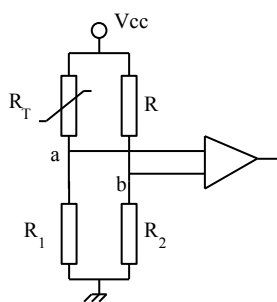


Circuito di condizionamento per trasduttori resistivi ponte di Wheatstone



Il primo problema che si incontra nel progetto di tale circuito di condizionamento è quello del dimensionamento delle resistenze del ponte, supposto che siano noti i valori relativi al trasduttore.

La resistenza R_T , in serie al trasduttore può essere dimensionata in base a diversi criteri: uno di questi è quello di evitare l'autoriscaldamento del trasduttore stesso, per cui dovrà essere di valore sufficientemente elevato. Le resistenze R ed R_2 dovranno essere dimensionate in modo da rendere il ponte in equilibrio quando la tensione in uscita deve essere nulla

(eliminazione dell'offset). Possono essere poste uguali alle resistenze sull'altro

lato del ponte, cioè $R = R_T$ e $R_1 = R_2$.

Valgono le relazioni:

$$V_a = V_{cc} * R_1 / (R_1 + R_T)$$

$$V_b = V_{cc} * R_2 / (R + R_2)$$

se $R_T = R$ allora $V_A = V_B$, il ponte è in equilibrio e la tensione in uscita è nulla

se $R_T = R + \Delta R$ allora $V_A = V_{cc} * R_1 / (R + \Delta R + R_1)$

$$V_{ba} = V_b - V_a = V_{cc} * [R_1 / (R_1 + R_2) - R_1 / (R + \Delta R + R_1)] = V_{cc} * \Delta R / (R_1 + 2R + \Delta R + R_1 * (R + \Delta R))$$

$$V_{ba} = V_{cc} * \left(\frac{R_1}{R_1 + R} - \frac{R_1}{R_1 + R + \Delta R} \right) \text{ elaborando tale espressione si ottiene:}$$

$$V_{ba} = \frac{V_{cc} * \Delta R}{R_1 + 2R + \Delta R + \frac{R}{R_1} (R + \Delta R)}$$

La tensione di uscita non è una funzione lineare della ΔR del trasduttore, ma per piccole variazioni la non linearità è trascurabile.

Esercizio: utilizzare un trasduttore PT100 (RTD) per realizzare un circuito che mi fornisca una tensione variabile da 0 a 10 V in corrispondenza di una variazione di temperatura da 0 a 150°C.

Dalle caratteristiche del PT100 si ricava: $t = 0^\circ\text{C} \rightarrow R = 100 \Omega$; $t = 150^\circ\text{C} \rightarrow R = 157,31 \Omega$.

Il circuito impiegato è quello precedente.

Si possono fissare i valori delle resistenze R_1 in modo che nel trasduttore circoli un basso valore di corrente, ad es 3 mA, per evitarne l'autoriscaldamento. Se il ponte è alimentato a $V_{cc} = 12 \text{ V}$
 $R_1 = V_{cc} / I = 12 / 3 \text{ mA} = 4 \text{ k}\Omega$. Si può usare il valore commerciale 3,9 kΩ.

Quindi $R = 100 \Omega$ e $R_1 = 3,9 \text{ k}\Omega$. Con queste condizioni abbiamo che per $t = 0^\circ\text{C}$ $V_o = 0 \text{ V}$.

Per calcolare V_{ba} alla temperatura di 150°C senza la necessità di applicare la formula precedente, calcolo separatamente i valori di V_A e V_B :

$$V_a = V_{cc} * \left(\frac{R_1}{R_1 + R_t} \right) = \frac{12 * 3,9}{3,9 + 0,157} = 11,536 \text{ V}$$

$$V_b = V_{cc} * \left(\frac{R_1}{R + R_1} \right) = \frac{12 * 3,9}{0,1 + 3,9} = 11,7 \text{ V}$$

la tensione in uscita del ponte vale quindi $V_{ba} = V_b - V_a = 11,7 - 11,536 = 0,165 \text{ V}$

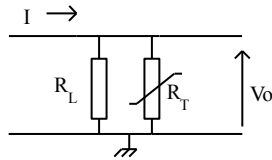
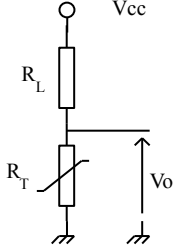
per avere $V_o = 10 \text{ V}$ è necessario che l'amplificatore differenziale guadagni $A_v = \frac{V_o}{V_{ba}} = \frac{10}{0,165} = 61$

Linearizzazione di un trasduttore

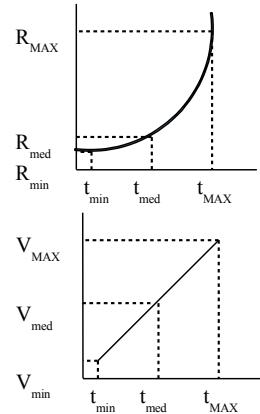
La caratteristica del trasduttore può presentare una non linearità non trascurabile specialmente se il campo di utilizzo è ampio.

Una caratteristica di questo tipo (è riportato l'esempio di un trasduttore resistivo di temperatura) può essere linearizzata con una semplice resistenza posta in serie, se l'alimentazione è in tensione, in parallelo, se l'alimentazione è in corrente.

Facciamo ora riferimento al circuito serie. Il circuito di linearizzazione deve



operare in modo da modificare la caratteristica e farla diventare come quella della illustrazione a fianco. Da rilevare che la linearizzazione viene fatta in un campo ben definito, stabilendo i valori minimo e massimo della temperatura, i corrispondenti valori minimo e massimo della resistenza del



trasduttore e ricavandosi il valore medio della temperatura ed il corrispondente valore della resistenza.

Si evidenzia subito che : $V_{MAX} - V_{med} = V_{med} - V_{min}$

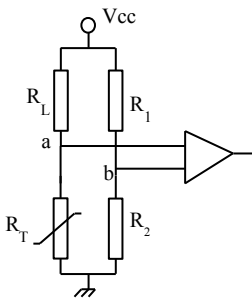
Determiniamo tali valori:

$$V_{MAX} = \frac{R_{MAX}}{R_L + R_{MAX}} * V_{cc} \quad V_{med} = \frac{R_{med}}{R_L + R_{med}} * V_{cc} \quad V_{min} = \frac{R_{min}}{R_L + R_{min}} * V_{cc}$$

Imponendo la relazione $V_{MAX} - V_{med} = V_{med} - V_{min}$ si ricava una equazione nella sola incognita R_L , non facile da ricordare:

$$R_L = \frac{R_{med} * (R_{min} + R_{MAX}) - 2R_{min}R_{MAX}}{R_{min} + R_{MAX} - 2R_{med}}$$

una resistenza di tale valore può essere usata nel ponte di Wheatstone per linearizzare il trasduttore:



Esempio:

Consideriamo il termistore NTC 25 della Siemens e supponiamo di doverlo utilizzare nel range $0^{\circ}C \div 100^{\circ}C$ per avere in uscita una tensione $V_o = 0 \div 5V$.

Dalle caratteristiche fornite nel data sheet ricaviamo che:

$$R(0^{\circ}) = 2417 \Omega \quad R(100^{\circ}) = 75 \Omega \quad R(50^{\circ}) = 326 \Omega$$

Applicando la formula precedente si ricava $R_L = 244 \Omega$.

La resistenza del lato contenente il trasduttore presenta il valore minimo di $244 + 75 = 319 \Omega$. Per evitare l'autoriscaldamento del NTC è necessaria una tensione di alimentazione del ponte ridotta:

supposto $V_{cc} = 5V$ ho $I_{MAX} = 5/319 = 15,7 \text{ mA}$ (in queste condizioni $P_T = R * I^2 = 18 \text{ mW}$)

Le resistenze R_1 e R devono essere calcolate in modo da avere il ponte in equilibrio per $t = 0^{\circ}C$.

La condizione di equilibrio del ponte di W. è la seguente: $R_L * R = R_1 * R_T$.

Ponendo ad esempio $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ricavo $R = R_1 * R_T / R_L = 10 * 2417 / 244 = 9,9 \text{ k}\Omega$.

(E' ovvio che una delle due resistenza deve essere variabile per effettuare la taratura del ponte).

Alimentando quindi il ponte con $V_{cc} = 5 \text{ V}$ otteniamo a $100^{\circ}C$:

$$V_a = V_{cc} * R_T / (R_L + R_T) = 5 * 75 / (244 + 75) = 1,175V$$

$$V_b = V_{cc} * R / (R_1 + R) = 5 * 9,9 / (1 + 9,9) = 4,54V$$

La tensione di uscita del ponte vale quindi $V_{ba} = 1,453 - 0,376 = 3,36 \text{ V}$

Per avere 5V all'uscita l'amplificatore dovrà avere un guadagno $A_v = 5/3,36 = 1,49$.

Alla temperatura di $50^{\circ}C$ ho una tensione $V_a = V_{cc} * R_T / (R_L + R_T) = 5 * 326 / (244 + 326) = 2,86V$, mentre V_b è rimasto invariato. L'uscita del ponte vale quindi $V_{ba} = 1,68 \text{ V}$, quella del circuito $V_o = 2,5 \text{ V}$.

N.B. La resistenza R_L linearizza la caratteristica del trasduttore, non il funzionamento del ponte.

NTC

Per gli NTC si può utilizzare una formula empirica, reperibile sui data sheets.

La relazione che esprime la dipendenza della resistenza del trasduttore dalla temperatura è la seguente:

$$R_T = R_0 * e^{\frac{B * (T_0 - T)}{T_0 * T}}$$

dove:

R_T è la resistenza del termistore alla temperatura generica T

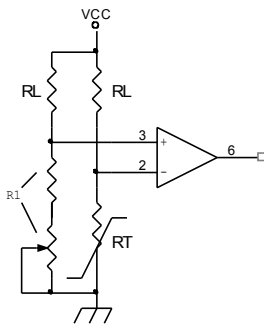
R_0 è la resistenza del termistore alla temperatura di riferimento fornita dal costruttore (generalmente 20 °C).

B è la costante dimensionale del trasduttore ed è compresa tra 2000 e 5000 K (dal data sheet).

T è la temperatura generica espressa in gradi Kelvin

T_0 è la temperatura di riferimento fornita dal costruttore (generalmente 20 °C = 293K).

La linearizzazione può essere fatta con una resistenza calcolata con la seguente formula empirica:



$$R_L = R(T_{med}) * \frac{B - 2T_{med}}{B + 2T_{med}} \quad \text{dove } T_{med} = \frac{T_{min} + T_{MAX}}{2}$$

Nella realizzazione del circuito bisogna tenere conto del fatto che la resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura; normalmente interessa una tensione che aumenti all'aumentare della temperatura, quindi gli ingressi del differenziale vanno collegati alla diagonale di rivelazione del ponte in modo adeguato (vedi figura).

Es.: progettare un circuito di condizionamento per un termistore NTC K25-1k che fornisca una tensione d'uscita 0÷5V per variazioni di temperatura comprese nel range 20°C÷80°C.

Le caratteristiche del termistore sono:

Tipo	R[Ω]	Tolleranza	B[K]	Colore	Codice
K 25 1 k	1000	20%	3530	violetto	

- Potenza a 60°C 400mW
- Temperatura di riferimento $T_0 = 20$ °C
- Campo di temperatura -25°C ÷ +100°C

Applicando la formula $R_T = R_0 * e^{\frac{B * (T_0 - T)}{T_0 * T}}$ si può determinare il valore di R_T a 50 °C (valore medio del range di misura) e a 80 °C ; il valore a 20 °C è noto dal data sheet $R(20^\circ C) = 1000 \Omega$.

$$R_T(50^\circ C) = 1000 * e^{\frac{3530 * (293 - 323)}{293 * 323}} = 326\Omega \quad R_T(80^\circ C) = 1000 * e^{\frac{3530 * (293 - 353)}{293 * 353}} = 130\Omega$$

Calcolo la resistenza di linearizzazione

$$R_L = R(T_{med}) * \frac{B - 2T_{med}}{B + 2T_{med}} = 326 * \frac{3530 - 646}{3530 + 646} = 225\Omega \quad (\text{valore commerciale } 220\Omega)$$

Supponendo $V_{cc} = 5V$ calcolo la potenza dissipata dal termistore:

$$I_{TMAX} = \frac{V_{cc}}{R_L + R_{Tmin}} = \frac{5}{220 + 130} = 14,3mA \rightarrow P_T = R_T * I_T^2 = 130 * (14,3 * 10^{-3})^2 = 26,5mW \quad \text{valore accettabile}$$

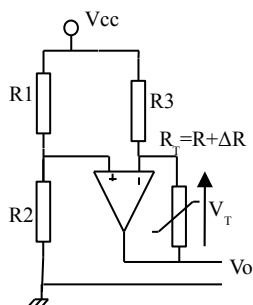
Per dimensionare l'amplificatore differenziale calcolo i valori di V^+ e V^- alla temperatura di 80°C.

$$V^+ = V_{cc} * \frac{R1}{R1 + R_L} = 5 * \frac{1000}{1000 + 220} = 4,1V \quad V^- = V_{cc} * \frac{R_T(80)}{R_T(80) + R_L} = 5 * \frac{130}{130 + 220} = 2,6V$$

$$V_d = V^+ - V^- = 4,1 - 2,6 = 1,5V \rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{5}{1,5} = 3,33$$

Linearizzazione del ponte di Wheatstone

È possibile linearizzare un ponte di W. usando un amplificatore operazionale:



All'ingresso non invertente dell'amp. op. è presente la tensione

$$V^+ = V_{cc} * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{rif}$$

, che ritroviamo anche sull'ingresso invertente per il principio della massa virtuale. La tensione di uscita vale : $V_o = V_{rif} - V_T$, ove V_T è la caduta di tensione sul trasduttore. Nella resistenza R_3 circola la corrente

$$I_3 = \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3}$$

Il trasduttore, sollecitato, presenta una resistenza $R_T = R + \Delta R$, è percorso dalla corrente I_3 e produce una c.d.t $V_T = I_3 * (R + \Delta R)$.

$$V_o = V_{rif} - V_T = V_{rif} - I_3 * (R + \Delta R) = V_{rif} - \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3} * (R + \Delta R) =$$

$$V_{rif} - \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3} * R - \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3} * \Delta R = q + m * \Delta R$$

$$\text{ove } q = V_{rif} - \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3} * R \quad \text{e } m = - \frac{V_{cc} - V_{rif}}{R_3}$$

Esaminando tale relazione si vede che il legame fra V_o e ΔR è lineare.

Esercizio di progetto

- Realizzare uno strumento di misura che, in corrispondenza di una temperatura variabile fra -100°C e $+100^\circ\text{C}$, fornisca una tensione di $0 \div 5V$.

Il range di temperatura richiesto esclude l'impiego di trasduttori a semiconduttore. Si può scegliere fra termoresistenze e termocoppie. Scegliamo le termoresistenze per il loro più facile impiego e perché il range di funzionamento è più idoneo al loro impiego.

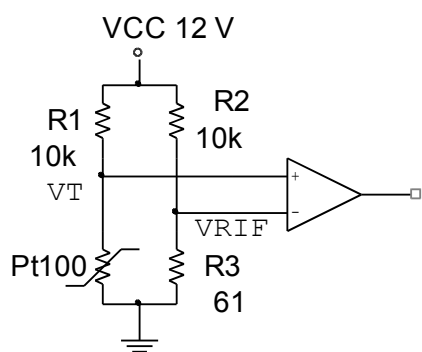
Usiamo la PT100, il cui range di utilizzo è $-243^\circ\text{C} \div +600^\circ\text{C}$, a 0°C presenta una resistenza di 100Ω e ha un coefficiente di temperatura, rilevabile dal data sheet e dal manuale, $\alpha = 0,0039/^\circ\text{C}$.

Ricaviamo i valori della RTD alle temperature estreme utilizzando la formula

$$R(t) = R(t_0) * (1 + \alpha * \Delta t)$$

$$R(100^\circ\text{C}) = 100 (1 + 0,0039 * 100) = 139 \Omega$$

$$R(-100^\circ\text{C}) = 100 (1 + 0,0039 * (-100)) = 61 \Omega$$



La elevata variazione del valore resistivo del trasduttore fa sì che il ponte di W. non possa ritenersi lineare. Supponendo di poter trascurare tale non linearità, utilizziamo un ponte di W. come c.d.c. e dimensioniamo R_1 in modo da evitare l'autoriscaldamento del trasduttore. Le resistenze R_1 e R_2 sono poste a $10 K$.

$$(I_T = V_{cc} / (R_1 + R_T) \approx 12 / 10K = 1,2 \text{ mA} \rightarrow P_T = R_T * I^2 = 0,15 \text{ mW})$$

R_3 viene posto a 61Ω in modo che il ponte risulta in equilibrio alla temperatura di -100°C .

Analizziamo il circuito alla temperatura di 100°C :

$$V_T = V_{cc} * \frac{RT}{R_1 + RT} = 12 * \frac{139}{139 + 10 * 10^3} = 0,1645V$$

$$V_{RIF} = V_{cc} * \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 12 * \frac{61}{61 + 10 * 10^3} = 72,756mV$$

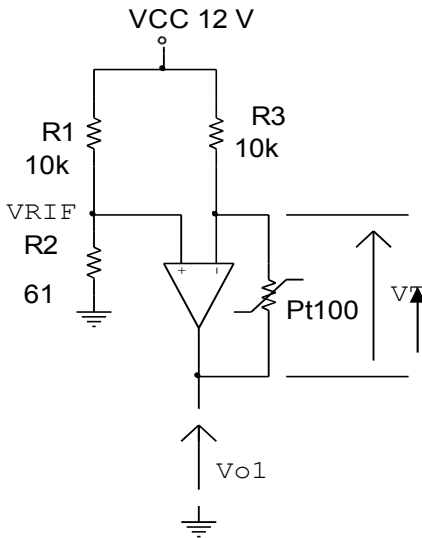
$$V_d = V_T - V_{RIF} = 0,164 - 0,07276 = 91,76mV$$

Per avere $V_o = 5V$ è necessario che l'amplificatore guadagni:

$$A_v = \frac{V_o}{V_d} = \frac{5}{91,76 * 10^{-3}} = 54,5$$

Posso usare un amplificatore per strumentazione per l'elevato valore della impedenza di ingresso e del CMRR.

Volendo realizzare uno strumento più preciso non posso ignorare la non linearità del ponte e dovrò utilizzare il circuito con il ponte di W. linearizzato con un amp. op.



I valori di R_1 , R_2 ed R_3 si determinano con le considerazioni precedenti. Anche V_{rif} assume il valore calcolato in precedenza:

$$V_{rif} = 72,756mV.$$

Tale valore lo ritroviamo sull'ingresso invertente dell'amp. op. per effetto del principio della massa virtuale dovuto alla retroazione negativa. La resistenza R_3 è quindi percorsa sempre dalla corrente

$$I_3 = \frac{V_{cc} - V_{Rif}}{R_3} = \frac{12 - 0,072756}{10 * 10^3} = 1,193mA$$

Tale corrente fluisce sul Pt100; a $-100^\circ C$ produce una caduta di tensione uguale e contraria alla V_{rif} , per cui $V_{o1} = V_{RIF} - V_T = 0V$.

$$V_T = I_3 * R_T = 1,193 * 10^{-3} * 61 = 72,756mV$$

A $100^\circ C$ invece produce una caduta di tensione

$$V_T = I_3 * R_T = 1,193 * 10^{-3} * 139 = 165,83mV$$

per cui $V_{o1} = V_{RIF} - V_T = 72,756 - 165,83 = -93mV$

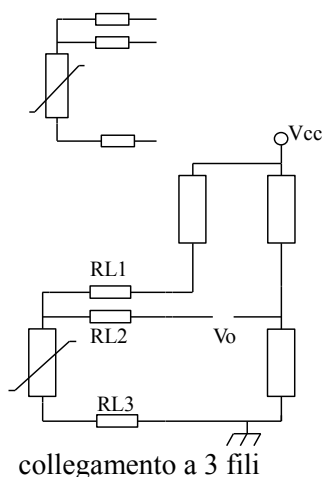
Sarà quindi necessario inserire a valle un altro amplificatore che guadagni per ottenere una tensione di uscita di 5V.

$$A_v = \frac{V_o}{V_{o1}} = \frac{5}{-93 * 10^{-3}} = -53,7$$

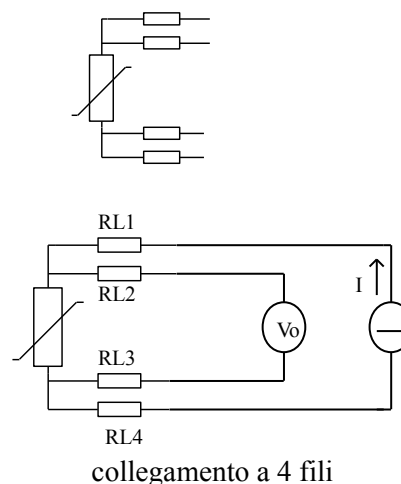
Inserzione a 3 o 4 fili.

Quando il trasduttore è posto lontano dal circuito di condizionamento non sono trascurabili gli effetti dei fili di collegamento, anche perché la loro resistenza è anch'essa influenzata dalla temperatura. Per eliminare tale inconveniente si ricorre a trasduttori a tre oppure a quattro fili, ed alla relativa inserzione.

TRASDUTTORE A 3 FILI



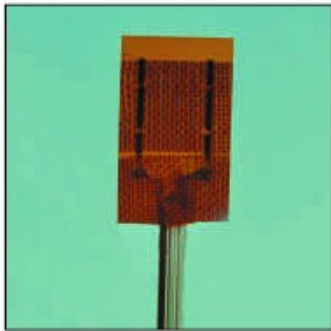
TRASDUTTORE A 4 FILI



Collegamento a tre fili: le resistenze RL1 e RL3 appartengono a due rami adiacenti del ponte, per cui i loro effetti si compensano; la resistenza RL2 è percorsa da una corrente trascurabile (ingresso di un amplificatore per strumentazione), non produce effetti. La compensazione è migliore quanto più le resistenze sono di uguale valore.

Collegamento a quattro fili: la tensione misurata dal voltmetro V_0 non è influenzata da RL1 e RL4 perché il circuito è alimentato da un generatore di corrente ideale; RL2 e RL3 sono percorse da una corrente trascurabile per cui anche loro non producono alcun effetto.

PT100 Platinum Resistance Temperature Detector 22810 "StikonTM"



Model 22810 is a polyimide insulated surface sensor designed to provide a practical method for measuring surface temperature. These sensors are small, flexible and their low mass has minimal thermal effect on the material being measured. They are ideally suited for applications where the device can be permanently mounted using adhesives or other mechanical

Specifications:

Resistance	100Ω at 0°C
Accuracy	-1 Model ± 0.5Ω -2 Model ± 0.22Ω
Stability	< 0.2°C drift/year
Temperature range	-200°C to +232°C
Response time	<200 milliseconds (lag on metal surfaces)
Self Heating	15mW/°C (on metal surface)

mounting methods.

- 3 and 4 terminal versions
- 3850 ppm/°C

