I.T.I.S. "Antonio Meucci" di Roma

Trasduttori e circuiti di condizionamento

a cura del Prof. Mauro Perotti

Anno Scolastico 2009-2010

Sommario

1. Generalità 3
1.1 La transcaratteristica 3
1.2 Il campo di ingresso 4
1.3 La sensibilità 4
1.4 La risoluzione 5
1.5 L'accuratezza 5
1.6 La precisione 5
1.7 La ripetibilità 5
1.8 La riproducibilità 5
1.9 Isteresi 5
1.10 Il tempo di risposta 5
2. Trasduttori con uscita a variazione resistiva 6
2.1 Azione esercitata da una grandezza meccanica 6
2.2 Azione esercitata da una grandezza termica 6
2.3 Azione esercitata da una grandezza fotoelettrica 7
2.4 Azione esercitata da una grandezza magnetica 7
2.5 Azione esercitata da un gas 7
3. Trasduttori di temperatura 7
3.1 Termoresistenze 7
3.2 Condizionamento del segnale prodotto da una R_{TD} 8
3.3 Termistori 9
3.4 Sensori di temperatura a giunzione PN 9
3.5 Un esempio di sensore di temperatura integrato: l'AD590 10
4. Trasduttori fotoelettrici 12
4.1 Le fotoresistenze 12
4.2 I fotodiodi 13
4.3 I fototransistor 14
5. Circuiti di condizionamento 15
5.1 La conversione V/I e I/V 15
5.2 Convertitore V/I con carico riferito a massa 16
5.3 Convertitore I/V con offset 17

1. Generalità

I trasduttori sono dispositivi in grado di trasformare le variazioni di una grandezza fisica non elettrica (temperatura, intensità luminosa, forza, pressione, posizione, velocità, accelerazione, ecc.) in variazioni di una grandezza elettrica (tensione, corrente, resistenza, capacità, ecc.). Le ragioni che suggeriscono una tale trasformazione risiedono nella più facile misurabilità e memorizzazione di una grandezza elettrica rispetto ad una generica grandezza fisica.

La trasformazione operata dal trasduttore è resa possibile grazie alla presenza, al suo interno, di un particolare componente detto *sensore* (elemento sensibile). Nei trasduttori di pressione, ad esempio, l'elemento sensibile è costituito da una sottile membrana sulla quale viene applicata la sollecitazione pressoria.

Sulla base della grandezza fisica convertita i trasduttori possono anche classificarsi in *primari* e *secondari*. Sono primari quei traduttori che convertono direttamente una grandezza fisica in una elettrica; sono invece secondari quelli in cui la grandezza fisica viene prima trasformata in un'altra grandezza fisica la quale, infine, viene rilevata da un trasduttore primario. Un esempio di trasduttore secondario è il trasduttore di forza. In esso vi è un estensimetro che misura le deformazioni di un corpo elastico le quali sono causate proprio dalla forza applicata e che si vuole rilevare (indirettamente).

Un ulteriore criterio di classificazione dei trasduttori fa riferimento al tipo di grandezza elettrica in uscita dal trasduttore: se si tratta di un segnale di tensione o di corrente dipendente direttamente dalla grandezza fisica applicata all'ingresso del trasduttore questo si dice *attivo*; se invece la grandezza fisica produce una variazione di resistenza, capacità o induttanza il trasduttore è detto *passivo*. I trasduttori passivi devono necessariamente essere inseriti all'interno di un circuito di *condizionamento* affinché la variazione del relativo parametro elettrico venga associata ad una variazione di tensione, corrente o frequenza del segnale.

Trasduttori e sensori, nella letteratura del settore, sono intesi come sinonimi.

I vari tipi di trasduttori risultano caratterizzati, nel loro funzionamento e nelle loro prestazioni, da insiemi diversi di parametri.

1.1 La transcaratteristica

E' la curva che mette in relazione l'uscita di un trasduttore, *o*, in funzione dell'ingresso *i*. Scriveremo:

$o=o(i)$

Questa funzione deve essere *monotonica* e *ad un solo valore*. La ragione di ciò è che, in caso contrario, la conoscenza del valore dell'uscita non permette di risalire all'ingresso che ha generato tale valore. La figura 1, ad esempio, illustra il caso di una transcaratteristica che non è ad un solo valore.

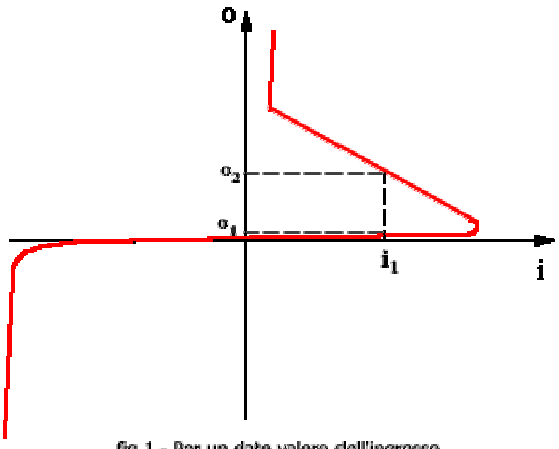


fig.1 - Per un dato valore dell'ingresso si hanno due valori dell'uscita

La figura 2, invece, evidenzia il caso di un trasduttore con transcaratteristica non monotonica.
Un trasduttore si dice *lineare* se la sua transcaratteristica è una retta.

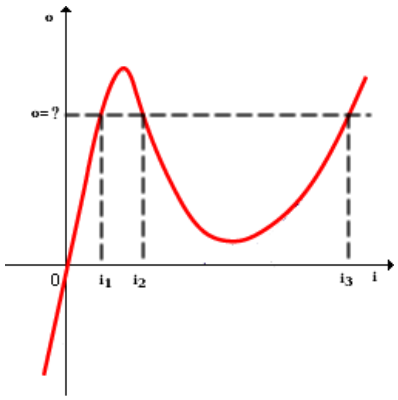


fig.2 - Quale ingresso ha determinato l'uscita? (funzione non monotona)

1.2 Il campo di ingresso

E' anche detto *range* o *portata*. E' l'insieme dei valori che può assumere l'ingresso in corrispondenza dei quali si ha una transcaratteristica ad un solo valore e monotonica. In certi casi il costruttore indica il campo di ingresso di un trasduttore relativamente al mantenimento di un'altra caratteristica come la linearità. Potrebbe scrivere, ad esempio, che una termoresistenza è lineare nell'intervallo di temperatura (-50, +70)°C.

1.3 La sensibilità

E' il rapporto tra la variazione dell'uscita e la corrispondente variazione dell'ingresso che l'ha determinata.

$$(1) \qquad S = \Delta_o / \Delta_i$$

Da un punto di vista matematico la sensibilità coincide con la pendenza della transcaratteristica in un determinato punto. E' evidente, pertanto, che se il trasduttore è lineare la sensibilità è costante per ogni punto di lavoro del trasduttore (e coincide con il coefficiente angolare di tale retta).

Una sensibilità elevata e costante è una qualità molto desiderabile per un trasduttore. Una grande sensibilità rende il trasduttore di soddisfacente risoluzione. La costanza della sensibilità è invece importante per due ragioni:

- consente di avere la stessa precisione su tutto l'intervallo di lavoro;
- consente di conoscere tutto l'insieme dei punti di lavoro del trasduttore se solo se ne conoscono due.

Se un trasduttore è non lineare il costruttore indica l'*errore di non linearità* come scostamento massimo dalla retta ideale riferito al fondo scala (che è il *massimo ingresso ammissibile*).

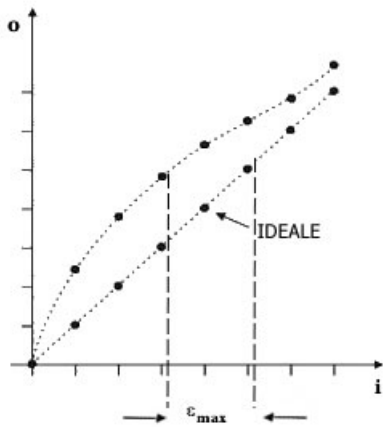


fig.3 - Errore di non linearità

La figura 3 illustra la transcaratteristica di un trasduttore non lineare e, a fianco a questa, quella ideale. L'errore di non linearità è il massimo scostamento, lungo l'asse delle ascisse, tra queste due curve. Esso è poi riferito al valore del fondo scala.

$$(2) \qquad \varepsilon_{nl} = \varepsilon_{max} / i_{FS}$$

Talvolta tale errore è espresso in percentuale rispetto al valore di fondo scala. Potremmo avere, ad esempio, un trasduttore di temperatura per il quale ε_{nl} =5% e i_{FS} = 125°C. Ciò significa che l'errore di non linearità è il 5% del fondo scala. Ovvero:

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon_{nl}\ \% \bullet i_{FS} = 0.05 \bullet 125 = 6.25°C$$

Considerare tale trasduttore lineare vuol dire commettere un errore, al massimo, di 6.25°C.

Se un trasduttore è non lineare si può optare per una delle seguenti strategie:

1. *linearizzare* il trasduttore con un opportuno circuito di condizionamento che compensi la transcaratteristica del trasduttore;
2. utilizzare il trasduttore in un opportuno range della grandezza fisica all'interno del quale è possibile considerare la curva del trasduttore come una retta (o quasi).

Nei sistemi a logica programmata, basati ad esempio su microcontrollore, è possibile (e molto più facile) compensare le non linearità del trasduttore per mezzo del software.

1.4 La risoluzione

E' l'inverso della più piccola variazione rilevabile della grandezza fisica di ingresso. Generalmente è espressa dal costruttore come percentuale del valore di fondo scala. Un buon trasduttore deve sempre presentare un elevato valore di risoluzione. Ovvero deve essere in grado di apprezzare valori piccoli della grandezza fisica applicata all'ingresso del medesimo.

(3) $r=1/\Delta i_{min}$

E' il limite inferiore alle variazioni della grandezza fisica rilevabili all'ingresso del trasduttore.

1.5 L'accuratezza

Esprime la capacità del trasduttore di ottenere il valore vero della grandezza fisica applicata all'ingresso del medesimo.

1.6 La precisione

Esprime il grado al quale la misura è libera da errori casuali. In sostanza più un trasduttore è preciso e più vicini tra loro saranno i valori della grandezza d'uscita a parità di grandezza fisica all'ingresso. La figura 4 illustra un'analogia con una serie di frecce lanciate su un bersaglio. Sia la parte A che la parte B della figura indicano un trasduttore preciso. In A, però, questo è anche accurato. Il trasduttore, in C, è accurato ma non preciso. In D non è né l'uno e né l'altro.

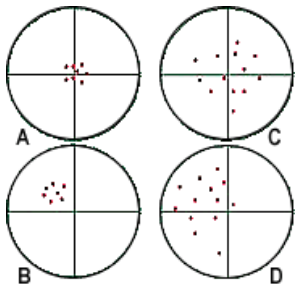


fig. 4

1.7 La ripetibilità

E' la capacità del trasduttore di fornire la stessa uscita quando viene applicato, in tempi diversi, lo stesso valore dell'ingresso e nelle medesime condizioni. Il costruttore, generalmente, esprime tale parametro come variazione nel tempo dell'errore massimo.

La ripetibilità rappresenta la costanza nel tempo delle caratteristiche del trasduttore. E' la resistenza all'invecchiamento del trasduttore stesso.

1.8 La riproducibilità

E' la capacità del trasduttore di fornire sempre la stessa uscita, a parità di ingresso, nonostante le modifiche delle condizioni al contorno: operatore, strumenti, luogo, ecc.

1.9 Isteresi

Con ciò si intende quel fenomeno per il quale, alcuni trasduttori, mostrano una differente evoluzione della grandezza d'uscita se la grandezza d'ingresso è crescente oppure se è decrescente.

1.10 Il tempo di risposta

Rappresenta la velocità con cui il trasduttore risponde ad un segnale a gradino applicato in ingresso. Per i trasduttori con risposta del primo ordine è definito come l'intervallo di tempo necessario per passare dal 10% al 90% del valore finale. Se il trasduttore è rappresentabile matematicamente come un sistema del secondo ordine la sua risposta potrebbe essere di tipo oscillatorio. In tal caso si definisce

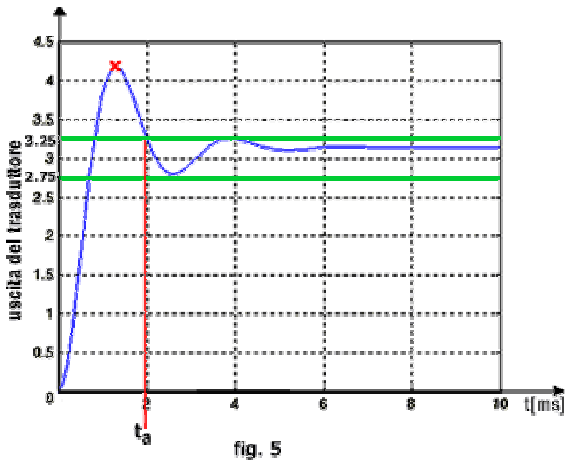


fig. 5

un ulteriore parametro, il tempo di assestamento, come il tempo necessario all'uscita per rientrare in un intorno prefissato del valore finale (vedi anche la figura 5).

2. Trasduttori con uscita a variazione resistiva

Il quadripolo di figura 6 rappresenta il modello di un trasduttore nel quale l'azione della grandezza fisica applicata all'ingresso determina una variazione resistiva rilevabile all'uscita.

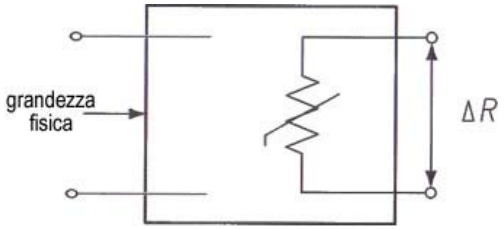


fig. 6

Le grandezze fisiche che provocano una variazione resistiva possono essere classificate nel seguente modo:

a) meccaniche
b) termiche
c) fotoelettriche
d) magnetiche
e) gas

2.1 Azione esercitata da una grandezza meccanica

Se consideriamo un conduttore di lunghezza l, sezione S e resistività ρ sappiamo, dalla legge di Ohm, che la resistenza da esso offerta è:

$$(4) \qquad R = \rho l / S$$

La resistenza offerta è quindi direttamente proporzionale alla sua lunghezza: è intuitivo pensare che maggiore è il percorso che le cariche devono fare e maggiori saranno le probabilità di incontrare ostacoli lungo di esso. Inoltre la resistenza è inversamente proporzionale alla sezione del conduttore: anche in questo caso si comprende che quanto più ampia è la sezione del conduttore, tanto maggiore sarà la facilità con cui passeranno le cariche attraverso di esso.

La costante ρ, invece, dipende dal tipo di materiale e rappresenta la disponibilità alla conduzione che quest'ultimo ha.

I resistori variabili come il trimmer ed il potenziometro basano il proprio principio di funzionamento su quanto appena detto: variando la lunghezza e/o la sezione varia la resistenza offerta da essi.

Anche i semiconduttori, se sottoposti ad azione meccanica, variano la loro resistività (ciò è dovuto ad una variazione della struttura molecolare del semiconduttore stesso). Questo fenomeno prende il nome di *piezoresistività*.

2.2 Azione esercitata da una grandezza termica

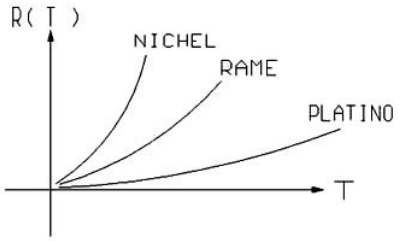


fig. 7

La conducibilità di un conduttore dipende, in relazione al tipo di materiale, dalla temperatura. Se, quindi, un conduttore viene sottoposto ad una variazione di temperatura esso modificherà la sua resistenza secondo una legge matematica che, in prima approssimazione, possiamo considerare lineare e scrivere nel seguente modo:

$$(5) \qquad R_{T2}=R_{T1}(1 + \alpha\, \Delta T) \quad \text{con} \quad \Delta T = T_2 - T_1$$

e dove R_{T2} ed R_{T1} rappresentano, rispettivamente, la resistenza offerta dal conduttore alla temperatura T_2 e T_1. Il coefficiente α, che ha dimensioni $[°C]^{-1}$, dipende dal tipo di materiale ed è definito *coefficiente di temperatura*. In figura 7 è rappresentato l'andamento della resistenza di alcuni conduttori al variare della temperatura.

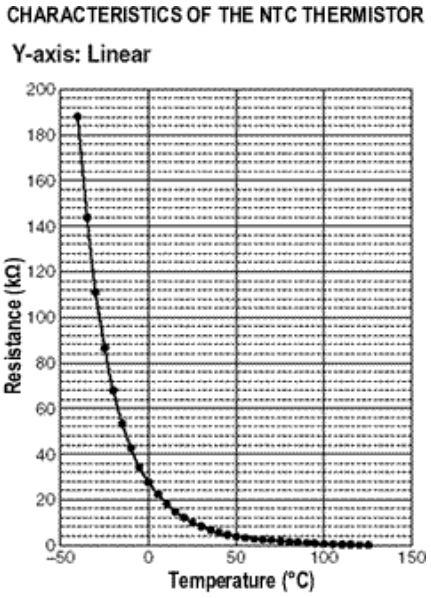


fig. 8

Anche i semiconduttori variano la loro conducibilità al variare della temperatura. La curva caratteristica che esprime la variazione della conducibilità rispetto alla temperatura è però marcatamente non lineare (un esempio è riportato in figura 8).

2.3 Azione esercitata da una grandezza fotoelettrica

Se un semiconduttore viene colpito da una radiazione luminosa la sua conducibilità varia. Questo fenomeno può essere sfruttato per realizzare sistemi che reagiscono alle variazioni di intensità luminosa. Un esempio molto diffuso è l'interruttore crepuscolare. Si tratta di un sistema automatico in grado di accendere una o più lampade (come accade in alcuni condomini) al calar della sera per poi spegnerle all'alba.

2.4 Azione esercitata da una grandezza magnetica

Vi sono conduttori costituiti da leghe di materiale ferromagnetico che variano la loro conducibilità al variare del campo magnetico circostante. Uno di questi è il permalloy (80% nichel, 20% ferro) che viene impiegato per realizzare, ad esempio, le testine di registrazione dei registratori magnetici (oggi meno diffusi rispetto a qualche tempo fa).

2.5 Azione esercitata da un gas

Vi sono alcuni semiconduttori che variano la loro resistenza al variare della concentrazione di particolari gas. In figura 9 vi è un esempio di sensore di gas a semiconduttore.

Esternamente si presentano come dei piccoli cilindretti di materiale plastico mentre al loro interno vi è una piccola piastrina di ceramica sulla quale si trovano un elemento sensibile ed uno riscaldante. L'elemento sensibile è costituito da un sottile strato di piccolissimi granuli di biossido di stagno. L'elemento riscaldante è un normale resistore che serve esclusivamente per portare alla temperatura di esercizio il sensore.

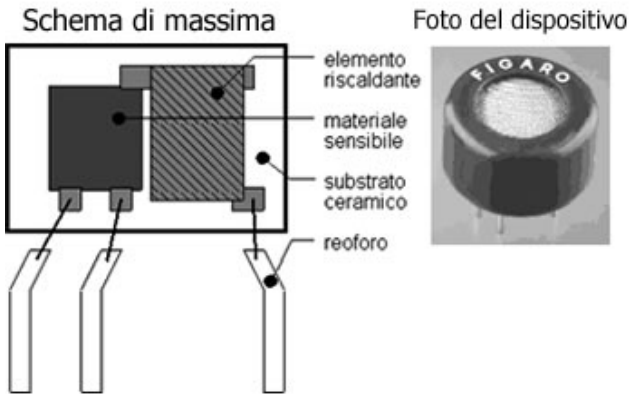


fig. 9

3. Trasduttori di temperatura

3.1 Termoresistenze

Le termoresistenze, R_{TD} (***R**esistance **T**emperature **D**etector),* sono costituite da conduttori metallici (platino, nichel, ferro-nichel, rame) che all'aumentare della temperatura aumentano la loro resistenza secondo la relazione (5). Il coefficiente di temperatura, α, è positivo e ha valori abbastanza piccoli. Ciò implica, in questo tipo di componenti, una bassa sensibilità. Infatti, dalla (5):

$$(6) \qquad S = dR/dT = \alpha R_{T1}$$

dalla quale si osserva che la sensibilità è direttamente proporzionale al coefficiente α. Un vantaggio a favore delle termoresistenze è la buona linearità in un campo di temperatura piuttosto vasto (diverse centinaia di gradi).

3.2 Condizionamento del segnale prodotto da una R_{TD}

Condizionare l'informazione prodotta da una R_{TD} significa trasformare la variazione di resistenza in una variazione di tensione (o anche di corrente). Per far ciò dobbiamo realizzare un circuito che faccia scorrere nella R_{TD} una corrente costante. In tal modo le variazioni di tensione che si avranno ai suoi capi saranno esclusivamente dovute alle variazioni di resistenza (e quindi di temperatura). La corrente che scorre nella termoresistenza, comunque, dovrà essere di bassa intensità per non alterare eccessivamente la misura a causa dell'inevitabile riscaldamento prodotto dalla corrente sulla R_{TD}.

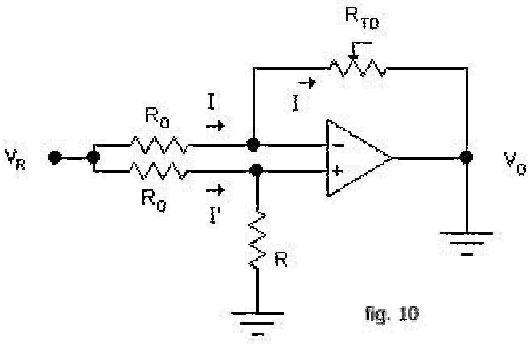


fig. 10

Una buona soluzione per la realizzazione di quanto auspicato, indicata in figura 10, è il ponte resistivo linearizzato. Il valore della resistenza R, collegata tra il morsetto (+) e massa, corrisponde al valore iniziale della R_{TD}.

Se consideriamo l'A.O. ideale si ha che la corrente I' vale:

$$(7) \qquad I' = V_R / (R + R_0)$$

Si tratta di una corrente di valore costante in quanto il suo valore è dovuto esclusivamente a grandezze tutte costanti. Questa corrente è anche la stessa che scorre nel ramo superiore: vediamo perché. Le resistenze R_0 sono sottoposte alla stessa d.d.p.. Infatti il loro terminale sinistro è posto al potenziale V_R ed il loro terminale destro è posto ai potenziali V_+ e V_- che, come sappiamo (massa virtuale) sono eguali. In esse, quindi, scorre la stessa corrente, la (7), che a sua volta scorre nella termoresistenza. In questo modo abbiamo ottenuto che le variazioni di tensione ai capi della R_{TD} saranno esclusivamente dovute a variazioni di resistenza (e quindi di temperatura) e non di corrente.

Facciamo ora vedere che il legame tra la tensione di uscita e lo sbilanciamento della R_{TD} rispetto al valore iniziale è:

$$(8) \qquad V_0 = -V_R \cdot \Delta R / (R_0 + R)$$

Ai capi della R_{TD} possiamo scrivere la seguente relazione:

$$V_- - V_0 = I \cdot (R + \Delta R)$$

Dove ΔR assume un valore positivo (per variazioni positive di temperatura), negativo (per variazioni negative di temperatura) o nullo (in corrispondenza di una temperatura costante).

La tensione sul morsetto V_- che è uguale alla V_+, vale:

$$V_- = I \cdot R$$

in quanto I ed I' sono eguali; quindi:

$$V_0 = V_- - I \cdot (R + \Delta R) = I \cdot R - I \cdot R - I \cdot \Delta R = - I \cdot \Delta R = -V_R \cdot \Delta R / (R_0 + R)$$

Tra i principali criteri di progetto di un sistema per il condizionamento del segnale prodotto dalla R_{TD} ricordiamo:

a. bassa circolazione della corrente costante in R_{TD} (in genere pochi mA);
b. far seguire al blocco di condizionamento un amplificatore per elevare il valore della V_0 al valore indicato dal progetto.

3.3 Termistori

Sono resistori variabili con la temperatura. Possono avere coefficiente di temperatura negativo, se realizzati con materiali semiconduttori composti, e vengono indicati con l'acronimo NTC (Negative Temperature Coefficient). Oppure possono avere coefficiente di temperatura positivo, se realizzati con materiali semiconduttori fortemente drogati, e vengono indicati con l'acronimo PTC (Positive Temperature Coefficient). La sensibilità è molto più elevata rispetto a quella offerta dalle termoresistenze. Presentano, quindi, un'elevata variazione di resistenza per unità di temperatura. Il principale difetto dei termistori è la non linearità della loro transcaratteristica. Vengono perciò usati per un intervallo di temperatura molto piccolo, all'interno del quale è possibile approssimare la transcaratteristica ad una retta, oppure in quelle applicazioni per le quali non è richiesta una risposta lineare.

Il legame matematico tra risposta ed ingresso è del tipo:

$$(9) \qquad R(T) = R(T_0)\, e^{B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)}$$

dove T è la temperatura assoluta espressa in K, T_0 è una temperatura di riferimento (in genere è pari a 298 K=25 °C) e B è una costante espressa in K.

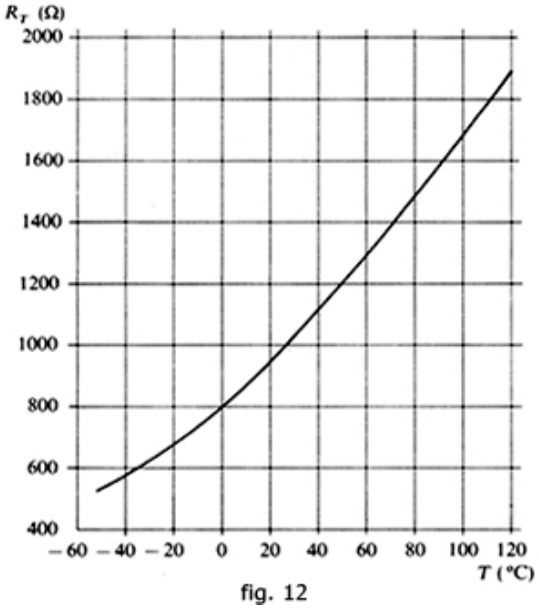


fig. 12

In figura 8 (pag. 7) e 12 sono illustrate, rispettivamente, la transcaratteristica di un NTC e di un PTC. Nella figura 13, invece, è possibile osservare alcuni termistori commerciali.

fig. 13

3.4 Sensori di temperatura a giunzione PN

Sappiamo che se manteniamo costante la corrente che circola in una giunzione PN si ha che la c.d.t. ai capi della giunzione stessa presenta un andamento lineare rispetto alla variazione della temperatura con coefficiente negativo (k) e pari a:

$$(10) \qquad K = \left(\frac{dV_D}{cT}\right)_{I_D=cost}$$

Diodi come l'1N914 o l'1N4148 sono ottimi sensori di temperatura in quanto, oltre alla linearità della risposta, presentano una piccola massa e quindi un'elevata velocità di risposta. L'unico problema è la scarsa riproducibilità. Non essendo infatti costruiti per funzionare come sensori di temperatura si ha una certa variabilità delle caratteristiche da un esemplare all'altro. Necessitano, perciò, di una specifica taratura.

Il costruttore fornisce un grafico rappresentante una famiglia di curve, con parametro I_D, che descrivono la variazione della V_D in funzione della temperatura (figura 14a). Nell'intervallo (-50°C;+150°C) si tratta di curve del primo ordine (rette).

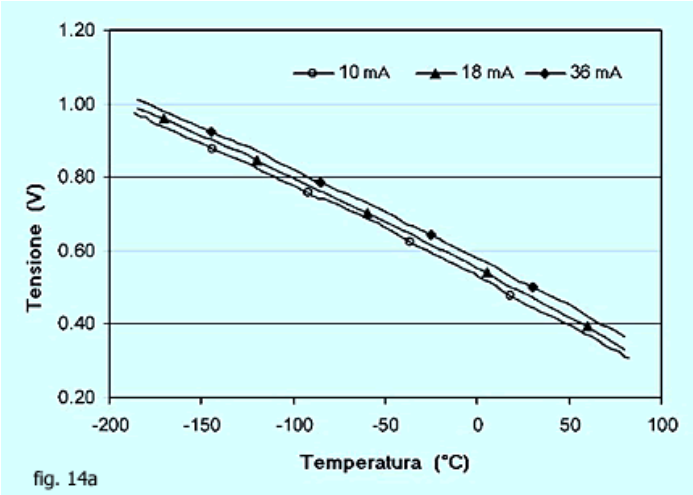


fig. 14a

Nella figura 14 vi è un possibile circuito di condizionamento per un diodo usato come sensore di temperatura. In esso viene fissata una corrente pari a 10 mA. La tensione presente in uscita sarà proprio la tensione ai capi del diodo:

$$(11) \qquad V_D = V_D(0) + k \cdot T$$

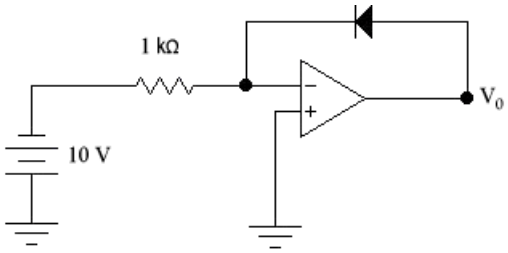


fig. 14

dove $V_D(0)$ rappresenta la c.d.t. ai capi del diodo alla temperatura di 0°C. Dalla famiglia di curve prima descritta si cerca quella in corrispondenza di una corrente di 10 mA e si legge il valore della V_D per T=0°C. Supponiamo che il valore letto sia pari a 0.75V. Allora avremo che la tensione, alla temperatura di 50°C sarà pari a:

$$V_D = V_D(0) - k \cdot T = 0.75 - 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 0.625 = 625\text{mV}$$

3.5 Un esempio di sensore di temperatura integrato: l'AD590

Sono disponibili sul mercato dei dispositivi integrati che comprendono oltre al sensore a semiconduttore, specifici circuiti per amplificare e linearizzare il segnale fornito dal sensore. Tra i più diffusi vi è l'AD590 della Analog Devices.

Tale dispositivo va alimentato con una tensione fra 4 e 30 volt e produce una corrente che dipende linearmente dalla temperatura:

$$(12) \qquad I = k \cdot T$$

con T in gradi kelvin e $k=1\ \mu A/K$.

Il funzionamento in corrente presenta il vantaggio di rendere il segnale di uscita indipendente da eventuali variazioni della tensione di alimentazione (batteria in parte scarica oppure disturbi sull'alimentazione). Consente, inoltre, di porre il sensore distante dall'apparato di misura.

Questo sensore, grazie anche al particolare contenitore (TO52) consente una elevata velocità di risposta. Il range utile di funzionamento dichiarato dal costruttore è (-55°C;+ 150°C).

Il circuito indicato in figura 15 propone una possibile soluzione per il condizionamento del segnale prodotto da questo tipo di sensore.

Alla temperatura in corrispondenza della quale si vuole ottenere una tensione in uscita nulla, diciamo T_0, si impone:

$$(13) \qquad I_s(T_0) = I_{R1}$$

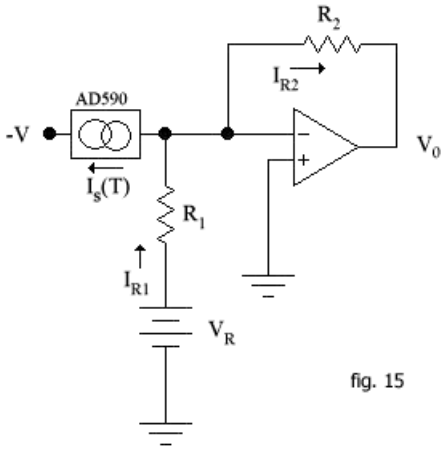


fig. 15

in questo modo la corrente I_{R2} è nulla e, conseguentemente, è nulla anche la V_0. Ad una temperatura qualsiasi si ha (applicando Kirchhoff):

$$(14) \qquad I_{R2} = I_{R1} - I_s$$

e quindi:

$$(15) \qquad V_0 = -R_2 \cdot I_{R2} = -R_2 \cdot (V_R / R_1 - I_s)$$

Il criterio per il dimensionamento di R_2 lo si ottiene sulla base del seguente ragionamento. Se vogliamo che sulla base di una certa variazione di temperatura, diciamo ΔT, si abbia corrispondentemente una variazione della tensione in uscita, diciamo ΔV_0, dobbiamo sviluppare una relazione che leghi queste due variazioni. Vediamo come. Osservando la (15) possiamo concludere che se varia la temperatura deve variare la tensione d'uscita (ciò accade in quanto la variazione di temperatura implica una variazione della I_s e, conseguentemente, della V_0).

Supponiamo, allora, che la temperatura vari da T_i a T_f. In corrispondenza di questi due valori di temperatura avremo due valori della tensione d'uscita, diciamo V_{0i} e V_{0f}. Possiamo perciò scrivere:

$$V_{0i} = -R_2 \cdot [V_R / R_1 - I_s(T_i)]$$

$$V_{0f} = -R_2 \cdot [V_R / R_1 - I_s(T_f)]$$

Sottraendo la prima dalla seconda:

$$V_{0f} - V_{0i} = -R_2 \cdot [V_R / R_1 - I_s(T_f)] + R_2 \cdot [V_R / R_1 - I_s(T_i)]$$

Indicando la variazione della tensione d'uscita con ΔV_0 e la variazione della corrente I_s con ΔI_s:

$$\Delta V_0 = R_2 \cdot I_s(T_f) - R_2 \cdot I_s(T_i) = R_2 \cdot \Delta I_s$$

Dalla (12) possiamo scrivere:

$$\Delta I_s = k \cdot T_f - k \cdot T_i = k \cdot (T_f - T_i) = k \cdot \Delta T$$

e quindi:

$$\Delta V_0 = R_2 \cdot \Delta I_s = R_2 \cdot k \cdot \Delta T$$

da cui, finalmente, il criterio di progetto per il resistore R_2:

$$(16) \qquad R_2 = \Delta V_0 / k \cdot \Delta T$$

Se, ad esempio, desideriamo una variazione della V_0 da 0 a 10 V in corrispondenza di una variazione di temperatura da 50°C a 100°C, avremo:

$$R_2 = \Delta V_0 / k \cdot \Delta T = 10/(10^{-6} \cdot 50) = 200\ k\Omega$$

4. Trasduttori fotoelettrici

I trasduttori fotoelettrici trasformano variazioni di intensità luminosa in variazioni di grandezza elettrica. A parte i *dispositivi fotoemissivi* e le *celle fotovoltaiche* che, rispettivamente, trovano applicazioni nelle misure fotometriche in astronomia e negli esposimetri fotografici, sono gli *elementi fotoconduttori* che hanno più larghe applicazioni come trasduttori fotoelettrici. Agli elementi fotoconduttori appartengono le *fotoresistenze*, i *fotodiodi* e i *fototransistori*.

4.1 Le fotoresistenze

Le fotoresistenze traducono l'informazione luminosa in una variazione di resistenza. Sono realizzate con materiali semiconduttori composti (drogati di tipo N). Le più comuni sono le CdS (solfuro di cadmio) e le PbS (solfuro di piombo). In figura 16 ve ne è un esempio. In figura 17, invece, vi è il simbolo grafico con cui viene indicata una fotoresistenza negli schemi elettrici.

Fotoresistenza CdS

fig. 16

Fotoresistenza CdS simbolo grafico

fig. 17

Tra i pregi delle fotoresistenze vi è l'elevata sensibilità e la robustezza. Sono anche economiche e possono essere alimentate sia in corrente continua che alternata. Il campo di variazione della resistenza va da qualche decina di Ω, per intensità luminose attorno ai 1000 lux, fino a qualche $M\Omega$ in oscurità. Possono dissipare qualche centinaio di mW. La curva della sensibilità raggiunge il picco intorno al rosso, per le CdS, ed all'infrarosso per le PbS.

Il limite principale di questi componenti è l'elevato tempo di risposta: attorno a qualche secondo. Le PbS, comunque, sono più veloci delle CdS.

Il legame tra resistenza e illuminamento (in lux) è lineare in scala logaritmica. Infatti:

$$(17) \qquad \log R = -\alpha \log L + \log k$$

dove α è una costante positiva e k è la resistenza offerta in corrispondenza di un illuminamento unitario. Infatti, dalla (17), per $L=1$ il primo logaritmo si annulla e si ha: $R=k$.

Applicando le proprietà dei logaritmi:

$$\log R = -\alpha \log L + \log k \quad \rightarrow \quad \log R = \log L^{-\alpha} + \log k \quad \rightarrow \quad \log R = \log L^{-\alpha} \cdot k$$

da cui:

$$R = k \cdot L^{-\alpha}$$

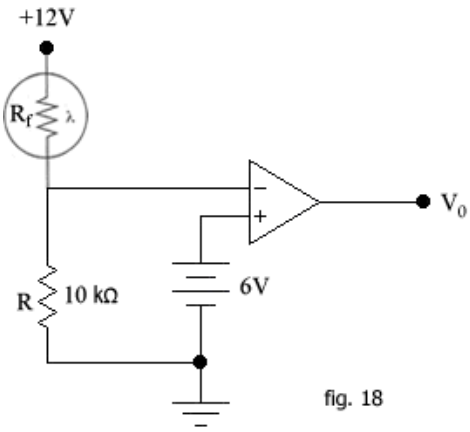


fig. 18

In figura 18 vi è un esempio di circuito applicativo utilizzante una fotoresistenza. Si tratta di un comparatore che confronta la tensione di riferimento di 12V, applicata sul morsetto (+) con la tensione ai capi di R (pari a $10k\Omega$), la quale, a sua volta, è il risultato di una partizione della tensione di 12V tra la stessa R e quella offerta da una fotoresistenza (indicata con R_f). La tensione sul morsetto (-), pertanto, sarà:

$$V_- = 12\, R / (R + R_f)$$

In piena oscurità tale tensione risulterà molto piccola. Infatti, con $R_f = 1\ M\Omega$, si avrà ai capi di R una tensione:

$$V_- = 12 \cdot 10^4 / (10^4 + 10^6) \cong 120\ mV$$

Ed in uscita si avrà la tensione V_{OH}. Appena la tensione sul morsetto (-) supera 6V si ha la transizione, in uscita, da V_{OH} a V_{OL}. Ciò avviene quando $R_f = 10\ M\Omega$. Dalla figura 19, che esprime la variazione della resistenza in funzione dell'illuminamento, si osserva che tale condizione si verifica in prossimità di $L \cong 30$ lux (attenzione, la scala è logaritmica e non lineare).

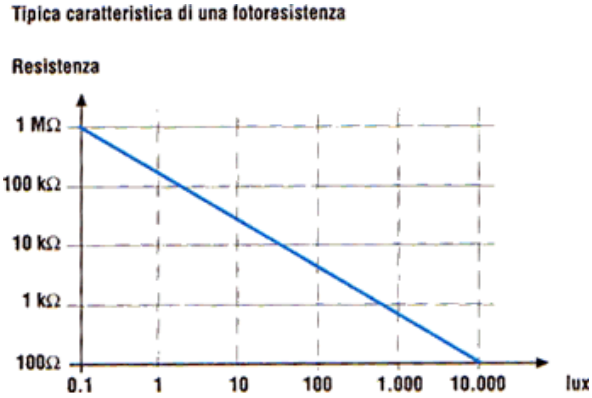


fig. 19

4.2 I fotodiodi

Un fotodiodo è un diodo particolare caratterizzato da una giunzione p-n drogata asimmetricamente. La zona p è la zona più drogata. La zona p, disposta molto vicino alla struttura esterna del fotodiodo è rivestita da uno strato antiriflesso ed ha due elettrodi in ossido di silicio. Sopra lo strato antiriflesso è inserita una lente il cui scopo è quello di rendere perpendicolari i raggi luminosi incidenti sulla superficie.

La zona di giunzione è resa accessibile alla radiazione luminosa ed il fotodiodo può essere impiegato come fotosensore, lavorando in zona inversa, o come elemento fotovoltaico, in cortocircuito.

Il fotodiodo, se polarizzato direttamente, si comporta come un comune diodo. La corrente che esso è in grado di condurre segue, in prima approssimazione, la nota legge esponenziale. Non essendo tuttavia progettato per la polarizzazione diretta, esso non avrà una capacità di corrente tale da suggerirne un simile utilizzo, in quanto il surriscaldamento dovuto al passaggio di corrente potrebbe danneggiare gli elementi ottici.

Il fotodiodo opera correttamente se polarizzato inversamente. L'energia di un fotone è data dall'equazione:

$$E = h\nu$$

Dove ν è la frequenza del fotone ed *h* è la costante di Planck.

Se tale energia è maggiore della banda proibita (intervallo energetico tra la banda di valenza e la banda di conduzione del dispositivo) causerà la creazione di una coppia elettrone-lacuna. Una volta generata la coppia, essa sarà soggetta al campo elettrico generato dalla differenza di potenziale applicata. L'elettrone sarà quindi spontaneamente attratto verso la zona *n* mentre la lacuna verso la zona *p*. A causa della assenza di una coppia elettrone-lacuna nella zona svuotata, la regione non sarà più neutra. Non essendo più neutra. il dispositivo compenserà questa situazione con un movimento di elettroni-lacune prelevati dal generatore di polarizzazione, causando così la presenza di una fotocorrente inversa che rappresenta il segnale elettrico prodotto dall'incidenza del fotone.

Il modello matematico è quindi espresso dalla:

$$(18) \qquad I = -I_L + I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

Il verso della corrente I è assunto convenzionalmente positivo, e così la tensione V, in condizioni di polarizzazione diretta. Per V<0 il termine costituito dall'esponenziale diviene trascurabile rispetto all'unità e si ottiene:

$$I = -I_L - I_o$$

Per V=0 si ha:

$$I = -I_L$$

E qui risulta chiaro, da un punto di vista fisico, la natura di I_L. Si tratta di una corrente di cortocircuito generata per conversione diretta dell'energia radiante in energia elettrica (così come accade per le celle solari).

Chiediamoci, invece, a quanto ammonta la tensione ai capi del fotodiodo quando esso è aperto. Fisicamente dobbiamo attenderci una tensione dovuta esclusivamente all'energia radiante. Matematicamente la troviamo imponendo, nella (18), I=0 e risolvendo rispetto a V. Si ottiene:

$$(19) \qquad V|_{I=0} = kT/q \cdot \ln(I_L / I_o + 1)$$

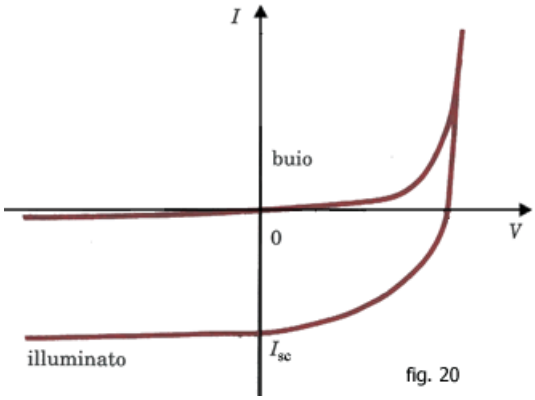


fig. 20

I fotodiodi sono componenti molto sensibili e possono lavorare a frequenze abbastanza elevate. Tale caratteristica ne suggerisce l'impiego nel campo delle trasmissioni dati su fibra ottica. La tecnologia al germanio è più sensibile all'infrarosso. Quella al silicio alla luce visibile.

La figura 20 illustra la caratteristica corrente-tensione di un fotodiodo. E' evidente che nel caso di non illuminamento il comportamento del componente è quello di un normale diodo. In condizioni di illuminamento, invece, in corrispondenza di una tensione nulla (cortocircuito) si evidenzia una corrente inversa piuttosto sostenuta. Nel caso del BPW34, per esempio, abbiamo circa 50 μA per L=400 lux.

4.3 I fototransistor

Sono componenti analoghi ai normali transistor BJT ma con la base aperta. La giunzione base-collettore è esposta alla luce. In questa giunzione, che deve essere polarizzata inversamente (come peraltro già accade per i normali BJT in funzionamento lineare), si origina un fenomeno del tutto simile a quello già illustrato per il fotodiodo. In queste condizioni si ottiene una corrente di collettore nella quale manca il termine dovuto alla corrente di base e vi compare, invece, quello dovuto all'illuminamento della giunzione.

In sostanza:

$$(20) \qquad I_C = (\beta + 1)(I_L + I_{CB0})$$

La naturale amplificazione introdotta dal transistore aumenta la sensibilità del componente rispetto al fotodiodo. Il tempo di risposta è buono e più basso è il rumore rispetto al fotodiodo.

In figura 21 viene riportato il simbolo del fototransistor e del fotodiodo; in figura 22 vi è un esempio di fototransistor. La figura 23, invece, illustra le caratteristiche del fototransistor BPW40. Il parametro è l'illuminamento espresso in lux.

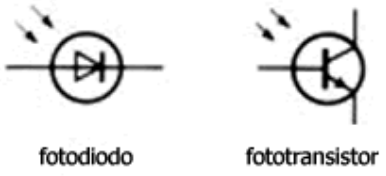


fig. 21

fig. 22

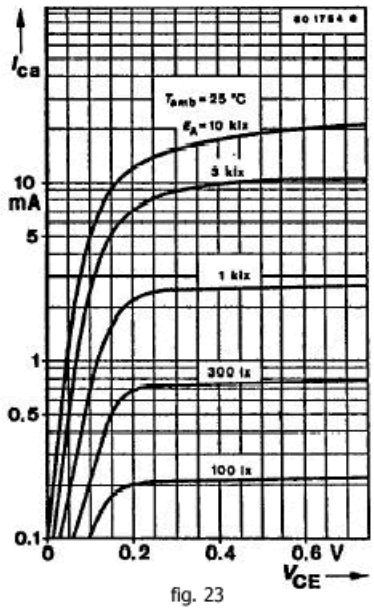


fig. 23

5. Circuiti di condizionamento

I circuiti di condizionamento hanno il compito di elaborare il segnale in uscita dal trasduttore per adattarlo alle caratteristiche dei circuiti che seguono nella catena di acquisizione.

In pratica con il termine condizionamento si indica un vasto insieme di operazioni messe in atto per ottimizzare le prestazioni del sistema di acquisizione.

Il condizionamento del segnale prodotto da trasduttori che hanno un'uscita digitale è in genere molto più semplice. Si tratta, in tali casi, di squadrare il segnale, amplificarlo in corrente ed adattare i livelli di tensione associati ai livelli logici.

I trasduttori con uscita analogica pongono, invece, la necessità di elaborazioni più complesse. Esse sono:

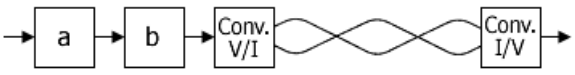
- convertire la grandezza elettrica in uscita dal trasduttore in una tensione;
- adattare il campo di variabilità del segnale a quello dei circuiti a valle (come i convertitori ADC) al fine di rendere massima la risoluzione del sistema di acquisizione;
- ridurre al minimo le alterazioni del segnale causate dai disturbi e dalle distorsioni;
- trasferire il massimo valore del segnale in tensione o in potenza;
- isolare i blocchi elettricamente per esigenze di sicurezza (come nelle applicazioni biomediche) mediante optoaccoppiatori o amplificatori di isolamento;
- filtrare il segnale, soprattutto se questo deve essere campionato e convertito in digitale, mediante filtri antialiasing;
- compensare le non linearità del trasduttore.

5.1 La conversione V/I e I/V

La qualità di un segnale analogico è espressa dal rapporto tra potenza utile e quella del rumore ad esso sovrapposto (S/N). Molte possono essere le cause di degenerazione del segnale: disturbi elettromagnetici (e.m.), rumore generato dai componenti (come ad esempio il resistore), distorsioni operate dai circuiti e dalle linee di trasmissione.

Quando si deve trasmettere un segnale informativo, soprattutto se in ambienti rumorosi (con la presenza, ad esempio, di motori), si preferisce l'impiego di cavi coassiali (che riducono il rumore) o di fibre ottiche (che ne sono del tutto immuni).

Nei casi in cui tra il trasduttore ed il blocco successivo vi è una certa distanza è bene impiegare tecniche in grado di ridurre l'influenza dei disturbi e.m. captati dalle linee. Una prima soluzione è quella di amplificare il segnale prima di trasmetterlo in modo da avere in ricezione un rapporto S/N il più elevato possibile. Una seconda tecnica è quella di convertire il segnale di tensione in una corrente, una frequenza o un tempo. Tutte grandezze che risultano, rispetto alla tensione, meno influenzabili dal rumore e.m..



a: Trasduttore
b: Circuito di condizionamento

fig. 24

La figura 24 illustra la struttura di collegamento che impiega la tecnica di conversione V/I e I/V. Il convertitore V/I converte i segnali da tensione a corrente e li invia su una linea bifilare intrecciata e bilanciata. Questi vengono quindi ricevuti da un convertitore I/V che li converte da corrente a tensione. La simmetria della linea bilanciata (non riferita a massa) consente di eliminare i disturbi e.m. in quanto questi, agendo simultaneamente su entrambi i conduttori, vengono eliminati in ricezione grazie ad un amplificatore differenziale.

Questa struttura viene anche indicata *current loop* (ad anello di corrente) in quanto la corrente esce da un terminale del trasmettitore, percorre un conduttore della linea bifilare, scorre nel carico (costituito dalla resistenza d'ingresso del ricevitore) e torna al trasmettitore ripercorrendo l'altro conduttore della linea.

Nei sistemi commerciali current loop i valori tipici di corrente sono compresi tra 4mA e 20mA.

La figura 25 illustra un anello di corrente costituito da un convertitore V/I la cui uscita è una corrente indipendente sia dalla resistenza della linea che da quella del carico del ricevitore (R_L).

Tale corrente vale:

$i = Vi / R1$

Tale corrente scorre poi in R_L producendo, in questa, una c.d.t. che viene amplificata dal differenziale ottenendo, in uscita:

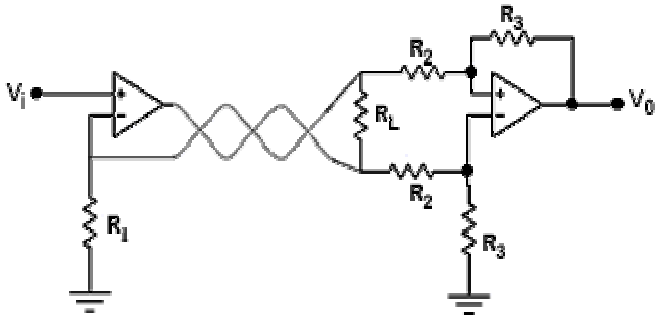


fig. 25

$V_o = i \cdot R_L \cdot R_3/R_2$

5.2 Convertitore V/I con carico riferito a massa

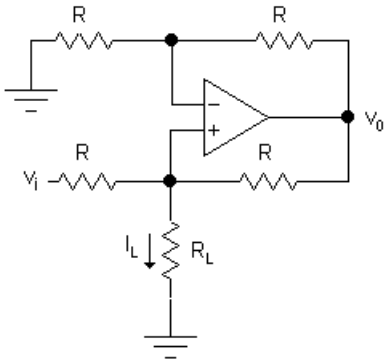


fig. 26

Quando si rende necessario convertire una tensione in una corrente e farla circolare in un carico riferito a massa si può utilizzare il circuito riportato in figura 26.

Mostriamo ora che la corrente che circola in R_L non dipende dal valore di R_L ma solo dalla V_i e da R. Indichiamo con R_p il parallelo tra R ed R_L. Determiniamo le tensioni sui morsetti (+) e (-) dell'A.O. ed eguagliamo tali tensioni.

$$V_- = \frac{V_0}{2}$$

Per la tensione sul morsetto (+) applichiamo il principio della sovrapposizione degli effetti:

$$V_+ = \frac{V_0 R_p}{R_p + R} + \frac{V_i R_p}{R_p + R}$$

Eguagliando i due potenziali si trova:

$$\frac{V_0 R_p}{R_p + R} + \frac{V_i R_p}{R_p + R} = \frac{V_0}{2}$$

$$\frac{V_0 R_p}{R_p + R} - \frac{V_0}{2} = -\frac{V_i R_p}{R_p + R}$$

$$V_0 \left(\frac{R_p}{R_p + R} - \frac{1}{2}\right) = -\frac{V_i R_p}{R_p + R}$$

$$V_0 \left(\frac{2R_p - (R_p + R)}{2(R_p + R)}\right) = -\frac{V_i R_p}{R_p + R}$$

$$V_0 \left(\frac{R_p - R}{2(R_p + R)}\right) = -\frac{V_i R_p}{R_p + R}$$

$$V_0 = -\frac{V_i R_p}{R_p + R} \frac{2(R_p + R)}{R_p - R}$$

$$V_0 = -\frac{2V_i R_p}{R_p - R}$$

E finalmente possiamo scrivere l'espressione per I_L:

$$(21) \quad I_L = \frac{V_+}{R_L} = \frac{V_0}{2R_L} = -\frac{2V_i R_p}{R_p - R}\frac{1}{2R_L} = \frac{V_i}{R}$$

dove si è sostituita l'espressione di R_P.

La (21), come già anticipato, non dipende da R_L ed è direttamente proporzionale a V_i.

I limiti di impiego di questa soluzione richiedono che la tensione d'uscita si mantenga al di sotto del valore di saturazione. Pertanto occorrerà imporre che:

$$V_0 = \frac{V_i 2R_L}{R} < V_{OH}$$

ovvero:

$$V_i < V_{OH}\frac{R}{2R_L}$$

5.3 Convertitore I/V con offset

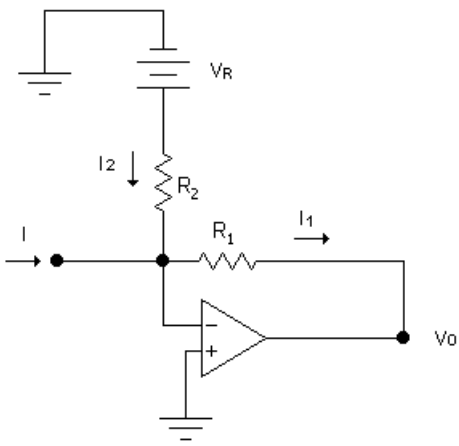


fig. 27

Per ottenere la conversione corrente-tensione in modo che non vi sia dipendenza dal carico e dalla non idealità della sorgente si ricorre al semplice circuito di figura 27. Con esso è anche possibile inserire un offset diverso da zero. Vediamo l'analisi.

Scriviamo il principio di Kirchhoff al nodo (-):

$$I + I_2 = I_1$$

sostituendo, poi, le espressioni per I_2 ed I_1 in base alla legge di Ohm si ottiene:

$$I = -\frac{V_0}{R_1} - \frac{V_R}{R_2}$$

Da cui:

$$V_0 = -IR_1 - \frac{V_R R_1}{R_2}$$

Affinché il funzionamento rimanga lineare è necessario che:

$$V_0 < V_{OH}$$

e quindi:

$$\left| -IR_1 - \frac{V_R R_1}{R_2} \right| < V_{OH}$$