

# Appunti di Misure Elettriche

## Voltmetri analogici con op-amp

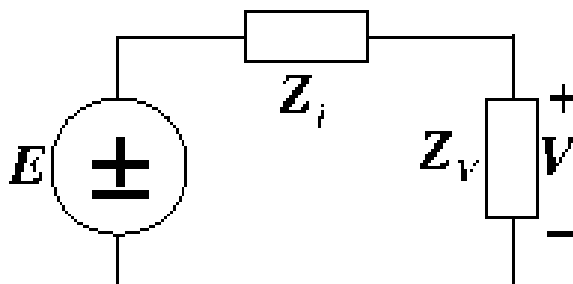
Generalità sui voltmetri elettronici analogici .....	1
Voltmetri con amplificatori operazionali .....	2
<i>Millivoltmetro in corrente continua</i> .....	2
<i>Rivelatore di picco</i> .....	3
<i>Voltmetri in corrente alternata</i> .....	4

### GENERALITÀ SUI VOLTMETRI ELETTRONICI ANALOGICI

I **voltmetri elettronici analogici** sono generalmente ottenuti come combinazione di uno strumento analogico passivo (ad esempio uno strumento magnetoelettrico, brevemente PMMC) e di un amplificatore costituito da uno o più stadi. Essi, pertanto, presentano una scala graduata compatibile con la *classe di precisione*<sup>1</sup> dello strumenti passivo impiegato.

Negli strumenti di maggior pregio, è previsto uno *specchietto* sotto l'indice della scala graduata, al fine di eliminare l'**errore di parallasse**: infatti, dato che l'indice non scorre sullo stesso piano su cui si trova la scala graduata, la lettura corretta si ottiene solo quando, guardando la scala, l'indice e la sua immagine sullo specchio risultano allineati.

Uno dei requisiti di maggiore interesse per un voltmetro riguarda la sua **impedenza di ingresso**:



Schematizzazione del tutto generale di una **misura di tensione**: il generatore  $E$  rappresenta la tensione da misurare, l'impedenza  $Z_i$  rappresenta l'impedenza interna del circuito sotto misura (costituito appunto da  $Z_i$  ed  $E$ ), l'impedenza  $Z_V$  rappresenta il voltmetro che viene inserito nel circuito sotto misura

<sup>1</sup> Ricordiamo che la **classe di precisione** di uno strumento di misura è definita come l'errore massimo percentuale relativo all'indicazione di fondo scala. E' una specifica dello strumento che il costruttore fornisce per quantificare l'accuratezza dello strumento.

Quanto maggiore è questa impedenza (indicata in figura con  $Z_V$ ), tanto minore è la corrente assorbita dallo strumento stesso e quindi tanto minore è il **consumo**, ossia l'errore dovuto all'*effetto di carico* dello strumento sul circuito sotto misura: con riferimento alla figura, quanto maggiore è  $Z_V$ , tanto più la tensione  $V$  si avvicina al valore  $E$  da misurare.

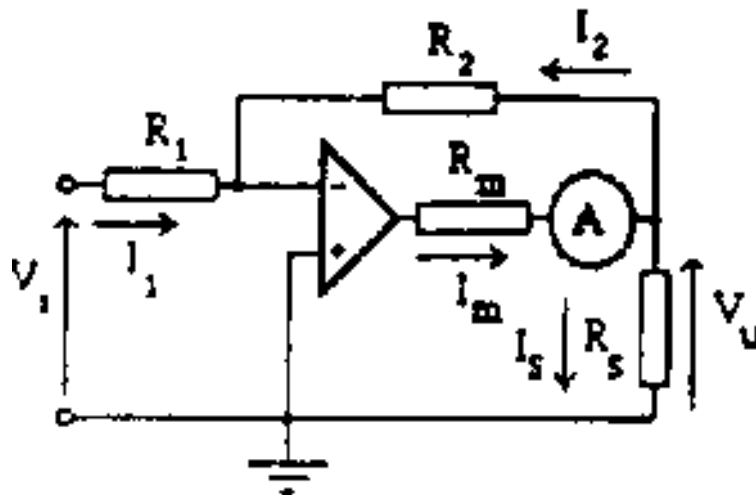
L'impedenza di ingresso, oltre ad essere elevata, deve anche essere indipendente dalla portata. Entrambi questi requisiti sono difficili da ottenere con i *voltmetri analogici passivi a bobina mobile*: infatti, per tali voltmetri la resistenza di ingresso non risulta mai elevata e soprattutto è funzione della portata di lavoro. La presenza di un apparato elettronico (tipicamente un amplificatore) insieme allo strumento elettromeccanico classico ha proprio la funzione di ovviare a tale inconveniente.

## VOLTMETRI CON AMPLIFICATORI OPERAZIONALI

Dato che un **amplificatore operazionale** presenta una resistenza di uscita molto bassa ed una resistenza di ingresso molto elevata e dato che il suo guadagno di tensione, in presenza di un *anello di reazione negativa*, dipende solo da un rapporto di resistenze, il suo uso risulta particolarmente adatto nei *millivoltmetri in corrente continua* e nei *rivelatori di picco*.

### Millivoltmetro in corrente continua

Cominciamo a considerare un **millivoltmetro in corrente continua**:



Possiamo sfruttare il concetto di **cortocircuito virtuale** tra i morsetti di ingresso dell'operazionale, al fine di ricavare il legame tra la corrente  $I_m$  che scorre nell'amperometro e la tensione di ingresso  $V_i$ .

In primo luogo, in base ai versi delle correnti segnati in figura, possiamo applicare la LKC e scrivere che  $I_m = I_2 + I_S$ ; la tensione ai capi di  $R_2$  è evidentemente pari a  $V_U$ , per cui la corrispondente corrente è  $I_2 = V_U / R_2$ ; analogamente, la stessa tensione  $V_U$  si trova ai capi di  $R_S$ , per cui  $I_S = V_U / R_S$ . Scriviamo dunque che

$$I_m = I_2 + I_S = V_U \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_S} \right)$$

D'altra parte, a prescindere dalla presenza del ramo con l'amperometro, la tensione  $V_U$  non è altro che la tensione di uscita di un operazionale in configurazione invertente, per cui  $V_U = -\frac{R_2}{R_1} V_i$  e quindi

$$I_m = -\frac{R_2}{R_1} V_i \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_s} \right)$$

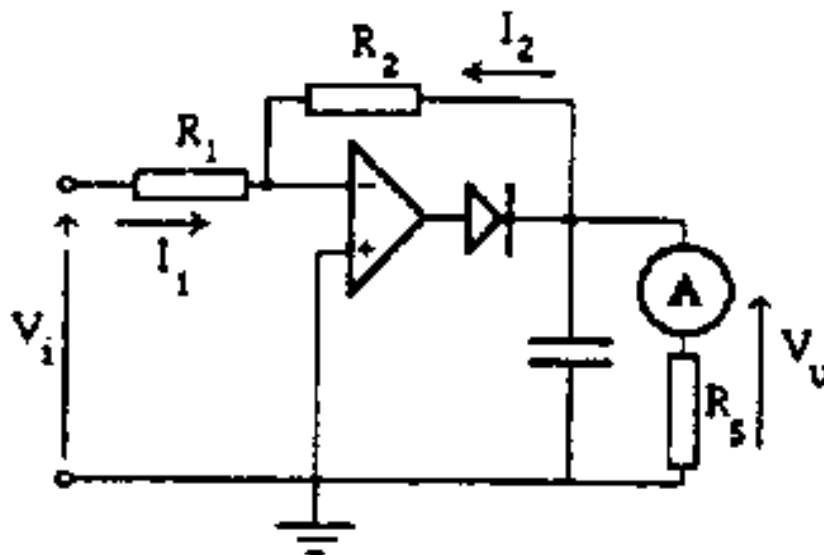
In base a questa espressione, se scegliamo le resistenze  $R_1$  ed  $R_2$  uguali (per cui  $R_2/R_1=1$ ) e molto più grandi di  $R_s$ , otteniamo che

$$I_m \cong -\frac{V_i}{R_s}$$

Questa espressione ci dice sia che l'indicazione dell'amperometro è proporzionale alla tensione in ingresso sia anche che, variando  $R_s$ , possiamo variare la portata del millivoltmetro. La variazione di  $R_s$  può essere ottenuta, ad esempio, predisponendo più resistori commutabili in parallelo.

### Rivelatore di picco

L'altra applicazione cui abbiamo fatto prima riferimento è un **rivelatore di picco** (o *voltmetro di picco*) basato su un amplificatore operazionale. La configurazione circuitale è la seguente:



Nella parte sinistra del circuito, notiamo sostanzialmente il classico *op-amp in configurazione invertente*, con in più un diodo sul terminale di uscita; il condensatore in parallelo al ramo con  $R_s$  consente invece di realizzare la classica **cellula di mantenimento**.

La presenza del diodo nell'anello di reazione fa sì che si abbia circolazione di corrente solo quando la tensione in ingresso è maggiore di quella in uscita (ai capi del condensatore): quando questo accade, il diodo è praticamente un cortocircuito, per cui l'amplificatore funziona in modo classico (cioè da invertitore con guadagno  $-R_2/R_1$ ); in tal modo, il condensatore si carica al massimo valore della tensione di uscita, legata al massimo valore della tensione di ingresso dalla relazione

$$V_{U,\max} = -\frac{R_2}{R_1} V_{i,\max}$$

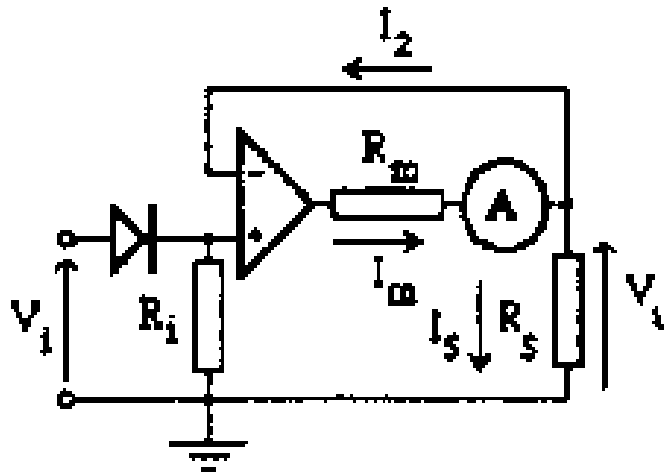
Quando la tensione si riprende a scendere, il diodo si interdice ed il condensatore rimane carico al valore  $V_{U,\max}$ .

Generalmente, il rapporto di resistenze  $R_2/R_1$  viene fissato a 0.707, in modo che lo strumento misuri direttamente il valore efficace della tensione in ingresso.

### Voltmetri in corrente alternata

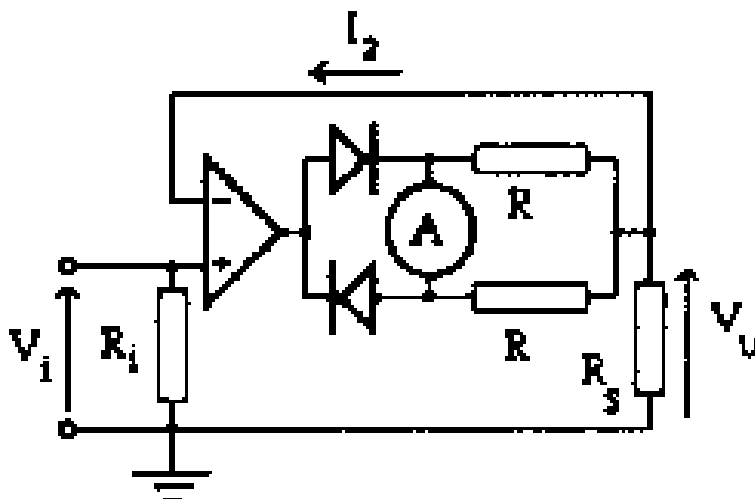
I **voltmetri elettronici in corrente alternata** sono sostanzialmente uguali a quelli in corrente continua, salvo la presenza di uno stadio di raddrizzamento. Questo può trovarsi sia all'ingresso sia all'uscita dell'amplificatore.

Una configurazione in cui il raddrizzatore precede l'amplificatore è la seguente:



Questo circuito comprende perciò un amplificatore in corrente continua, dato che la tensione in ingresso è raddrizzata.

Se invece lo stadio raddrizzatore segue l'amplificatore (per cui quest'ultimo funziona in regime alternato), la configurazione diventa la seguente:



In questo caso, l'amplificatore avrà elevato guadagno ad anello aperto e presenterà anche una forte reazione negativa, in modo da ovviare alla non linearità dei diodi raddrizzatori.

Notiamo inoltre che il raddrizzatore posto in uscita è un classico **ponte di Graetz**, che però presenta due resistori al posto di due diodi: il motivo è sempre quello di ovviare alla non linearità dei diodi.

E' bene infine ricordare che i voltmetri in corrente alternata di questo tipo, normalmente tarati in valori efficaci, funzionano perfettamente quando l'ingresso è puramente sinusoidale; se invece non lo è, allora la misura è affetta da un errore la cui entità dipende dal *fattore di forma* del segnale in ingresso, cioè dal rapporto tra il valore di picco ed il valore efficace.

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**  
e-mail: [sandry@iol.it](mailto:sandry@iol.it)  
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>  
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>