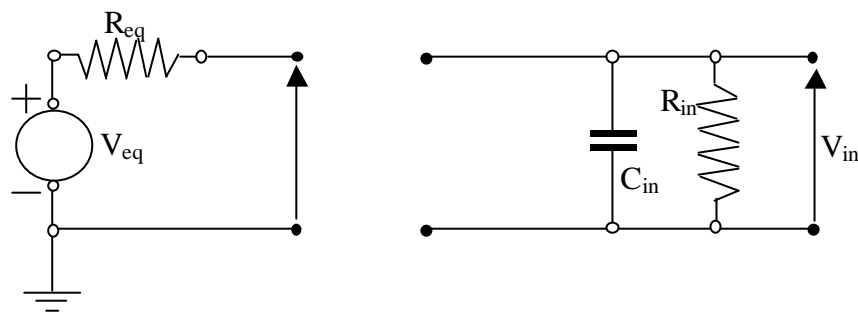


LE SONDE

L'impedenza di ingresso, Z_{in} , di un oscilloscopio è modellabile dal parallelo tra una resistenza R_{in} e una capacità C_{in} , i cui valori tipici sono rispettivamente $1M\Omega$ e $10\div 20pF$. Il loro valore effettivo è fornito dal costruttore e può variare con la casa costruttrice e il modello. A causa dell'effetto capacitivo, l'impedenza complessiva Z_{in} dell'oscilloscopio decade al crescere della frequenza del segnale applicato, secondo la seguente relazione:

$$Z_{in} = \frac{R_{in} \frac{1}{j\omega C_{in}}}{R_{in} + \frac{1}{j\omega C_{in}}} = \frac{R_{in}}{1 + j\omega R_{in} C_{in}} = \frac{R_{in}}{1 + j\omega \tau_{in}} \quad (6.9)$$

Dove τ_{in} è la costante di tempo del circuito d'ingresso.



- figura 6.14 -

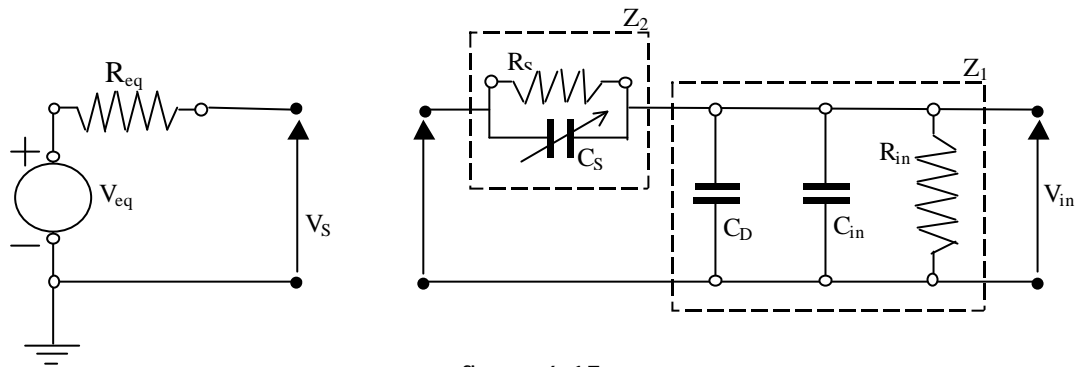
Assumendo, per esempio, $C_{in}=20pF$, l'impedenza corrispondente Z_{Cin} raggiunge il valore di $1M\Omega$ alla frequenza di appena $8kHz$. Se si connettesse all'oscilloscopio una sorgente di segnale, come rappresentato nella figura 6.14 (generatore di segnale V_{eq} con la sua resistenza interna R_{eq}), ne risulterebbe un effetto di carico crescente con la frequenza.

Molti oscilloscopi offrono la possibilità di selezionare un valore della resistenza d'ingresso R_{in} pari a 50Ω . Un valore relativamente basso della resistenza d'ingresso accresce la larghezza di banda dello strumento, infatti aumenta il valore delle frequenze a cui cominciano a diventare rilevanti gli effetti delle impedenze capacitive. Peraltro, determina effetti di carico sul segnale applicato che non sempre sono tollerabili.

Le **sonde** costituiscono un corredo indispensabile dell'oscilloscopio. Il segnale da visualizzare infatti viene, di norma, applicato allo strumento tramite le sonde, realizzate in cavo coassiale e terminale BNC.

Per ovviare agli inconvenienti dell'impedenza d'ingresso limitata, nella pratica si adoperano le sonde attenuatrici compensate, tipicamente 10X (si veda la figura 6.15). Normalmente esse sono costituite da una resistenza R_S di valore $9M\Omega$, la quale, in serie con la resistenza di ingresso R_{in} pari a $1M\Omega$ dell'oscilloscopio, porta l'impedenza complessiva in DC vista dalla sorgente al valore di $10M\Omega$ (oscilloscopio + sonda 10X).

Contemporaneamente però si raggiunge una attenuazione del segnale di 10 volte: $V_{in}=V_S/10$.



- figura 6.15 -

Per contrastare gli effetti della capacità equivalente in ingresso C_{in} dell'oscilloscopio, si dispone nella sonda attenuatrice anche una capacità di compensazione C_S regolabile.

Detta C_D la capacità indotta dai cavi di collegamento, se si rendono uguali le costanti di tempo $R_S C_S = R_{in} (C_{in} + C_D)$ si realizza una perfetta compensazione del comportamento in frequenza. Infatti la funzione di trasferimento della sonda può essere scritta, in funzione delle impedenze, nella forma:

$$W = \frac{V_{in}}{V_S} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{6.10}$$

dove:

$$Z_1 = \frac{R_{in}}{1 + j\omega R_{in} C_{in}} \quad e \quad Z_2 = \frac{R_S}{1 + j\omega R_S C_S} \tag{6.11}$$

In pratica si desidera che l'attenuazione W della sonda risulti costante per tutte le frequenze e pari al suo valore in DC:

$$W_0 = \left. \frac{V_{in}}{V_S} \right|_{DC} = \frac{R_{in}}{R_S + R_{in}}$$

(6.12)

In realtà il comportamento della sonda è funzione della frequenza. Infatti risulta:

$$W(j\omega) = \frac{V_{in}}{V_s} = \frac{R_{in}}{1 + j\omega R_{in} C_{eq}} \cdot \frac{(1 + j\omega R_{in} C_{eq})(1 + j\omega R_s C_s)}{R_s (1 + j\omega R_{in} C_{eq}) + R_{in} (1 + j\omega R_s C_s)} \quad (6.13)$$

dove $C_{eq} = C_D + C_{in}$.

Da tale espressione si osserva che la condizione desiderata ($W(j\omega) = W_0$), detta anche **compensazione**, viene raggiunta quando le due costanti di tempo risultano uguali: $R_s C_s = R_{in} C_{eq}$.

Raggiungere operativamente la compensazione significa variare la capacità C_s della sonda.

Oltre alla situazione di equilibrio sono però possibili due casi:

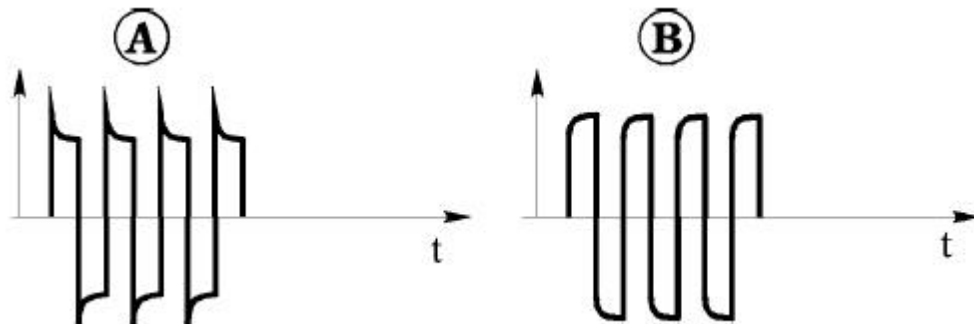
caso A) $R_s C_s > R_{in} C_{eq}$

caso B) $R_s C_s < R_{in} C_{eq}$

Il caso A), detto *sovracompensazione*, corrisponde ad un'accentuazione delle alte frequenze e ad un'azione anticipatrice sulla fase.

Il caso B), detto *sottocompensazione*, corrisponde invece ad un'attenuazione delle alte frequenze e ad un'azione ritardatrice sulla fase.

Il risultato di tali azioni su di una forma d'onda di tipo rettangolare, che l'oscilloscopio stesso è in grado di fornire per la calibrazione, è riportato in figura 6.16.



- figura 6.16 -

Si osserva, infine, che l'impedenza d'ingresso complessiva del sistema costituito dall'oscilloscopio e dalla sonda perfettamente compensata risulta pari a:

$$Z_{osc+sonda} = Z_1 + Z_2 = \frac{R_{in} + R_s}{1 + j\omega t} \quad (6.14)$$

con $t = R_s C_s = R_{in} C_{eq}$.

Ma l'effetto più interessante legato all'uso di sonde compensate 10X, riguarda l'incremento della banda passante.

L'insieme formato dal circuito di misura, cavo di connessione e dal circuito in ingresso dell'oscilloscopio, costituisce un filtro passa-basso, capace di ridurre l'ampiezza di banda del sistema di misura rispetto a quella del solo amplificatore verticale dell'oscilloscopio.

Se è vero che, in condizioni di perfetta compensazione, il trasferimento del segnale da V_s a V_{in} avviene con la semplice attenuazione di dieci volte per tutte le frequenze, è anche vero che, in realtà, si vorrebbe osservare la tensione V_{eq} del generatore di segnale, minimizzando la caduta sulla resistenza interna R_{eq} . Si potrebbe allora considerare la funzione W' che descrive il rapporto fra V_s e V_{eq} :

$$W' = \frac{V_s}{V_{eq}} = \frac{Z_{osc+sonda}}{R_{eq} + Z_{osc+sonda}} = \frac{\frac{R_{in} + R_s}{1 + j\omega t}}{R_{eq} + \frac{R_{in} + R_s}{1 + j\omega t}} = \frac{R_{in} + R_s}{R_{eq} + j\omega t R_{eq} + R_{in} + R_s} \quad (6.15)$$

Se la resistenza interna R_{eq} del generatore di segnale è molto più piccola della somma di R_{in} e R_s (pari a $10M\Omega$), allora si ha, con buona approssimazione, che:

$$W' = \frac{V_s}{V_{eq}} \cong \frac{1}{1 + j\omega t \frac{R_{eq}}{R_{in} + R_s}} \quad (6.16)$$

In tal caso, la costante di tempo risulta: $t \cdot \frac{R_{eq}}{R_1 + R_2}$.

Viceversa, se non si fosse usata la sonda compensata 10X, l'impedenza d'ingresso vista dal generatore equivalente di segnale sarebbe stata solo $Z_{in} = Z_{osc} = Z_1$ e la costante di tempo sarebbe stata, con la stessa approssimazione ($R_{eq} \ll R_s$), pari a $\tau \cdot R_{eq}/R_s$, ossia circa dieci volte più grande.

Ricordando ancora che la frequenza di taglio risulta l'inverso della costante di tempo, si deduce che la sonda compensata 10X presenta una frequenza di taglio a 3dB circa dieci volte più grande rispetto al caso di accoppiamento diretto del

segnale.

Quanto detto vale, naturalmente, indipendentemente dalla banda passante dei circuiti elettronici (ad esempio l'amplificatore) presenti subito dopo, in ingresso all'oscilloscopio.