efficientemente dal rumore occorre un filtraggio passabanda centrato sulla frequenza di modulazione f_m e con larghezza di banda Δf_F dimensionata in modo da passare tutte le componenti di frequenza che interessano del segnale della termocoppia. È conveniente ed efficiente utilizzare un Lock-in amplifier (LIA) con demodulazione a onda quadra e con filtro passabasso avente limite di banda $f_s = 10\text{ Hz}$ eguale a quello già usato per la misura di V_T continua. Indicando con $S_n(f)$ lo spettro di rumore di tensione totale

$$S_n(f_m) = S_V + S_V f_C \frac{1}{f}$$

Il S/N così ottenuto è

$$\frac{S}{N} = \frac{V_T}{\sqrt{S_n(f_m) f_s}}$$

e tenendo conto che abbiamo scelto la frequenza di modulazione f_m eguale alla frequenza d'angolo del rumore $1/f$, cioè $f_m = f_{CV} = 1\text{MHz}$, abbiamo

$$S_n(f_m) = S_V + S_V f_{CV} \frac{1}{f_m} \approx 2S_V$$

e quindi

$$\frac{S}{N} \approx \frac{V_T}{\sqrt{2S_V f_s}}$$

Riesame degli errori nella misura con modulazione e confronto con la misura in continua

Errore dovuto a CMRR limitato

Nella misura con modulazione viene eliminato perchè la tensione di modo comune V_{CM} non viene modulata dall'inversione dei contatti tra termocoppia e preamplificatore. Anche in questo caso V_{CM} produce un segnale spurio continuo che non contribuisce alla misura effettuata con LIA.

Errore dovuto al rumore $1/f$ del preamplificatore

Il rumore totale in questo caso risulta poco maggiore di quello valutato per la sola componente bianca nella misura in continua

$$\sqrt{n_m^2} \approx \sqrt{2S_V f_s} \approx 90\text{nV}$$

quindi l'errore dovuto al rumore totale, ivi inclusa la componente $1/f$, risulta trascurabile $\Delta T \approx 0,009^\circ\text{C}$.

Errore dovuto alla resistenza di ingresso verso massa del preamplificatore

L'inversione dei contatti tra termocoppia e preamplificatore inverte anche la differenza di potenziale spuria dovuta alle diverse resistenze dei fili di termocoppia. Quindi questo effetto continua a contribuire al segnale modulato e pertanto continua a causare lo stesso errore:

$$\Delta T \approx 0,9^\circ\text{C}$$

Errore dovuto alla deriva termica di offset del preamplificatore

Nella misura con modulazione viene eliminato perchè lo offset e le sue variazioni termiche producono un segnale spurio continuo che non contribuisce alla misura effettuata con LIA

Errore dovuto alla resistenza di ingresso differenziale del preamplificatore

L'effetto rimane eguale e quindi l'errore rimane trascurabile