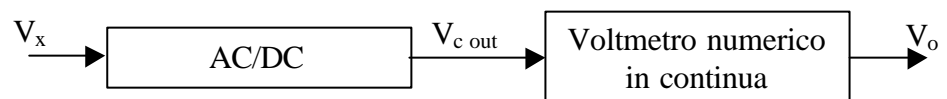


Le impedenze  $Z_1$  e  $Z_2$  abbassano la corrente  $I_L$  ed il contributo di modo comune in ingresso allo strumento è minimizzato. Il morsetto di guardia  $G$  può essere connesso al punto C attraverso una resistenza di valore  $R_g$  che chiude, attraverso  $Z_2$ , una nuova maglia nella quale circola una aliquota di  $I_L$ . In questo modo la  $I_L$  viene ulteriormente ridotta giacché le resistenze sono scelte in modo da rendere il percorso  $R_L$ - $Z_1$ - $Z_2$  ad impedenza maggiore di quello costituito dal percorso  $R_g$ - $Z_2$ .

### Voltmetri numerici in alternata

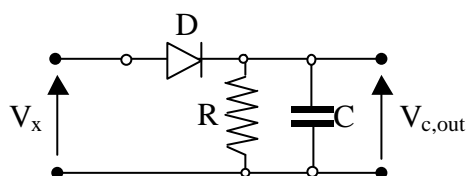
Per realizzare un voltmetro numerico in alternata si adottano, generalmente, opportuni blocchi di preconditionamento che, posti a monte di un voltmetro numerico in continua, estraggono una componente continua significativa dalla tensione AC. Essi si diversificano per il tipo di informazione desiderata ( $V_p$ ,  $V_{pp}$ ,  $V_{medio}$ , ...).



- figura 5.23 -

### Misura del picco di un segnale sinusoidale

Un modello circuitale molto usato per misurare il valore di picco  $V_p$  di segnali sinusoidali, è riportato in figura 5.24.



- figura 5.24 -

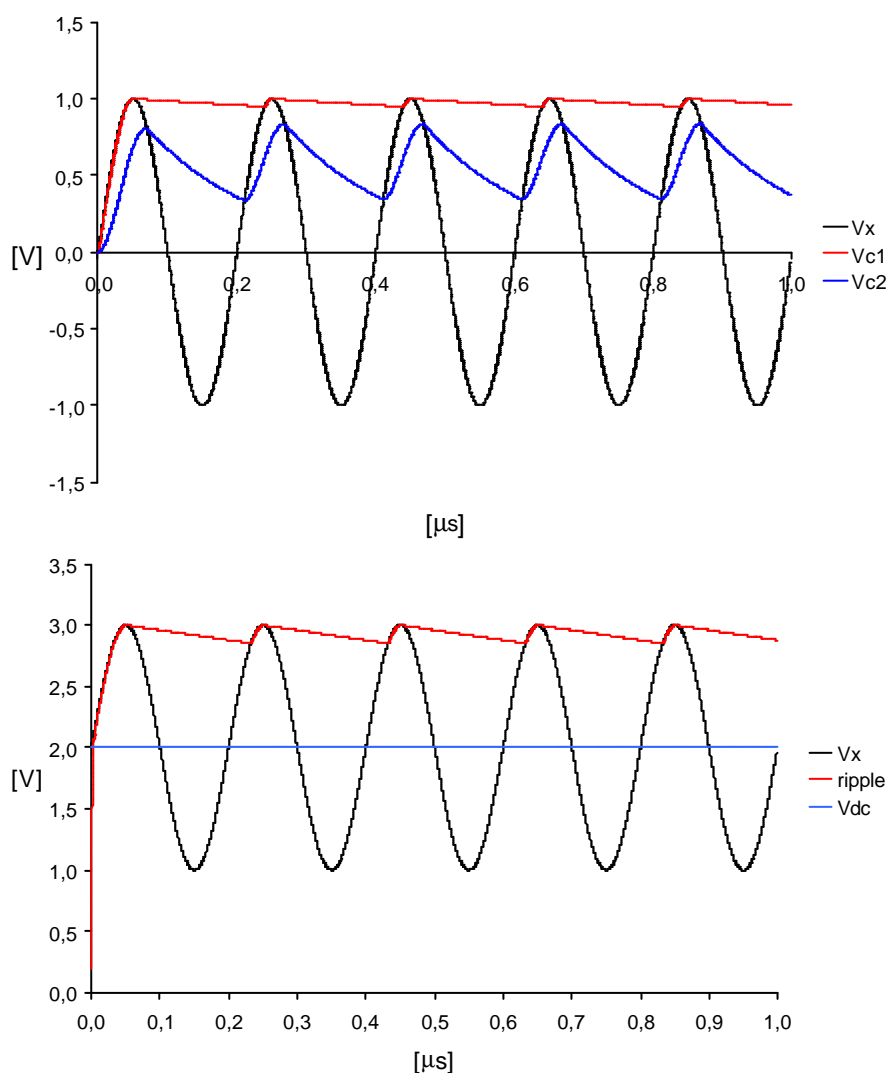
A regime, per  $V_x > V_{c,out}$  il condensatore si carica con una costante di tempo pari ad  $(r_{on} || R)C$   $r_{on}C$ , mentre per  $V_x < V_{c,out}$  il condensatore si scarica con costante di tempo pari ad  $(r_{OFF} || R)C$   $RC$ , dove  $r_{on}$  ed  $r_{OFF}$  sono rispettivamente la resistenza

diretta ed inversa del diodo, e  $C$  è la capacità del condensatore. Il generico andamento nel tempo della  $V_{c,out}$  è riportato dal diagramma  $V_{c2}$  di figura 5.25a.

Per minimizzare l'ondulazione è sufficiente scegliere una resistenza  $R$  di valore elevato in modo da diminuire la velocità di scarica del condensatore: in ipotesi di diodo ideale,  $r_{on}$  nulla ed  $r_{OFF}$  infinita, l'andamento è rappresentato dal diagramma  $V_{c1}$  di figura 5.25a.

Il caso ideale è caratterizzato dall'assenza della fase di scarica del condensatore con conseguente assenza dell'ondulazione. In tal caso la tensione ai capi del condensatore coincide con la tensione di picco del segnale. Il circuito di riferimento è rappresentato in figura 5.27.

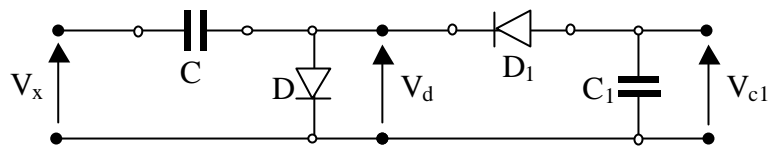
Questa soluzione consente la cosiddetta *misurazione di tensione di picco con accoppiamento in DC*, evidenziando il fatto che al segnale sinusoidale può o meno essere sovrapposta una tensione continua (figura 5.25b).



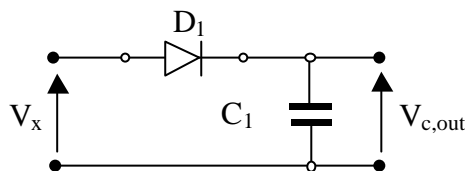
- figura 5.25 a),b) -

### Misura picco picco di un segnale sinusoidale

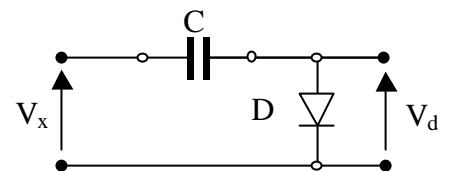
Una soluzione circuitale molto usata per le misure del valore picco picco è mostrata in figura 5.26 e può essere vista come composizione dei due circuiti fondamentali riportati nelle figure 5.27 e 5.28.



- figura 5.26 -



- figura 5.27 -



- figura 5.28 -

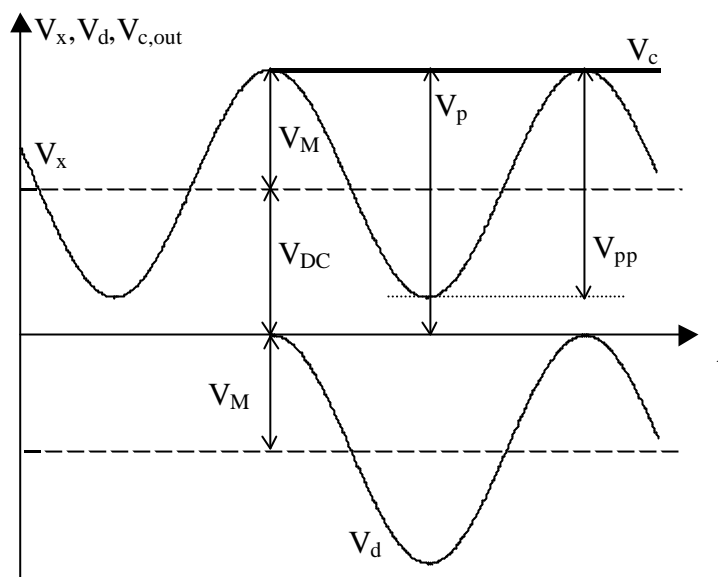
Il circuito di figura 5.27, come già descritto, è generalmente impiegato per la rilevazione del valore di picco. Il circuito di figura 5.28, invece, esibisce in uscita un segnale  $V_d$  che è pari al segnale  $V_x$  traslato verso il basso della quantità  $V_p$  ed è, quindi, sempre non positivo. Si osservi che il diodo  $D_1$  di figura 5.26 è montato in polarità inversa rispetto a quello di figura 5.27 poiché il segnale  $V_d$ , come già detto, è negativo. In questo modo  $D_1$ , supposto ideale, è sempre in conduzione e consente la carica di  $C_1$  al valore minimo di  $V_d$ .

Le loro risposte a regime sono riportate in figura 5.29, e valgono rispettivamente:

$$V_{c,out} = V_M + V_{DC} \quad (5.28)$$

$$= V_x - V_{c,out} \quad (5.29)$$

L'uscita  $V_{c1}$ , che per le costanti di tempo in gioco è una tensione continua, viene infine posta in ingresso ad un voltmetro numerico ad integrazione, per la misura del valore medio, e quindi, con il segno invertito, del valore di picco della sola componente alternata.



- figura 5.29 -

I voltmetri di picco e di picco picco hanno, generalmente, la scala tarata in valore efficace; in ipotesi di segnale sinusoidale, è possibile ricavare il valore di picco mediante la nota relazione:

$$V_p = \sqrt{2} V_{eff} \quad (5.30)$$

Questa relazione è valida solo per segnali sinusoidali: per altre classi di segnali, quindi, non è possibile ricavare il valore di picco dall'informazione fornita dallo strumento.

### Voltmetri a valor medio

I voltmetri a valore medio sono voltmetri in alternata che forniscono il valore medio convenzionale di una forma d'onda a valore medio nullo. Essi sono costituiti da un blocco di condizionamento che effettua opportune trasformazioni del segnale di ingresso, e da un voltmetro in continua che ne misura il valore medio.

Il valore medio convenzionale è definito come:

$$v_{mc} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt \quad (5.31)$$

Per un segnale sinusoidale vale la relazione:

$$v_{mc} = \frac{2}{p} V_p \quad (5.32)$$

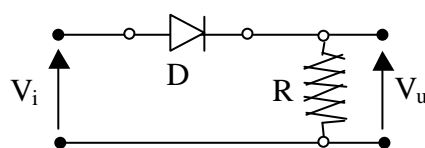
Il valore assoluto del segnale in ingresso è realizzato dal blocco di condizionamento mediante il raddrizzamento definito *a singola semionda*, che restituisce valori nulli in corrispondenza di valori negativi del segnale.

Il raddrizzamento è, invece, definito *a doppia semionda* se l'uscita del blocco di condizionamento restituisce valori simmetrici rispetto all'asse dei tempi in corrispondenza dei semiperiodi in cui il segnale sinusoidale in ingresso assume valori negativi (viene effettuata l'operazione di modulo).

In entrambi i casi il raddrizzamento restituisce valori positivi in corrispondenza dei semiperiodi in cui il segnale è positivo.

Essendo le aree positive e negative del segnale uguali in valore assoluto il valore medio può essere ottenuto dalla semplice semionda, valutando un semiperiodo (singola semionda) oppure, in maniera equivalente, esaminando un intero periodo in cui sono presenti la componente positiva del segnale e la semionda raddrizzata (doppia semionda).

Una soluzione circuitale molto usata per il raddrizzamento a singola semionda è riportata in figura 5.30.

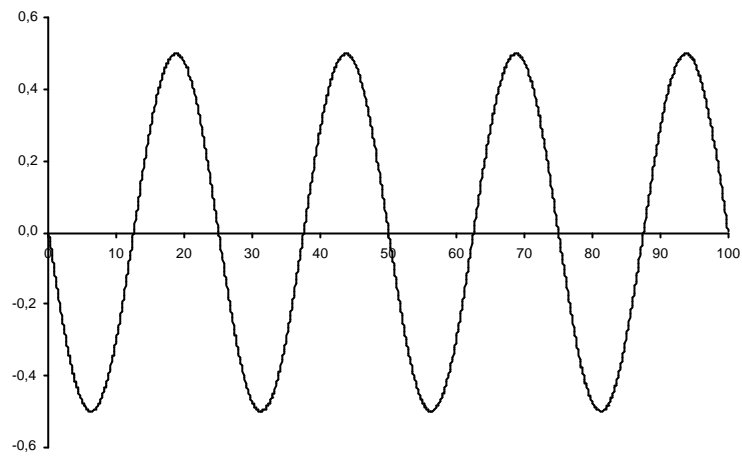


- figura 5.30 -

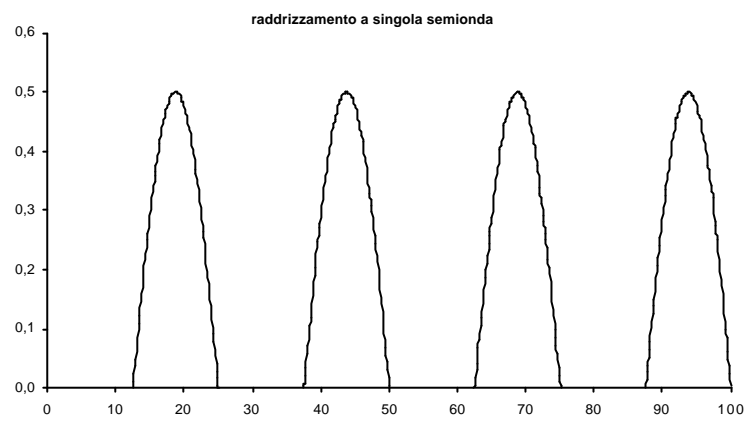
In ipotesi di idealità del diodo  $D$ , l'uscita  $V_u$  è pari a  $V_i$  per  $V_i > 0$ , altrimenti  $V_u$  è nulla poiché non circola corrente in  $R$ . Il diagramma che riporta l'andamento nel tempo dell'uscita  $V_u$  è riportato in figura 5.32 e rappresenta la componente positiva del segnale  $V_i$  in figura 5.31.

L'uscita  $V_u$  va poi in ingresso al voltmetro il cui periodo di integrazione deve essere accordato con quello del segnale  $V_i$ .

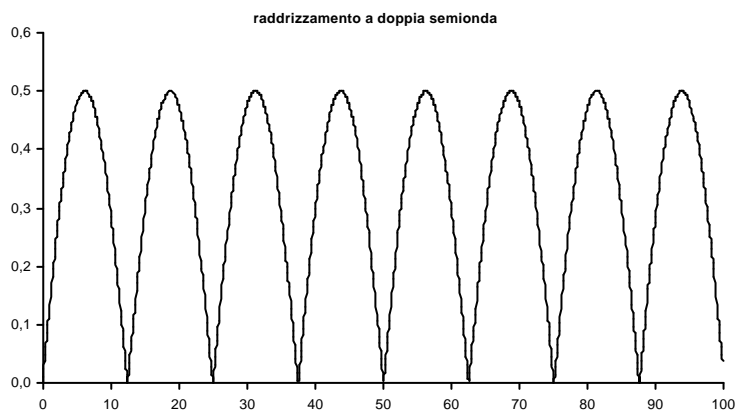
Il risultato, anche in questo caso, è fornito in termini di valore efficace. Il valore medio viene recuperato mediante il fattore di forma che, per un segnale sinusoidale, come è noto, vale 1,11.



- figura 5.31 -



- figura 5.32 -

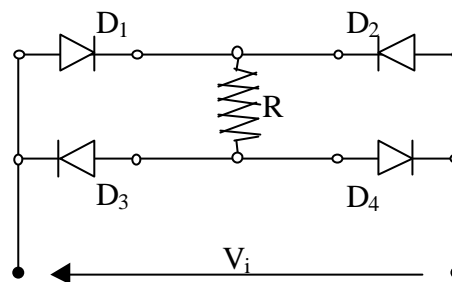


- figura 5.33 -

Il raddrizzamento a doppia semionda (figura 5.33) può essere realizzato attraverso un circuito costituito da quattro diodi, opportunamente connessi, detto a ponte di Graëtz (figura 5.34).

Quando il segnale  $V_i$ , applicato in ingresso al circuito, è positivo il percorso della corrente è  $D_1-R-D_4$  perché i diodi considerati sono gli unici in conduzione. Quando  $V_i$  è negativo entrano in conduzione gli altri due diodi, i primi due si interdicono, ed il percorso della corrente è  $D_2-R-D_3$ .

Detta  $R$  la resistenza di ingresso dello strumento è importante notare che la corrente che la attraversa ha sempre lo stesso verso e non cambia la polarità della tensione vista dal voltmetro.



- figura 5.34-

### Voltmetri a vero valore efficace

Si è già detto che il **valore efficace** è il livello energetico di una grandezza e fornisce un'idea degli effetti termici ad essa associati.

Per le grandezze che variano con legge sinusoidale nel tempo, è possibile ricavare il valore efficace dalla misura, ad esempio, del valore di picco e applicando la nota relazione:

$$V_{eff} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (5.33)$$

dove  $V_p$  è il valore di picco del segnale.

Per le grandezze per cui non vale tale relazione, è necessario utilizzare strumenti che misurino direttamente il valore efficace.

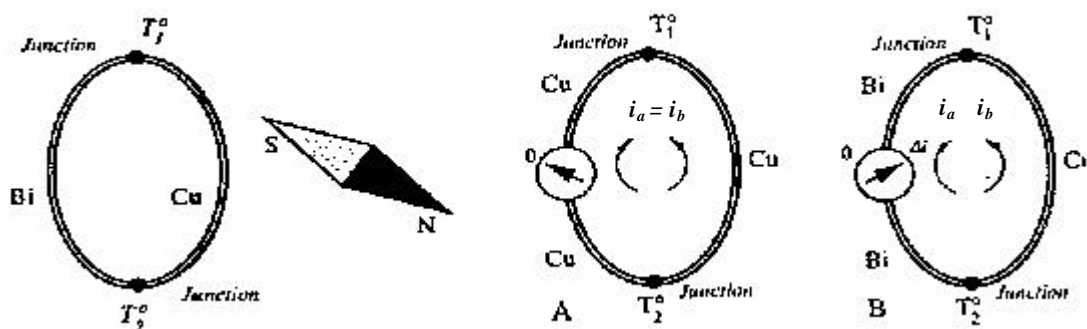
Sono disponibili in commercio strumenti che fanno uso di diverse soluzioni tra cui quella più diffusa utilizza particolari trasduttori, le termocoppie, il cui principio di funzionamento si basa sull'effetto termoelettrico (Seebeck, 1826 e Peltier, 1834).

**Effetto Seebeck** - un conduttore, con le estremità poste rispettivamente a temperatura  $T_1$  e  $T_2$ , con  $T_2 > T_1$ , è sede di un campo elettrico generato dal gradiente termico, che si manifesta con un incremento di tensione secondo la relazione:

$$dV = \alpha dT \quad (5.34)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di Seebeck e dipende dal tipo di metallo. La seguente tabella riporta il coefficiente di Seebeck ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) per alcuni metalli (o leghe) di uso più comune.

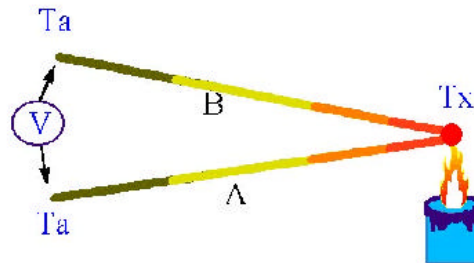
Tipo	Metalli (lega)	Coeff. Seebeck ( $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ )
J	Fe-Con	50
K	Ni-Cr	40
T	Cu-Con	38
S	Pt/Rh-Pt	10
E	Ni/Cr-Con	59
N	Ni/Cr/Si-Ni/Sj	39



- figura 5.35 -

La **termocoppia** è un circuito elettrico costituito da due conduttori metallici, di differente materiale, saldati alle estremità per formare due giunzioni. In presenza di una differenza di temperatura tra le due giunzioni si genera, per effetto Seebeck, un flusso di cariche elettriche (figura 5.35).

Aperto una delle due giunzioni (figura 5.36), è possibile misurare una forza elettromotrice la cui polarità ed intensità è funzione del tipo di metallo e della temperatura alle giunzioni. Per misurare la tensione ai capi della termocoppia è necessario utilizzare un voltmetro a bassissimo consumo e cioè ad elevata impedenza interna.



- figura 5.36 -

La legge che descrive il fenomeno è:

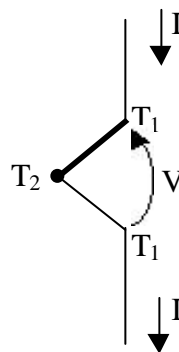
$$V = k_1(T_1 - T_2) + k_2(T_1 - T_2)^2 + \dots \quad (5.35)$$

In condizioni di linearità si trascurano i termini di ordine superiore al primo, e la relazione che lega la differenza di potenziale alla temperatura delle giunzioni  $J_1$  e  $J_2$  diventa:

$$V_{J_1, J_2} = k_1(T_1 - T_2) \quad (5.36)$$

**Effetto Peltier** - è il duale dell'effetto Seebeck: una corrente elettrica di intensità  $I$  che circola in una termocoppia, provoca, per effetto Joule, una variazione di temperatura alle giunzioni.

Con riferimento alla figura 5.37, se le due giunzioni  $J_1$  e  $J_2$  sono inizialmente alla stessa temperatura,  $T_1 = T_2$ , il passaggio della corrente  $I$  attraverso la giunzione  $J_2$  ne determina il riscaldamento che la porta a temperatura  $T_2 > T_1$ .



- figura 5.37 -

La potenza termica dissipata alla giunzione  $J_2$  vale:

$$P_{d_2} = R_{J_2} \cdot I^2 \quad (5.35)$$

dove  $R_{J_2}$  è la resistenza elettrica offerta dalla giunzione  $J_2$  al passaggio della corrente  $I$ .

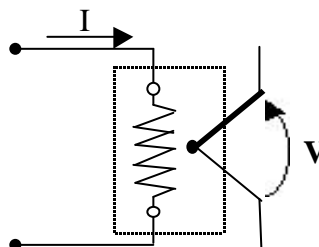
In regime di equilibrio termico, la potenza termica dissipata è pari a quella trasmessa alla giunzione, pertanto:

$$P_t = P_{d_2} \Rightarrow K^* (T_2 - T_1) = R_{J_2} I^2 \Rightarrow V_{J_1 J_2} = \frac{R_{J_2}}{K} \cdot I^2 \quad (5.36)$$

Da cui si evince che la tensione ai capi della termocoppia è proporzionale al quadrato del valore efficace della corrente. Ciò motiva la scelta delle termocoppie per le misure di valore efficace.

L'elevata sensibilità riscontrabile conferisce alla misura una buona qualità, ma questo tipo di soluzione, detta *a riscaldamento diretto* perché la corrente fluisce direttamente nella termocoppia, non consente una separazione elettrica tra il circuito di misura e quello sotto osservazione, generando indesiderati effetti di sovraccarico: valori di corrente relativamente elevati possono danneggiare la termocoppia.

Si preferisce, pertanto, utilizzare una metodologia diversa, detta *a riscaldamento indiretto*, in cui una corrente  $I$ , proporzionale alla grandezza di cui si desidera misurare il valore efficace, è fatta circolare in una resistenza di valore noto, il cui riscaldamento per effetto Joule determina la variazione di temperatura della giunzione della termocoppia, e quindi, la differenza di potenziale ai suoi capi, come mostrato in figura 5.38.

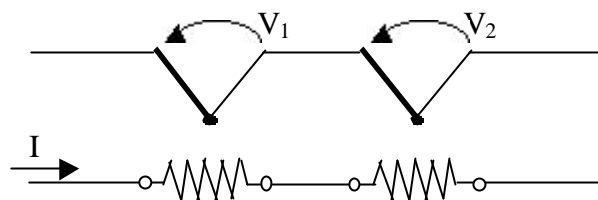


- figura 5.38 -

È evidente che i due circuiti sono isolati tra loro elettricamente ma non termicamente: la metodologia costruttiva prevede che si interponga tra la

resistenza e la giunzione un materiale che sia al contempo un buon isolante elettrico e un buon conduttore termico, come, ad esempio, il biossido di Titanio.

È possibile aumentare la sensibilità usando più termocoppie come in figura 5.39.

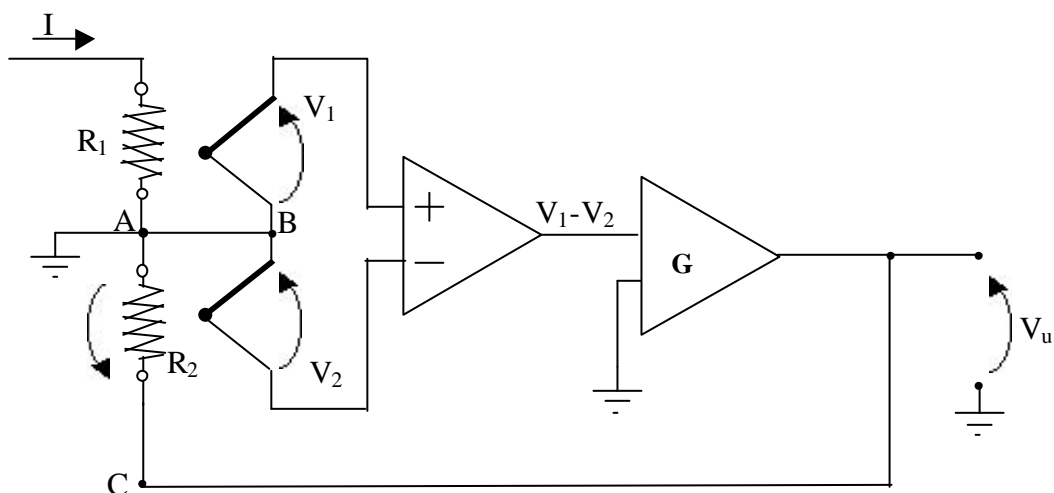


- figura 5.39 -

Le principali problematiche che si possono presentare sono:

1. piccola sovraccaricabilità – per evitare la rottura del trasduttore, l'intensità della corrente non può essere troppo elevata;
2. linearità – esiste un limite alla validità del legame lineare (5.34) tra la variazione di temperatura e la tensione rilevata;
3. riferimenti termici costanti – l'ipotesi di  $T_1$  costante è riferita alla temperatura ambiente.

La soluzione circuitale di figura 5.40 risolve quest'ultimo problema.



- figura 5.40 -

Supponendo che le due termocoppie siano perfettamente uguali e che inizialmente siano nulle le tensioni alle giunzioni di entrambe le termocoppie,  $V_1=0$  perché  $R_1$  non si è ancora riscaldata e  $V_2=0$  perché  $V_u=0$ .

Durante un breve transitorio il riscaldamento di  $R_1$  determina un aumento di  $V_1$  e, quindi, uno squilibrio ai morsetti di ingresso dell'amplificatore differenziale; l'amplificatore a guadagno  $G$  comincia dunque ad erogare una corrente che, riscaldando la seconda termocoppia, genera una  $V_2$  che tende a compensare lo squilibrio. L'uguaglianza tra le tensioni  $V_1$  e  $V_2$  viene raggiunta con una precisione tanto maggiore quanto più elevato è il guadagno dell'amplificatore.

La tensione  $V_u$ , che per la topologia del circuito è pari alla caduta di tensione  $V_{CA}$  sulla resistenza  $R_2$ , è una tensione continua perché, a regime, tali sono  $V_1$  e  $V_2$  e perché l'amplificatore differenziale è progettato per avere una banda passante per la sola componente continua.

L'uguaglianza delle resistenze e delle potenze trasmesse consente di considerare che:

$$P_{t_1} = P_{t_2} \Leftrightarrow \frac{V_{eff}^2}{R_1} = \frac{V_u^2}{R_2} \Leftrightarrow V_u = V_{eff} \quad (5.39)$$

La misura della tensione in uscita al circuito, affidata ad un voltmetro ad integrazione, è dunque una misura di valore efficace, qualunque sia l'andamento di  $I$ .

Le cause di incertezza dipendenti dalla temperatura ambiente vengono eliminate perché agiscono su entrambe le termocoppie, elidendosi.

Permangono tuttavia altre cause di incertezza, tra le quali:

- il guadagno  $G$  è finito,
- le termocoppie non sono perfettamente uguali,
- la seconda termocoppia, a differenza della prima, lavora sempre in continua, mentre la prima lavora in alternata; ciò significa che, pur essendo perfettamente uguali, il comportamento delle due termocoppie può essere differente al variare della frequenza del segnale in ingresso (occorre pertanto lavorare in banda).

### Specifiche dei voltmetri numerici in AC

Ulteriori specifiche riportate dal costruttore per i voltmetri numerici in AC sono:

1. **Banda** – intervallo di frequenza entro cui l'errore è contenuto nei limiti specificati. Sovente quest'ultimi sono superati mediante l'uso di sonde.

2. **Prodotto della portata per la larghezza di banda** – questo prodotto indica la capacità di rispondere rapidamente alle variazioni della tensioni in ingresso ed è limitato dallo slew rate degli amplificatori operazionali. Quando questa specifica non viene soddisfatta gli amplificatori non sono in grado di seguire la forma d'onda in ingresso, che pertanto viene distorta.
3. **Distorsione e contenuto di armoniche** – la tensione periodica applicata all'ingresso può evidenziare distorsione, ovvero può discostarsi dalla forma d'onda sinusoidale; la presenza di armoniche costituenti il segnale è fonte di errore nella misura, ed il suo contributo è tanto maggiore quanto maggiori sono l'ampiezza e fase delle armoniche.

Ad esempio, quando si utilizza un voltmetro a vero valore efficace la misura vale:

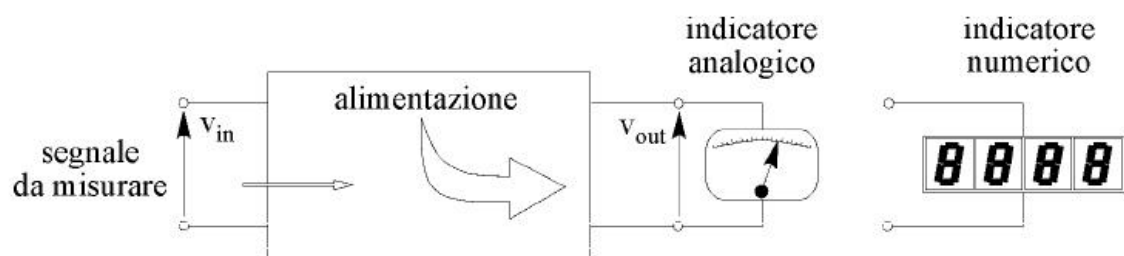
$$V_{eff} = \sqrt{V_{1eff}^2 + V_{2eff}^2 + V_{3eff}^2 + \dots} \quad (5.40)$$

con  $V_{1eff}$ ,  $V_{2eff}$ ... valori efficaci delle singole armoniche. Il valore misurato rappresenta, pertanto, il valore efficace vero della forma d'onda complessiva, ed è maggiore del valore efficace della fondamentale.

### Multimetri digitali (DMM, *Digital Multi Meter*)

#### L'alimentazione propria

La strumentazione elettronica, in generale, prevede il ricorso a una alimentazione propria (rete o batteria) indipendente dalla grandezza da misurare (figura 5.41). Questa particolarità consente di non caricare il circuito sotto prova, evitando di sottrargli l'energia necessaria per la presentazione o l'utilizzo del risultato di misura.



- figura 5.41 -