TRASDUTTORI E SENSORI

Molto spesso le parole trasduttore e sensore vengono considerate sinonimi. Quando non lo sono si considera sensore la sola parte iniziale del trasduttore, sensibile alla grandezza fisica che varia un suo parametro in funzione della grandezza da misurare. Il sensore non ha bisogno di energia esterna per funzionare. Il trasduttore è un dispositivo che fornisce in uscita una grandezza elettrica, spesso una tensione, funzione di una grandezza fisica in ingresso. Il sensore è quindi la parte iniziale del trasduttore. In molti casi questa suddivisione non è precisa.

GENERALITA'

Un trasduttore si dice:
Analogico: quando il suo segnale d'uscita è una grandezza elettrica che varia in modo continuo mantenendo una doppia corrispondenza con il valore della grandezza misurata
Digitale: quando il suo segnale di uscita è composto da uno o più segnali digitali che possono assumere ciascuno solo due livelli di tensione identificati come 0 e 1.
Attivo: quando fornisce in uscita un segnale direttamente utilizzabile da circuiti di elaborazione senza nessun consumo di energia elettrica. E' il caso delle celle fotovoltaiche e delle termocoppie.
Passivo: è quel trasduttore al quale bisogna fornire energia affinché la grandezza fisica d'uscita possa essere trasformata in una elettrica. Ad esempio il potenziometro che fornisce in uscita valori di resistenza diversi, a seconda della posizione.
Lineare: per ogni sensore si può definire la caratteristica di trasferimento, cioè il legame che intercorre tra la variabile da misurare (ingresso) e la grandezza d'uscita del trasduttore. Un trasduttore la cui caratteristica è una retta viene detto lineare. In alcuni casi la retta passa per l'origine ma nella maggior parte dei casi la retta non passa per l'origine. In questi casi la variabile d'uscita è diversa da zero e vale U_{offset} in corrispondenza del valore nullo della variabile di ingresso I. L'equazione della caratteristica di trasferimento è:
$U = K \cdot I + U_{offset}$ U = Grandezza di uscita
Il funzionamento ottimale di un trasduttore è quello definito da una caratteristica lineare
Range di funzionamento: è l'intervallo dei valori che può assumere la grandezza che deve essere trasdotta.
Sensibilità: è il rapporto tra la variazione della grandezza d'uscita e la variazione della grandezza d'ingresso che la provoca. Più il coefficiente angolare della retta della caratteristica di trasferimento è elevato più il trasduttore è sensibile e minore sarà il range di funzionamento.
Tempo di risposta: è il tempo che il trasduttore impiega per raggiungere in uscita il valore di regime corrispondente al valore d'ingresso.
Risoluzione: è il rapporto percentuale tra la minima variazione della grandezza d'uscita in grado di essere rilevata e il valore massimo del fondo scala.
Ripetibilità: è la capacità di un sensore di fornire sempre gli stessi valori d'uscita in corrispondenza dell'ingresso.
Stabilità: è la caratteristica di mantenere le caratteristiche in seguito a variazione dei parametri (ad esempio la temperatura o l'invecchiamento)
I trasduttori di temperatura: AD590, LM35

TRASDUTTORE AD590

Descrizione sintetica: un trasduttore AD590 è assimilabile ad un generatore di corrente.
Caratteristica di utilizzo: è un componente che, sottoposto ad una tensione compresa tra 4V e 30V si lascia attraversare da una corrente proporzionale alla temperatura ma non dipendente dalla tensione alla quale è sottoposto.
Caratteristica di trasferimento: $I = K \cdot T$ I è la corrente di uscita misurata in µA
K è la costante del trasduttore espressa in [µA/°K]
T è la temperatura espressa in °K
Circuito di conversione: Per ottenere una tensione legata alla temperatura si inserisce il componente in un partitore resistivo oppure in un amplificatore con A.O. in configurazione invertente o non invertente.
Esercizio: Trovare la corrente che attraversa un trasduttore AD590 per la temperatura 0°C
$T(^\circ C) = 0^\circ C \rightarrow T(^\circ K) = 0 + 273 = 273K$

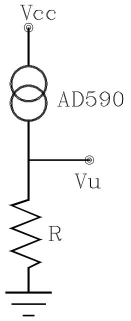
$I(0^\circ C) = K \cdot T = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 273 = 273\mu7$

Esercizio 1: Trovare la corrente che attraversa un trasduttore AD590 per la temperatura 70°C

$T(^\circ C) = 70^\circ C \rightarrow T(^\circ K) = 70 + 273 = 343K$

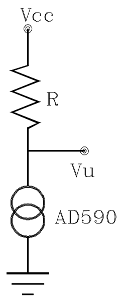
$I(0^\circ C) = K \cdot T = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 343 = 343\mu4$

Esercizio 2: Calcolare la tensione d'uscita alla temperatura 0°C. R=1000Ω



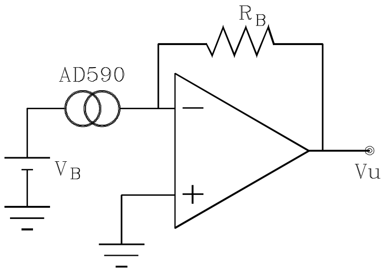
$V(u) = 1000 \cdot 273 \cdot 10^{-6} = 10^3 \cdot 273 \cdot 10^{-6} = 273 \cdot 10^{-3} = 0{,}273V$

Esercizio 3: Calcolare la tensione d'uscita alla temperatura 70°C. Dati: R=1000Ω Vcc=5V



$V(u) = V_{CC} - V_R = 5 - 1000 \cdot 343 \cdot 10^{-6} = 5 - 10^3 \cdot 343 \cdot 10^{-6} = 5 - 343 \cdot 10^{-3} = 5 - 0{,}343V = 4{,}657V$

Esercizio 4: Calcolare la tensione d'uscita alla temperatura 70°C R=1000Ω Vcc=5V



$V(u) = -R_B \cdot I = -1000 \cdot 343 \cdot 10^{-6} = -343 \cdot 10^{-3} = -0{,}343V$

TRASDUTTORE LM35

Descrizione sintetica: Un trasduttore LM 35 fornisce direttamente in uscita una tensione proporzionale alla temperatura

Caratteristica di utilizzo: deve essere alimentato con una tensione compresa tra 4V e 30V e la temperatura deve essere compresa tra -55°C ¸ 150°C

Caratteristica di trasferimento: Vu= K T dove T è la temperatura espressa in °C
K=10mV/°C
Vu la tensione di uscita espressa in mV

Circuito di conversione: non ne ha bisogno perché fornisce già una tensione in uscita.

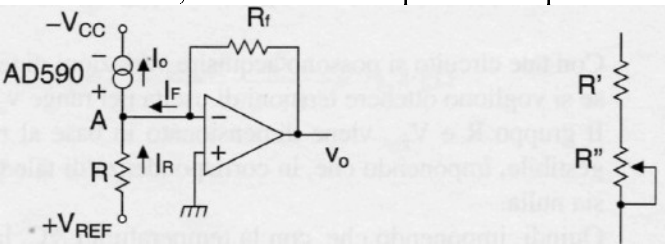
Esercizio: Trovare la tensione in uscita quando la temperatura assume due valori:
–20 °C ¸ +30 °C.

Soluzione

T a –20°C à V=10·(-20)=-200 mV
T a +30°C à V=10·(+30)=+300 mV

Convertitore I-V

Tornando allo schema iniziale, è chiaro però che l'inserimento di un carico (in parallelo ad R) provoca una variazione della resistenza totale vista dal generatore e di conseguenza una variazione della tensione v. (a parità di temperatura) ed una scorretta trasduzione.
Normalmente, sia per ottenere una informazione in tensione indipendente dalle variazioni del carico, sia per adattare la scala dei valori, si inserisce un amplificatore operazionale, collegato come convertitore corrente-tensione.



Nello schema la resistenza R sarà come al solito affiancata da un trimmer (R'ed R"). Per comandare gli stadi successivi è necessario che la tensione v_O corrispondente al minimo valore di temperatura che si suppone di voler rilevare sia v_O=0V.
La resistenza R assolve proprio a questo compito, cioè fa da derivazione parallelo ***(shunt).***
Scriviamo le equazioni relative al circuito (punto A a massa virtuale) quindi:

$I_o = I_F + I_R$ $\qquad\qquad$ $V_A = -RI_R + V_{REF} = 0$

$I_R = V_{REF} / R$ costante al variare della temperatura R

$V_o = R_F I_F$

Essendo $I_O = T^k$ μA e volendo che in corrispondenza del range di temperature $[T_1, T_2]$, si abbia una tensione di uscita nel range $[v_{ol}, v_{o2}]$ con:

$\Delta T = T_1 - T_2$ $\qquad$ e $\qquad$ $\Delta v = v_{ol} - v_{o2}$

si hanno le due equazioni relative al minimo ed al massimo:

$$v_{o1} = R_F I_{F1} = R_F (I_{o1} - I_R) = R_F (T_1 \cdot 10^{-6} - I_R)$$
$$v_{o2} = R_F I_{F2} = R_F (I_{o2} - I_R) = R_F (T_2 \cdot 10^{-6} - I_R)$$

Facendo la differenza membro a membro fra la seconda equazione e la prima si ha:

$$\Delta v_O = R_F \Delta T\, 10^{-6}$$

Quindi la resistenza RF è imposta dalla relazione

$$R_F = \Delta v_O / (\Delta T\, 10^{-6}) = \Delta v_O / (\Delta\tau\, 10^{-6})$$

Normalmente si vuole che il range della tensione di uscita sia 0... 5V quindi Δv_O= 5 V che, da R_F =5 / (ΔT μ). Posto al massimo R_F=100k si ha la minima variazione di temperatura gestibile

$$\Delta T_{MIN} = \frac{\Delta v_o}{R_F} 10^6 = \frac{5 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^3} = 50°K = 50°C$$

Con tale circuito si possono acquisire variazioni di temperature solo superiori a 50 °C se si vogliono ottenere tensioni di uscita nel range vo=0...5V.
Il gruppo R e VREF viene dimensionato in base al minimo valore della temperatura gestibile, imponendo che, in corrispondenza di tale temperatura, la tensione di uscita sia nulla.
Quindi, imponendo che, con la temperatura t, °C, la tensione di uscita sia v_{ol}=0 si ha:

$$I_{F1} = \frac{v_{o1}}{R_F} = 0 \qquad I_R = I_{o1} = T_1 \cdot 10^{-6} K$$

$$I_{o1} - I_R = 0 \qquad \frac{V_{REF}}{R} = T_1 \cdot 10^{-6} K = (t_1 + 273) \cdot 10^{-6}\ °C$$

Si imporrà V_{REF} in base ai componenti disponibili e si dimensionerà la resistenza R.

Se vogliamo avere un'idea globale della corrispondenza fra la tensione di uscita e la temperatura, dobbiamo trovare la relazione fra esse e disegnare quindi la curva caratteristica di trasferimento.
Quindi la relazione cercata è:

$$V_o = R_F\ I_F = R_F\ (I_o - I_R) = R_F\ (T°\cdot 10^{-6} - I_R) = R_F\ (t° + 273)\cdot 10^{-6} - R_F I_R =$$

$$= R_F t°\cdot 10^{-6} + 273\cdot 10^{-6}\ R_F - R_F\ I_R = R_F\ t°\cdot 10^{-6} + 273\cdot 10^{-6}\ R_F - R_F\ \frac{V_R}{R}$$

Dato che il trasduttore è lineare e che il circuito interposto è lineare, tale curva risulterà una retta.

$$V_o = R_F\cdot 10^{-6} t° + 273\cdot 10^{-6} R_F - R_F\frac{V_R}{R}$$

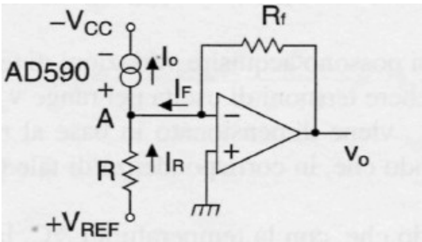
che è una funzione lineare di variabile t °C rappresentata da una retta di coefficiente angolare:

$m = R_F\ 10^{-6}$ e che incontra l'asse delle Vo nel punto:

$q = 273\ 10^{-6}\ R_F - V_{REF}\ (R_F / R)$

ESERCIZIO:

Dato il circuito



e dati range di temperatura e della tensione di uscita, dimensionare i componenti e disegnare la curva caratteristica:

$t° = -20 \div 50\ °C$

$v_o = 0 \div 5\ V$

Si dimensiona subito la resistenza R_F:

$$R_F = \frac{\Delta v_o}{\Delta t\cdot 10^{-6}} = \frac{5}{70\cdot 10^{-6}} = 71{,}4\ k\Omega$$

Si dimensiona il blocco gruppo R e V_{REF}:

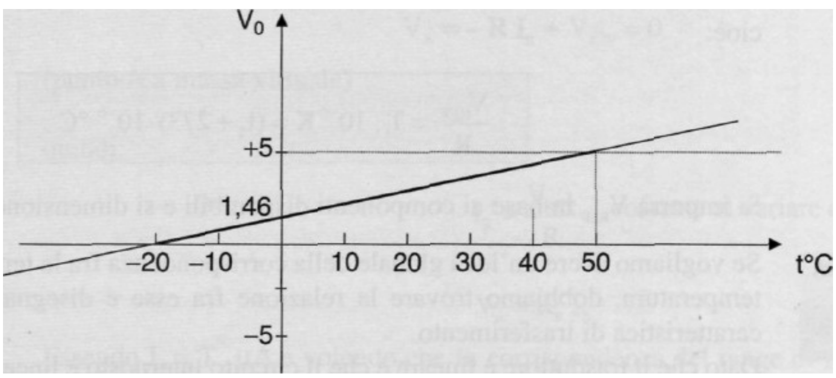
$$\frac{V_{REF}}{R} = (t_1 + 273)\cdot 10^{-6}\ °C = 253\cdot 10^{-6}$$

fissato, ad esempio, $V_{REF} = 5$ V si ha:

$$R = \frac{V_{REF}}{(t_1 + 273)\cdot 10^{-6}} = \frac{5}{253\cdot 10^{-6}} = 19{,}8\ k\Omega$$

m= 0,0714V/°C q= 1,46 V

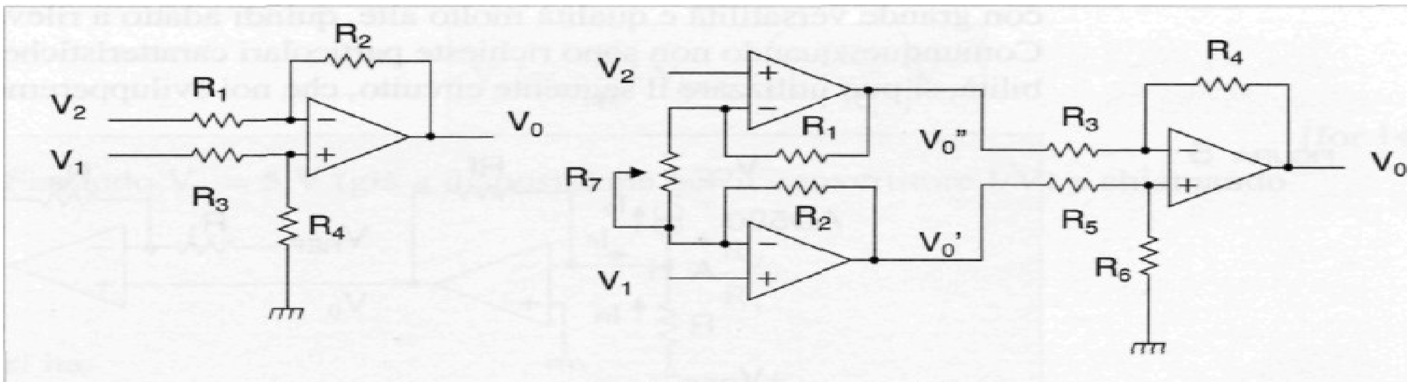
curva caratteristica del circuito di condizionamento:



TRASLATORE DI LIVELLO

Si è detto come il semplice circuito convertitore I/V non sia sufficiente per ottenere sempre il segnale utile con le richieste caratteristiche, per cui è necessario l'utilizzo di circuiti aggiuntivi, come il traslatore di livello (normalmente un circuito differenziale) ed un dispositivo che fornisce una tensione di riferimento stabile e costante (come già visto).
Per ottenere controlli con range di temperatura più bassi, abbiamo solo la possibilità (dovendo rimanere al massimo R_K=100k) di diminuire il range della tensione di uscita. Poi, in cascata, dovremo inserire un circuito ulteriore che porti la tensione al range richiesto.
Il traslatore di livello può essere costituito da un circuito differenziale realizzato con un operazionale, soddisfacente la condizione:
$R_2/R_1 = R_4/R_3$
che sappiamo amplifica la tensione v_1-v_2, proprio di questa quantità.
Tale circuito ha però alcuni inconvenienti che ne rendono sconsigliabile l'utilizzo e che rendono necessario l'utilizzo di un circuito differenziale più complesso, costituito da tre operazionali, chiamato amplificatore per strumentazione.
Gli inconvenienti sono:
1) la condizione $R_2/R_1 = R_4/R_3$ non è stabile e sicura, essendo influenzato dalle tolleranze costruttive delle resistenze e dalla loro dipendenza dalla temperatura;
2) il CMRR (il rapporto di reiezione al modo comune, in pratica l'immunità ai disturbi) risulta dipendente proprio dall'uguaglianza dei due rapporti, e quindi non è altissimo;
3) le resistenze di ingresso vista dai due morsetti a cui sono applicate le tensioni di ingresso, sono diverse fra loro e dipendente dal valore delle resistenze.
4) L'amplificatore **per strumentazione** ha caratteristiche migliori ed inoltre è realizzabile in forma integrata, il che migliora ulteriormente le sue caratteristiche di stabilità e precisione. Al differenziale, comunque sia realizzato, vengono applicate, ad un ingresso la tensione proveniente dal convertitore I/V, all'altro una tensione di riferimento, prodotta da un apposito circuito (già visto prima).
5) Per diminuire il range della temperatura rilevabile è necessario quindi diminuire la tensione di uscita del convertitore I/V.
6) Poi il traslatore di livello penserà a riportare la tensione ai livelli TTL compatibili **(0..5V).**
7) Per l'amplificatore differenziale semplice, se $R_2/R_1 = R_4/R_3$ allora

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (v_1 - v_2)$$



Amplificatore differenziale semplice

Amplificatore differenziale per strumentazione

Per T amplificatore per strumentazione invece se $R_6/R_5 = R_4/R_3$ allora

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} \cdot (v_o' - v_o'')$$

Le tre resistenze R_1, R_7, R_2 sono in serie ed hanno applicata globalmente la tensione (v_o'- v_0") per cui:

$$v_1 - v_2 = \frac{R_7}{R_1 + R_7 + R_2}(v_o' - v_o'')$$

di conseguenza:

$$v_o = \frac{R_4}{R_3} \cdot (v_o' - v_o'') = \frac{R_4}{R_3} \frac{R_1 + R_7 + R_2}{R_7} (v_1 - v_2)$$

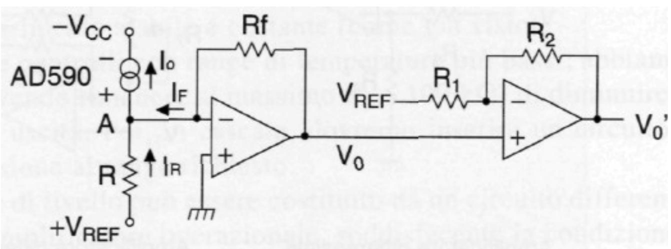
che è la relazione cercata, che inoltre conferma che l'amplificatore per strumentazione è proprio un amplificatore differenziale. Inoltre, ponendo $R_1=R_2=R_3=R_4= R$ si ha:

$$v_o = \left(\frac{2R}{R_7} + 1\right)(v_1 - v_2)$$

Per variare il guadagno normalmente si agisce solo sulla resistenza R_7 che è sostituita da un trimmer.
Tale circuito si trova anche integrato, senza la R_7 che deve essere inserita dall'esterno, di valore opportuno; noi saremo costretti a realizzarlo a componenti discreti perché abbiamo bisogno che attenui e non amplifichi; per questo basterà porre sempre $R_1=R_2$ per mantenere la simmetria e quindi continuare ad avere il CMRR alto, per poi lavorare sul valore delle altre resistenze R_3 R_4 R_7, utilizzando la relazione:

$$v_o = \frac{R_4}{R_3}\left(\frac{2R}{R_7} + 1\right)(v_1 - v_2)$$

Tale circuito è molto più attendibile e sicuro, dato che, come si vede dallo schema elettrico, le resistenze di ingresso sia su v_1 e v_2 sono uguali e molto alte (teoricamente infinite), e si può dimostrare che il CMRR è anch'esso ancora molto elevato. Lo schema globale, che prevede l'utilizzo del convertitore I/V, del generatore di tensione di riferimento e dell'amplificatore per strumentazione, permette di ottenere i risultati più diversi, con ampie possibilità di scelta per i range di temperatura e di tensione, con grande versatilità e qualità molto alte, quindi adatto a rilevazioni di precisione. Comunque, quando non sono richieste particolari caratteristiche di precisione ed affidabilità, si può utilizzare il seguente circuito, che noi svilupperemo per il nostro progetto.



Abbiamo visto precedentemente che, con il semplice convertitore I/V, se $\Delta T(°K)$ è la variazione massima di temperatura, quindi $\Delta I_T(\mu A)$ la corrispondente variazione di corrente del sensore e $\Delta I_F(\mu A)$ la variazione della corrente sulla resistenza R_F, la variazione della tensione di uscita è:

$$\Delta V_o = R_F\, \Delta I = R_F\, \Delta I_T = R_F\, \Delta T^K \cdot 10^{-6} = R_F\, \Delta T^K \cdot 10^{-6} = R_F\, \Delta T^{oC} \cdot 10^{-6}$$

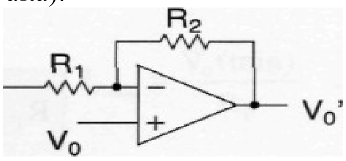
Si vede come, per ottenere una alta variazione della tensione di uscita, è necessario mantenere alta la resistenza R_F.
Fissando quindi R_F = 100 *kΩ* (che è il massimo valore che possiamo avere) si ha:

$$\Delta V_o \text{ (al massimo)} = 0{,}1\ \Delta T^K = 0{,}1\ \Delta T^{oC}$$

Δt	Δvo
50	5
40	4
30	3
20	2
10	1
5	0,5

e notiamo che, se il range di temperatura è al di sotto di 50 °C la tensione di uscita non arriva ai soliti 5 V richiesti (posto che il minimo sia O V).
Inoltre vediamo che al di sotto dei 5 °C di variazione di temperatura, la differenza fra le tensioni diventa troppo piccola, risentendo troppo dei disturbi.

Quindi, per riportare la tensione massima ai 5 V richiesti, dovremo lavorare con un traslatore di livello, composto sempre da un differenziale, leggermente modificato, che ha il vantaggio di avere sempre resistenza di ingresso molto alta).



V_O è la tensione fornita in uscita dal convertitore I/V, mentre V_{REF} è prodotta da un apposito reference voltage circuit.
Conviene utilizzare la stessa tensione inserita nel convertitore I/V, in modo da non gravare il circuito complessivo con un ulteriore gruppo componenti. L'espressione generale della tensione di uscita del traslatore di livello è:

$$V_o' = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_o$$

Fissando V_{ref}= 5V (già a disposizione per il convertitore I/V) e chiamando

$H = R_2/R_1$ si ha: $V_O' = -H\ 5 + (1+H)V_O$

si hanno le due relazioni (per la temperatura massima e per la minima)

$v_o'(min) = -5H + (1+H)\, v_O\,(min)$

$v_o'(max) = -5H + (1+H)\, v_O\,(max)$

in cui poniamo:

$v_o'(min)=0$ e $v_O'(max)=5$ ottenendo le espressioni di $v_O(min)$ e di $v_O(max)$ in funzione di H:

$v_0(min) = \underline{5H /(}1+H)$ $v_O(max)= 5$

Inoltre, facendo la differenza membro a membro delle due precedenti forule, si ha:

$\Delta V_O' = (1+H)\Delta V_O$

e quindi, dato che il range di uscita è AV_O'=5V:

$$\Delta V_o = \frac{\Delta V_o'}{1+H} = \frac{5}{1+H}$$

inoltre sostituendo la formula:

$$\Delta V_o = R_F\, \Delta T^{oC} \cdot 10^{-6}$$

si ha:

$$R_F \Delta T^{oC} \cdot 10^{-6} = \frac{\Delta V_o'}{1+H} = \frac{5}{1+H}$$

quindi:

$$R_F = \frac{5}{(1+H)\, \Delta T^{oC} \cdot 10^{-6}}$$

che, confrontata con quella relativa al circuito semplice senza traslatore, evidenzia come ora il valore necessario per R_F non sia legato solo alla variazione di temperatura richiesta, ma dipenda anche dal valore di H. Questo ci da più possibilità di ottenere realizzazioni valide.

Nella scelta dei valori di R_F e di H è necessario tener conto della escursione ΔV_O che è inversamente proporzionale al valore di H e che non deve essere troppo piccola (quindi H non può essere troppo grande).

PROGETTO

Presi come dati:

il range di temperatura $\Delta T^{oC} = T_{min}^{oC} \div T_{max}^{oC}$

il range della tensione di uscita $V_o' = 0...5$ V
ricordiamo che v_o (max) = 5V fissi
Fissiamo un valore di ΔVo non troppo piccolo e ricaviamo H
$H = 5/\Delta V_0 - 1$
da cui dimensioniamo il rapporto $R_2/R_1 = H$
e ricaviamo la

$$R_F = \frac{5}{(1+H)\,\Delta T^{oC} \cdot 10^{-6}}$$

$v_0(\text{min}) = 5H / (1+H)$

$$I_{Fmax} = \frac{V_o(\text{max})}{R_F} = \frac{5}{R_F}$$

$$I_R = I_{Tmax} - I_{Fmax}$$

(se tale valore viene negativo è necessario modificare i valori posti all'inizio, cioè ΔV_O) e per finire:

$$R = \frac{V_{REF}}{I_R} = \frac{5}{I_R}$$

Il valore di I_{Fmin} può essere calcolato sia come:

$$I_{Fmin} = \frac{V_0(\text{min})}{R_F}$$

di conseguenza:

$$I_R = I_{Tmin} - I_{Fmin}$$

Che deve coincidere con la precedente.